



MBING Vorlesung Modul KW 13

Grundlagen Windlasten

Bergische Universität
Wuppertal

Prof. Dr.-Ing. Michael Hortmanns

Mitglied des Normenausschusses UA Wind (DIN 1055 Teil 4, DIN EN 1991-1-4)

PT – Mitglied: Eurocode EN 1991-1-4 "Wind Actions on Structures"

Mitglied der BAST Arbeitsgruppe „Schwingungsanfällige Zugglieder im Brückenbau“

Mitglied DIBt-Ausschuss „Windenergieanlagen“



Solingen • Bremen



Einführung

Windlast allgemein: $W = q \cdot c \cdot A$ in N

mit:

- q = Geschwindigkeitsdruck (Staudruck), N/m²**
- c = aerodynamischer Beiwert
(Druck oder Kraftbeiwert)**
- A = Bezugsfläche in m²**

oder

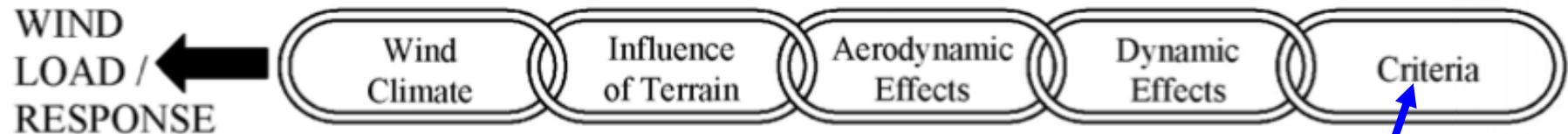
Windlast allgemein: $w = q \cdot c \cdot b$ in N/m

b = Bezugsmaß in m



Wind-Load-Chain

THE ALAN G. DAVENPORT WIND LOADING CHAIN



$$W = q \cdot c \cdot A \cdot \varphi_d$$

Design-Criteria for considering uncertainties, usually by applying Safety-Factors



Bergische Universität
Wuppertal

Grundlagen Windlasten

Grundlagen Strömungsmechanik

Stromlinien - Bahnlinien
Stromröhren

Bernoullische-Gleichung
Kontinuitätsgleichung

Grenzschichten – Strömungsablösung

Aerodynamische Beiwerte



Grundlagen Windlasten

Grundlagen Strömungsmechanik

Stromröhren – Bernoulli-Gleichung - Kontinuität

Bergische Universität
Wuppertal

Bernoulli-Gleichung (Energiegleichung)

Energieform

$$\underbrace{\frac{1}{2} \cdot w_2^2}_{\text{kin.E}} + \underbrace{\frac{p_2}{\rho}}_{\text{Arbeit gegen den Druck}} + \underbrace{g \cdot z_2}_{\text{pot.E.}} = \frac{1}{2} \cdot w_1^2 + \frac{p_1}{\rho} + g \cdot z_1 \quad \left[\frac{m^2}{s^2} \right]$$

Druckform (= Energieform $\cdot \rho$)

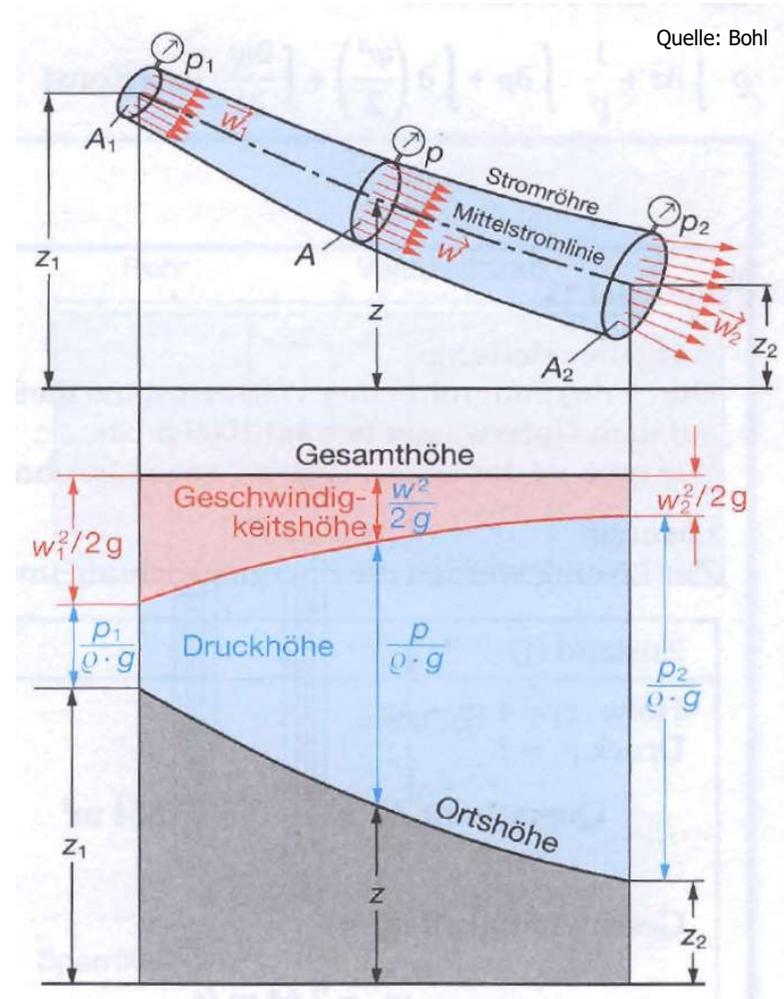
$$\frac{\rho}{2} \cdot w_2^2 + p_2 + \rho \cdot g \cdot z_2 = \frac{\rho}{2} \cdot w_1^2 + p_1 + \rho \cdot g \cdot z_1 \quad [Pa]$$

Höhenform (= Druckform $\cdot 1/(g \cdot \rho)$)

$$\frac{w_2^2}{2 \cdot g} + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + z_2 = \frac{w_1^2}{2 \cdot g} + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + z_1 \quad [m]$$

Kontinuität

$$A_2 \cdot w_2 = A_1 \cdot w_1$$





Grundlagen Windlasten

Grundlagen Strömungsmechanik dyn. Druck – Druckbeiwerte

Definition des dynamischen Drucks: $q_\infty = \frac{1}{2} \rho u_\infty^2$ (Staudruck oder Geschwindigkeitsdruck)

Definition des Druckbeiwertes:

$$c_p = \frac{p_1 - p_\infty}{q_\infty} = \frac{\Delta p_{1,\infty}}{q_\infty} \quad c_p = \frac{p_1 - p_\infty}{q_\infty} = \frac{q_\infty - q_1}{q_\infty} = 1 - \frac{q_1}{q_\infty} = 1 - \left(\frac{u_1}{u_\infty} \right)^2$$

p_1 = Druck an der Wandung (z.B. Oberflächendruck an Bauwerk)
 p_∞ = Druck in der ungestörten Anströmung (barometrischer Druck)

$$c_p = 1 - \left(\frac{u_1}{u_\infty} \right)^2$$

für Bereiche in denen die Stromlinien der Kontur folgen
 \Rightarrow **keine Ablösungen**

\Rightarrow **folgt aus:**

$$q_1 + p_1 + \cancel{\rho \cdot g \cdot z_1} = q_\infty + p_\infty + \cancel{\rho \cdot g \cdot z_\infty}$$

$$p_1 = q_\infty + p_\infty - q_1$$

$$c_p = \frac{q_\infty + \cancel{p_\infty} - q_1 - \cancel{p_\infty}}{q_\infty} = 1 - \left(\frac{u_1}{u_\infty} \right)^2$$



Grundlagen Windlasten

Grundlagen Strömungsmechanik Staupunkt und minimaler Druck

Beispiele:

1) Am Staupunkt:

$$u_1 = 0$$

$$\Rightarrow c_p = 1$$

$$p_1 = p_\infty = q$$

**=> Die kinematische Energie wurde in Druck umgewandelt
bei Vernachlässigung der potentiellen Energie:**

• q ist der maximale Druck => $c_p \leq 1$

2)

$$u_1 = u_\infty$$

$$\Rightarrow c_p = 0$$

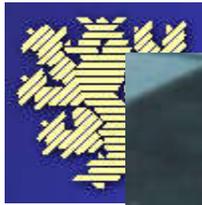
3)

$$u_1 > u_\infty$$

$$\Rightarrow c_p < 0$$

Die negativen Drücke sind nicht limitiert. Das Minimum entsteht durch Kavitation (Luftblasen, die sich in der Flüssigkeit bei sehr geringen Drücken bilden)

Grundlagen Windlasten



Bergische Universität
Wuppertal

- Druck
- Bew



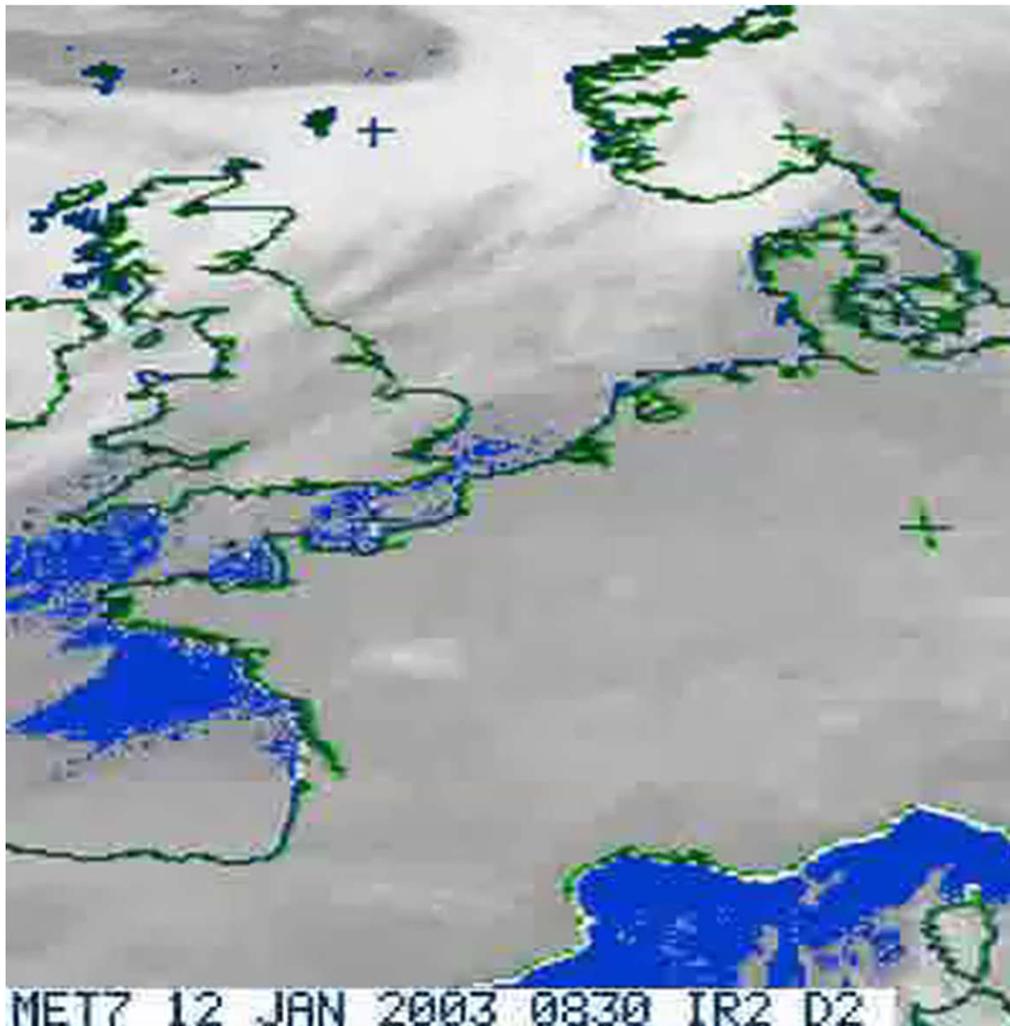


Grundlagen Windlasten

Windgeschwindigkeit, Turbulenz und Böengeschwindigkeitsdruck

Bergische Universität
Wuppertal

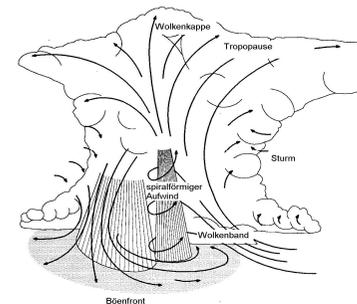
Westeurop. Orkan (außertropischer Zyklon)



Fallwinde



Tornados



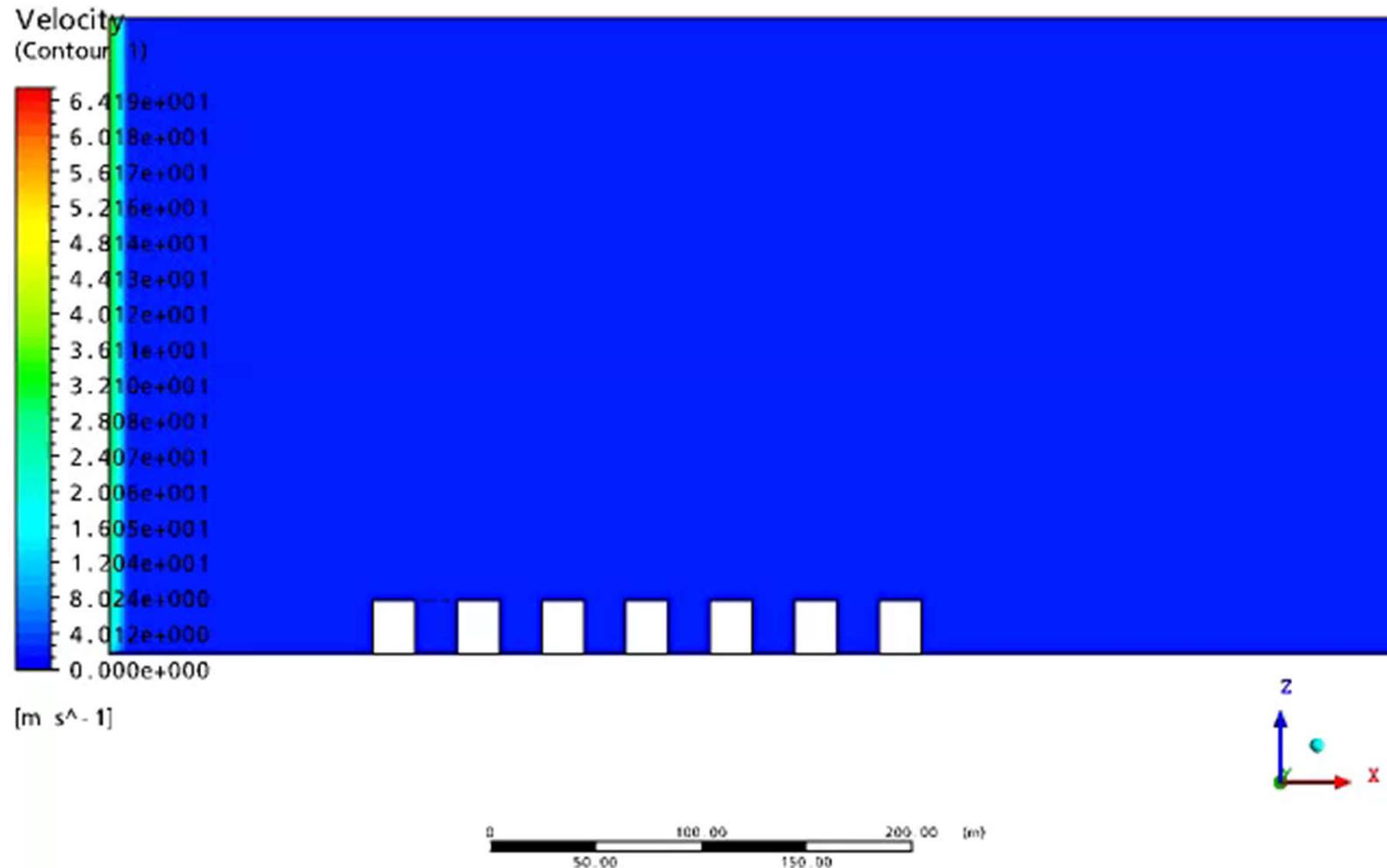
Gewitterstürme

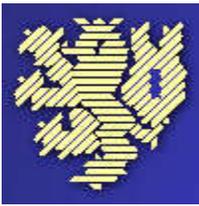


Grundlagen Windlasten

Numerische Simulation eines Windfeldes

Bergische Universität
Wuppertal



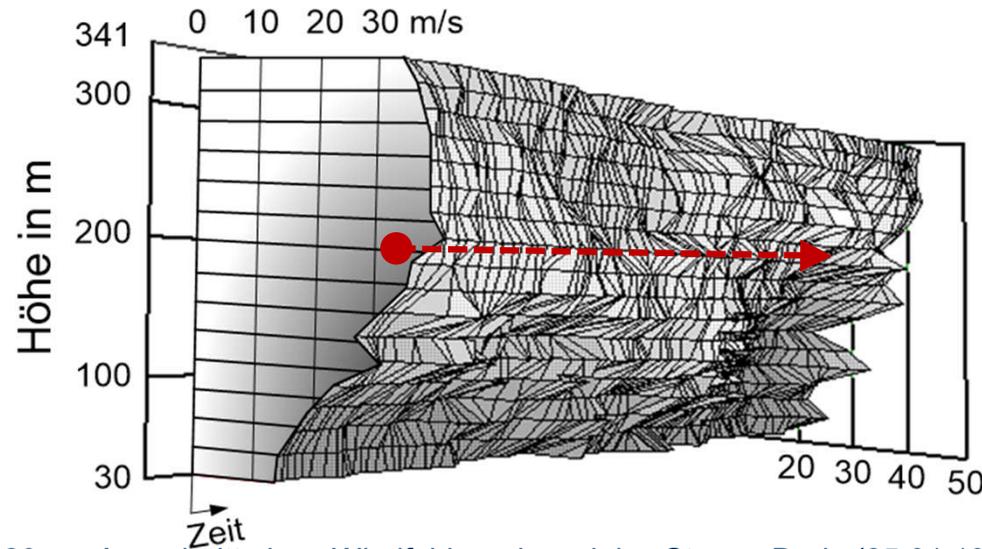


Grundlagen Windlasten

Statistische Erfassung der Bögigkeit (Windturbulenz)

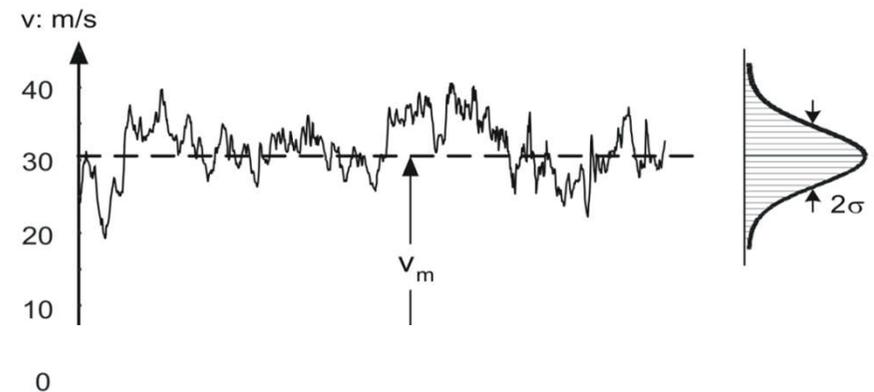
Bergische Universität
Wuppertal

Niemann, H.-J.; Peil, U.: Windlasten auf Bauwerke.
in: Stahlbaukalender 2003, S. 673 – 748, Verlag Ernst & Sohn,
Berlin, 2003



20 s – Ausschnitt eines Windfelds während des Sturms Daria (25.01.1990) an einem abgespannten Mast in Gatow (Messungen durch Prof. Peil et al.)

Zeitschrieb der Windgeschwindigkeit
an einem ortsfesten Punkt



Aufspaltung in Mittelwert und Standardabweichung

Mittelwert

Varianz

Standardabweichung

$$v(t) = v_m + v'(t)$$

$$v_m = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} v(t) \cdot dt$$

$$\sigma_v^2 = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} (v(t) - v_m)^2 \cdot dt$$

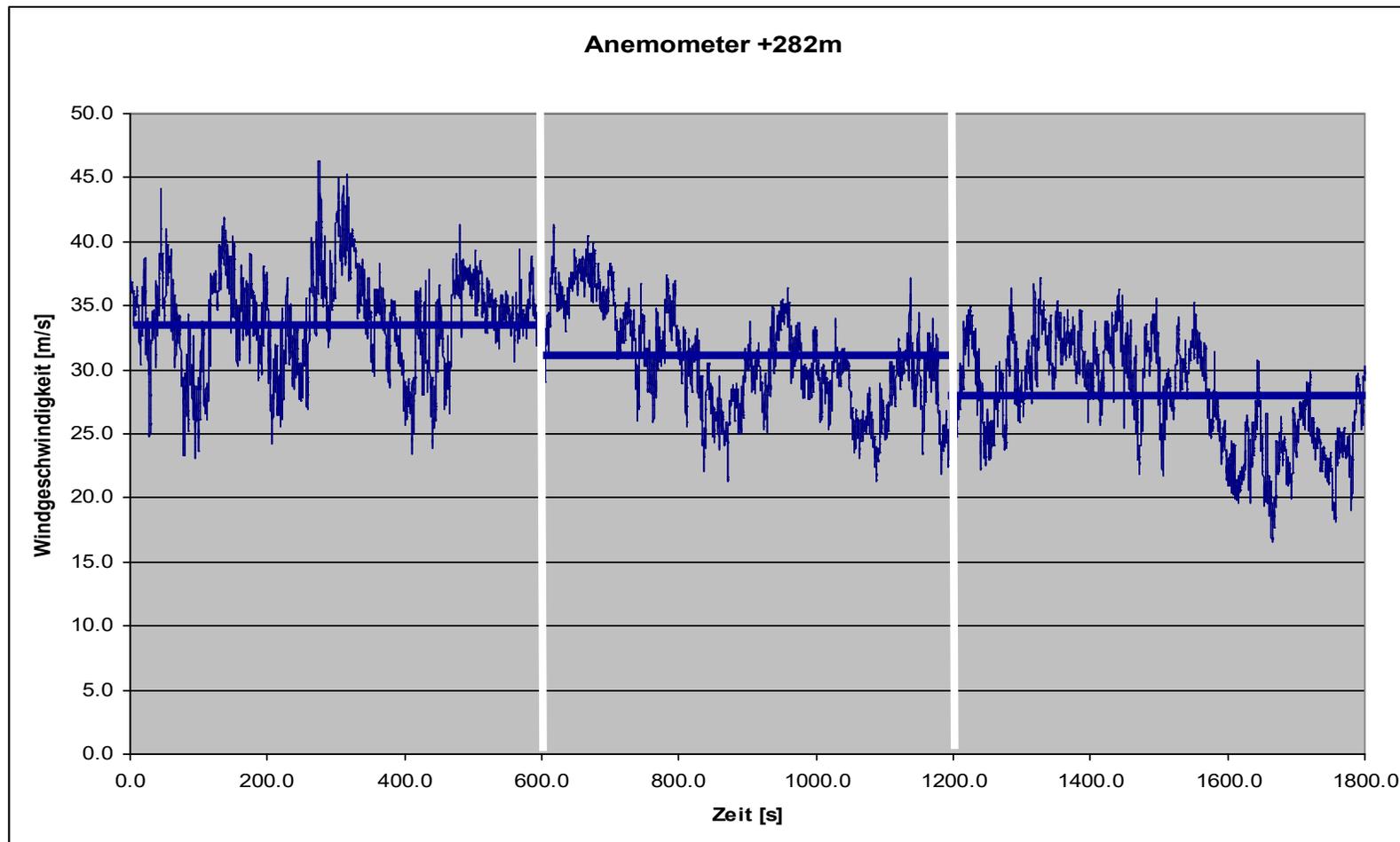
$$\sigma_v = +\sqrt{\sigma_v^2}$$



Grundlagen Windlasten

Windgeschwindigkeit und Turbulenz

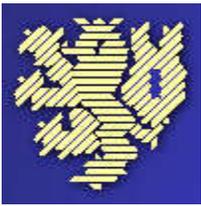
Bergische Universität
Wuppertal



$u_m = 34,0 \text{ m/s}$
 $\sigma_u = 3,14 \text{ m/s}$
 $I_u = 0,092$

$u_m = 30,8 \text{ m/s}$
 $\sigma_u = 2,86 \text{ m/s}$
 $I_u = 0,093$

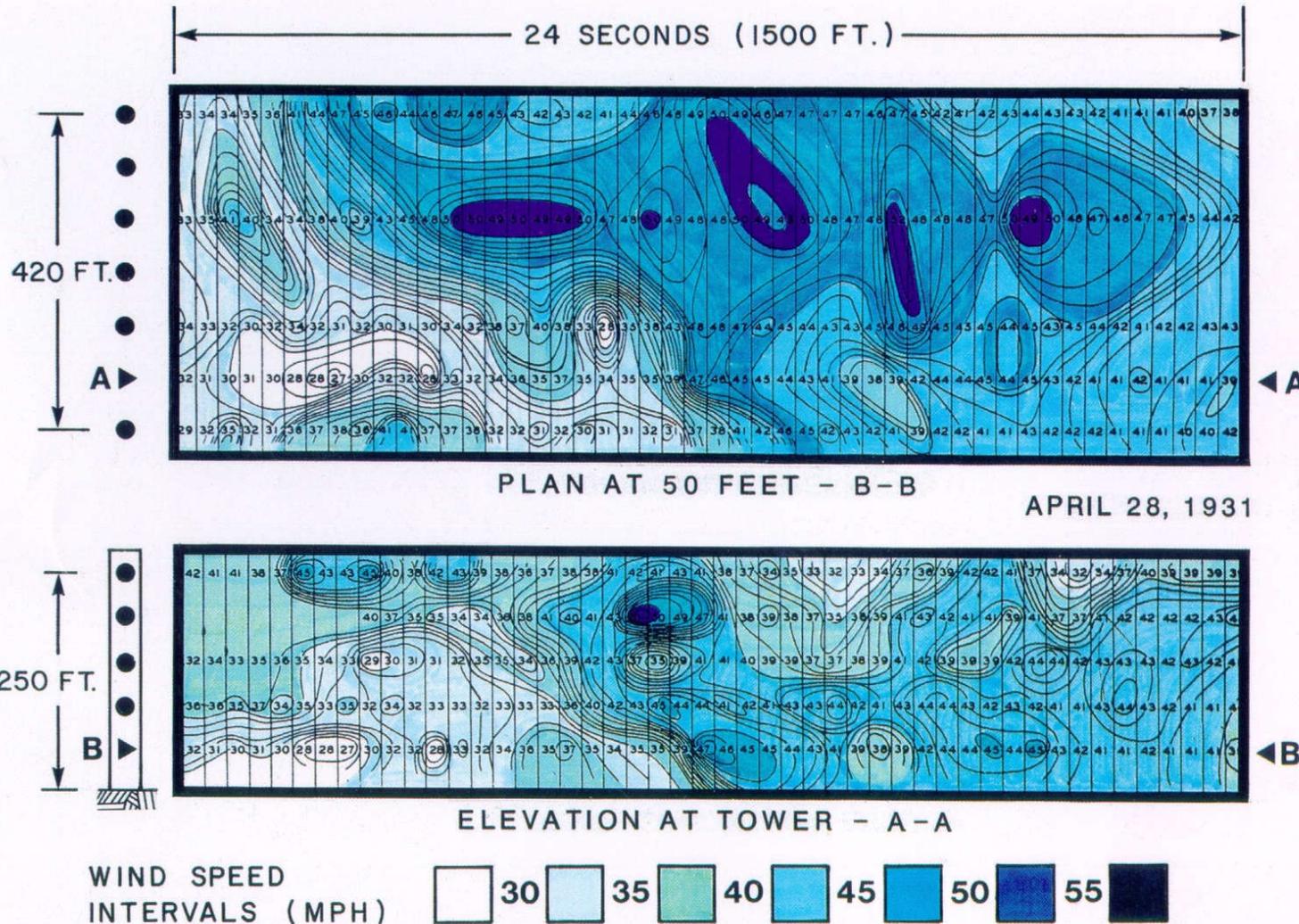
$u_m = 27,8 \text{ m/s}$
 $\sigma_u = 2,61 \text{ m/s}$
 $I_u = 0,094$



Grundlagen Windlasten

Windgeschwindigkeit und Turbulenz Böenballengrößen

Bergische Universität
Wuppertal



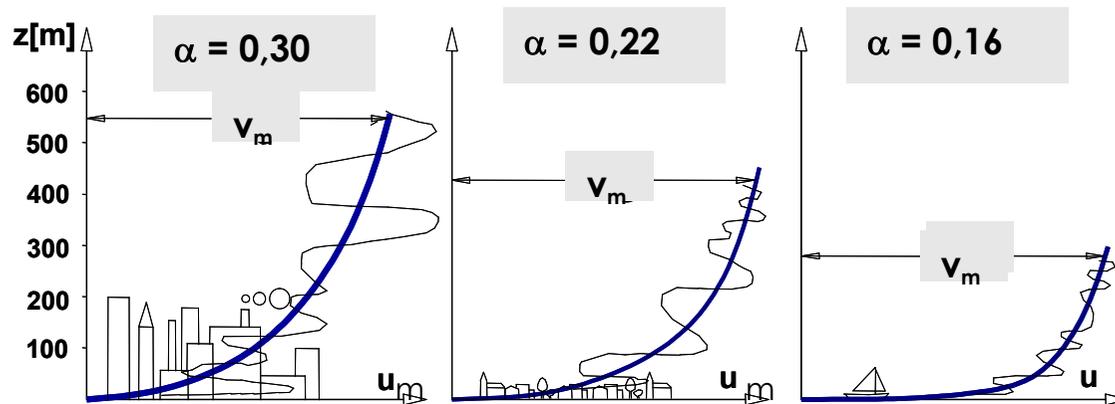


Grundlagen Windlasten

Windgeschwindigkeit, Turbulenz und Böengeschwindigkeitsdruck

Bergische Universität
Wuppertal

Mittlere Windgeschwindigkeit, Turbulenzintensität und Böengeschwindigkeitsdruck hängen von der Höhe über Grund z ab. Die mittlere Windgeschwindigkeit v_m nimmt zu, die Turbulenzintensität I_v nimmt ab, der Böengeschwindigkeitsdruck q_p nimmt zu.



Potenzgesetz für das Windprofil nach Hellmann

$$v_m(z) = v_m(10) \cdot [z/10]^\alpha$$

Der Eurocode benutzt das logarithmische Profil. Der Nationale Anhang erfasst diesen Effekt durch so genannte Potenzprofile mit Exponenten α für die mittlere Windgeschwindigkeit, α' für die Böengeschwindigkeit.

Die Exponenten hängen von der Geländerauhigkeit ab.

Der Nationale Anhang regelt 4 Geländekategorien, der Eurocode 5.



Grundlagen Windlasten

Windgeschwindigkeit, Turbulenz und Böengeschwindigkeitsdruck

Potenzgesetz für die mittlere Windgeschwindigkeit

$$v_m(z) = v_m(10) \cdot \left(\frac{z}{10} \right)^\alpha$$

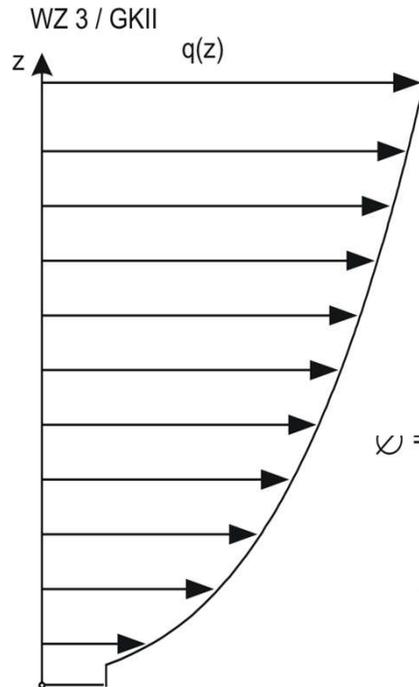
Potenzgesetz für die Turbulenzintensität

$$I_v(z) = I_v(10) \cdot \left(\frac{z}{10} \right)^{-\alpha}$$

$$I_v(10) = \frac{1}{\ln \frac{10}{z_0}}$$

Potenzgesetz für den Böengeschwindigkeitsdruck

$$q_p(z) = q_p(10) \left(\frac{z}{10} \right)^{2\alpha'}$$

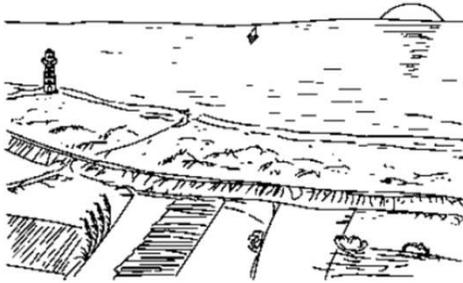
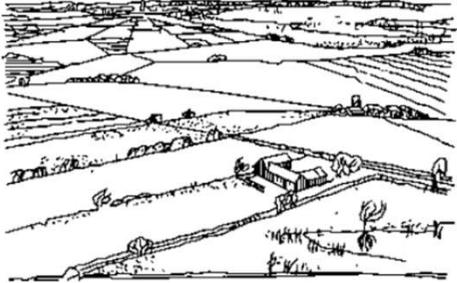
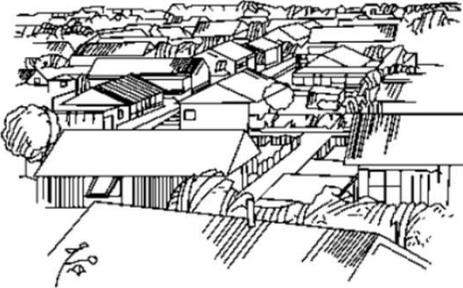




Grundlagen Windlasten

Windgeschwindigkeit, Turbulenz und Böengeschwindigkeitsdruck

Bergische Universität
Wuppertal

<p>Geländekategorie I</p> <p>Offene See; Seen mit mindestens 5 km freier Fläche in Windrichtung; glattes, flaches Land ohne Hindernisse</p> <p>Rauigkeitslänge $z_0 = 0,01 \text{ m}$ $v_m(10) = 1,18 \cdot v_b$ Profilexponent $\alpha = 0,12$ $q_m(10) = 2,6 \cdot q_b$</p>	
<p>Geländekategorie II</p> <p>Gelände mit Hecken, einzelnen Gehöften, Häusern oder Bäumen, z. B. landwirtschaftliches Gebiet</p> <p>Rauigkeitslänge $z_0 = 0,05 \text{ m}$ $v_m(10) = 1,00 \cdot v_b$ Profilexponent $\alpha = 0,16$ $q_m(10) = 2,1 \cdot q_b$</p>	
<p>Geländekategorie III</p> <p>Vorstädte, Industrie- oder Gewerbegebiete; Wälder</p> <p>Rauigkeitslänge $z_0 = 0,30 \text{ m}$ $v_m(10) = 0,77 \cdot v_b$ Profilexponent $\alpha = 0,22$ $q_m(10) = 1,6 \cdot q_b$</p>	



Grundlagen Windlasten

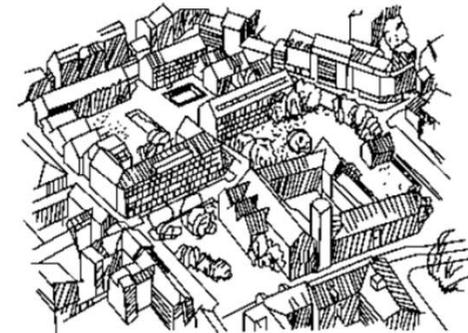
Windgeschwindigkeit, Turbulenz und Böengeschwindigkeitsdruck

Bergische Universität
Wuppertal

Geländekategorie IV

Stadtgebiete, bei denen mindestens 15 % der Fläche mit Gebäuden bebaut sind, deren mittlere Höhe 15 m überschreitet

Rauigkeitslänge	$z_0 = 1,00 \text{ m}$	$v_m(10) = 0,56 \cdot v_b$
Profilexponent	$\alpha = 0,30$	$q_m(10) = 1,1 \cdot q_b$



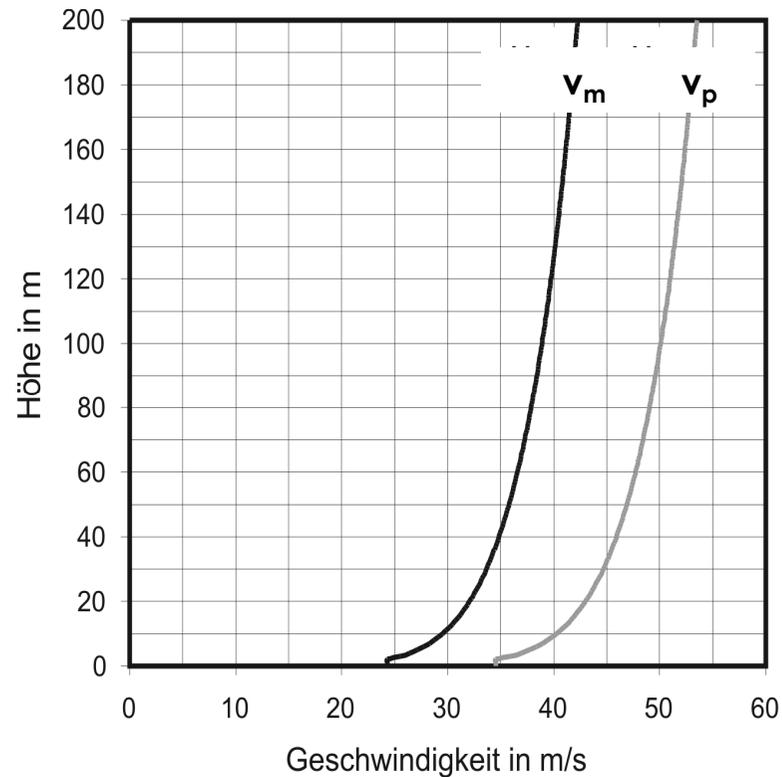


Grundlagen Windlasten

Anhang NA.B in DIN EN 1991-1-4/NA

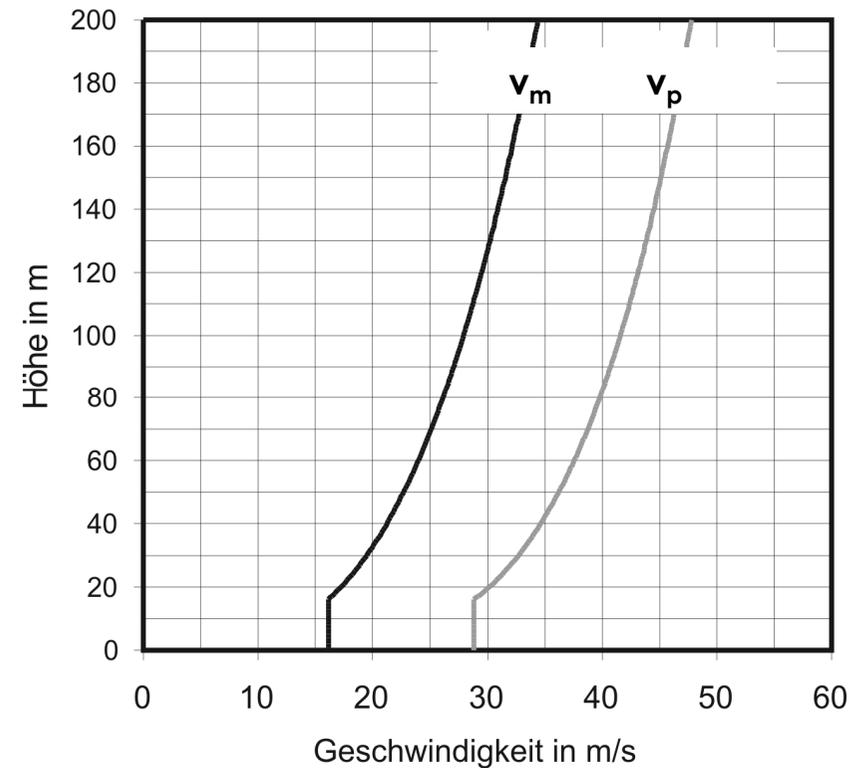
Windprofile in Geländekategorie I und IV

Bergische Universität
Wuppertal



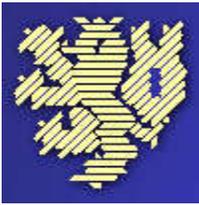
GK I

**glattes, flaches Land
ohne Hindernisse, große
Binnenseen, offene See**



GK IV

Stadtgebiete



Grundlagen Windlasten

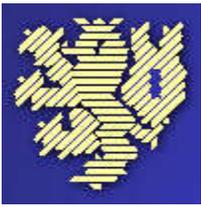
Anhang NA.B in DIN EN 1991-1-4/NA

Profile von v_m , I_v , q_p und v_p für die 4 Geländekategorien

Bergische Universität
Wuppertal

Tabelle NA.B.2 — Profile der mittleren Windgeschwindigkeit, der Turbulenzintensität, des Böengeschwindigkeitsdrucks und der Böengeschwindigkeit in ebenem Gelände für 4 Geländekategorien

Geländekategorie	I	II	III	IV
Mindesthöhe z_{\min}	2,00 m	4,00 m	8,00 m	16,00 m
Mittlere Windgeschwindigkeit v_m für $z > z_{\min}$	$1,18 \times v_b (z/10)^{0,12}$	$1,00 \times v_b (z/10)^{0,16}$	$0,77 \times v_b (z/10)^{0,22}$	$0,56 \times v_b (z/10)^{0,30}$
v_m / v_b für $z < z_{\min}$	0,97	0,86	0,73	0,64
Turbulenzintensität I_v für $z > z_{\min}$	$0,14 \times (z/10)^{-0,12}$	$0,19 \times (z/10)^{-0,16}$	$0,28 \times (z/10)^{-0,22}$	$0,43 \times (z/10)^{-0,30}$
I_v für $z < z_{\min}$	0,17	0,22	0,29	0,37
Böengeschwindigkeitsdruck q_p für $z > z_{\min}$	$2,6 \times q_b (z/10)^{0,19}$	$2,1 \times q_b (z/10)^{0,24}$	$1,6 \times q_b (z/10)^{0,31}$	$1,1 \times q_b (z/10)^{0,40}$
q_p / q_b für $z < z_{\min}$	1,9	1,7	1,5	1,3
Böengeschwindigkeit v_p für $z > z_{\min}$	$1,61 \times v_b (z/10)^{0,095}$	$1,45 \times v_b (z/10)^{0,120}$	$1,27 \times v_b (z/10)^{0,155}$	$1,05 \times v_b (z/10)^{0,200}$
v_p / v_b für $z < z_{\min}$	1,38	1,30	1,23	1,15



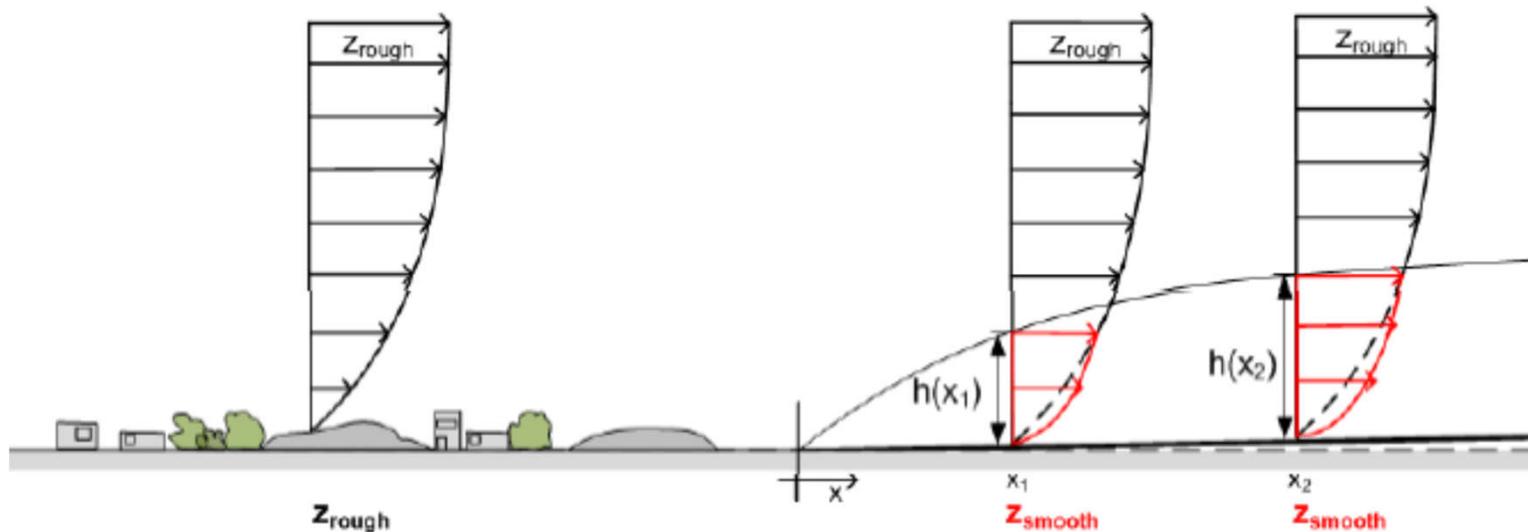
Grundlagen Windlasten

Anhang NA.B in DIN EN 1991-1-4/NA

Wechsel der Bodenrauigkeit

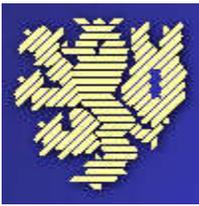
Bergische Universität
Wuppertal

Entwicklung eines zweiphasigen Grenzschichtprofils aufgrund eines Rauigkeitswechsels von glattem zu rauem Gelände



Die Bebauung liegt in Mitteleuropa überwiegend im Bereich von Mischprofilen der GK I und GK II (Küste, große Binnenseen) oder GK III und GK IV (Binnenland).

Die Norm hat zur Vereinfachung bei der Beurteilung der Geländekategorien daher als *Regelfall* entsprechende *Mischprofile* festgelegt.

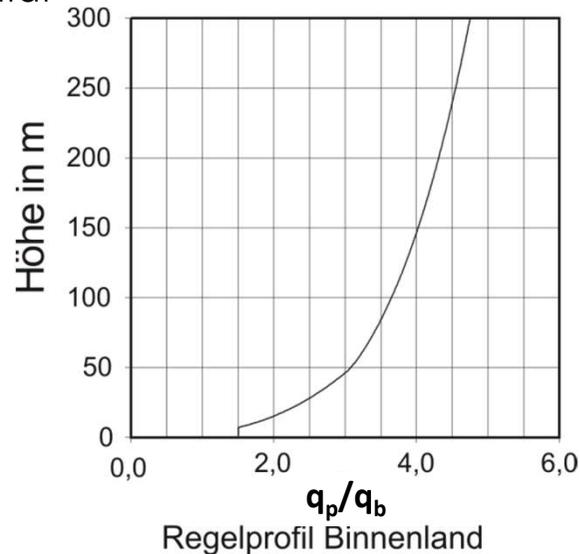


Bergische Universität
Wuppertal

Grundlagen Windlasten

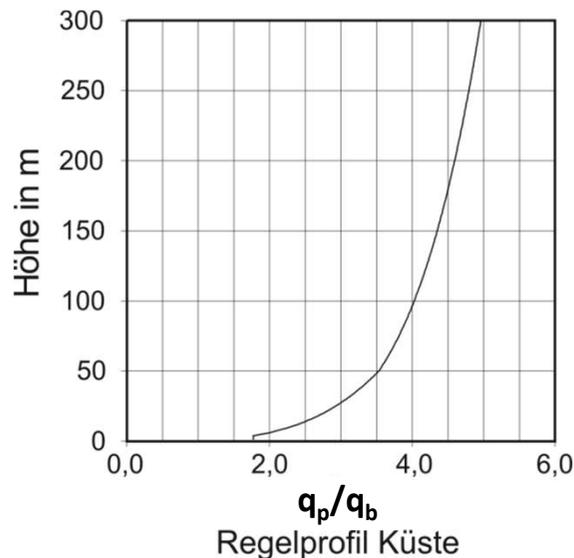
Anhang NA.B in DIN EN 1991-1-4/NA

Regelprofile des Böengeschwindigkeitsdruckes – Küste, Binnenland



Regelprofil Binnenland
**Mischprofil beim Übergang von GK II –
offenes Gelände zu GK III – Vorstadt.**

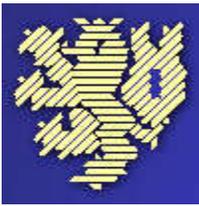
*Oberhalb von $z = 50\text{m}$ gilt das Profil für
GK II, bis $z = 7\text{m}$ gilt ein konstanter
Wert, dazwischen ein Übergangprofil.*



Regelprofil Küste
**Mischprofil beim Übergang von GK I – offene, große Wasserflächen
zu GK II – offenes Gelände.**

*Oberhalb von $z = 50\text{m}$ gilt das Profil für GK I, bis $z = 4\text{m}$ gilt ein
konstanter Wert, dazwischen ein Übergangprofil.*

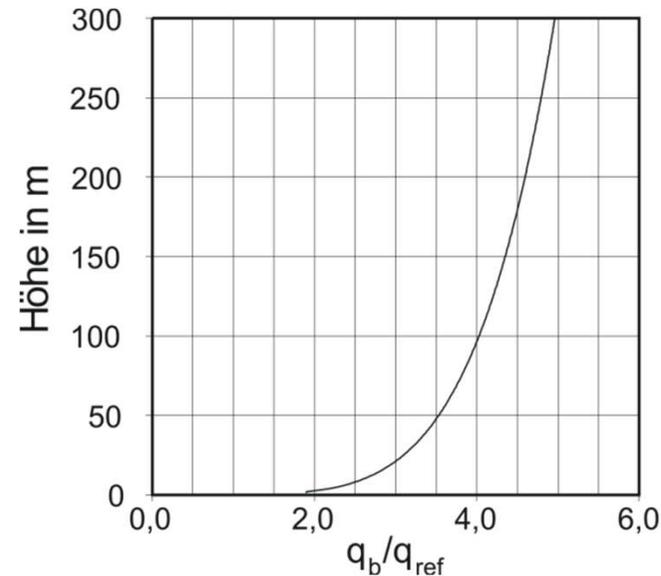
**Anzuwenden in küstennahen Gebieten in einem Streifen entlang der
Küste von 5km Breite landeinwärts und auf den Inseln der Ostsee.**



Grundlagen Windlasten

Anhang NA.B in DIN EN 1991-1-4/NA

Regelprofile des Böengeschwindigkeitsdruckes – Küste, Binnenland

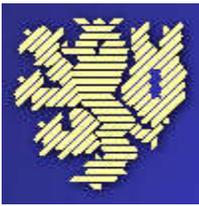


**Regelprofil Nordseeinseln
Profil der GK I – große, offene
Wasserflächen.**

**Anzuwenden für die Inseln der Deutschen
Bucht**

- Die Regelprofile gelten für Bauwerkshöhen bis zu 300m.
- Eine topografisch besonders exponierte Lage ist zu berücksichtigen.
- Der Einfluss der Bodenrauheit darf genauer bewertet werden. Dabei sind die Geländekategorien und ihre Profile zu verwenden.

- Auf Bergkuppen, an Küsten oder in größerer Höhe treten höhere Geschwindigkeiten auf, *sie sind gesondert zu erfassen.*



Grundlagen Windlasten

Anhang NA.B in DIN EN 1991-1-4/NA

Profile von v_m , I_v , q_p und v_p für die Regelprofile Binnenland, Küste

Tabelle NA.B.4 — Profile der mittleren Windgeschwindigkeit, der Turbulenzintensität und der Böengeschwindigkeit in ebenem Gelände für die Regelfälle nach NA.B.3.3

	Regelprofil im Binnenland	Regelprofil in küstennahen Gebieten
Mindesthöhe z_{\min}	7,00 m	4,00 m
Mittlere Windgeschwindigkeit v_m für $50 \text{ m} < z < 300 \text{ m}$	$1,00 \times v_b (z/10)^{0,16}$	$1,18 \times v_b (z/10)^{0,12}$
v_m / v_b für $z_{\min} < z < 50 \text{ m}$	$0,86 \times (z/10)^{0,25}$	$1,10 \times (z/10)^{0,165}$
v_m / v_b für $z < z_{\min}$	0,79	0,95
Turbulenzintensität I_v für $50 \text{ m} < z < 300 \text{ m}$	$0,19 \times (z/10)^{-0,16}$	$0,14 \times (z/10)^{-0,12}$
I_v für $z_{\min} < z < 50 \text{ m}$	$0,22 \times (z/10)^{-0,25}$	$0,15 \times (z/10)^{-0,165}$
I_v für $z < z_{\min}$	0,24	0,17
Böengeschwindigkeit v_p für $50 \text{ m} < z < 300 \text{ m}$	$1,45 \times v_b (z/10)^{0,120}$	$1,61 \times v_b (z/10)^{0,095}$
v_p / v_b für $z_{\min} < z < 50 \text{ m}$	$1,31 \times (z/10)^{0,185}$	$1,51 \times (z/10)^{0,135}$
v_p / v_b für $z < z_{\min}$	1,23	1,33



Grundlagen Windlasten

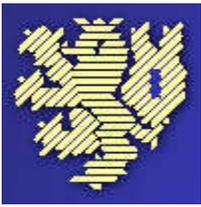
Anhang NA.B in DIN EN 1991-1-4/NA

Vereinfachte, über die Höhe konstante Geschwindigkeitsdrücke

Bergische Universität
Wuppertal

Tabelle NA.B.3 — Vereinfachte Geschwindigkeitsdrücke für Bauwerke bis 25 m Höhe

Windzone		Geschwindigkeitsdruck q_p in kN/m ² bei einer Gebäudehöhe h in den Grenzen von		
		$h \leq 10\text{m}$	$10\text{ m} < h \leq 18\text{ m}$	$18\text{ m} < h \leq 25\text{ m}$
1	Binnenland	0,50	0,65	0,75
2	Binnenland	0,65	0,80	0,90
	Küste und Inseln der Ostsee	0,85	1,00	1,10
3	Binnenland	0,80	0,95	1,10
	Küste und Inseln der Ostsee	1,05	1,20	1,30
4	Binnenland	0,95	1,15	1,30
	Küste der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee	1,25	1,40	1,55
	Inseln der Nordsee	1,40	–	–



Grundlagen Windlasten

Anhang NA.A in DIN EN 1991-1-4/NA
Windzonenkarte

Bergische Universität
Wuppertal

Basiswindgeschwindigkeit

$$V_b = C_{dir} \cdot C_{season} \cdot V_{b,0}$$

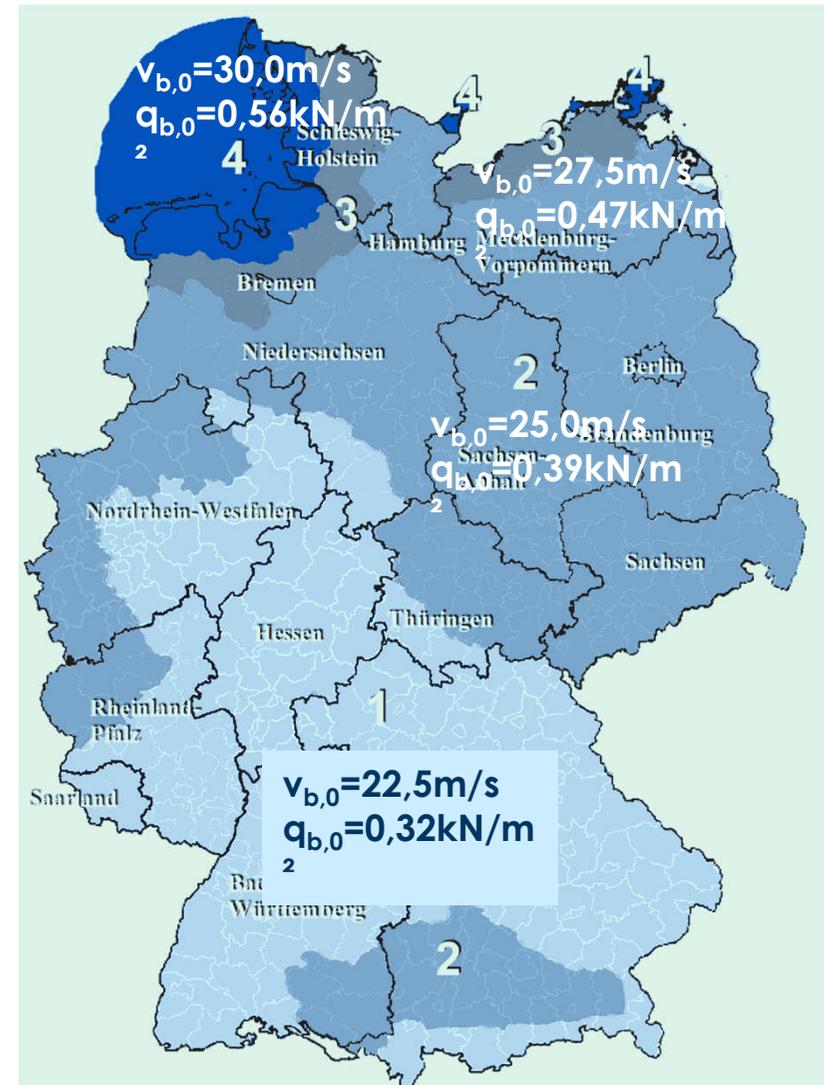
C_{dir} **Richtungsfaktor**
(empfohlen: $c_{dir} = 1,0$; Berücksichtigung bei ausreichender, statistischer Absicherung gestattet)

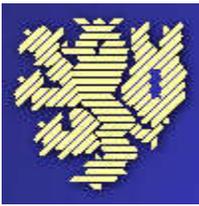
C_{season} **Jahreszeitenbeiwert**
(empfohlen: $c_{season} = 1,0$)

$V_{b,0}$ **Grundwert der Basisgeschwindigkeit, 10 m über Grund, GK II aus der Windzonenkarte (Einfluss der Meereshöhe, von Kamm- und Gipfellen beachten)**

Geschwindigkeitsdruck von v_b

$$q_b = \frac{v_b^2}{1600}$$





Grundlagen Windlasten

Anhang NA.B in DIN EN 1991-1-4/NA

Bergische Universität
Wuppertal

Bauzeitenfaktor nach Nationalem Anhang

Tabelle NA.B.5 — Abgeminderter Geschwindigkeitsdruck zur Untersuchung vorübergehender Zustände

Dauer des vorübergehenden Zustands	Mit schützenden Sicherungsmaßnahmen ^a	Mit verstärkenden Sicherungsmaßnahmen	Ohne Sicherungsmaßnahmen
bis zu 3 Tagen	$0,1 \cdot q$	$0,2 \cdot q$	$0,5 \cdot q$
bis zu 3 Monaten von Mai bis August	$0,2 \cdot q$	$0,3 \cdot q$	$0,5 \cdot q$
bis zu 12 Monaten	$0,2 \cdot q$	$0,3 \cdot q$	$0,6 \cdot q$
bis zu 24 Monaten	$0,2 \cdot q$	$0,4 \cdot q$	$0,7 \cdot q$

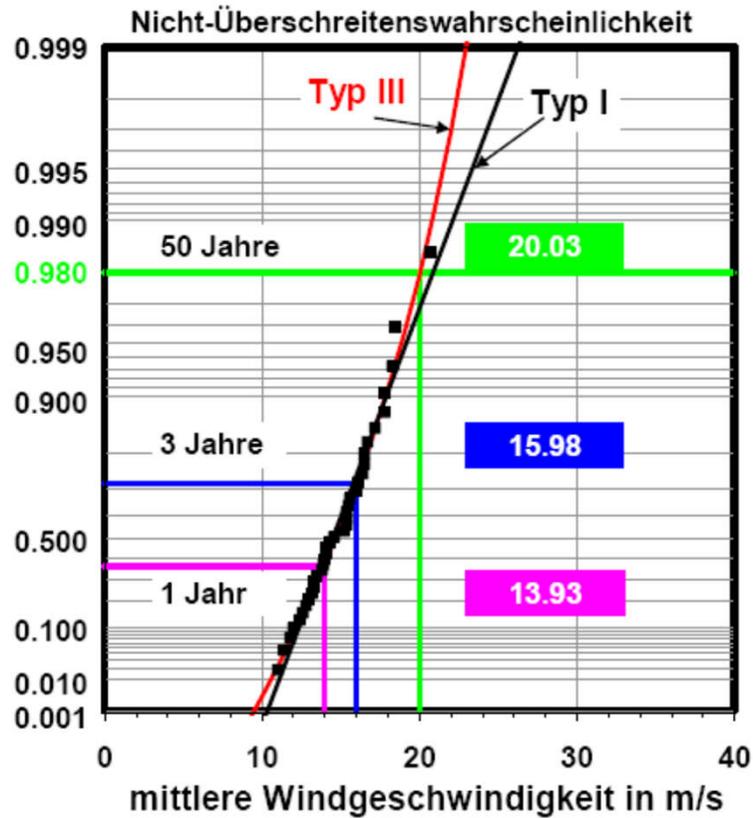
^a Schützende Sicherungsmaßnahmen sind z. B.: Niederlegen von Bauteilen am Boden, Einhausung oder Einschub in Hallen



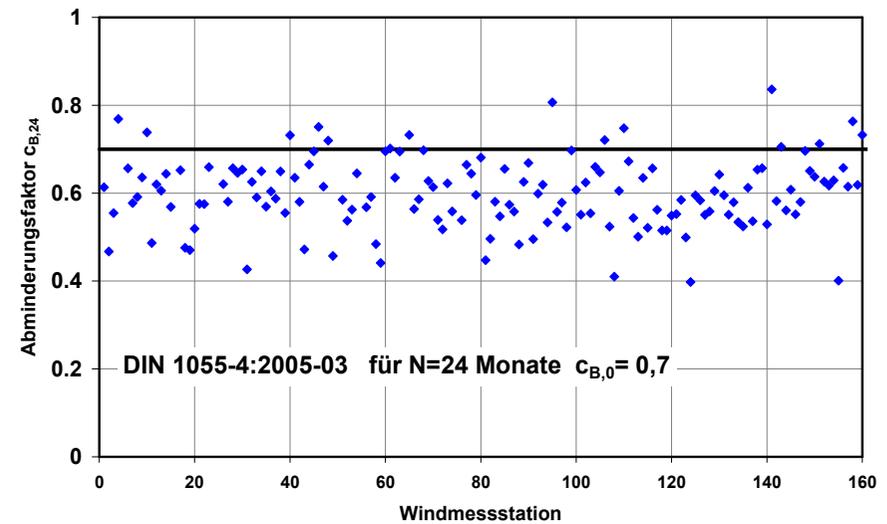
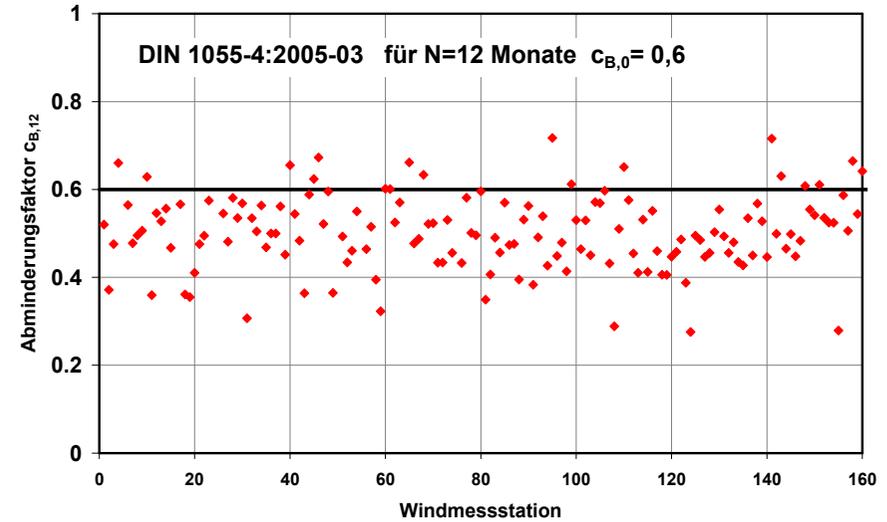
Grundlagen Windlasten

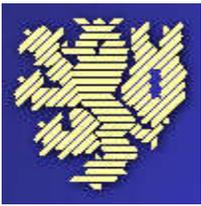
Beispiel Extremwertanalyse

Bergische Universität
Wuppertal



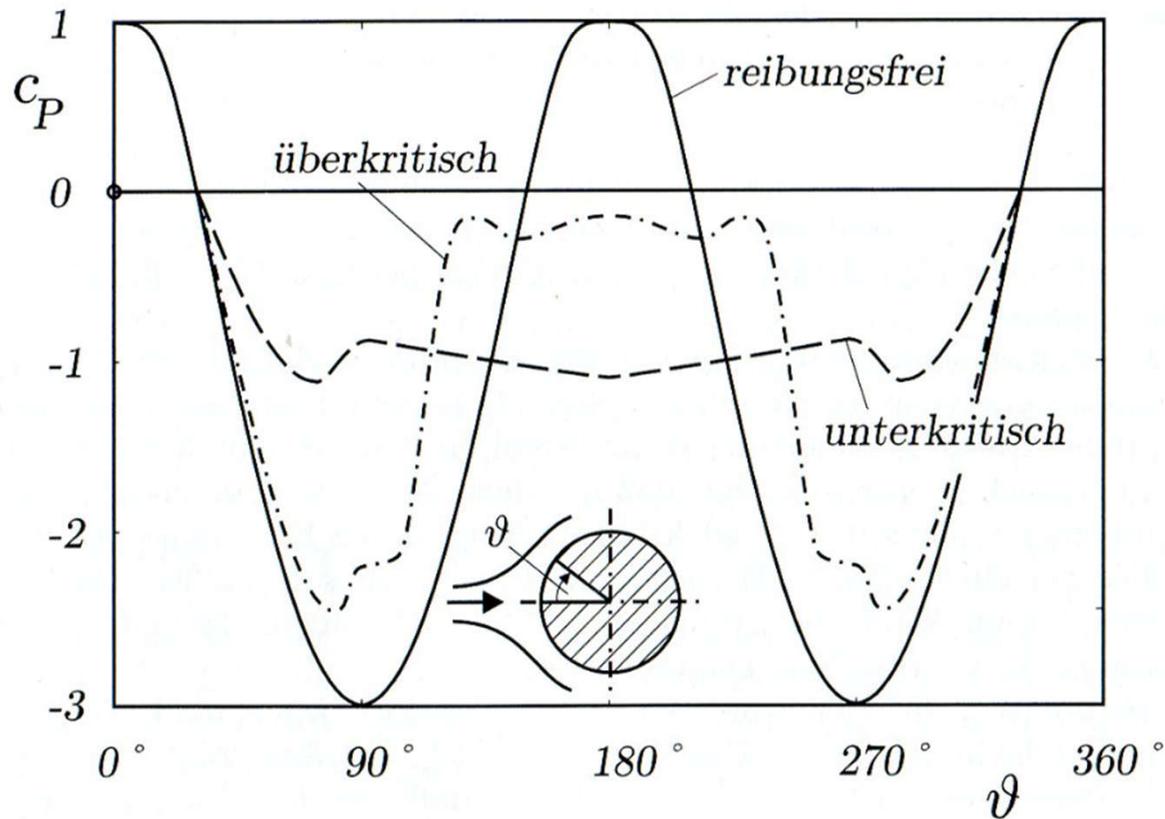
$$\sqrt{c_{B,0}} = \frac{v_N}{v_L} = \frac{1 - \frac{1}{a \cdot b} \cdot \ln[-\ln(F_1(< v_N))]}{1 - \frac{1}{a \cdot b} \cdot \ln[-\ln 0,98]}$$





Grundlagen Windlasten

Grundlagen Strömungsmechanik Druckverteilung am Kreiszyylinder



$$c_p = 1 - 4 \sin^2 \vartheta$$

Bild: Druckbeiwert für Kreiszyylinderumströmungen

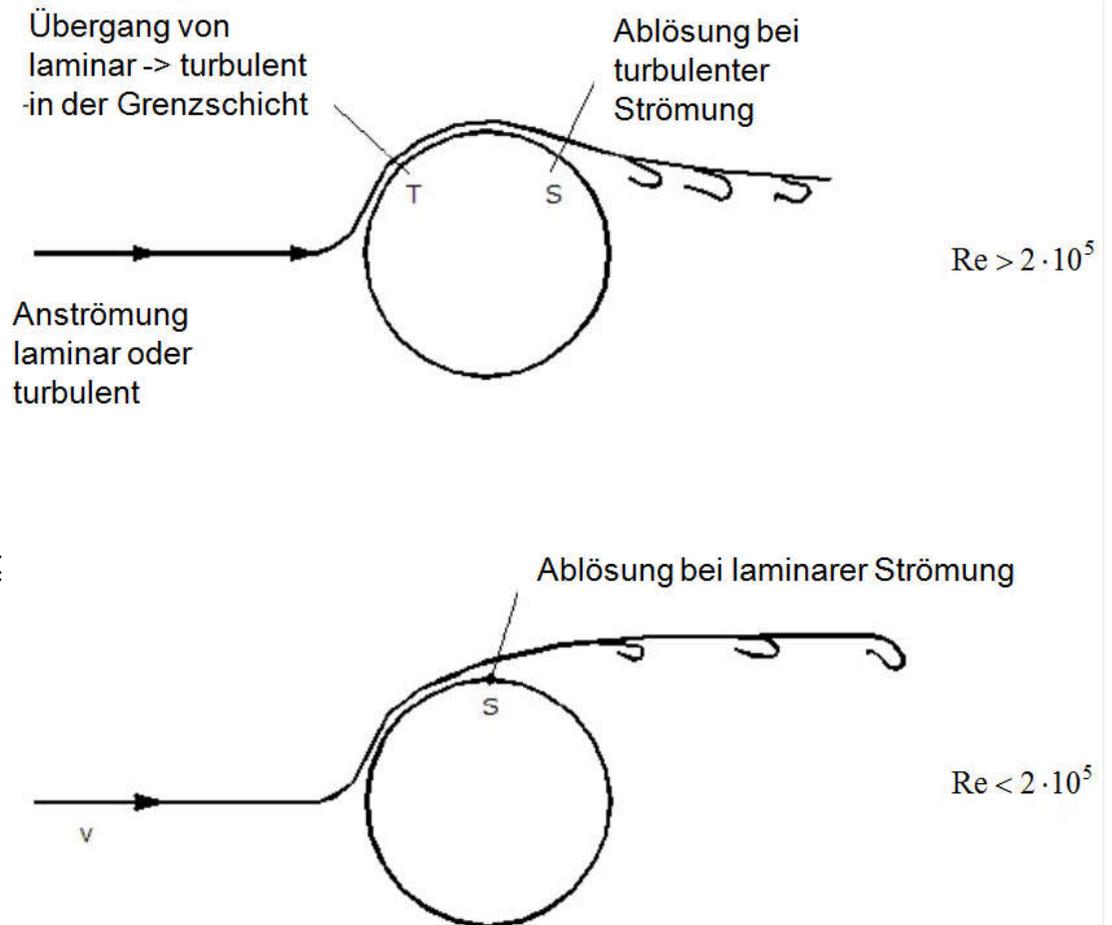
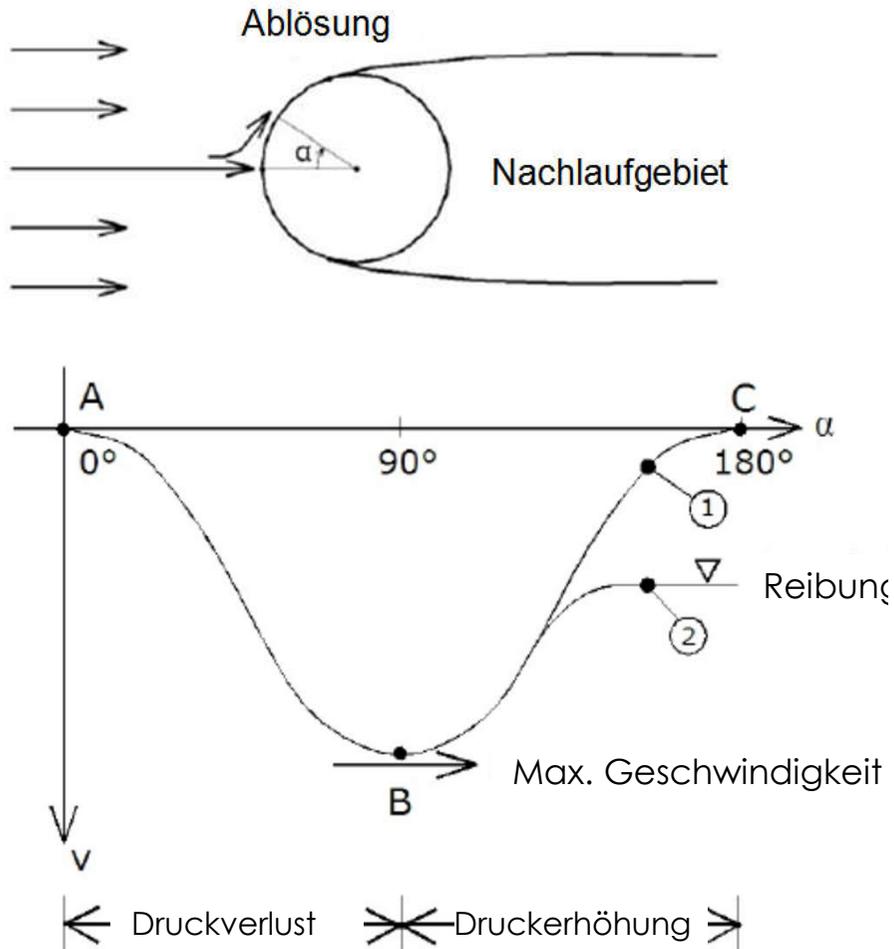
Bild: Herwig, Heinz (2006): Strömungsmechanik.



Grundlagen Windlasten

Umströmung eines Kreiszylinders

Bergische Universität
Wuppertal



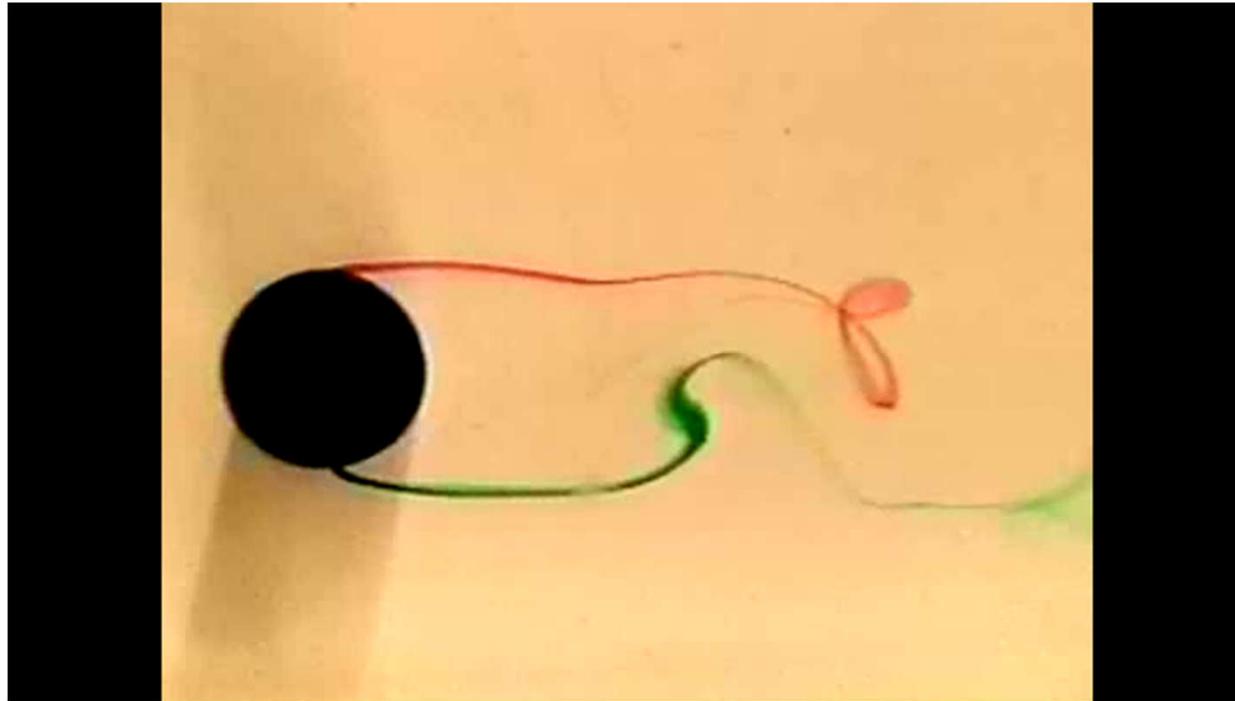


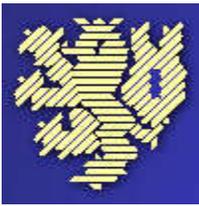
Bergische Universität
Wuppertal

Grundlagen Windlasten

Umströmung eines Kreiszyinders

von Kármán - Wirbelstraße





Grundlagen Windlasten

Winddruck an Kühlturmschalen

Bergische Universität
Wuppertal

External wind pressure:

$$W_e(z, \Theta) = \varphi \cdot F_l(\Phi) \cdot c_{pe}(\Theta) \cdot q_p(z, \Phi)$$

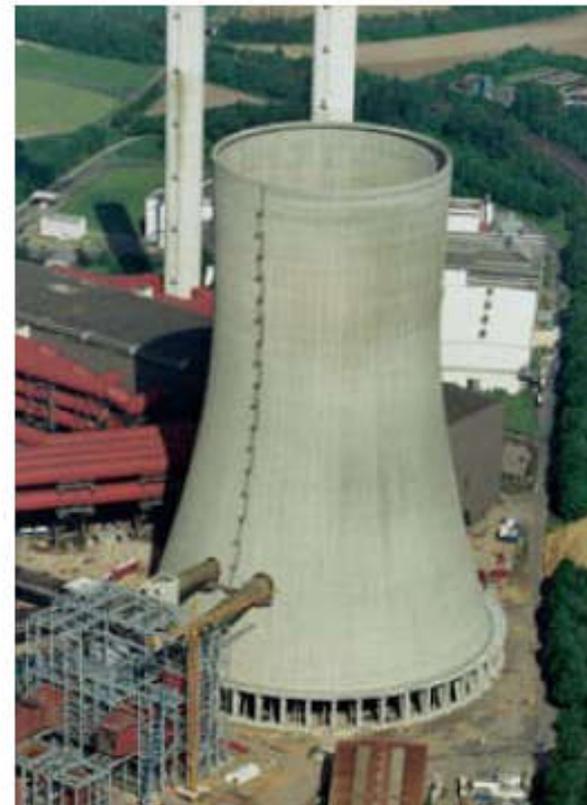
Internal wind pressure:

$$W_i(z, \Theta) = F_l(\Phi) \cdot c_{pi} \cdot q_p(H, \Phi)$$

- F_l – interference factor
- φ - resonance factor
- c_{pe} – external pressure coefficient
- Θ - angle at circumference
- q - velocity pressure
- z - height above ground
- H - height at tower top

Net pressure

$$W = W_e - W_i$$





Grundlagen Windlasten

Winddruck an Kühlturmschalen

Bergische Universität
Wuppertal

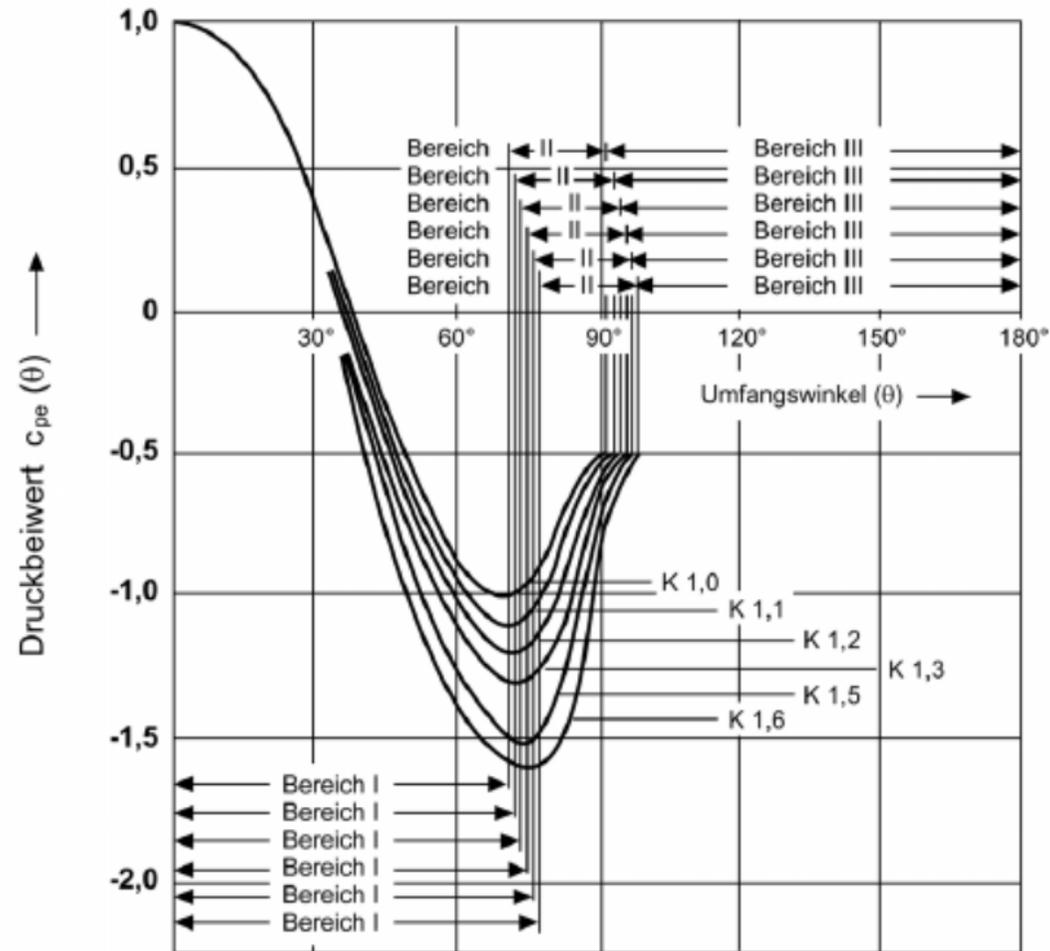
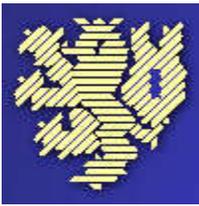


Bild: Druckbeiwert bei Kühltürmen



Grundlagen Windlasten

Widerstand und Auftrieb in einer 2D-Strömung

Bergische Universität
Wuppertal

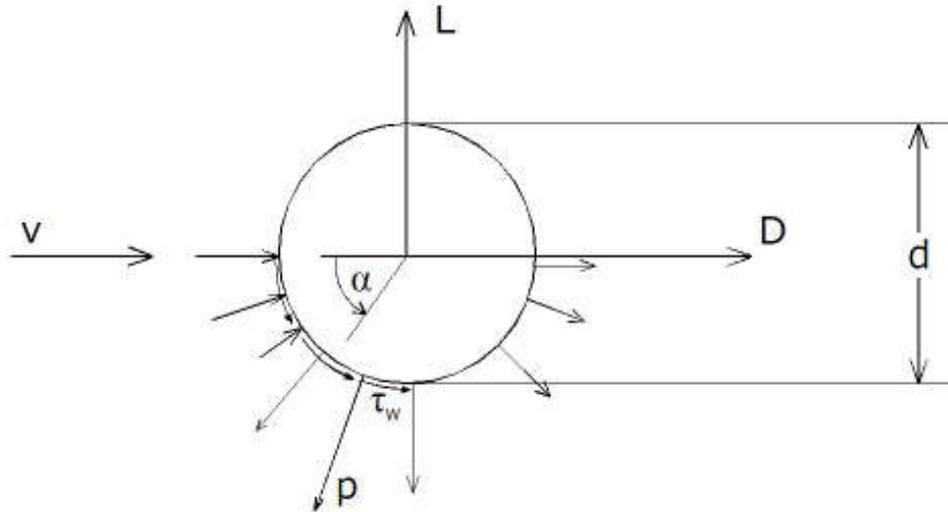


Bild: Druckverteilung auf Kreiszylinder

$$D = \int_0^{2\pi} (p \cdot \cos \alpha + \tau_w \cdot \sin \alpha) \cdot ds$$

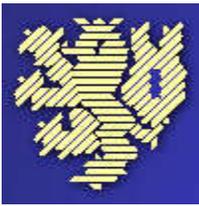
$$L = \int_0^{2\pi} (\tau_w \cos \alpha - p \sin \alpha) \cdot ds$$

$$ds = \frac{d}{2} \cdot d\alpha$$

$$p(\alpha) = c_p(\alpha) \cdot q$$

$$\tau_w(\alpha) = c_{fr}(\alpha) \cdot q$$

Widerstand D = parallel zur Hauptstromrichtung
Auftrieb L = senkrecht zur Hauptstromrichtung

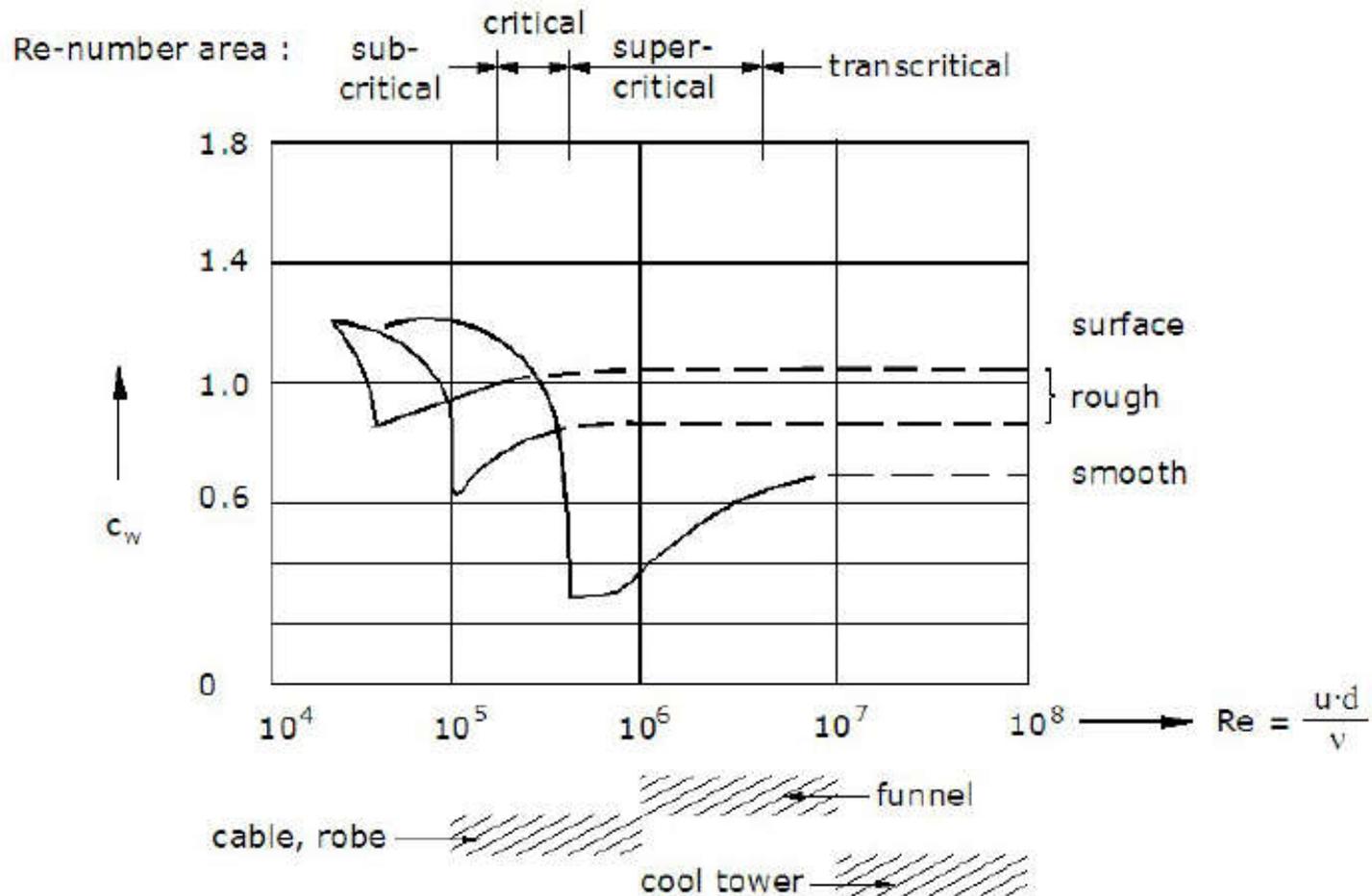


Grundlagen Windlasten

Widerstand eines Kreiszylinders

Bergische Universität
Wuppertal

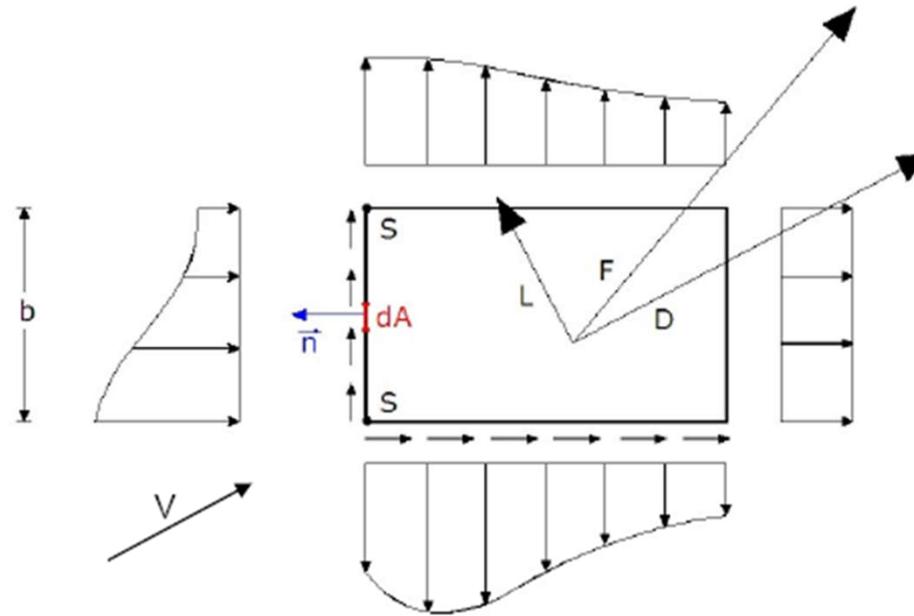
Drag vs. Re.





Grundlagen Windlasten

Integration von Oberflächendrücken zur Windkraftermittlung



wall shear τ_w and pressure p contribute to the net force

$$\vec{F} = \int_S \vec{\tau}_w \cdot dA + \int_S -p \cdot \vec{n} \cdot dA$$

line of action: displaced with regard to center of area.

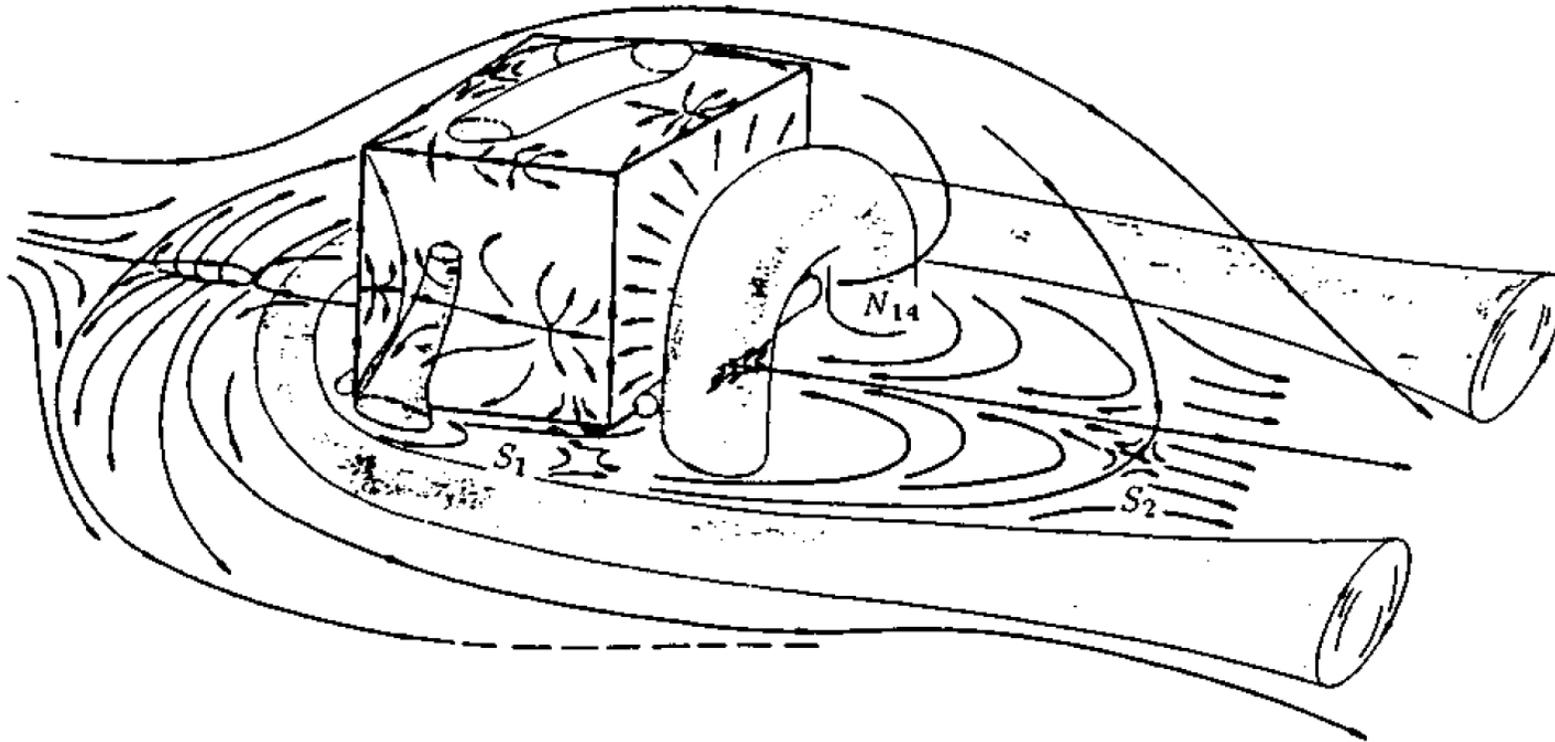


Bergische Universität
Wuppertal

Grundlagen Windlasten

Grundlagen Strömungsmechanik

Umströmung eines Quaders



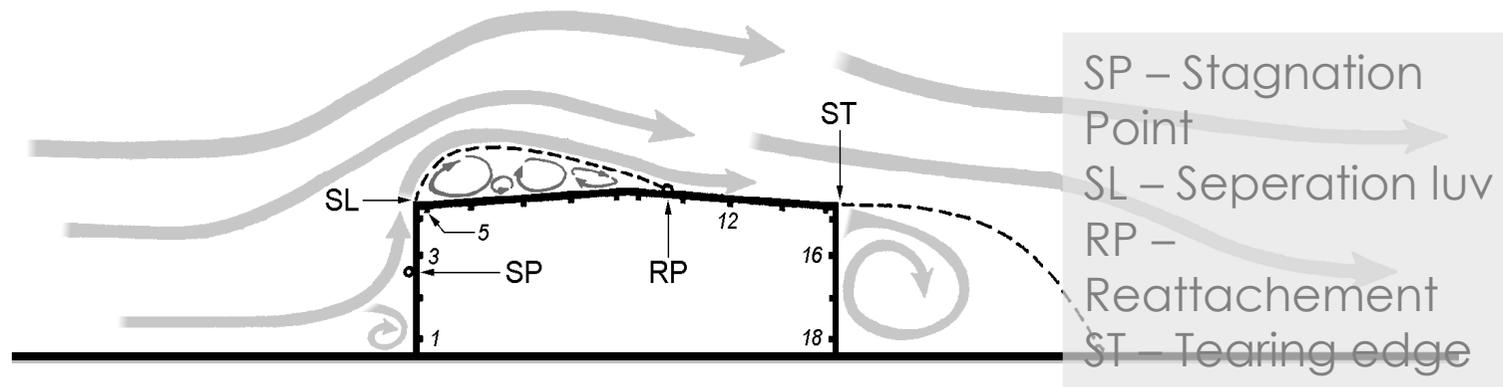
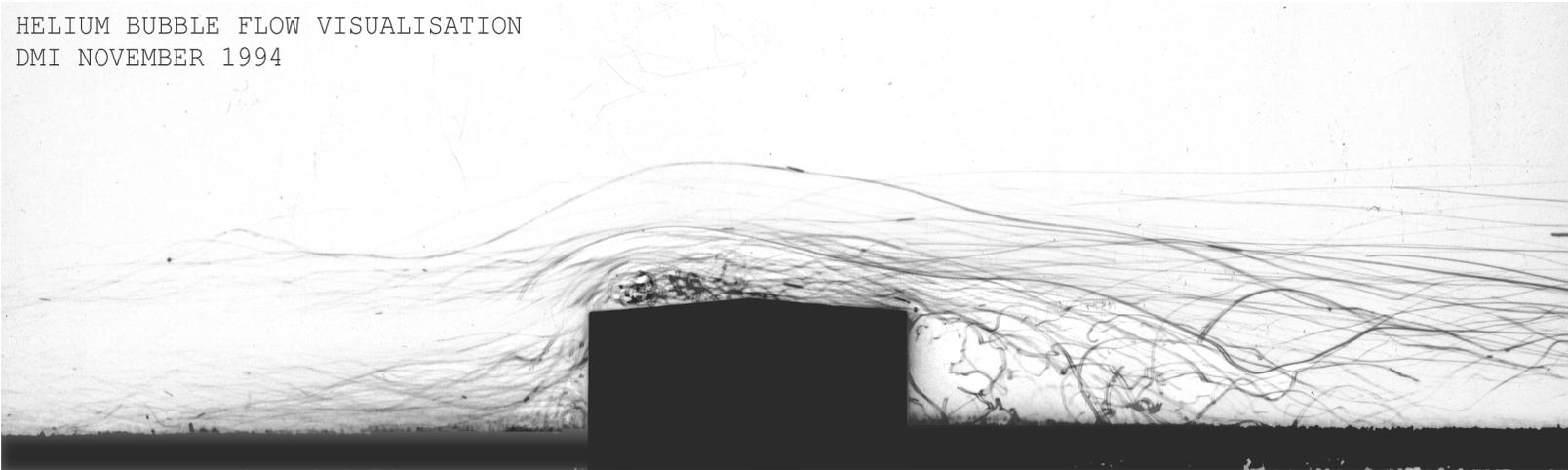


Grundlagen Windlasten

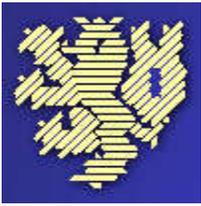
Bauwerksumströmung - Halle

Bergische Universität
Wuppertal

HELIUM BUBBLE FLOW VISUALISATION
DMI NOVEMBER 1994



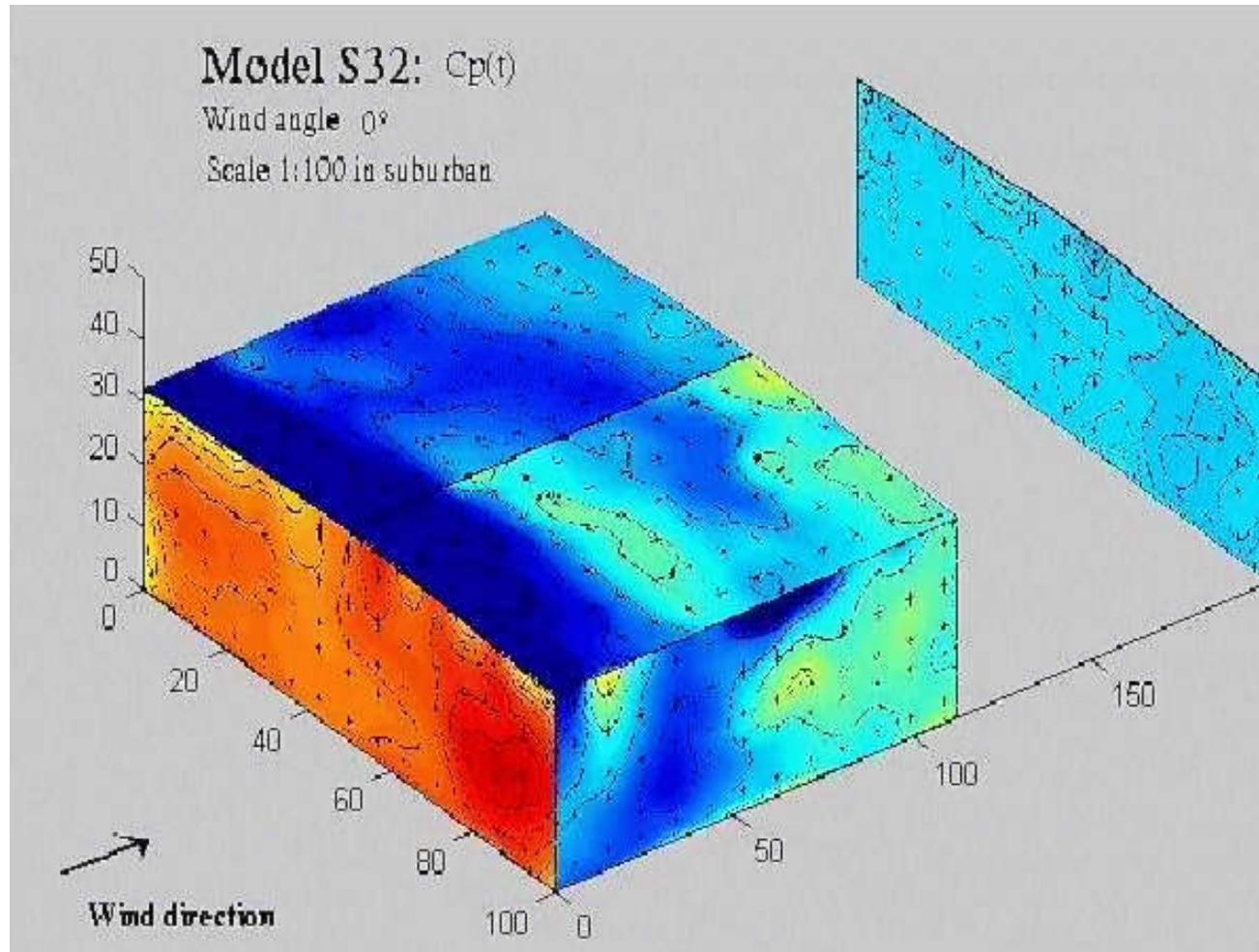
Strömungsfeld bei festgelegter Ablösestelle



Grundlagen Windlasten

Bauwerksumströmung – Halle (Forts.)

Bergische Universität
Wuppertal



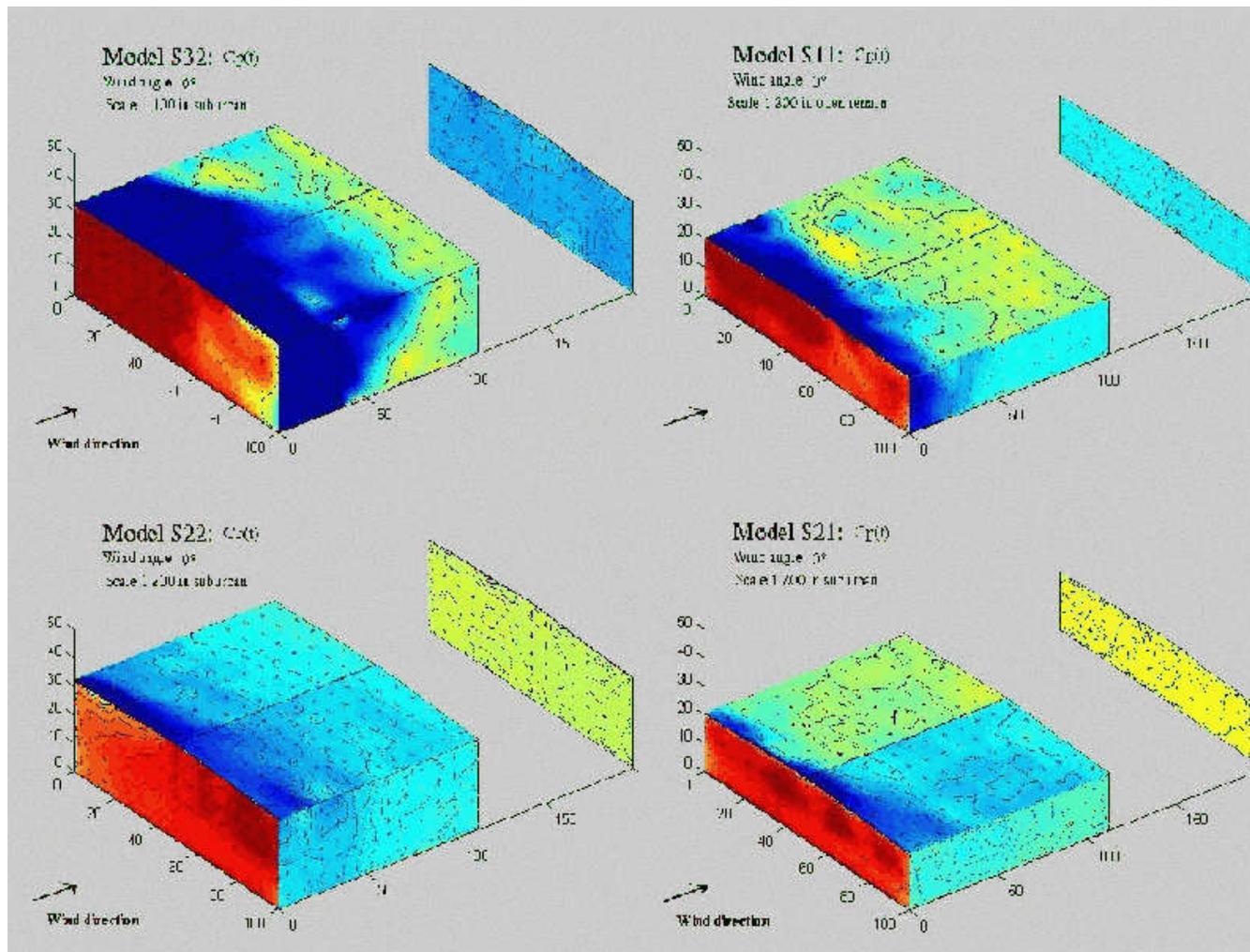
from: Simiu, E, Gioffre, M.: Wind risks. Socrates Intensive Programme, Florence, 2008



Grundlagen Windlasten

Bauwerksumströmung – Halle (Forts.)

Bergische Universität
Wuppertal



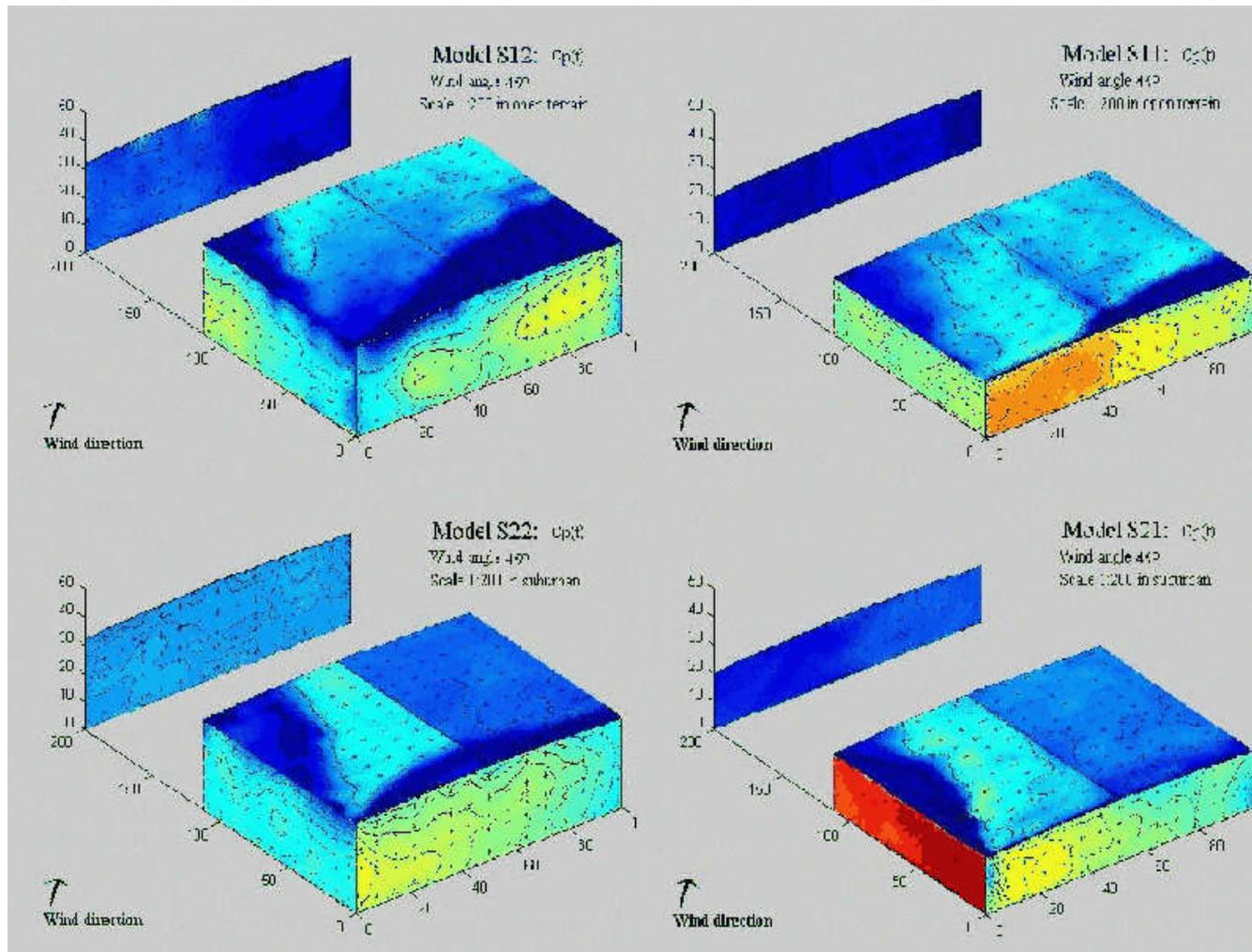
from: Simiu, E, Gioffre, M.: Wind risks. Socrates Intensive Programme, Florence, 2008



Grundlagen Windlasten

Bauwerksumströmung – Halle (Forts.)

Bergische Universität
Wuppertal



from: Simiu, E, Gioffre, M.: Wind risks. Socrates Intensive Programme, Florence, 2008

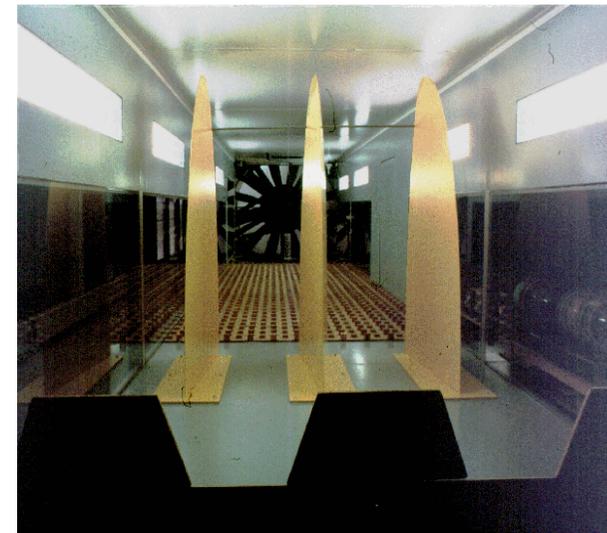
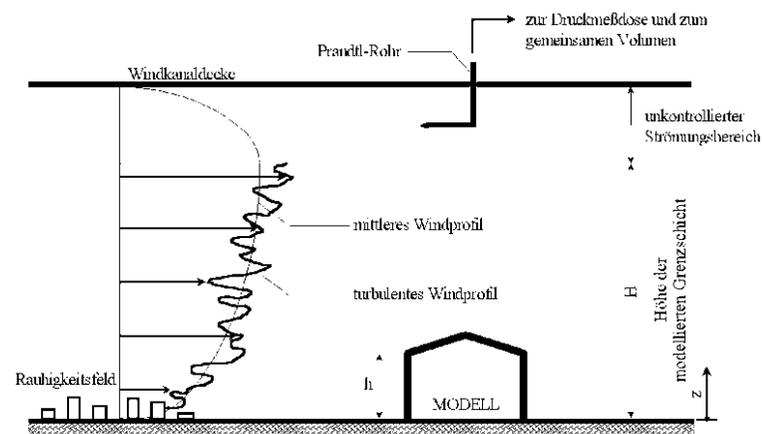
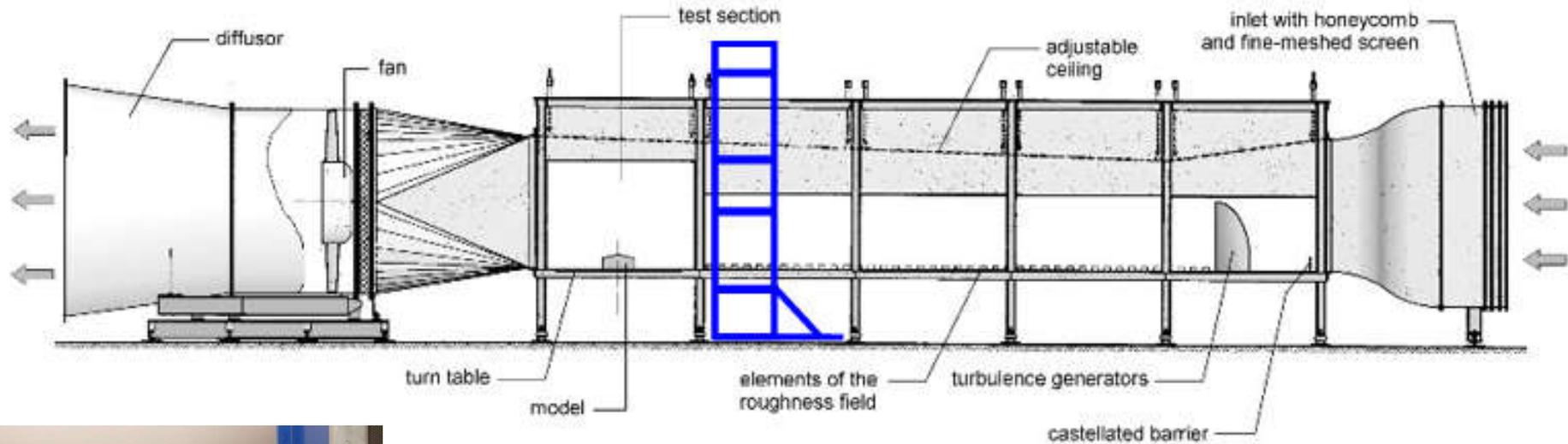


Grundlagen Windlasten

Windkanalversuche

Grenzschichtwindkanal an der Ruhr-Universität Bochum

Bergische Universität
Wuppertal



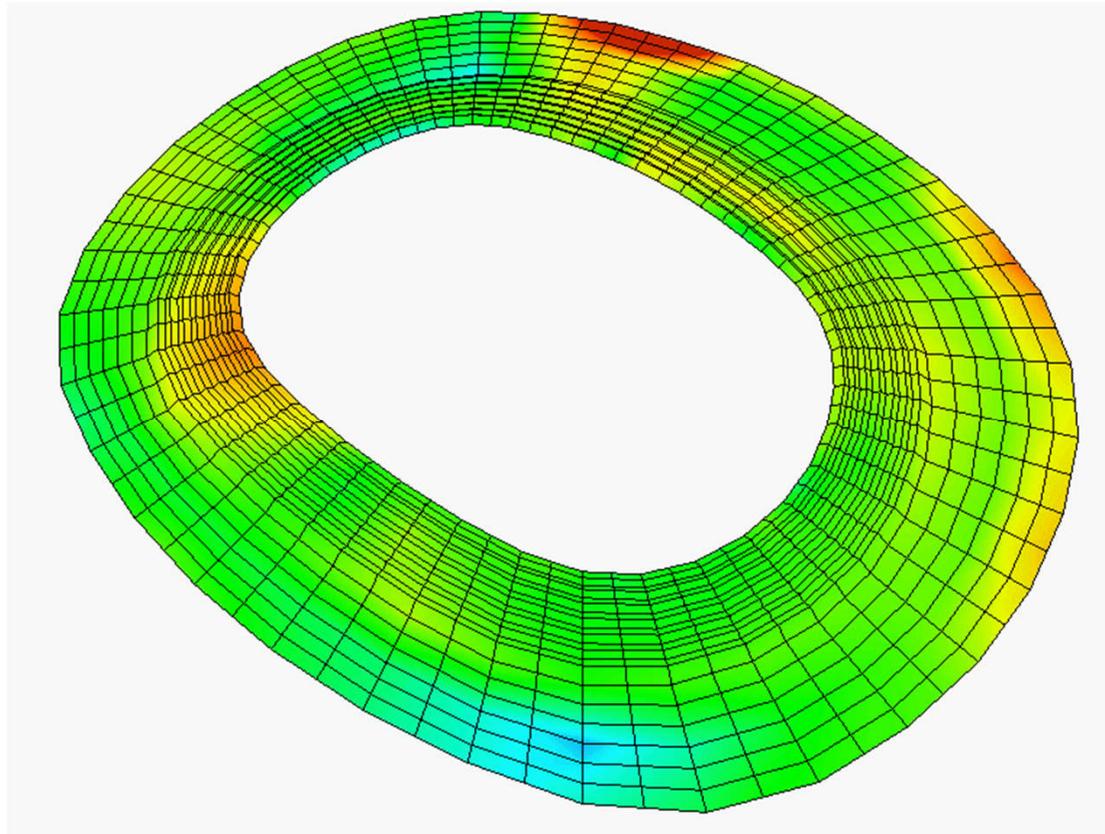


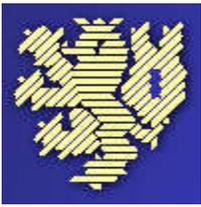
Bergische Universität
Wuppertal

Grundlagen Windlasten

Windkanalversuche
Stadion Hannover

- **Druckmessungen an der Dachkonstruktion**





Grundlagen Windlasten

Windkanalversuche
Hochhaus GAP 15, Düsseldorf

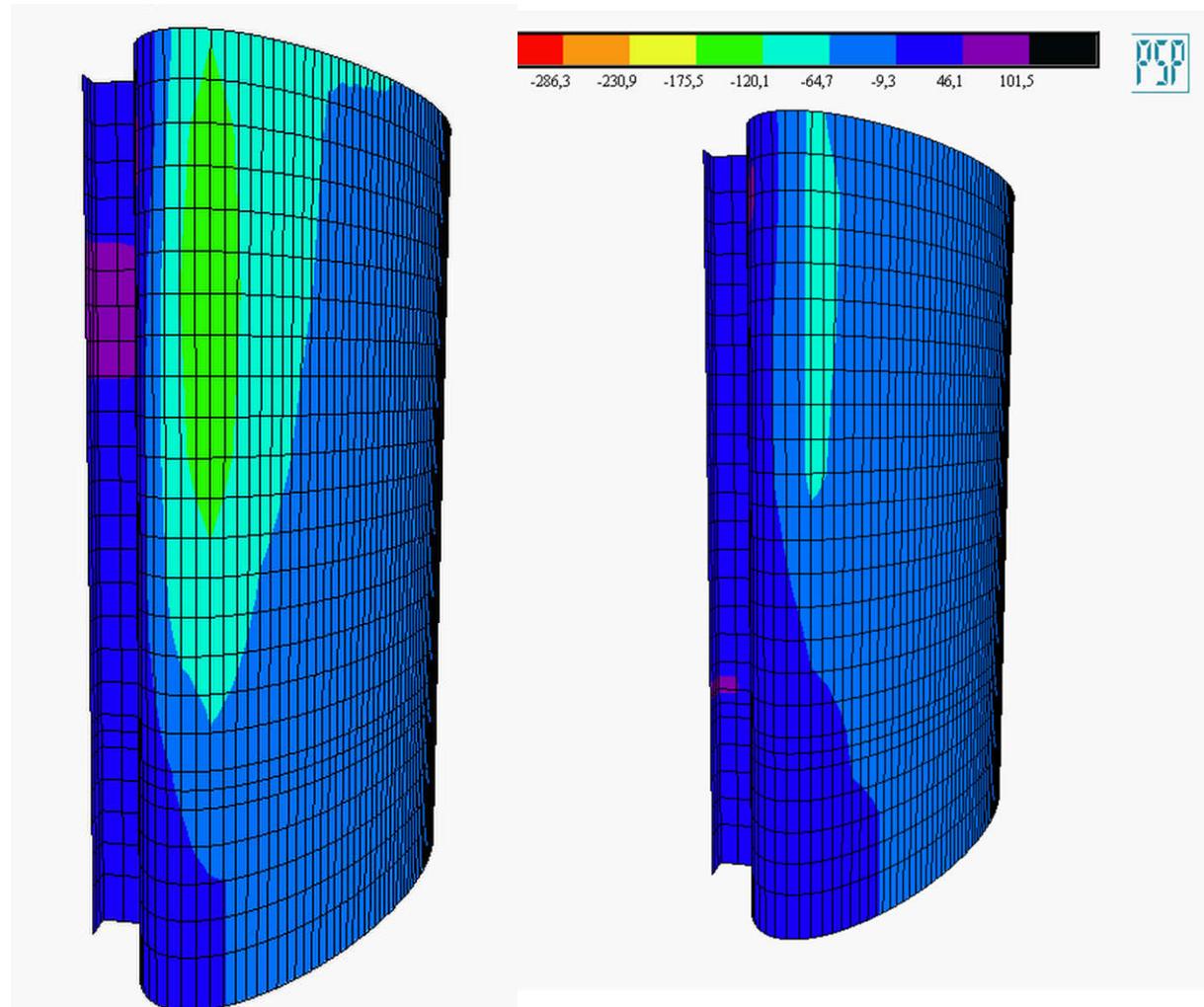
Bergische Universität
Wuppertal

Druckmessungen an der Fassade

Messung globaler Kräfte

Optimierung Messstandort Windwächter

Druckmessungen am Flugdach



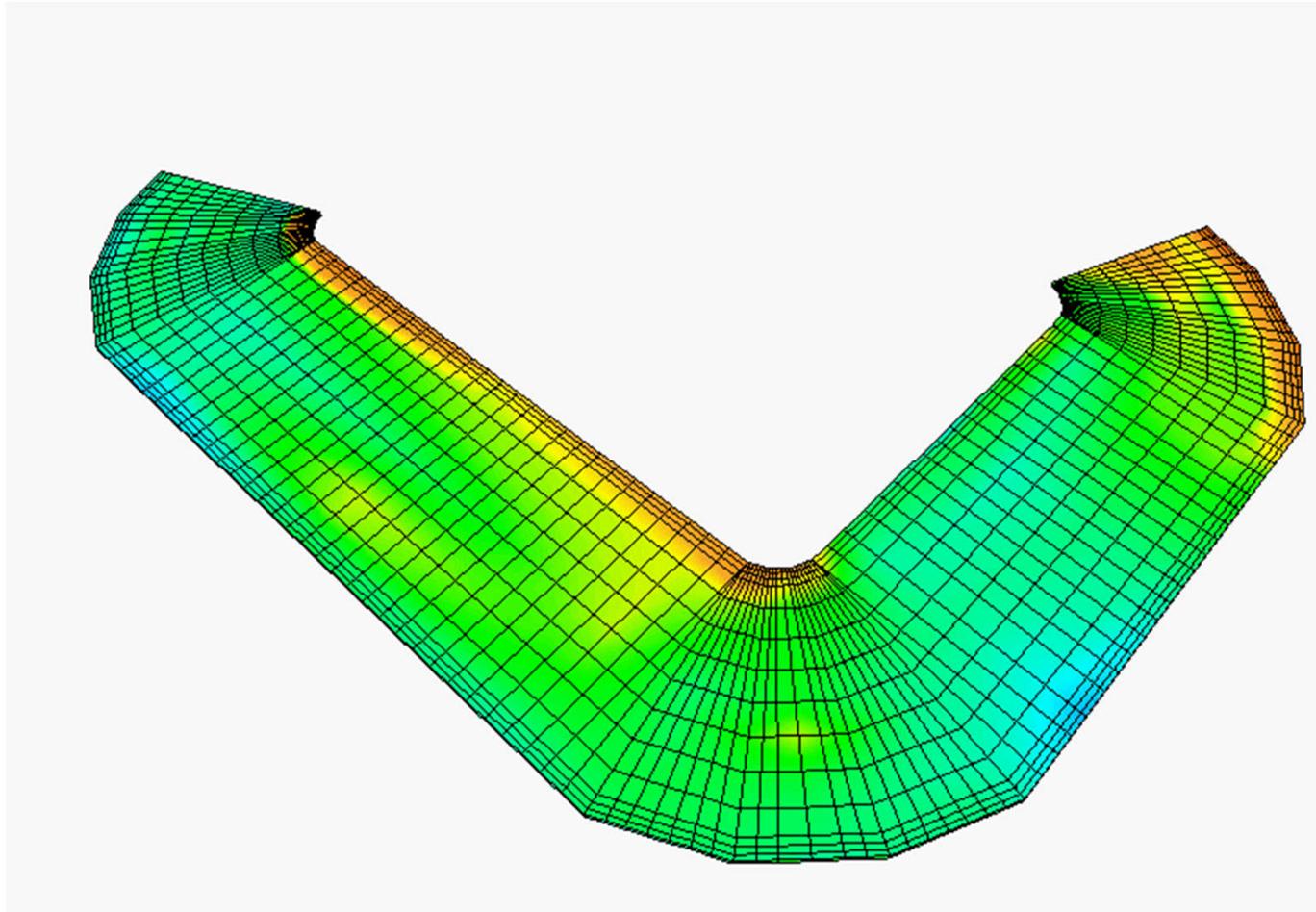


Bergische Universität
Wuppertal

Grundlagen Windlasten

Windkanalversuche

Stadion Mönchengladbach



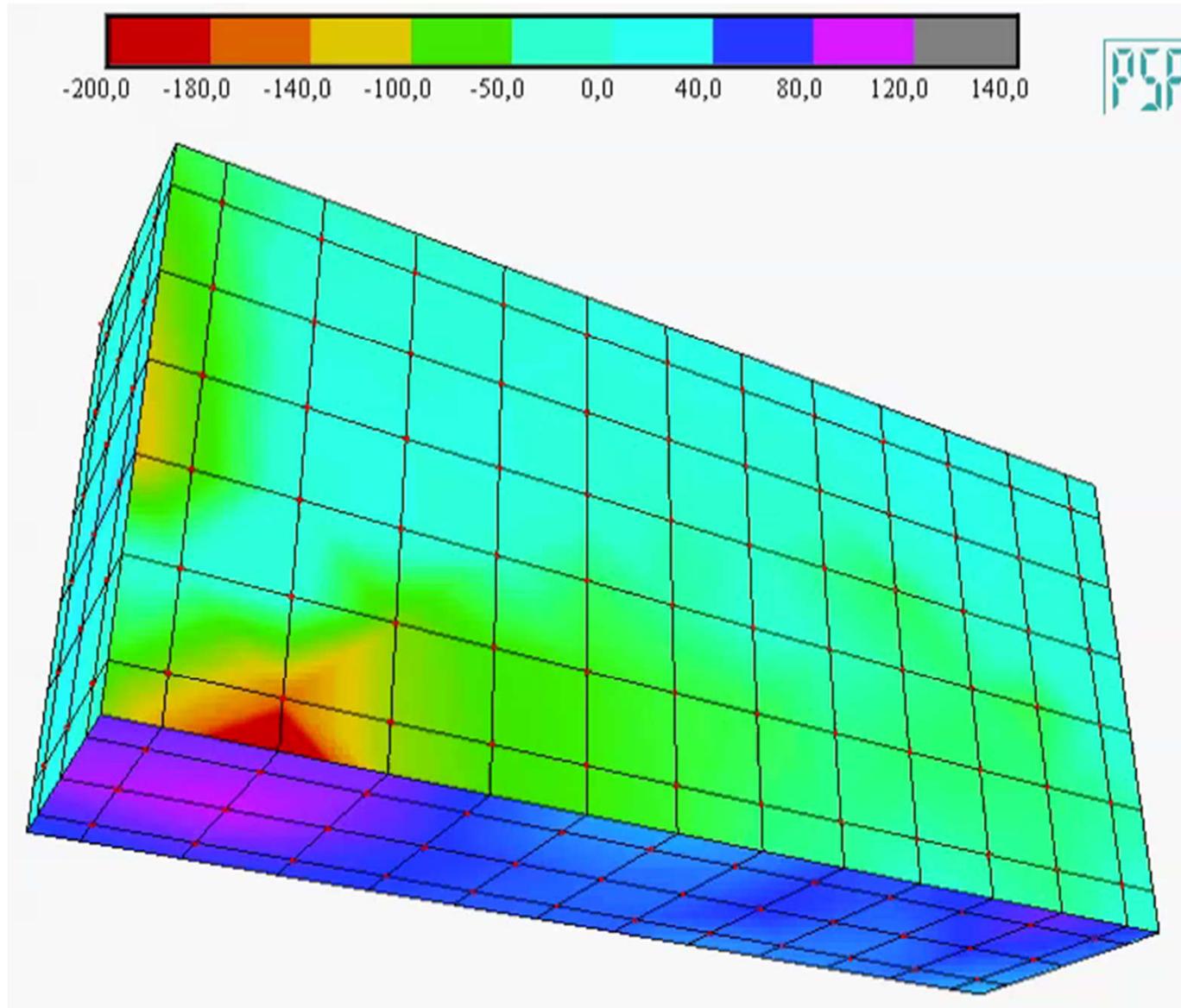
Druckmessungen an der Dachkonstruktion

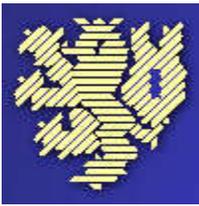


Grundlagen Windlasten

Aerodynamische Zonen – physikalische Ursachen

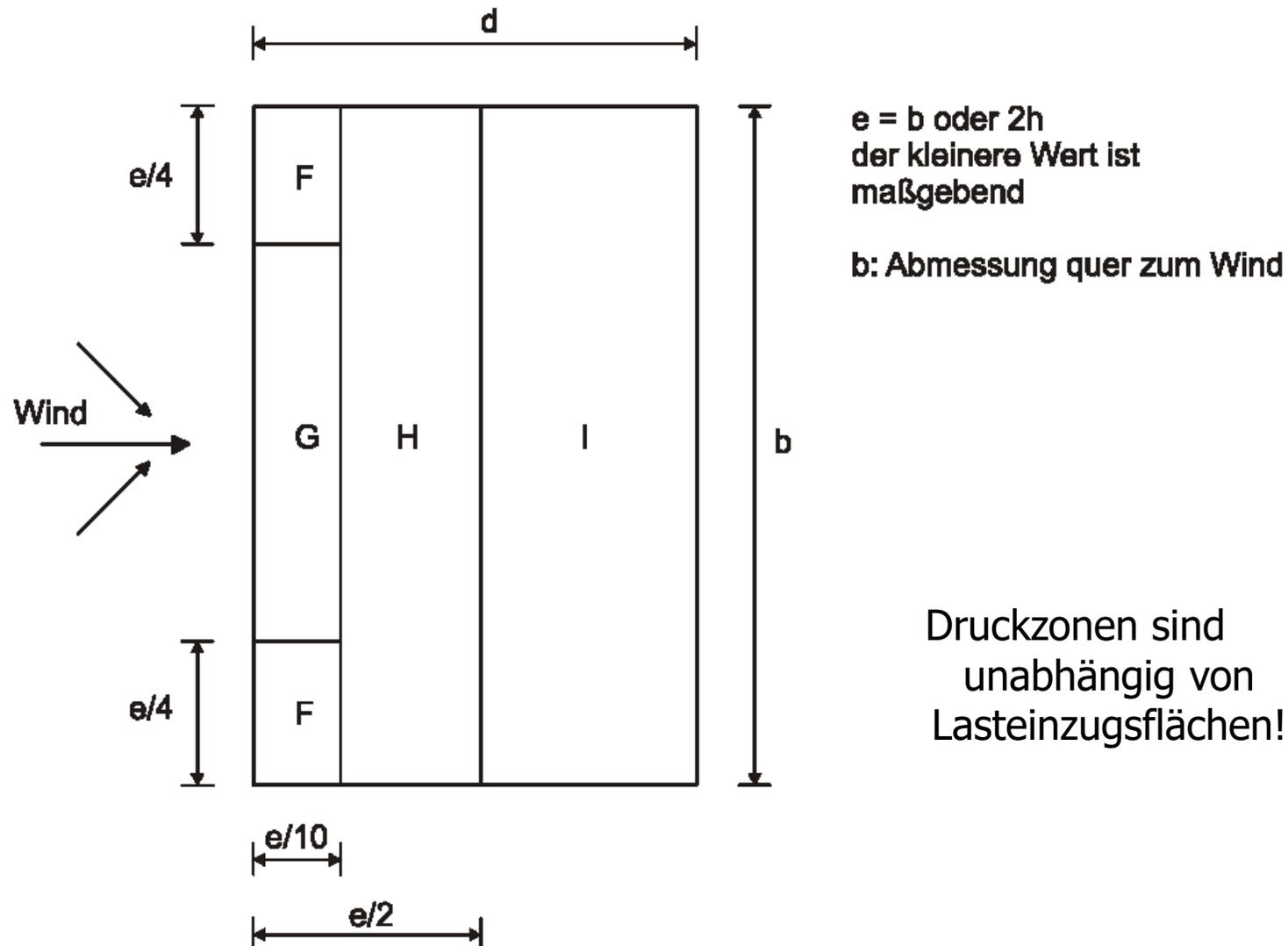
Bergische Universität
Wuppertal





Grundlagen Windlasten

Einteilung eines Flachdaches in Druckzonen (Bild 7.6)





Bergische Universität
Wuppertal

Grundlagen Windlasten

Beispielsammlung

[Beispielsammlung Praxisseminar - Windlasten](#)