Djelovanje vjetra na građevinske konstrukcije

-utjecaj vjetra na stabilnost građevinske konstrukcije
-utjecaj vjetra na sigurnost prometa
-utjecaj vjetra na pronos tvari (ekologija)
- ...

Vladajuće jednadžbe

Osnovni zakoni koji vrijede za opisivanje opstrujanja zraka oko tijela malim brzinama su:

a) zakon održanja mase,
b) II Newtonov zakon i
c) prvi zakon termodinamike

+ konstitutivne jednadžbe za zrak

+ rubni i početni uvjeti

Proučavat će se opstrujavnje oko tijela za male brzine zraka u kojima ne dolazi do njegove stišljivosti odnosno promatrat će se pojave vezane za brzine strujanja do 0.4 Macha tj. do v =134 m/s.

Zakon održanja mase

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0$$

pri čemu je:
ρ gustoća fluida
v vektor brzine

Drugi Newtonov zakon

$$\rho\left(\frac{dv}{dt}\right) = \rho F_B + F_s$$

F_B volumna sila po jedinici mase
F_S površinska sila

Derivacija brzine se sastoji od lokalne i konvektivne komponente

$$\rho\left(\frac{dv}{dt}\right) = \rho\left(\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla)\, v\right)$$

Uvrštavanjem Stokesovog zakona za opis površinskih sila dobiva se Navier-Stokesova jednadžba

$$\rho\frac{d\vec{v}}{dt} = \rho\vec{R} - grad\ \ p + \mu\nabla^2\vec{v}$$

Prvi zakon termodinamike

(matematički zapis principa održanja energije)

$$\rho \frac{\partial}{\partial t}\left(C_v T + \frac{v^2}{2}\right) + \rho v \cdot \nabla\left(C_v T + \frac{v^2}{2}\right) =$$

$$\rho g \cdot v - \nabla \cdot pv + \nabla \cdot \left[2\mu\nabla\left(\frac{v^2}{2}\right) + \mu(\nabla \times v)\times v \; - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot v)v\right] + \nabla \cdot k\nabla T$$

pri čemu je:

T	temperatura
Cv	specifična toplina
k	termalna provodljivost

Najbolji pristup rješavanju praktički svih aerodinamičkih problema se zasniva na odgovarajuće kombiniranim rezultatima eksperimentalnih istraživanja, teoretskih razmatranja te numeričkih simulacijama na računalu usmjeravanih iskustvom.

Karakteristike zraka

Gustoća zraka

$$\rho_a = \left(\frac{0.0034847}{T}\right)\left(p - 0.003796\, R_h\; e_s\right)$$

R_h relativna vlaga
T temperatura (^{0}K)
p tlak (Pa)

Napon vodenih para

$$e_s = (1.7526\times10^{11})\, e^{\left(-5315.56/T\right)}$$

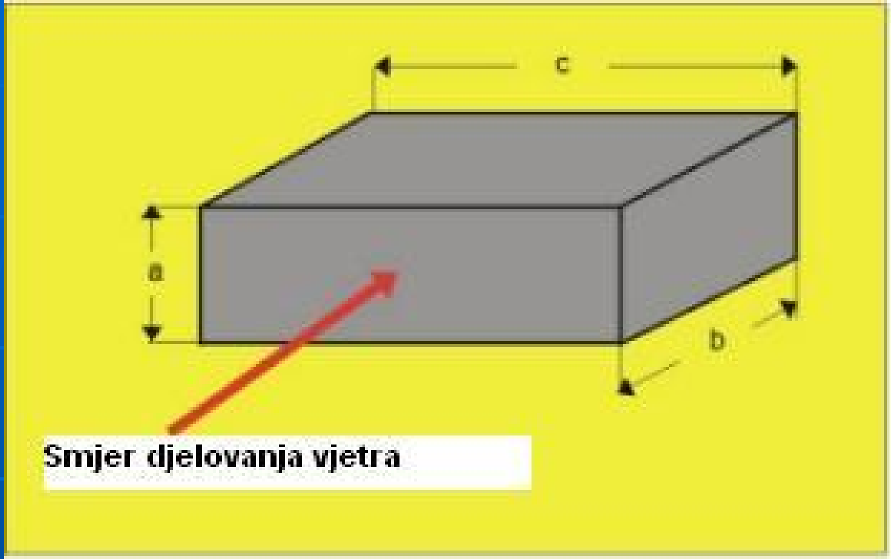
Standardne (prosječne) karakteristike zraka

Karakteristike zraka	
Gustoća	1,225 kg/m^3
Tlak	101 325 Pa [N/m^2]
Viskoznost μ	1.791×10^{-6} kg/m-s
Kinematska viskoznost ν	1.44×10^{-5} m^2/s

Aerodinamičko opterećenje od vjetra

$$F = c_f \ \rho \ A \frac{v^2}{2}$$

$$q_{ref} = \rho \frac{v^2}{2}$$



Na građevinske strukture djeluju sile vjetra koje ovise o obliku strukture i jačini vjetra. Generalno, djeluju tlačne, usisne i sile trenja.

Ukupna sila djelovanja vjetra dana je u formi:

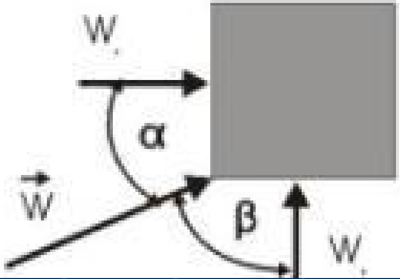
$$W = c_f \, q \, A$$

Cf - bezdimenzionalni aerodinamički koeficijent (za jednostavne oblike vrijennosti su dane u tablicama normi)

Pri djelovanju kutne devijacije (odmaka) vektora brzina od geometrijskih osi tijela komponente ukupne sile u smjeru osi tijela (x,y) izražene su kao:

$$W_x = |\vec{W}| \cdot \cos\alpha$$

$$W_y = |\vec{W}| \cdot \cos\beta$$



Sile otpora oblika

Sile vjetra na strukturu
(definicija preuzeta iz EUROCODE 1, dio2.4 ; 6.6)

dinamički koeficijent povećanja pri vremenski promjenjivom intenzitetu djelovanja vjetra

referentna vremenski osrednjena (10min) dinamička komponenta tlaka na 10m visine iznad terena druge kategorije, povratnog perioda 50g.

ravninska projekcija strukture okomito na smjer djelovanja vjetra

$$F_W = q_{ref} \cdot c_e(z_e) \cdot c_d \cdot c_f \cdot A_{ref}$$

koeficijent okoline u kojem je uzeta u obzir konfiguracija terena, visina iznad tla i efekti turbulencije

koeficijent otpora oblika opstrujavane strukture

Sile otpora trenja

Sile trenja vjetra na strukturu
(definicija preuzeta iz EUROCODE 1, dio2.4 ; 6.6)

referentna vremenski osrednjena (10min) dinamička komponenta tlaka na 10m visine iznad terena druge kategorije, povratnog perioda 50g.

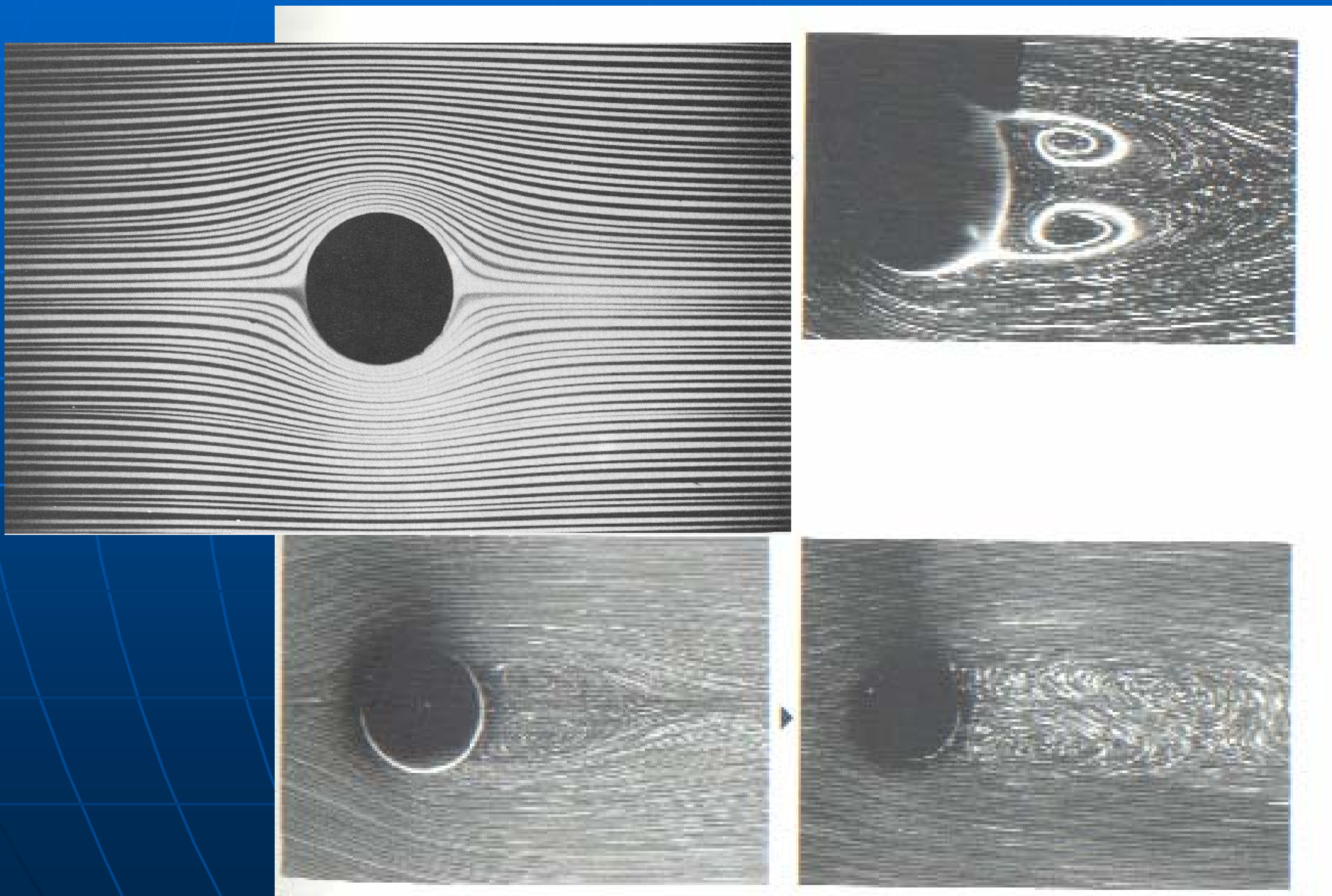
površina strukture u smjeru djelovanja vjetra

$$F_{fr} = q_{ref} \cdot c_e(z_e) \cdot c_{fr} \cdot A_{fr}$$

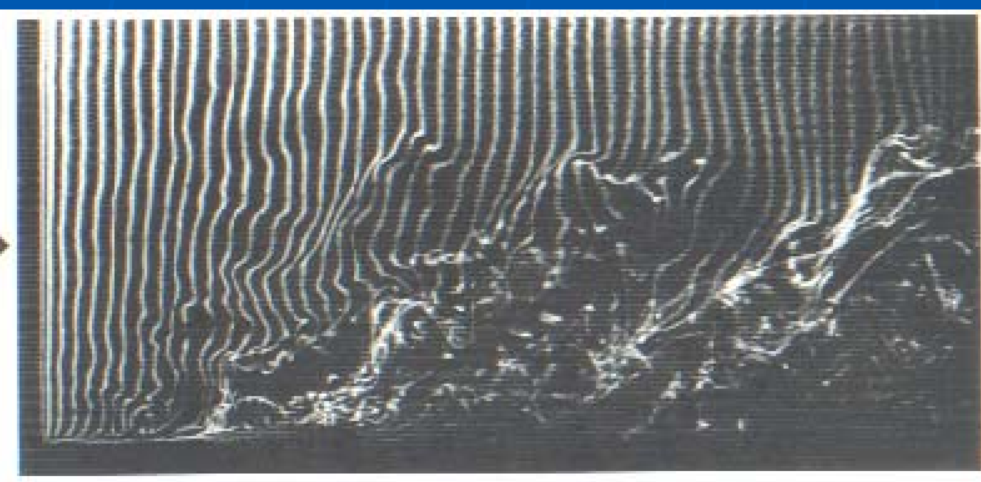
koeficijent okoline u kojem je uzeta u obzir konfiguracija terena, visina iznad tla i efekti turbulencije

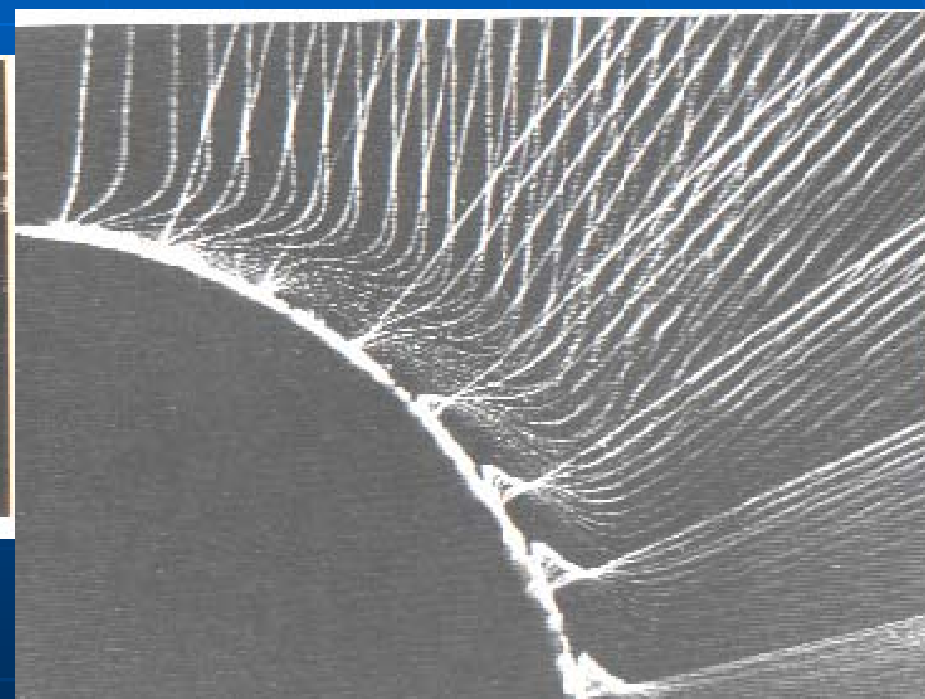
koeficijent otpora trenja pripadnog strukturnog oblika

Strujna slika u ovisnosti o Reynoldsovom broju

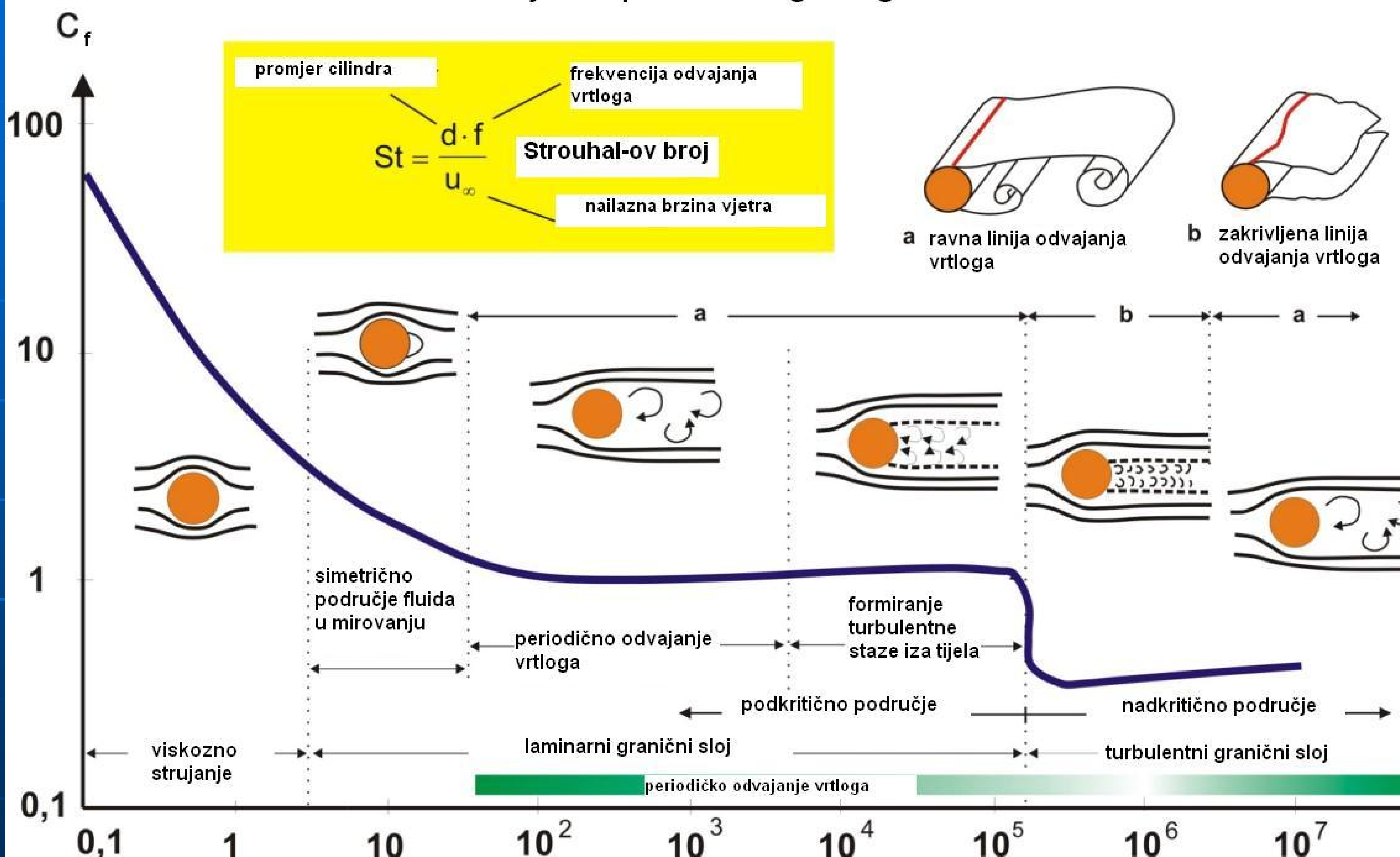


Formiranje i odvajanje graničnog sloja

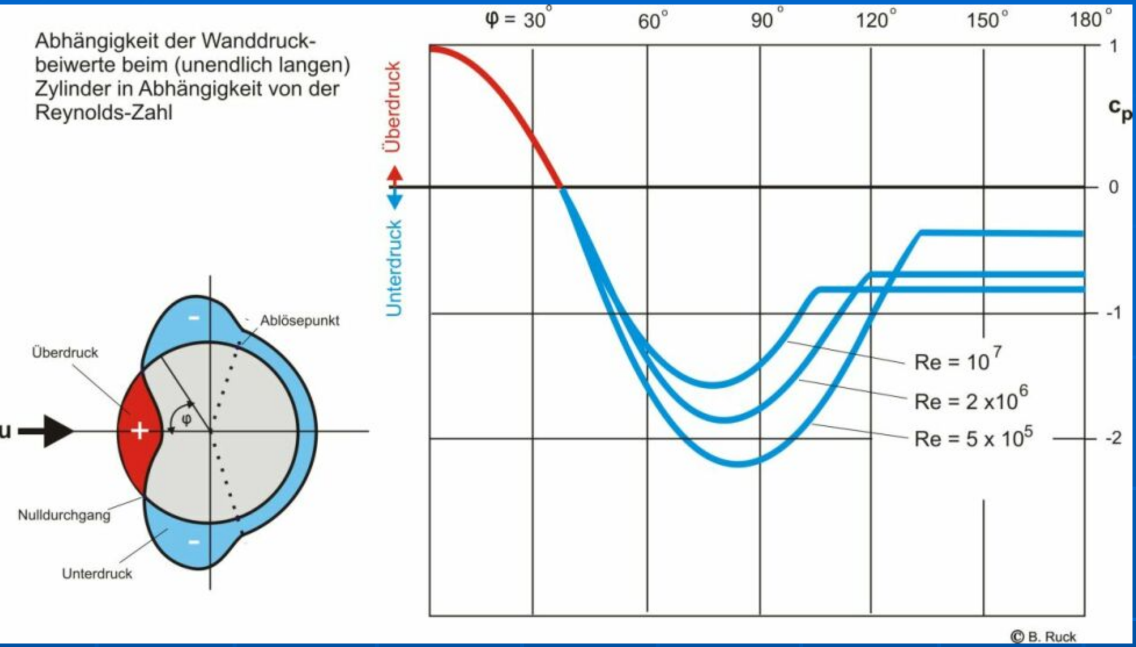


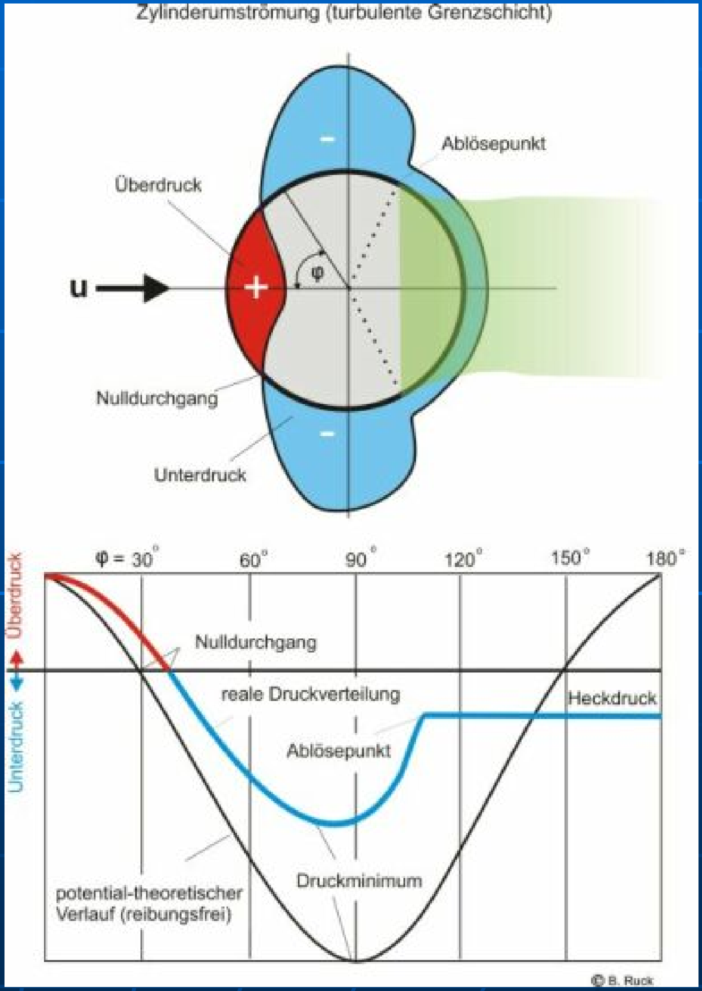


Koeficijent otpora oblika glatkog cilindra



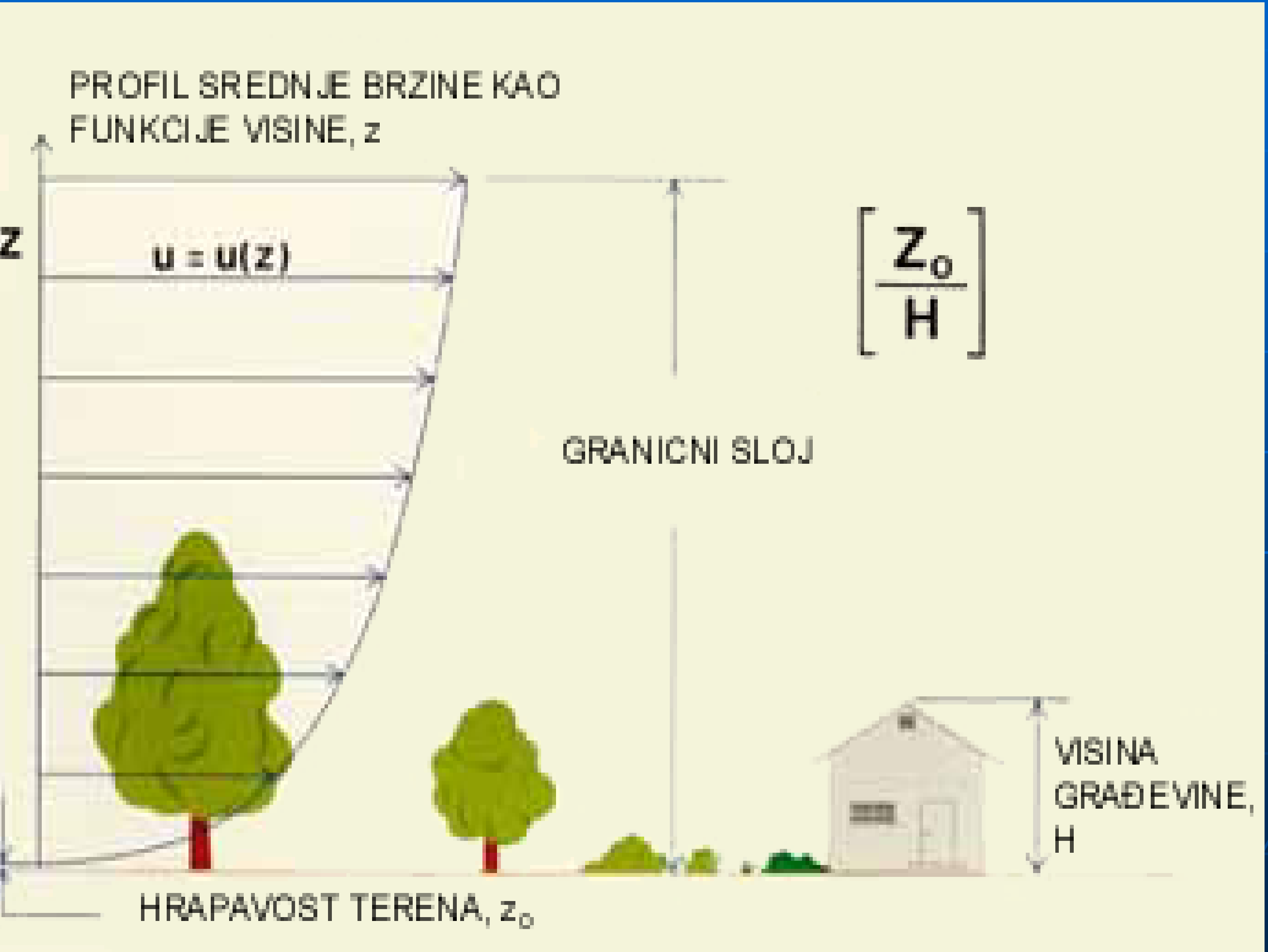
Jednoliko periodično odvajanje vrtloga pojavljuje se u područjima 60<Re<5000 i Re>3x10E+6





Film: zrak-optjecanje oko kugle

Razvoj graničnog sloja



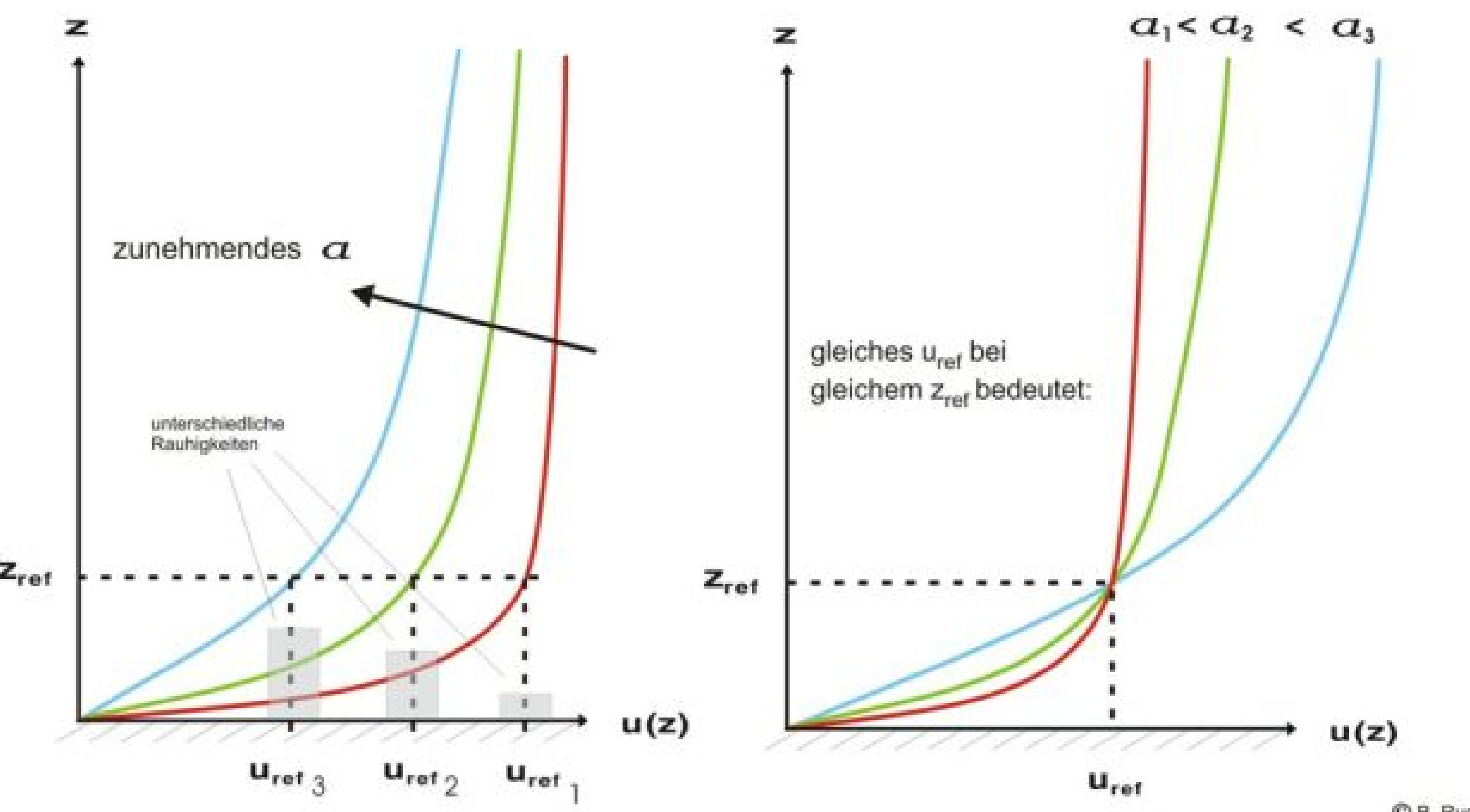
Exponentialgesetz des Windgeschwindigkeitsverlaufes mit der Höhe

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

Typische Werte:

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

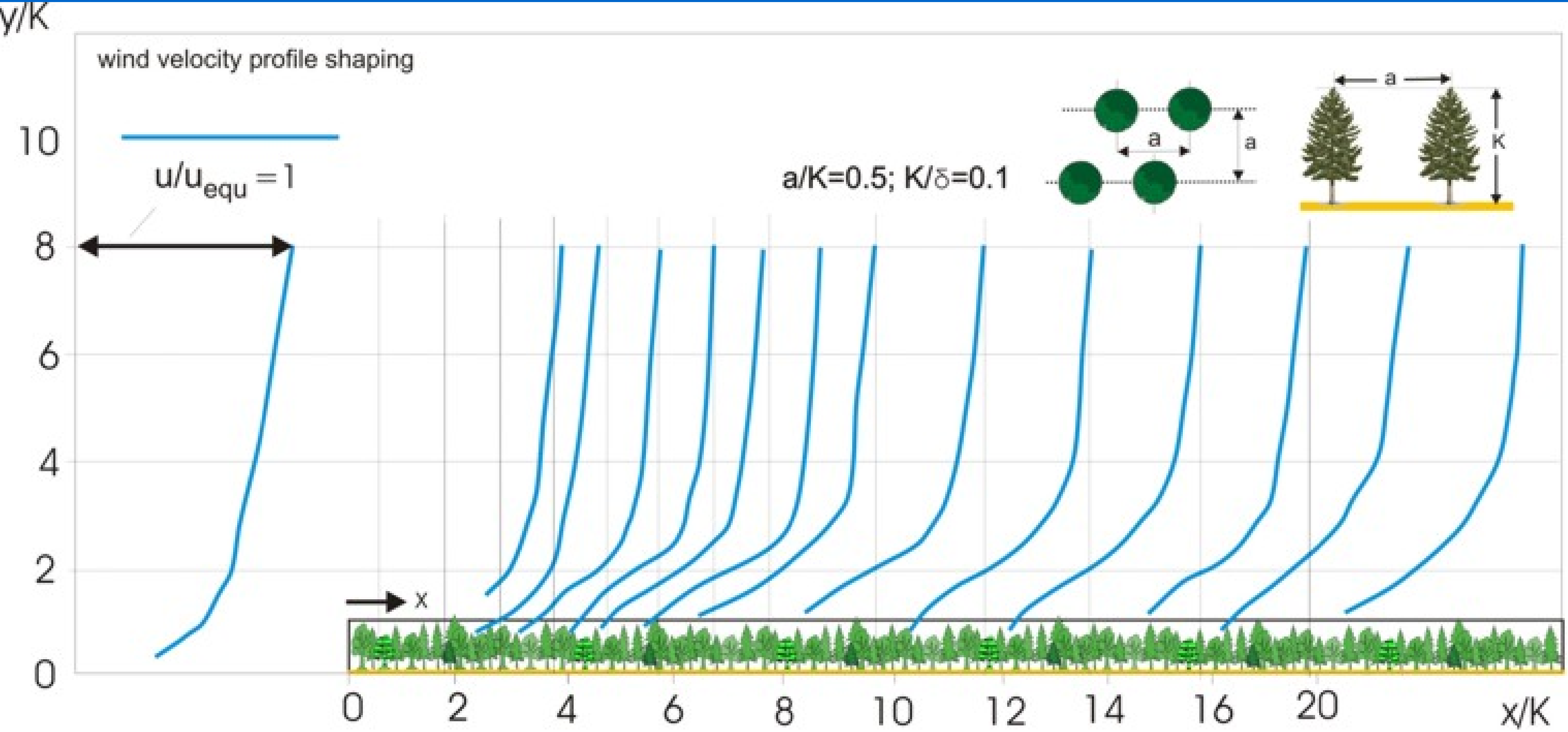
$$v_2 = v_1 \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^{\alpha}$$



Raspored brzine vjetra u graničnom sloju

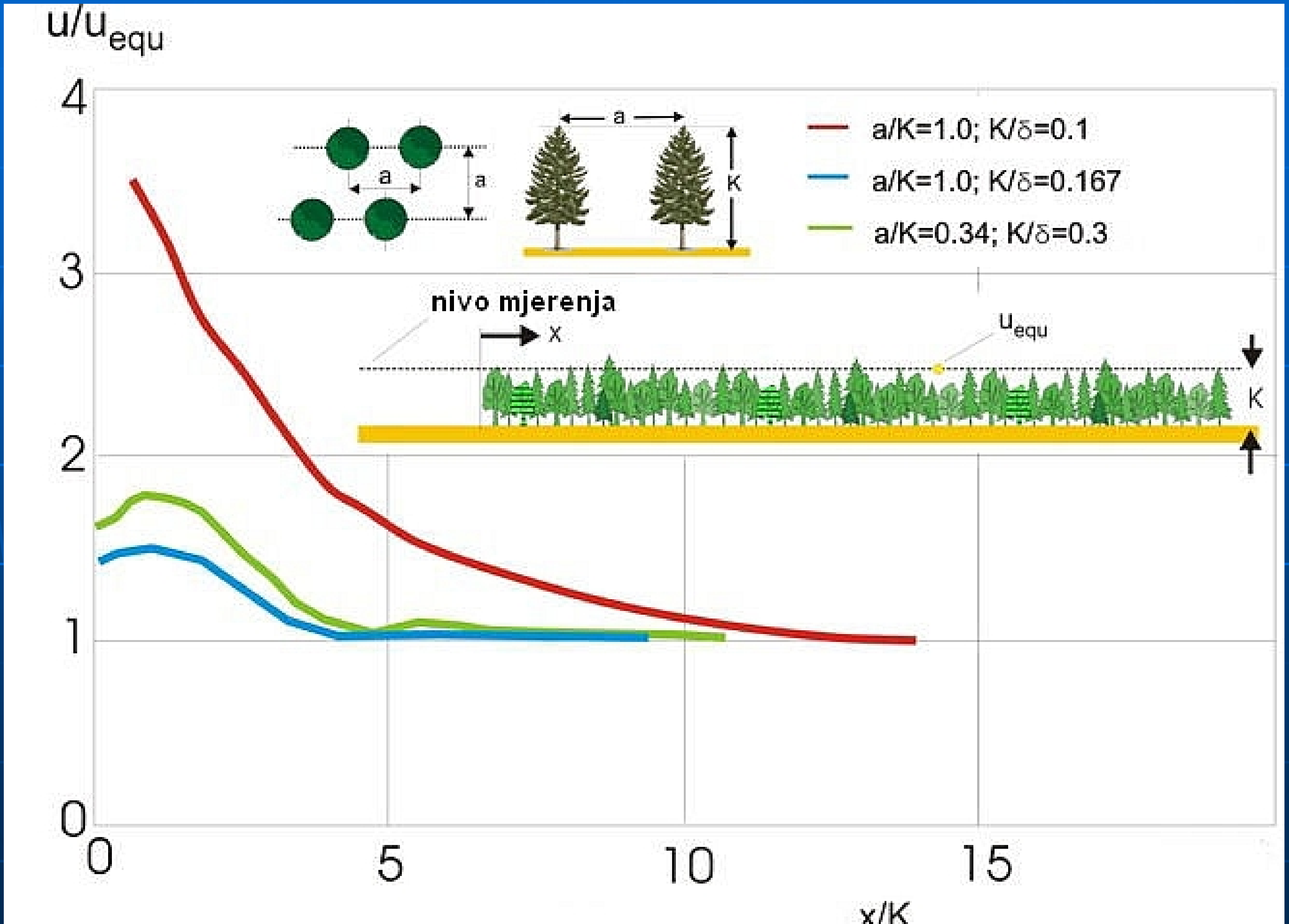
$$v_M = v_{10}\left(\frac{z_M}{z_{10}}\right)^{\alpha}$$

Vrsta povšine	α
Gradsko područje	0,4
Predgrađa	0,3
Pošumljeno područje	0,28
Uobičajeni pejzaž (livade sa šumarcima)	0,25
More	0,16

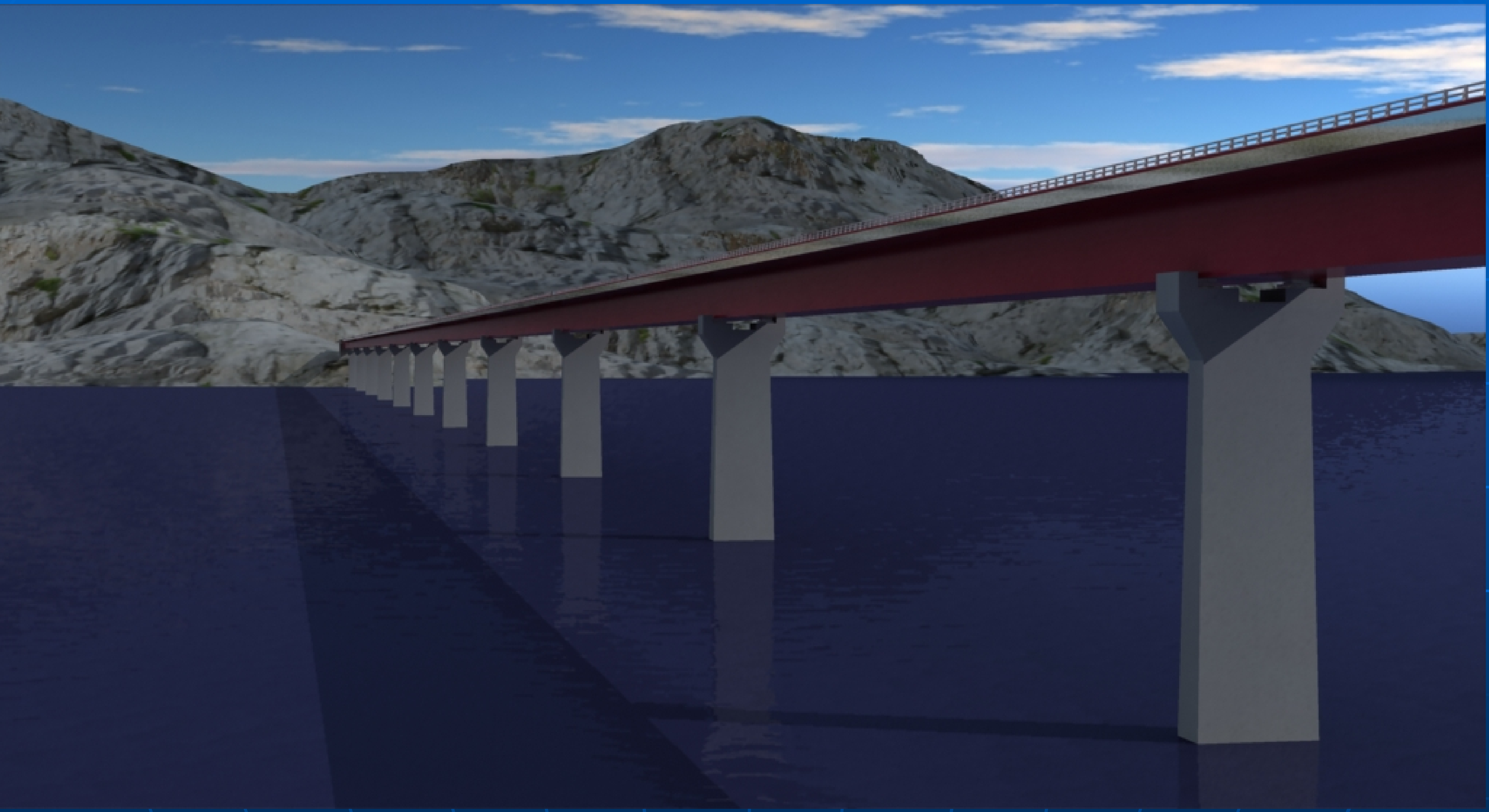


Mean wind velocity as a function of streamwise distance

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

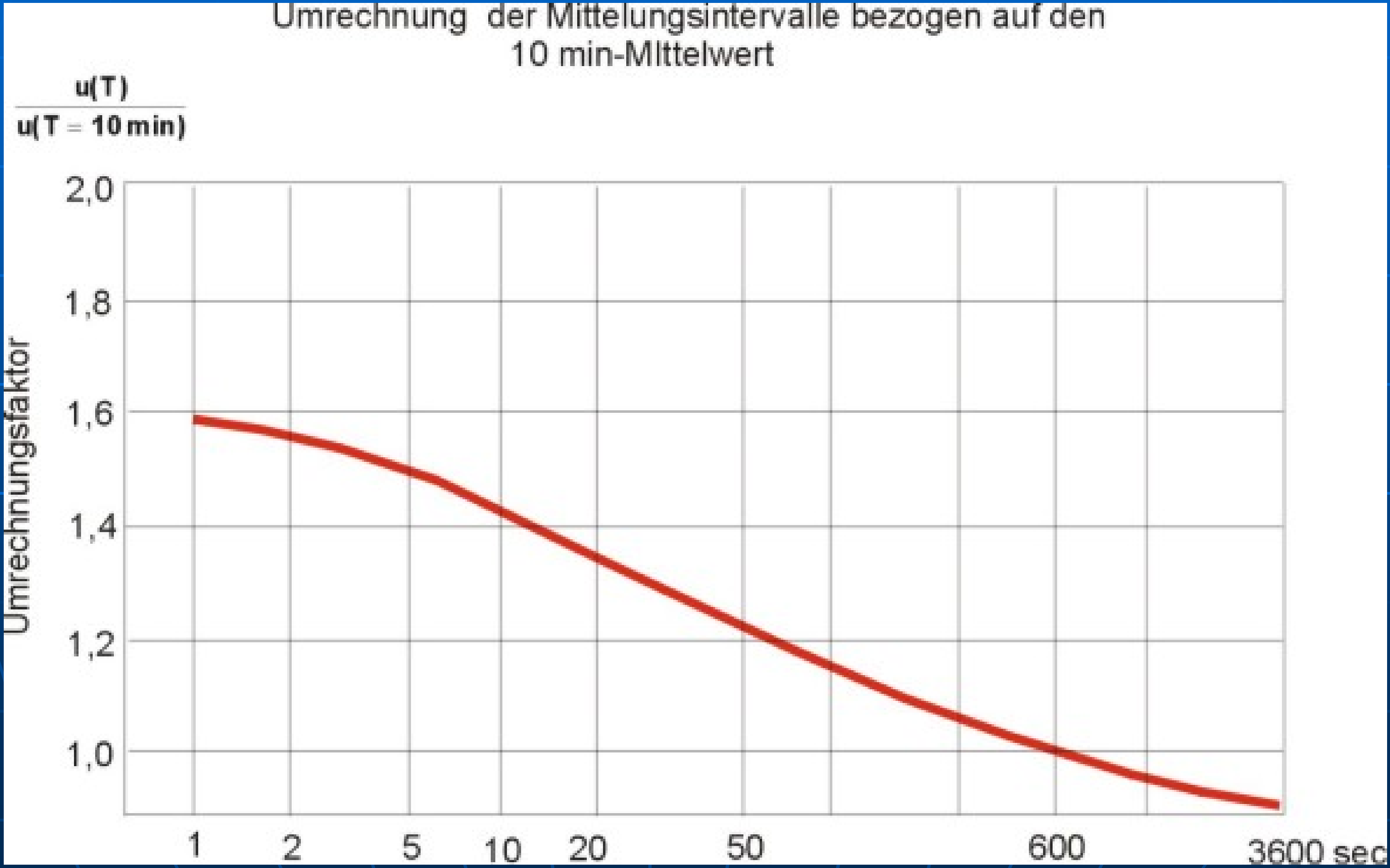

u/u_equ
4
3
2
1
0
0
5
10
15
x/K
a
a
a
K
a/K=1.0; K/δ=0.1
a/K=1.0; K/δ=0.167
a/K=0.34; K/δ=0.3
nivo mjerenja
x
u_equ
K

Most na Pelješac

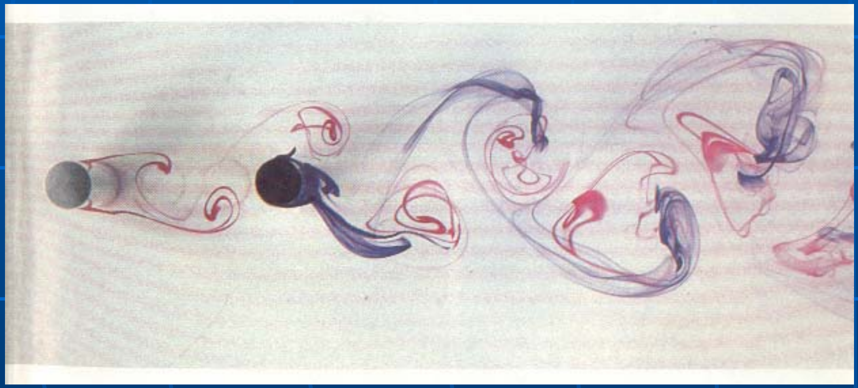


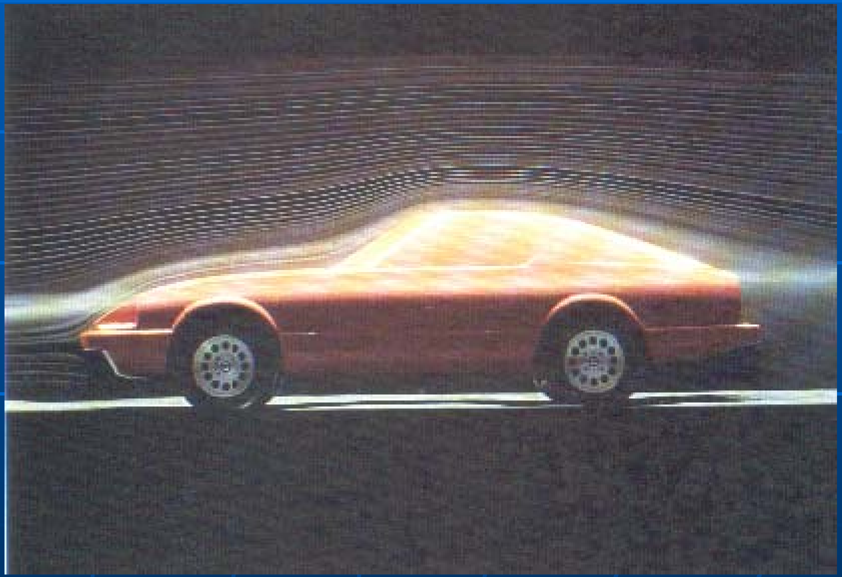
$$v_M = v_{10}\left(\frac{z_M}{z_{10}}\right)^{\alpha} = 25{,}3\left(\frac{40}{10}\right)^{0{,}16} = 31{,}25 \quad m/s$$

Utjecaj osrednjavanja brzine vjetra



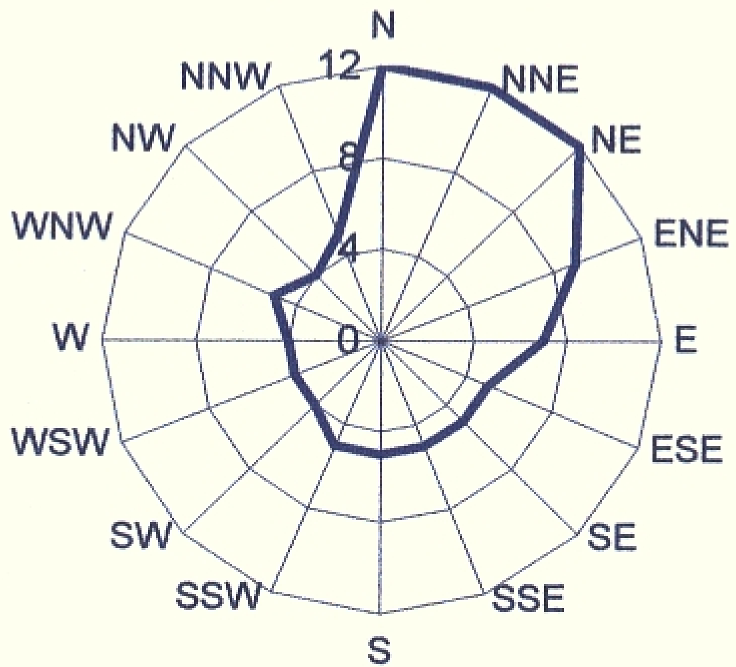
Karmanovi vrtlozi





Film: vort.mpg
Film: most_tacoma.avi
Film: most_Dubrovnik1 i 2
Film: Auto 1

Bura



Beauforova ljestvica

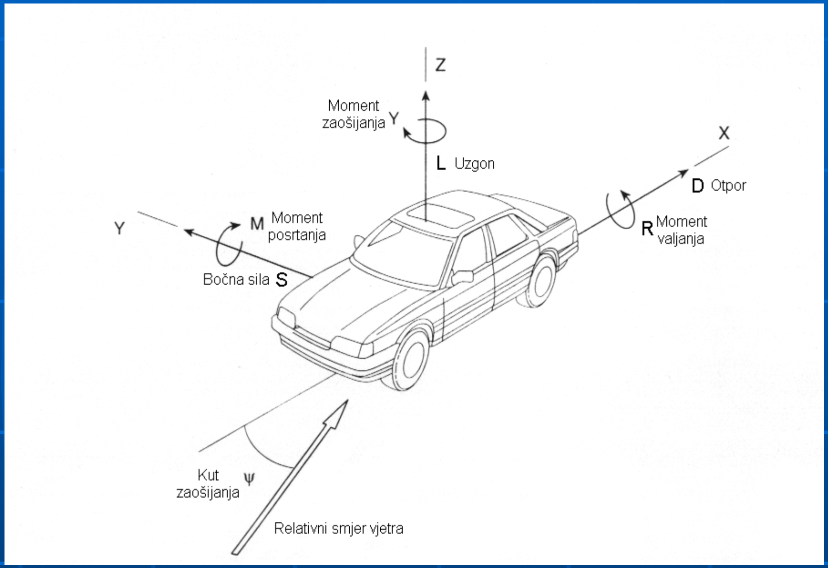
Bf	Opisni naziv	Srednja brzina		
		čv	ms^{-1}	kmh^{-1}
0	Tišina	<1	0-0.2	<1
1	Lahor	1-3	0.3-1.5	1-5
2	Povjetarac	4-6	1.6-3.3	6-11
3	Slabi vjetar	7-10	3.4-5.4	12-19
4	Umjereni vjetar	11-16	5.5-7.9	20-28
5	Oštri vjetar	17-21	8.0-10.7	29-38
6	Jaki vjetar	22-27	10.8-13.8	39-49
7	Žestoki vjetar	28-33	13.9-17.1	50-61
8	Olujni vjetar	34-40	17.2-20.7	62-74
9	Jaki olujni vjetar	41-47	20.8-24.4	75-88
10	Oluja	48-55	24.5-28.4	89-102
11	Žestoka oluja	56-63	28.5-32.6	103-117
12	Orkan	>64	> 32.7	>118

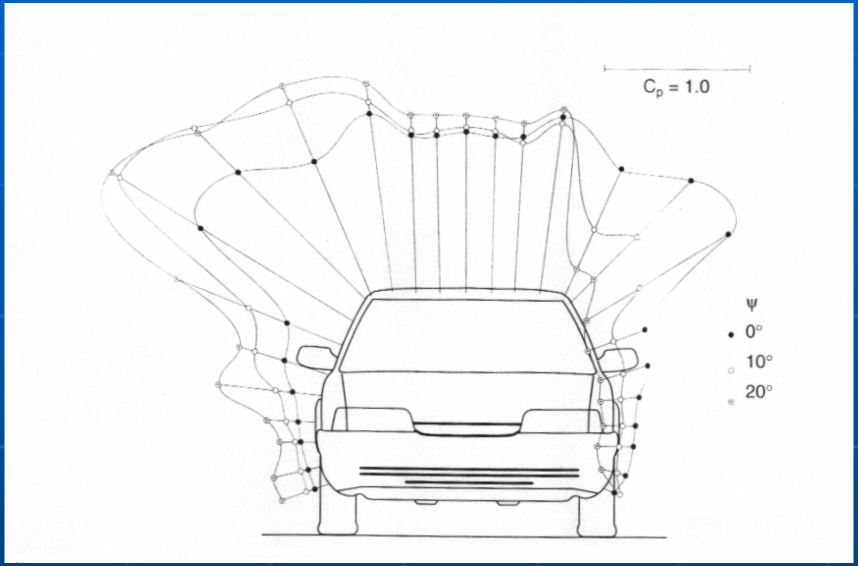
Kategorija	1	2	3	4	5
Tlak u središtu ciklone (hPa)	> 980	965-979	945-964	920-944	< 920
Brzina vjetra (m/sec)	33-42	43-49	50-58	59-69	> 69
Brzina vjetra (km/sat)	119-153	154-177	178-209	210-249	> 249
Visina valova (m)	do 1,5	do 2,4	do 3,7	do 5,5	> 5,5
Šteta	mala	umjerena	velika	vrlo velika	katastrofalna

Saffir-Simpsonova ljestvica ciklona

Film:Vjetar na mostu 1
Film:Vjetar na mostu 2

Sile i momenti na vozilo usljed djelovanja vjetra

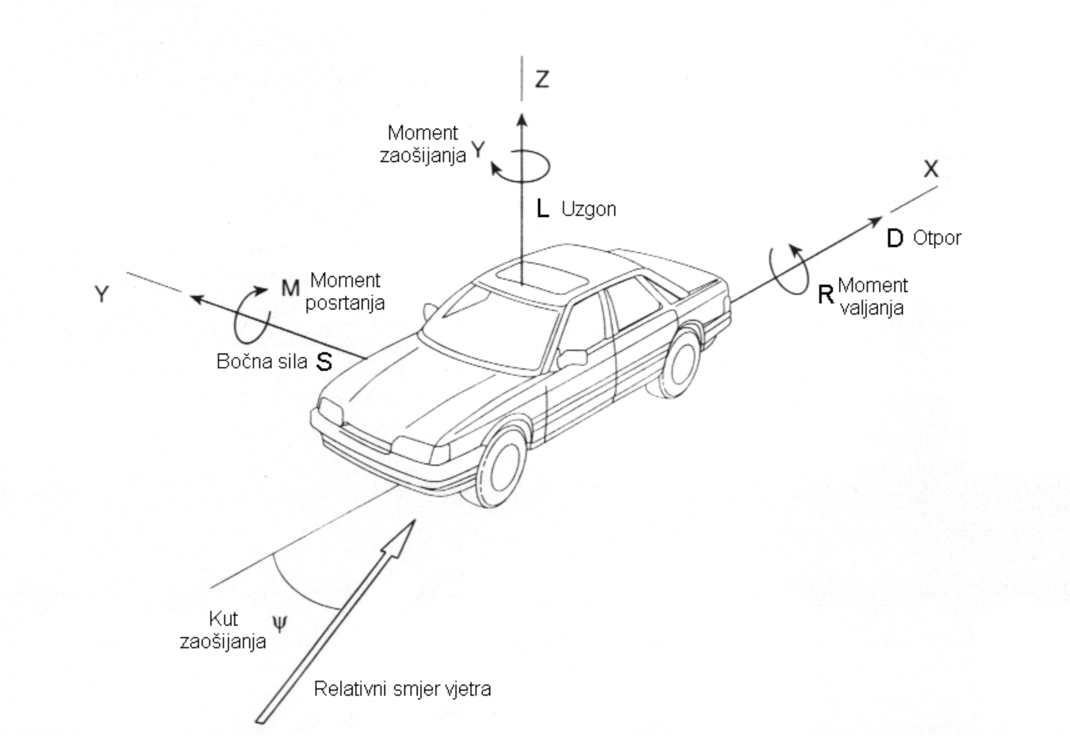


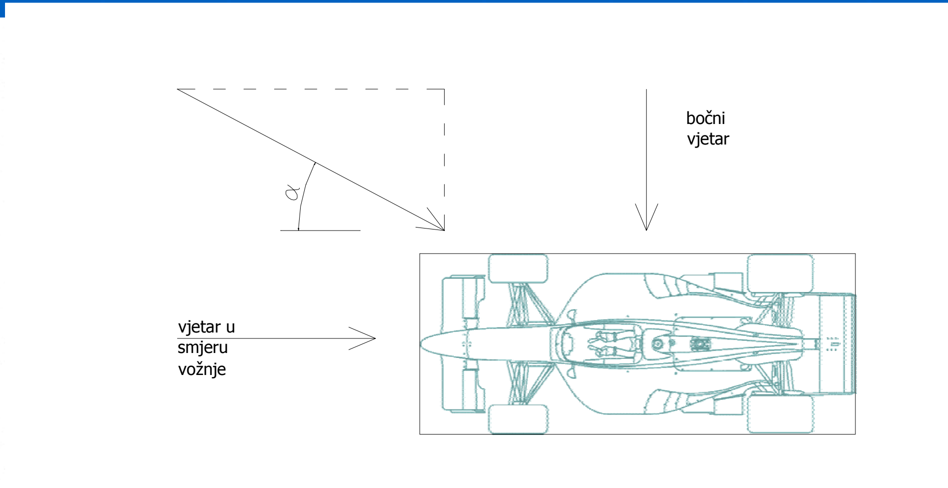


Uvjet prevrtanja
$$\frac{\rho}{2} v_r^{\,2} A\left(C_L \frac{t}{2} + C_R\, l\right) \geq W \frac{t}{2}$$

Uvjet zaošijanja
$$v_w = v_r \sin\psi = \sqrt{\frac{2W}{A\rho\left(C_L + 2\frac{l}{t} C_R\right)}}\, \sin\psi$$

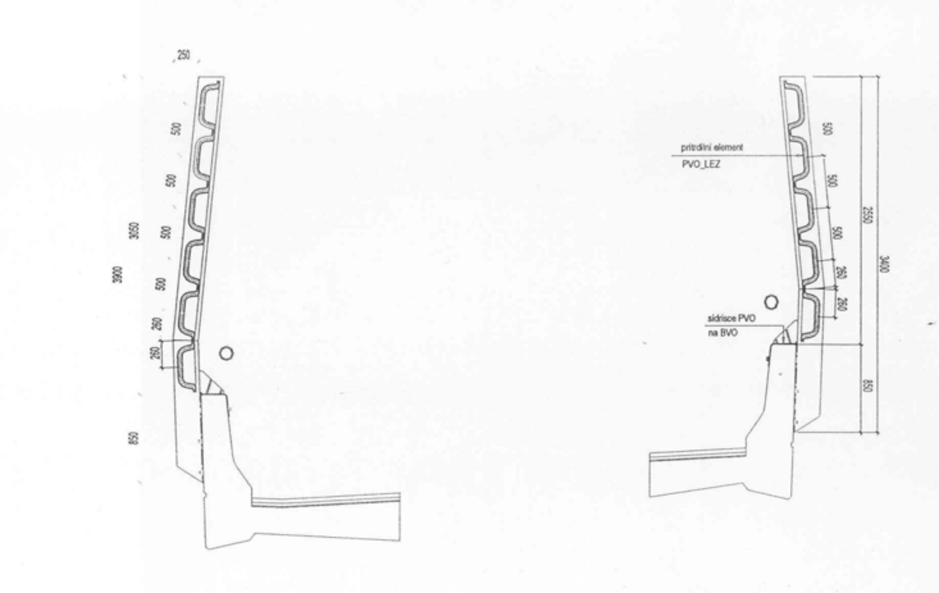
Homogenizirane brzine



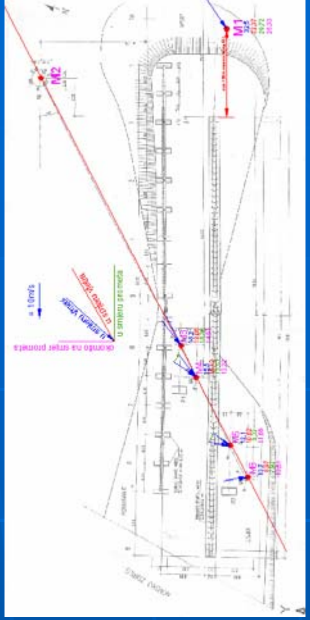


$$v_{HOM} = c_B \cdot (0{,}5 \cdot v_{MAX} + 0{,}5 \cdot v_{MAX} \cdot \sin\alpha) \leq 30 m/s$$

Vjetrobran (propusni)



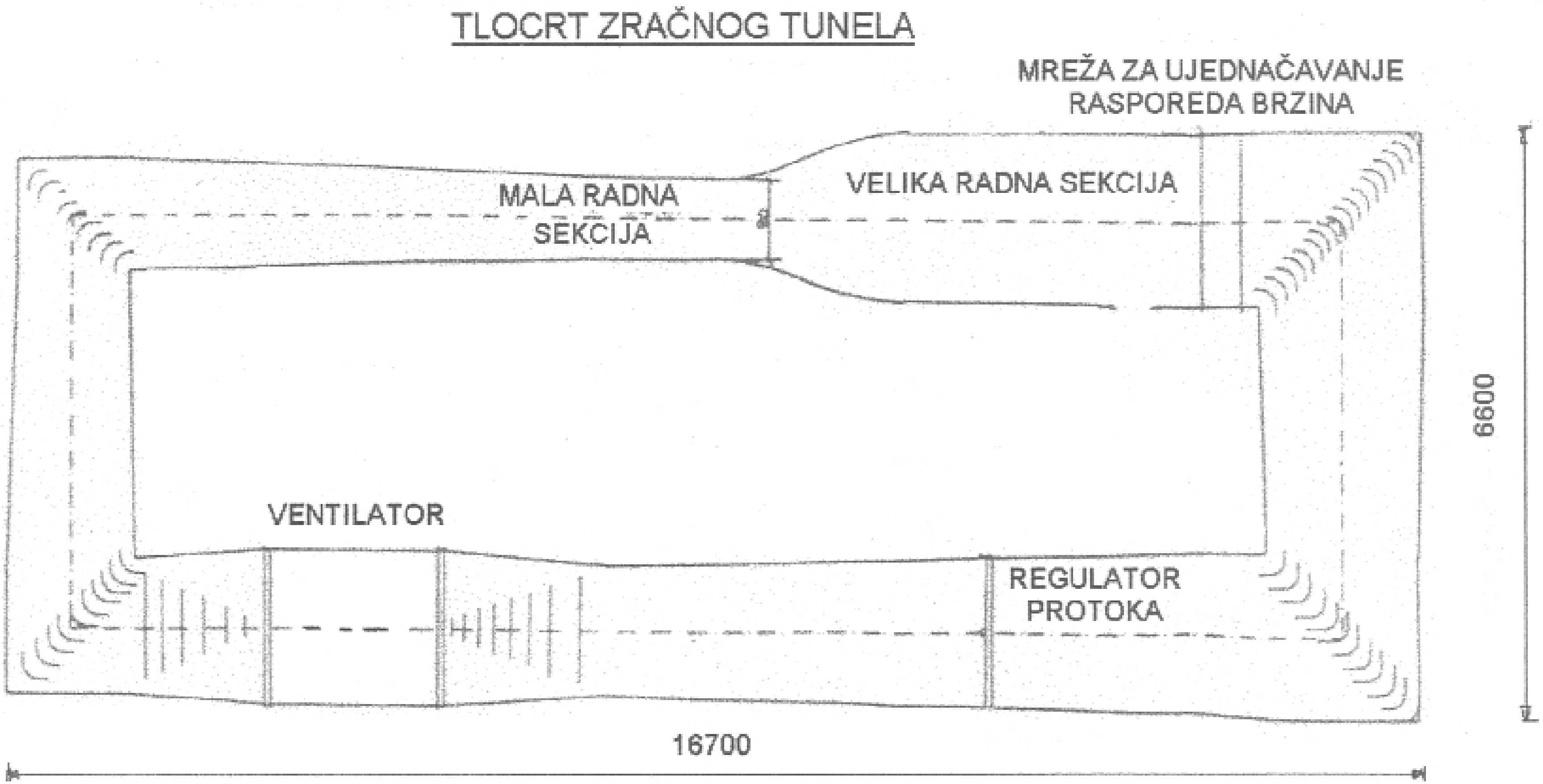
Vjetrobran (segmentni)

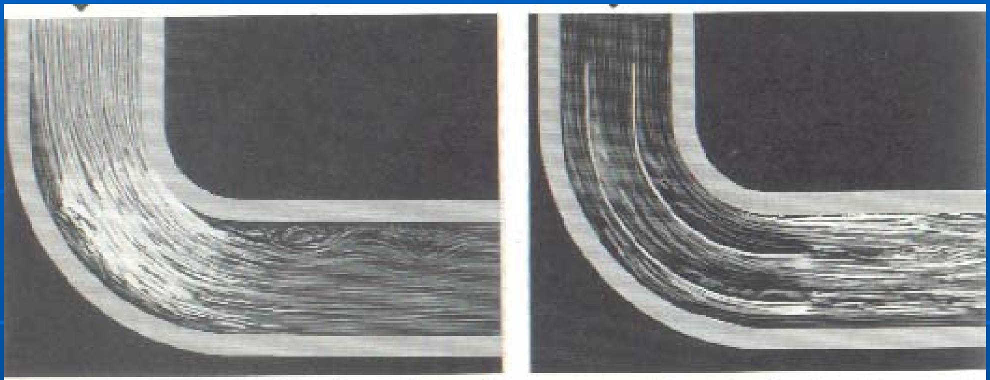


Vjetrobran (nasip)

Ispitivanja u zračnom tunelu

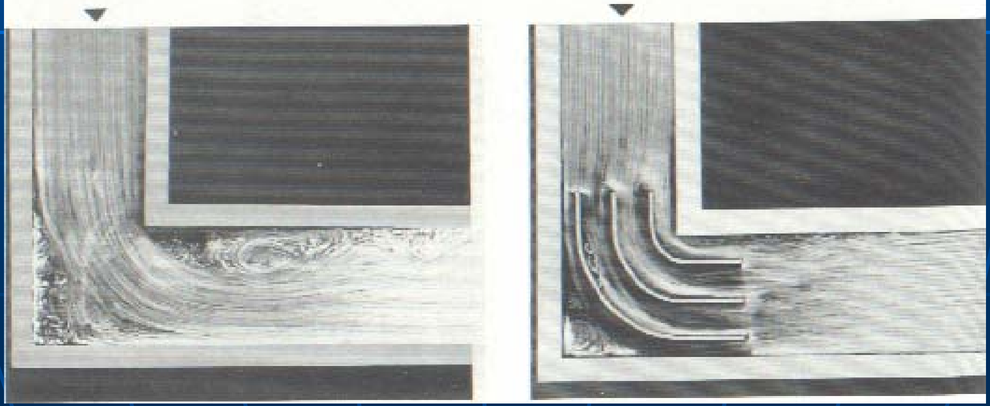
Hidrotehničkog laboratorija Građevinskog fakulteta u Zagrebu.



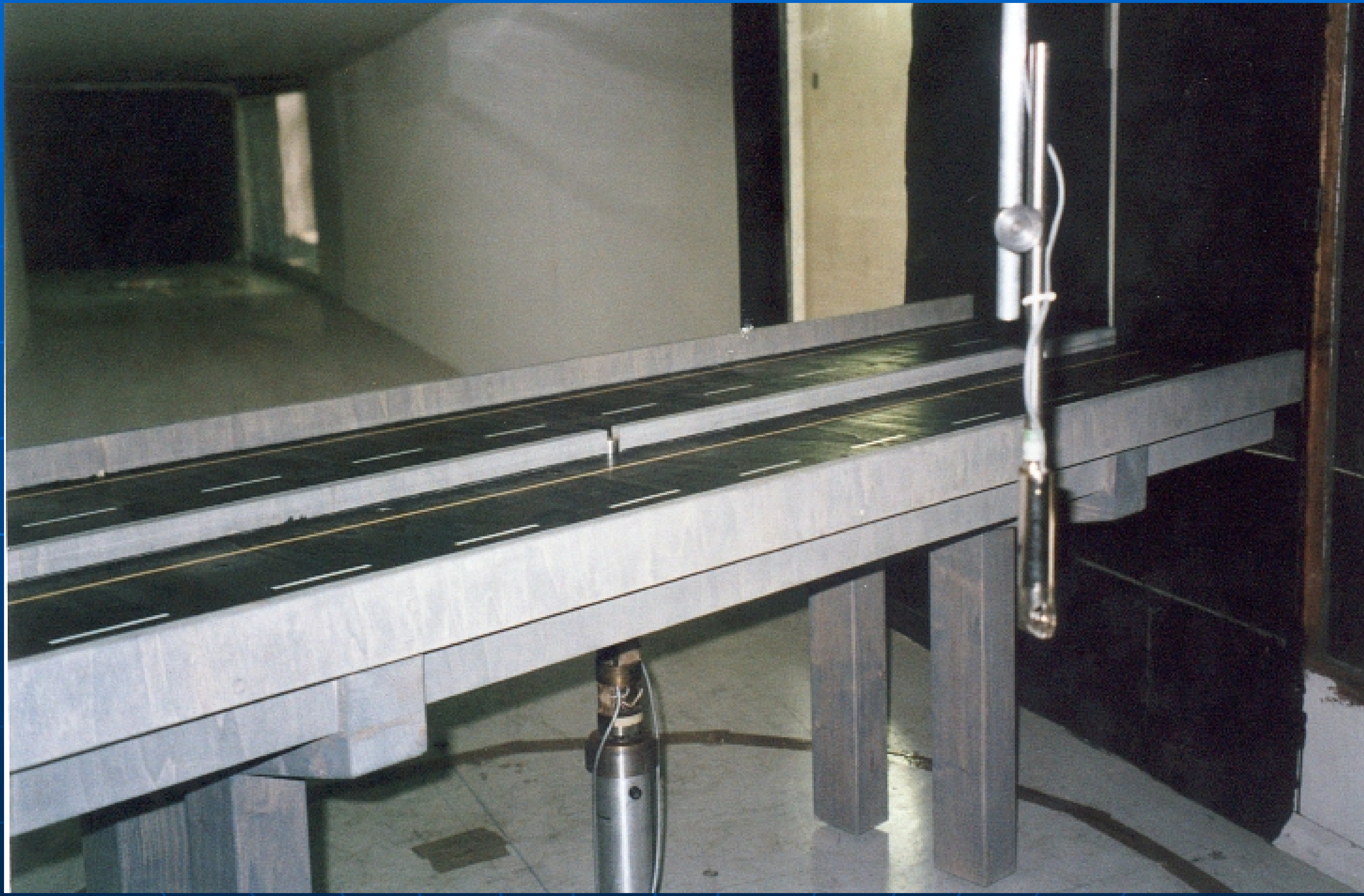


Figs. 108 and 109. Flow through a turning passage with and without guide vanes (water, velocity = 10 cm/s, passage width = 20 mm, $Re = 2 \times 10^3$, surface tracer metho

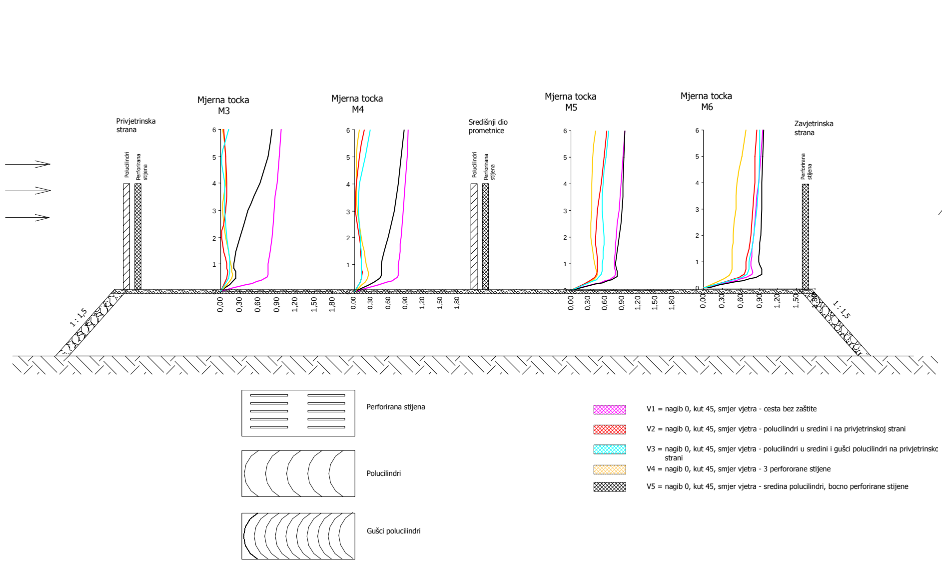
Figs. 110 and 111. Passages connected in right angle with and without guide vanes (water, velocity = 10 cm/s, passage width = 20 mm, $Re = 2 \times 10^3$, surface tracer metho



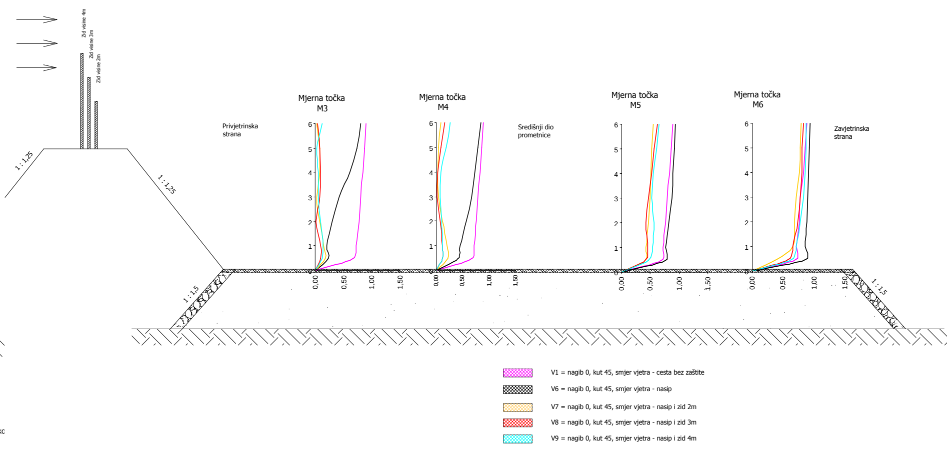
Model mosta u zračnom tunelu



Relativna brzina u smjeru vjetra



Rezultati u smjeru vjetra



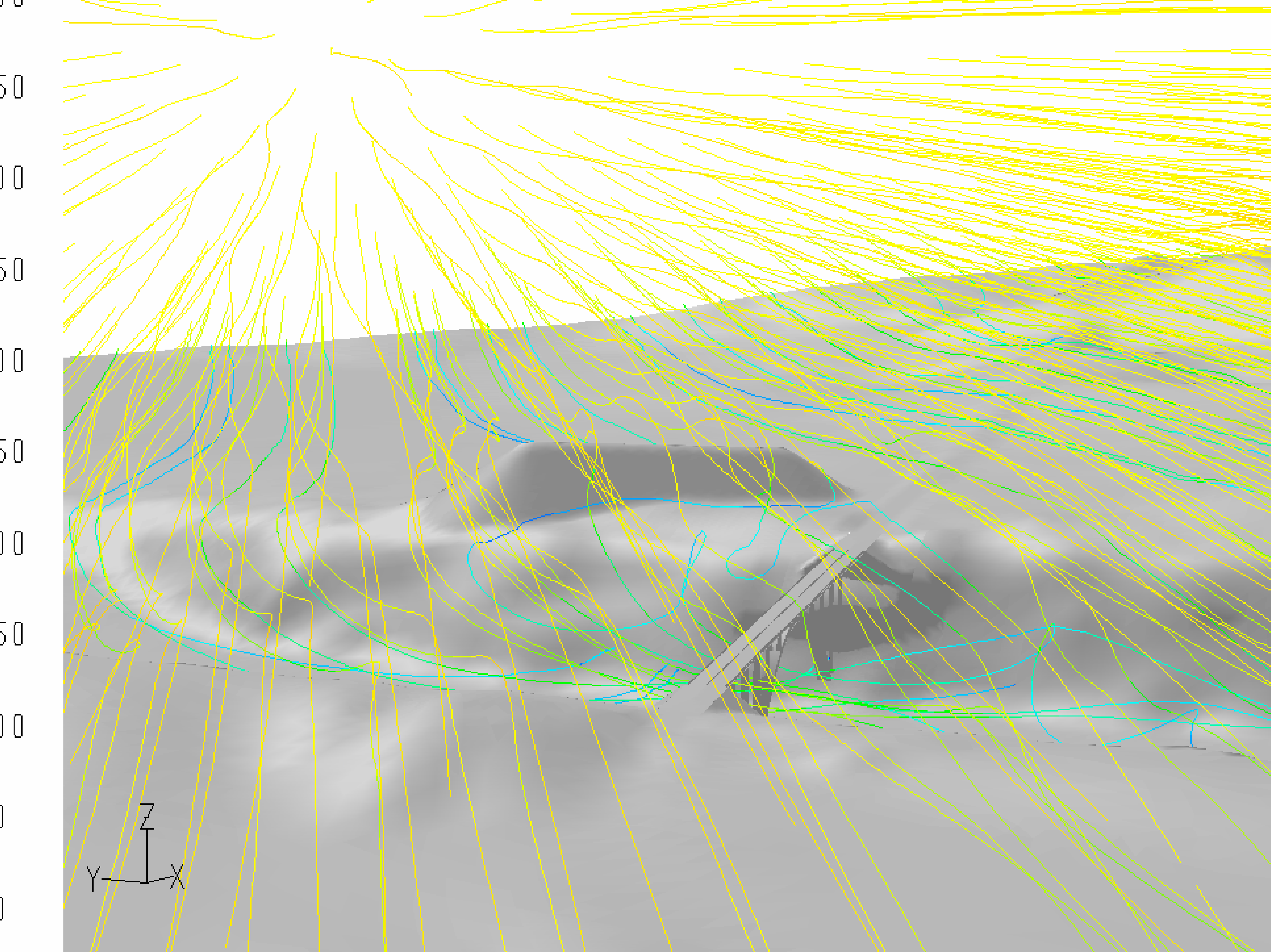
- Filmovi:

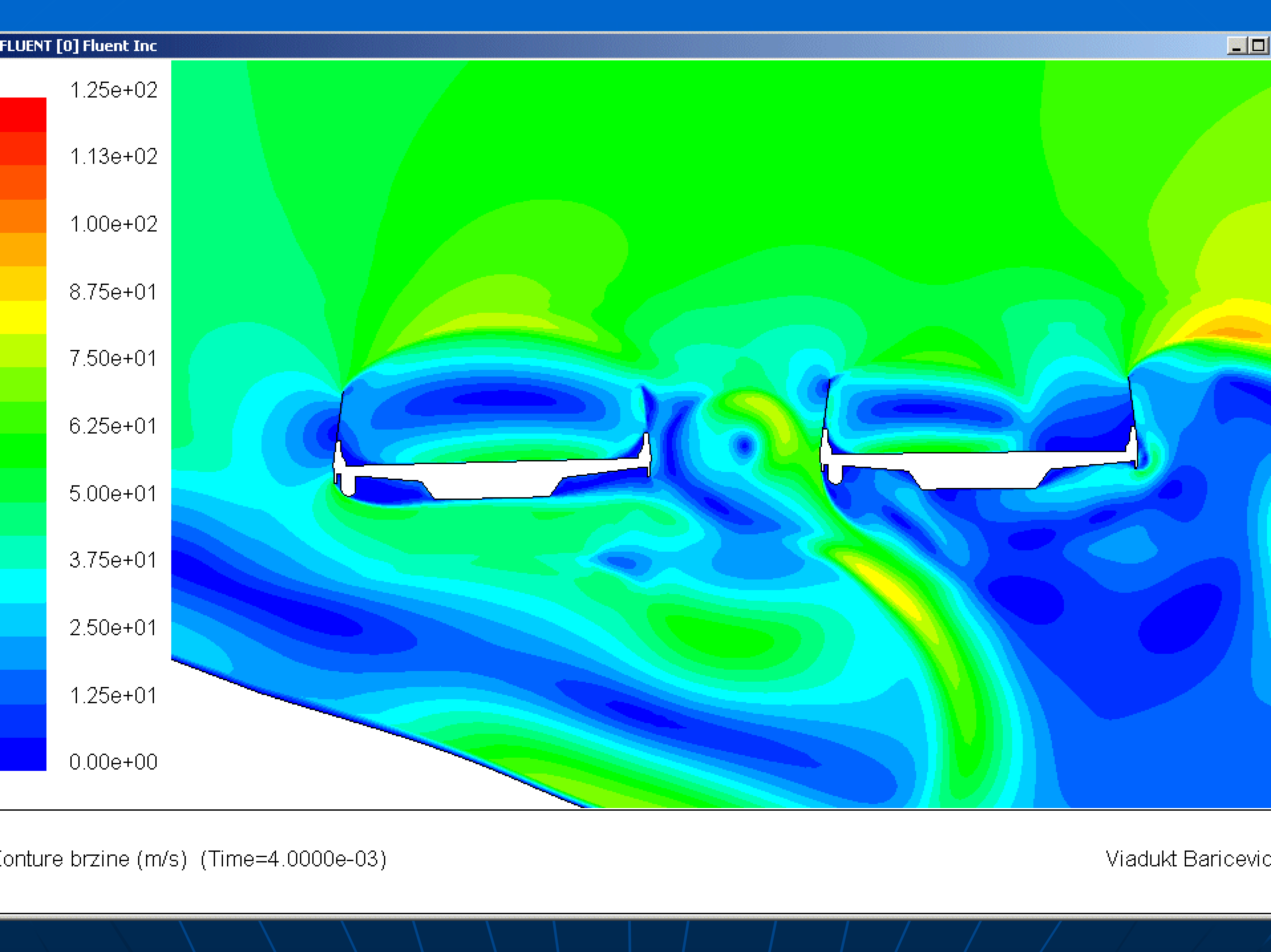
vort.mpeg

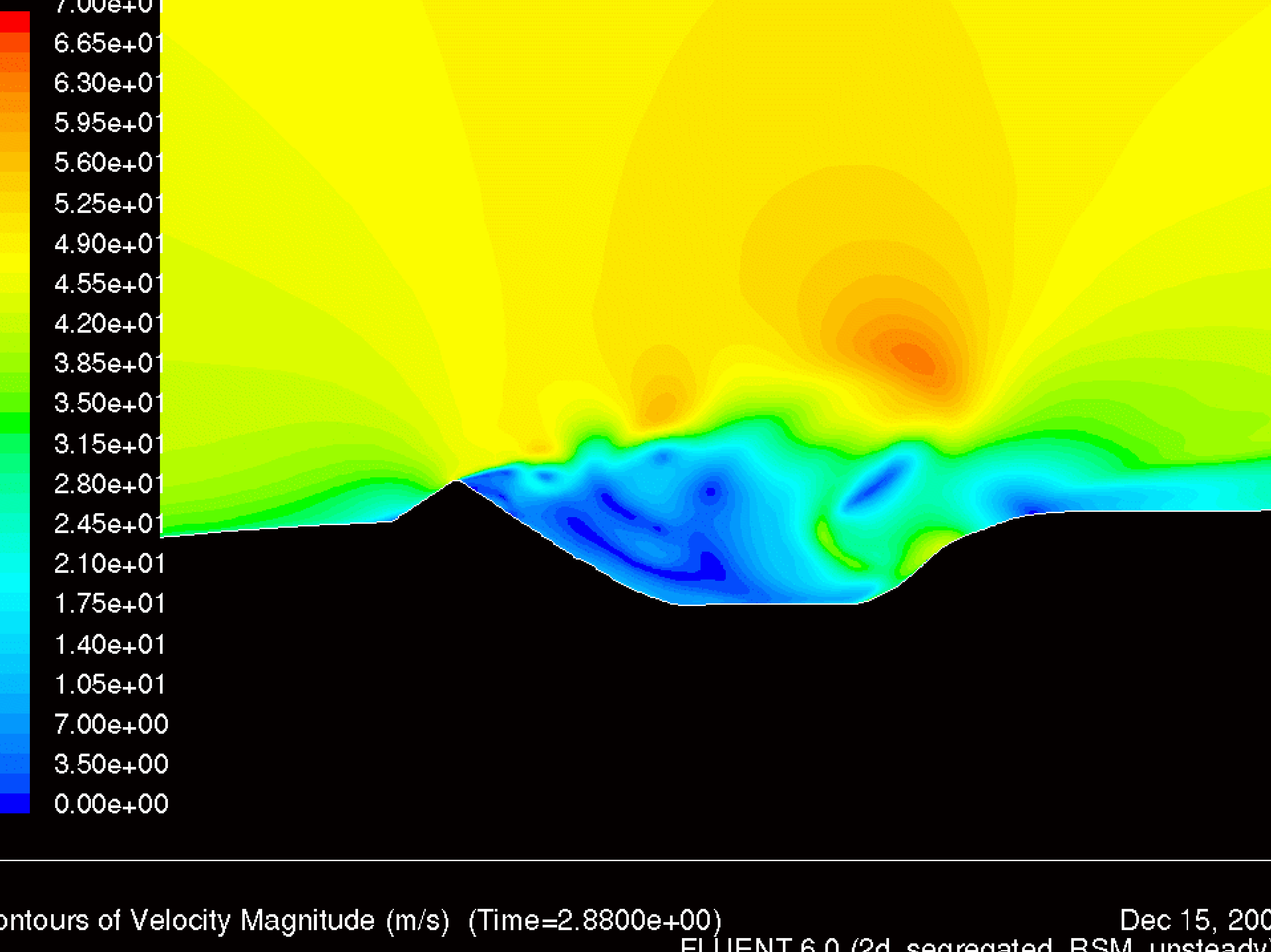
win2fire.mpg

auto1.mpeg (možda negdje drugdje”)

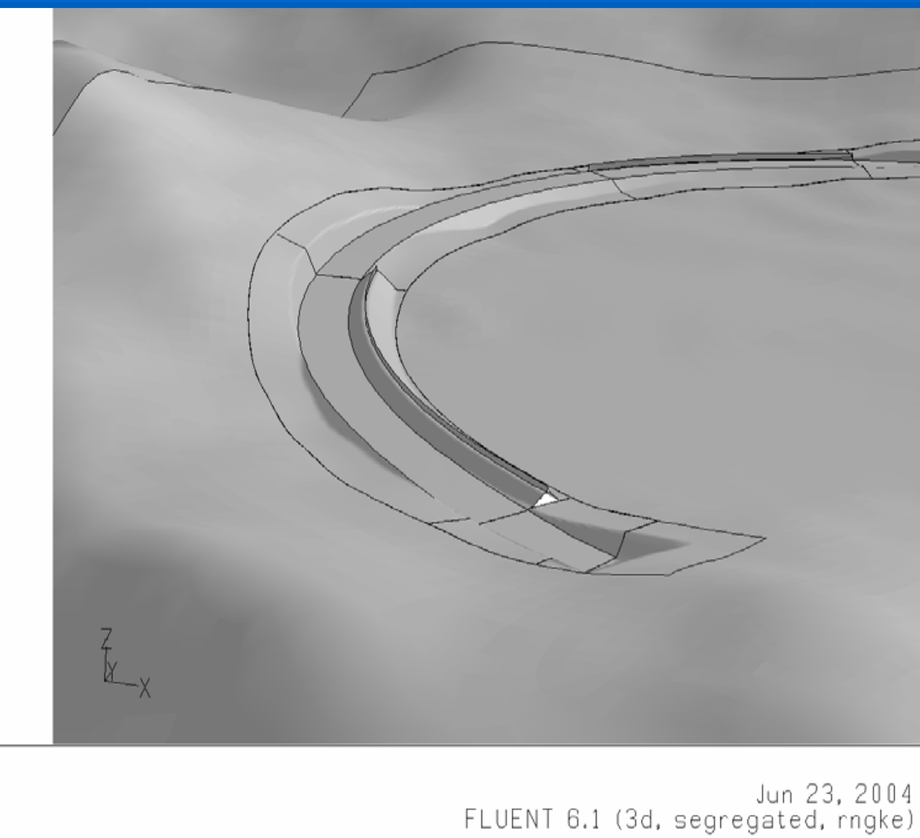
auto2.mpeg

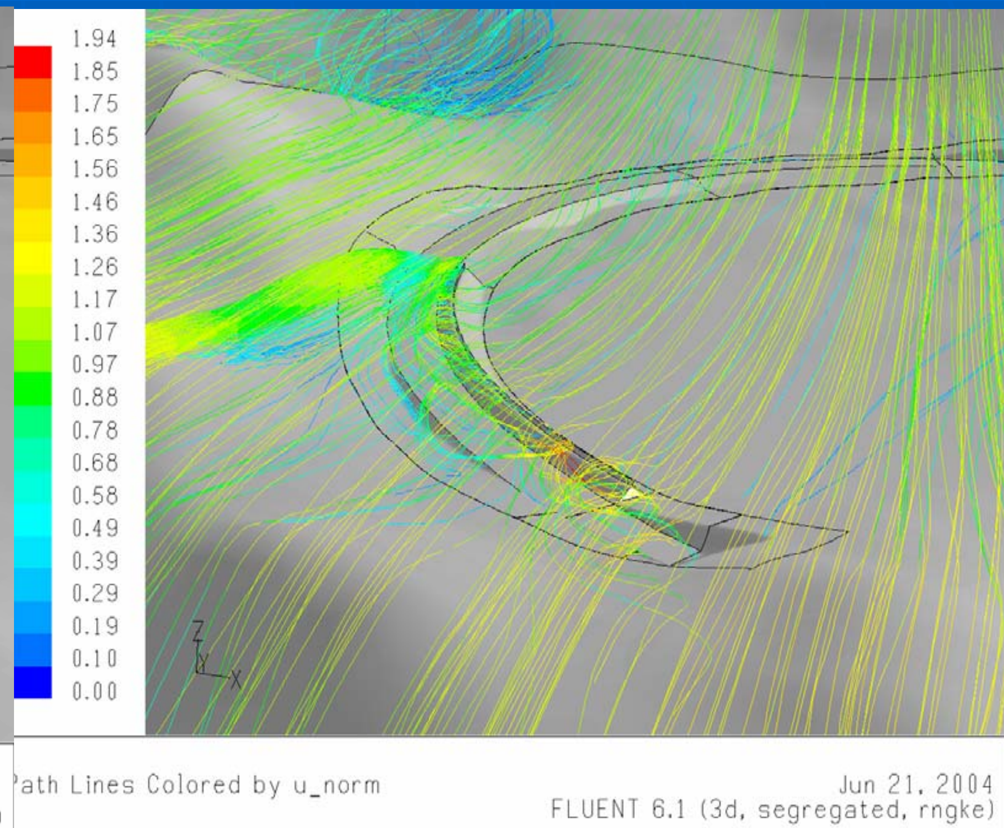

Z
Y
X


FLUENT [0] Fluent Inc
1.25e+02
1.13e+02
1.00e+02
8.75e+01
7.50e+01
6.25e+01
5.00e+01
3.75e+01
2.50e+01
1.25e+01
0.00e+00
onture brzine (m/s) (Time=4.0000e-03)
Viadukt Baricevic


7.00e+01
6.65e+01
6.30e+01
5.95e+01
5.60e+01
5.25e+01
4.90e+01
4.55e+01
4.20e+01
3.85e+01
3.50e+01
3.15e+01
2.80e+01
2.45e+01
2.10e+01
1.75e+01
1.40e+01
1.05e+01
7.00e+00
3.50e+00
0.00e+00
ontours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=2.8800e+00)
Dec 15, 200
FLUENT 6.0 (2d, segregated, RSM, unsteady)

Zaštita krivine Vučipolje skraćenim nasipom

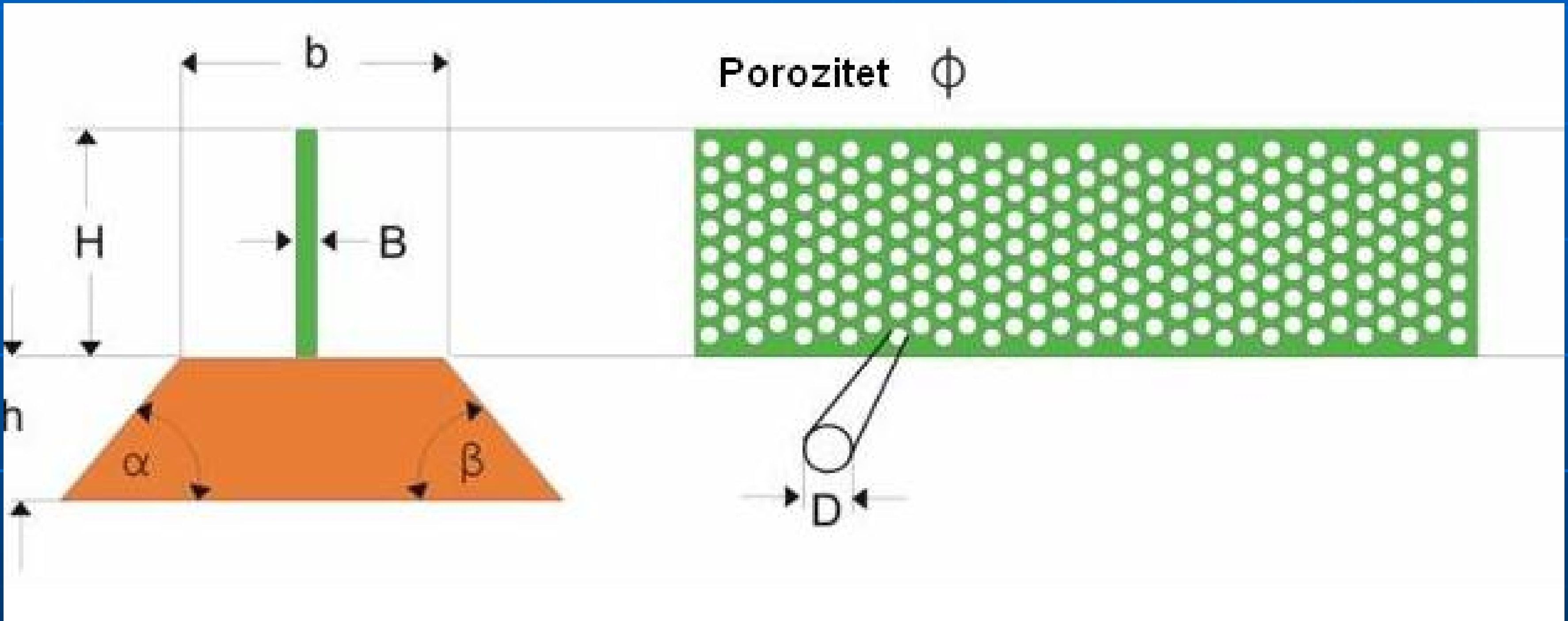




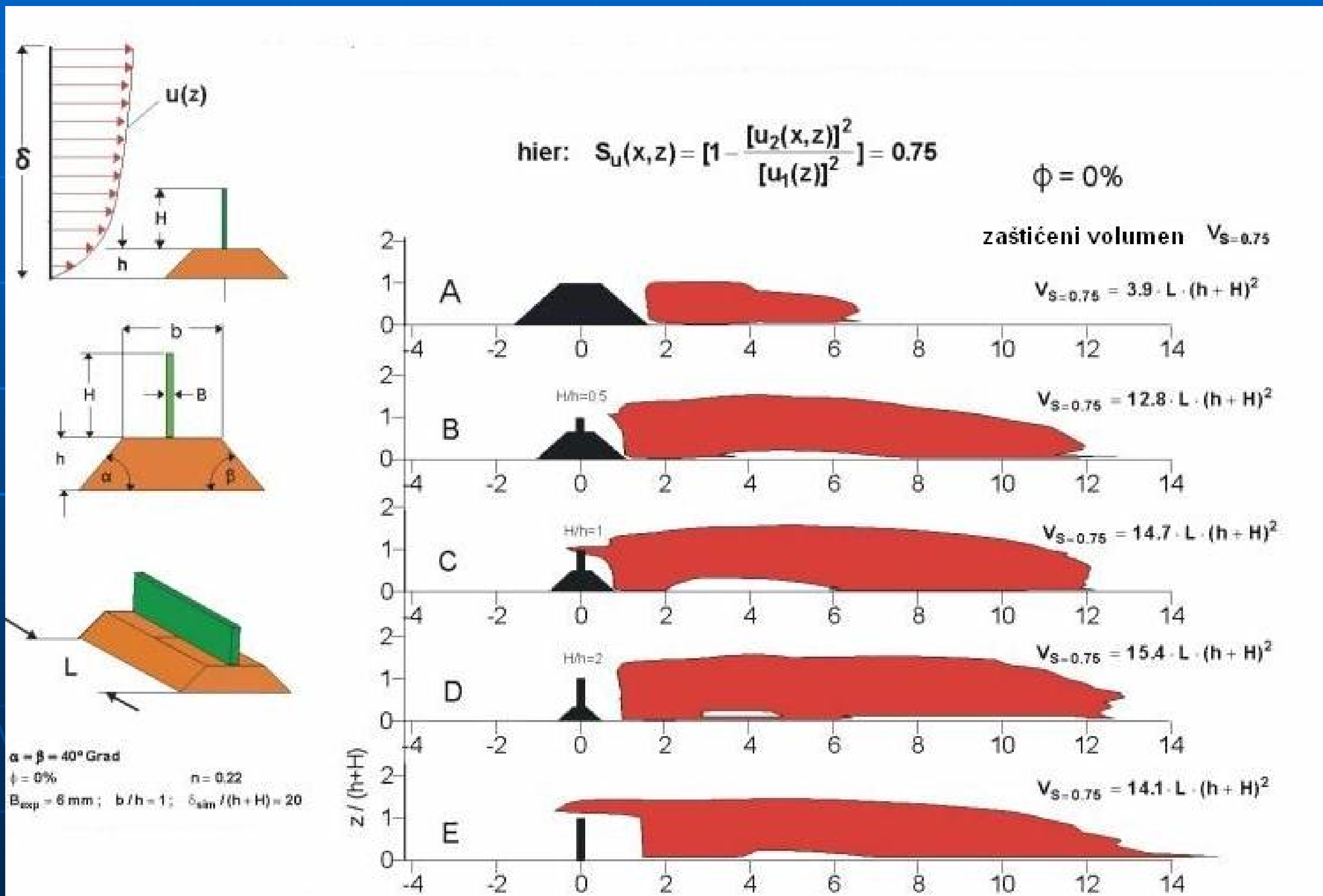
Probno polje kod Maslenice

Na riječkoj strani Masleničkog mosta 23.XII 04 $v = 42{,}7 m/s$

Na probnom polju 23.XII 04 $v = 24{,}2 m/s < v_{dop} = 30 m/s$


b
Porozitet Φ
H
B
h
α
β
D

Učinkovitost vjetrobrana



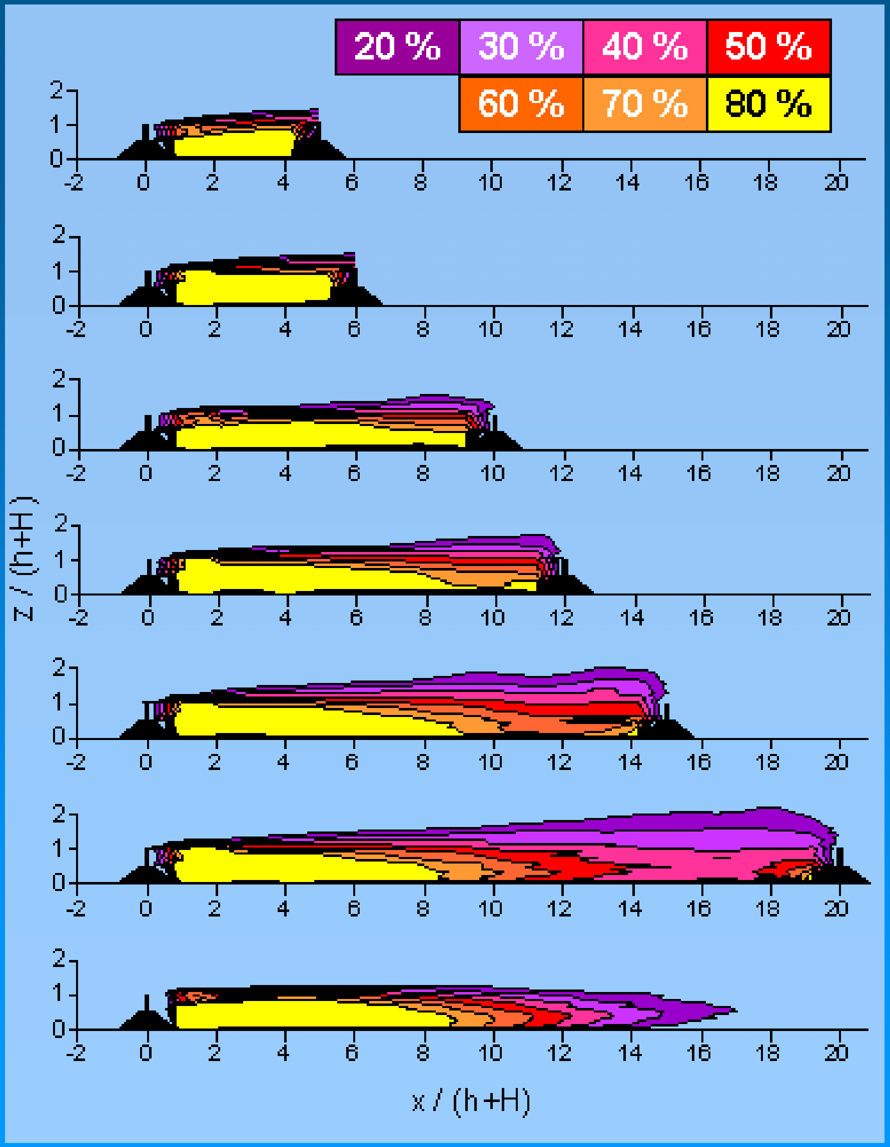
ZAŠTIĆENI VOLUMEN V_{Su}

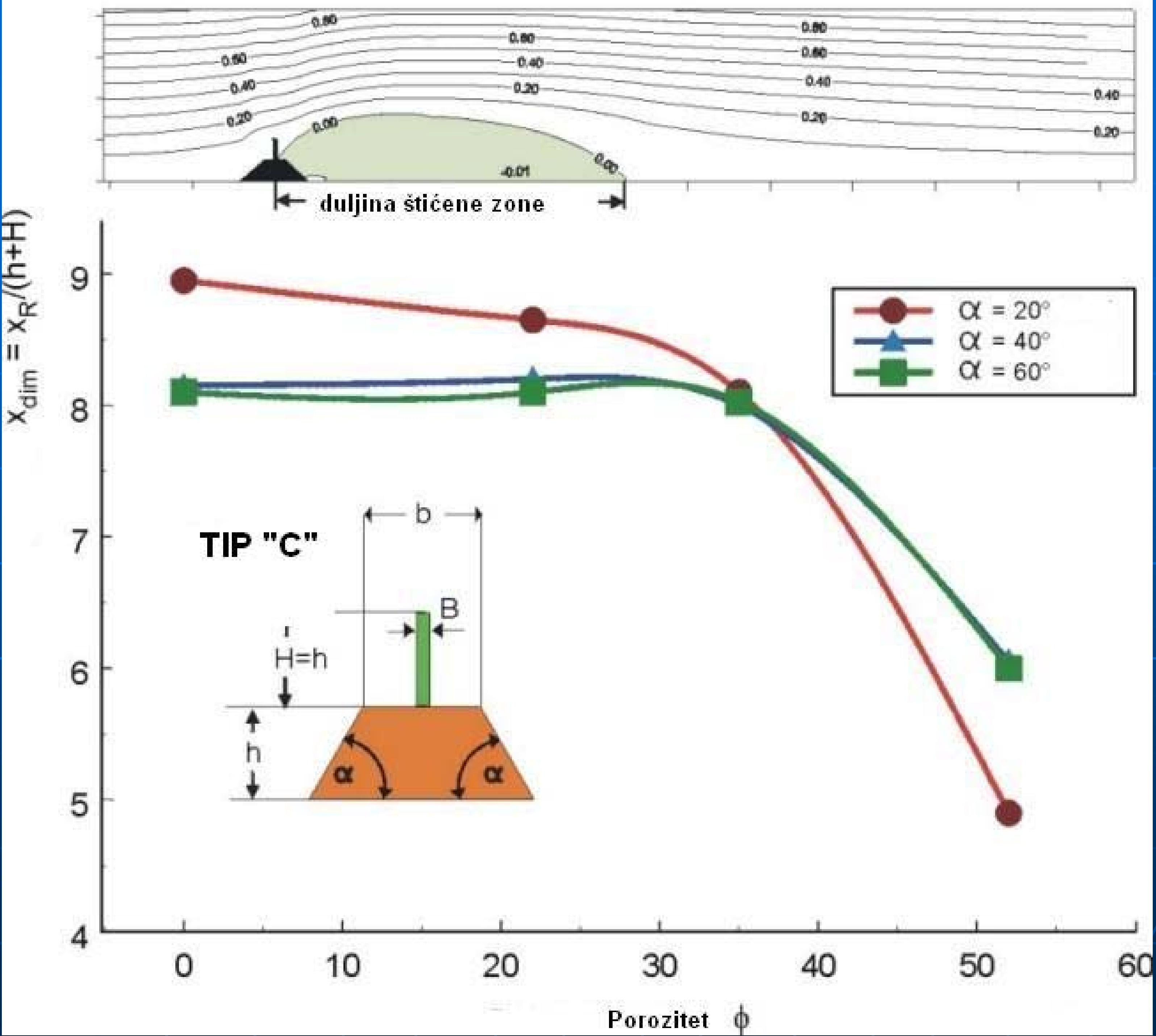
($\alpha = 40°$, $\Phi = 52\%$, $h/H = 1$)

$$S_u(x,z) = 1 - \frac{u_2(x,z)^2}{u_1(z)^2}$$

$S_u > 0$: smanjenje utjecaja vjetra

$S_u < 0$: povećanje utjecaja vjetra





duljina štićene zone
$x_{dim} = x_R/(h+H)$
Porozitet ϕ
α = 20°
α = 40°
α = 60°
TIP "C"
b
B
H=h
h
α

PROCJENA VJETROVNE ZAŠTITE

Parametri učinka zaštite

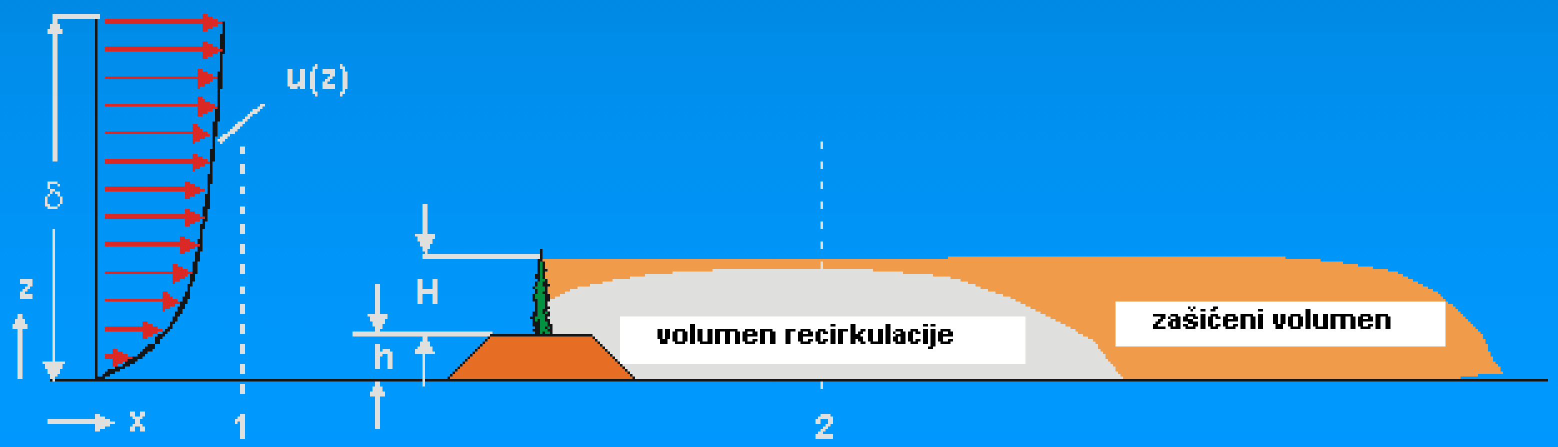
- S_u: relativna promjena strujnog impulsa i djelovanja aerodinamičkih sila (faktor zaštite)
- f: komforni parametar prema Gandemer-u
- $S_{u'w'}$: vertikalni tok impulsa (vertikalni faktor zaštite)

→ Određivanje zaštitnog volumena

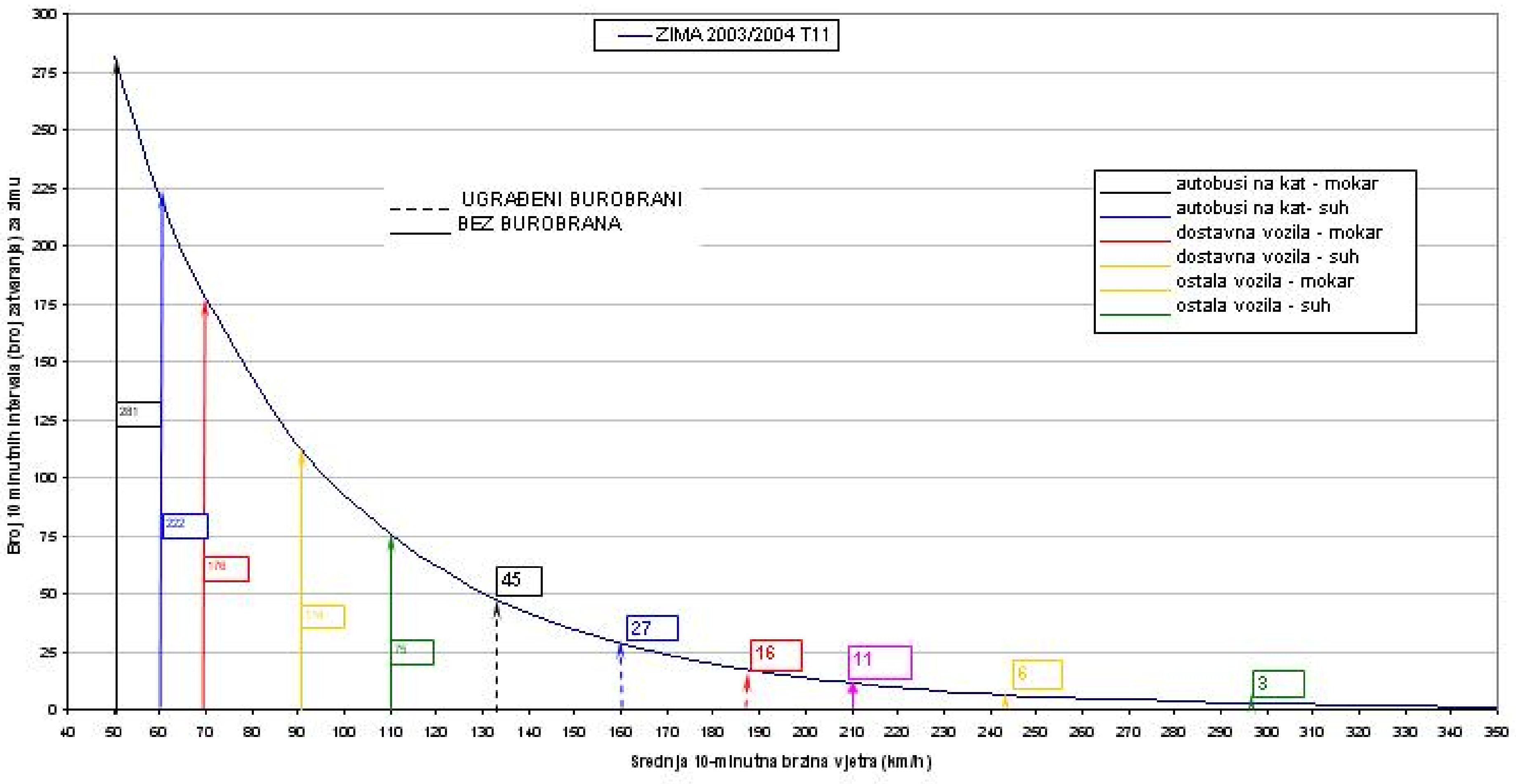
$$S_u(x,z) = 1 - \frac{u_2(x,z)^2}{u_1(z)^2}$$

$$f(x,z) = \frac{u_1(z) + \sigma(u_1(z))}{u_2(x,z) + \sigma(u_2(x,z))}$$

$$S_{u'w'}(x,z) = 1 - \frac{u'w'_2(x,z)}{u'w'_1(z)}$$



Trajanje olujnih vjetrova



Očekivano trajanje bure pri kojoj se zatvora promet osobnih vozila (sa i bez izgradnje burobrana)

Windgeschwindigkeit nach DIN 1055

Bei der vereinfachten Auslegung nicht schwingungsfähiger Bauten wird eine Windgeschwindigkeit in unterschiedlichen Höhen vorgegeben ("Treppenlinie" aus DIN 1055,Teil 4, Tabelle 1). Diese Treppenlinie kann näherungsweise als Einhüllende der möglichen Nennböenprofile betrachtet werden.

$$v(z) = v\ (10) \left[\frac{z}{10} \right]^{0,11}$$