

# E xperimentální A nalýza N apětí

## 2004

### THE EFFECT OF SURROUNDINGS ON THE RESPONSE OF THE WIND LOADED BUILDING

### VLIV OKOLNÍ ZÁSTAVBY NA ODEZVU BUDOVY ZATÍŽENÉ VĚTREM

Jaromír Král<sup>1</sup>

*This paper contains description and some results of response measurements of a model of a tall building in the boundary layer wind tunnel VZLÚ/KÚ ČVUT (BLWT). The aim of these measurements was to determine the free model response for different angles of attack of the wind and the effect of the present and future neighbouring building configurations. From records of time history of responses there have been for different angles of attack evaluated both mean and effective values of drag, lift and moment coefficients. These measurements represent a means of determining the broadband component of the model response or wind actions respectively. The reliability of measuring the resonance component of the response depends on the precision of modelling the dynamic characteristics of the building and on suppressing parasitic vibrations.*

**Keywords** *aeroelastic model, boundary layer, building, response, wind tunnel, force coefficient.*

#### Charakteristiky modelovaná mezní vrstvy

Modelovaná mezní vrstva se vytváří ve 13,5 m dlouhém přípravném prostoru větrného tunelu podobně jako v přírodě prouděním vzduchu nad drsným terénem. Na jeho vstupu prochází nasávaný vzduch sítím, za ním je řada spir a 120 mm vysoká bariéra. Podlaha přípravného prostoru je pokryta plastovou fólií s homogenním polem výstupků přibližně 10 mm vysokých. Při měření samostatně stojícího modelu je plastová folie položena také na podlaze měřicího prostoru kolem malé otočné desky s modelem.

Optimalizaci vlastností dvourozměrné mezní vrstvy provedli pracovníci VZLÚ. Po úpravách jednotlivých částí zařízení a jejich vzájemné polohy jsme se na základě zjištěných charakteristik mezní vrstvy rozhodli pro použití modifikace označené Sa B120 [1]. Mezní vrstva je v měřicím prostoru tunelu charakterizována dvourozměrným polem středních rychlostí, polem intenzit turbulence a výkonovou spektrální hustotou flukтуаční složky rychlosti větru. Na obr. 1a je závislost střední rychlosti  $U(z)$  a intenzity turbulence v podélném směru  $I_u(z) = \sigma_u(z)/U(z)$  na výšce ( $\sigma_u(z)$  je směrodatná odchylka rychlosti  $u(z)$  v podélném směru). Profil střední rychlosti lze v zájmové oblasti aproximovat logaritmickou nebo mocninnou funkcí. Parametry možných aproximací jsou uvedeny v tab. 1. Frekvenční složení turbulence proudu vzduchu charakterizuje výkonová spektrální hustota podélné složky rychlosti, uvedená v bezrozměrném tvaru na obr. 1b pro výšku  $z = 200$  mm v místě modelu společně jejím základním teoretickým modelem (von

---

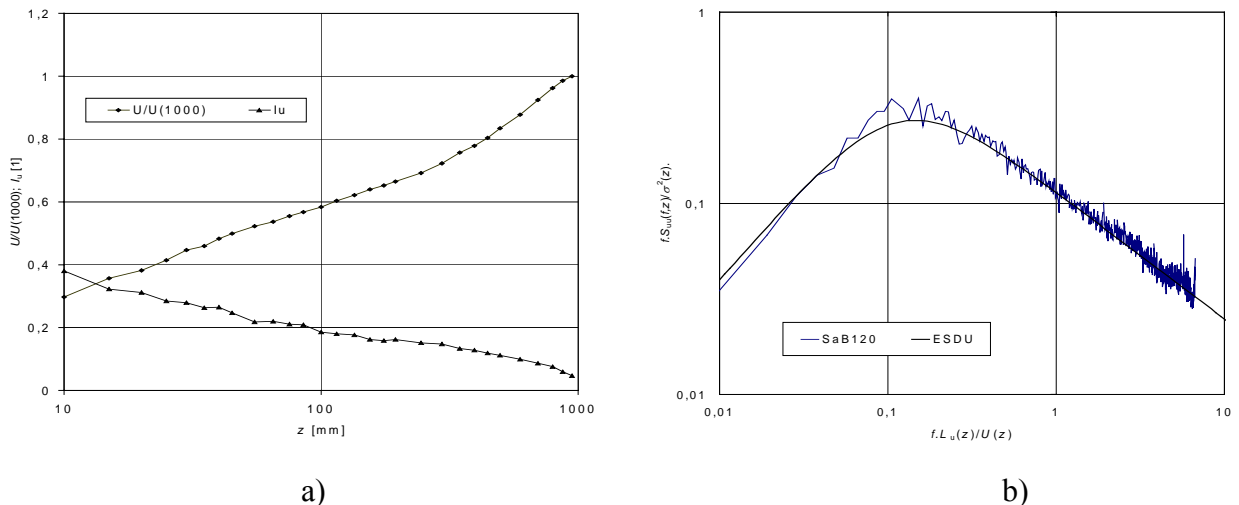
<sup>1</sup> Ing. Jaromír Král, CSc.: ČVUT Kloknerův ústav, Šolínova 7, 166 08 Praha, Česká republika, tel.: +420224353544, e-mail: jkral@klok.cvut.cz

Karman), definovaným na základě meteorologických měření v přírodě. Integrací odpovídajících autokorelačních funkcí byla odhadnuta integrální délka turbulence  $L_u(250) = 0,413$  m. Charakteristiky mezní vrstvy jsou uvedeny v tab. 1.

**Tab. 1 Charakteristiky modelované mezní vrstvy Sa B120**

Funkce	$z_0$ [mm]	$d$ [mm]	$k$ [m.s <sup>-1</sup> ]	$\alpha$ [1]	$U(z_r)/U(25)$ [1]	$I_u$ [1]	$z_r$ [mm]
$U(z) = k \ln((z-d)/z_0)$	0,65	5	0,82	-	-	-	-
$U(z) = U(z_r) ((z-d)/z_r)^\alpha$	-	8	-	0,20	2,561	-	25
$I_u = I_u(25) ((z-d)/z_r)^\alpha$	-	-	-	-0,266	-	0,271	25

Při měřeních odezvy modelu byla v referenčním místě modelového prostoru ve výšce  $z = 600$  mm nastavena střední rychlost  $10 \text{ m.s}^{-1}$ . Na horním okraji pláště modelu budovy byla střední rychlosti  $8,0 \text{ m.s}^{-1}$ . Pro kategorii terénu III podle [2] tomu odpovídá měřítko rychlosti  $K_{U,III} = 0,256$ . Měřítko délek pro vzdušný proud se stanoví z poměru integrální délky turbulence v tunelu ( $L_{u,m}(0,25) = 0,413$  m) a v odpovídající výšce v přírodě ( $L_{u,s,III} \approx 187$  m) podle [2]. Po úpravě je  $K_{L,III} = 1/453 = 0,00221$ . Pro obtékání ostrohranných těles je podle modelových zákonů měřítko frekvencí  $K_{f,III} = 115,8$ .



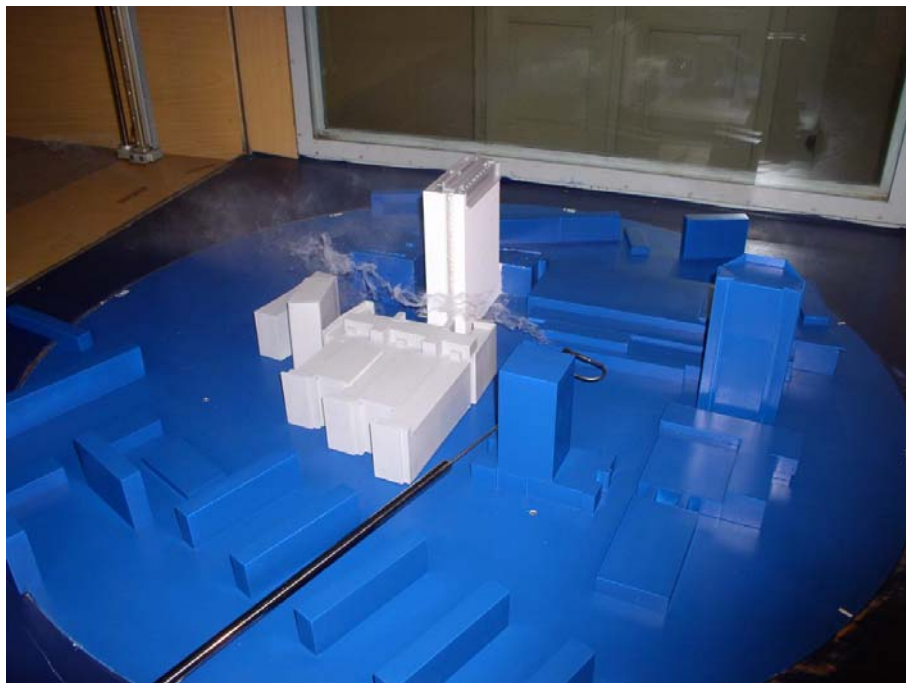
**Obr. 1 Charakteristiky modelované mezní vrstvy: a) Profil střední rychlosti a intenzity turbulence. b) Spektrum flukтуаční složky rychlosti v podélném směru.**

## Modely a jejich vlastnosti

Model budovy s rozměry  $108 \text{ m} \times 70 \text{ m} \times 28 \text{ m}$  a modely okolní zástavby jsou vyrobeny v měřítku délek  $K_L = 1:400$ . Zvolené měřítko délek a umístění modelu budovy mimo střed modelované zástavby jsou kompromisy mezi požadavky na modelovou podobnost a potřebou zahrnout do modelového řešení stavby v okolí modelované budovy, které ovlivňují proudění vzduchu. Nosný systém aeroelastického modelu budovy je tvořen systémem svislých stěn a podlaží, který je odvozen z nosného systému modelované budovy. Je zhotoven z plexiskla

a v rozích podlaží jsou dřevěné sloupky. Počet podlaží je snížen přibližně na třetinu. Plášť budovy je vytvořen zažehlovací plastickou fólií. Relativně složitá střešní konstrukce je sestavena včetně pláště z plexiskla a slouží mimo jiné i k upevnění systému balkónů na severní, jižní a západní stěnu modelu.

Tuhost nosného systému modelu budovy je navržena tak, aby bylo možné modelovat nejnižší tvary ohybového kmitání budovy v obou svislých rovinách symetrie a torzního kmitání kolem osy z v požadovaném měřítku frekvencí. Logaritmický dekrement útlumu modelu je blízký hodnotám z měření skutečné konstrukce. Model se upevňuje čtyřmi šrouby k otočné desce. Středem základové desky jsou přivedeny kabely k tenzometrům. Stavby v okolí budovy jsme zjednodušili. Modelovali jsme hlavně charakteristiky, důležité z hlediska vlivu na proudění v okolí měřené budovy (vnější tvar budov, rozměry, poloha a orientace vzhledem k měřené budově). Při měření byly použity dva modely zástavby. Model Z1 odpovídal „současné zástavbě“ a po doplnění modelů dalších plánovaných budov vznikl model Z2, odpovídající „budoucí zástavbě“. Obr. 2 ukazuje vizualizaci proudění při měření v „budoucí zástavbě“. Ideální měřítka délek  $K_{L,id} = 1/453$  a frekvencí  $K_{f,id} \approx 116$  lze určit z vlastností turbulentního proudu.



**Obr. 2 Vizualizace proudění kolem modelu v zástavbě Z2**

Návrh dynamických vlastností modelů a umístění tenzometrů jsme ověřovali dynamickým výpočtem modelu. Opakovanými úpravami jsme dospěli ke kompromisnímu řešení, kterému pro experimentálně zjištěné skutečné vlastní frekvence odpovídal rozptyl měřítek modelovaných frekvencí v pásmu  $K_f = 101 - 133$ . Měřítko odezvy  $K_y = 1/781$  jsme stanovili pomocí modelové analýzy diferenciálních rovnic pro ohybové a torzní kmitání vetknutého nosníku s rovnoměrně rozdělenou hmotou a konstantní tuhostí po výšce pro odhadnutou objemovou hmotnost budovy  $\rho = 150 \text{ kg.m}^{-3}$ . Pro úhel zkroucení při torzním kmitání  $\varphi$  bylo odvozeno měřítko  $K_\varphi = 1/1,2$ . Ekvivalentní moment je moment, který vyvolá stejnou odezvu v měřeném místě jako silový

účinek proudu vzduchu a setrvačných sil kmitajícího modelu. Pro ekvivalentní ohybové a kroutící momenty byl odvozen modelový zákon ve tvaru  $K_M = K_w \cdot (K_L)^3$ , kde  $K_w$  je měřítko tlaku větru.

## Měřicí zařízení

Rychlost větru v tunelu jsme nastavovali podle údajů vrtulkového snímače rychlosti ALMEMO. Střední rychlost proudu vzduchu jsme dále měřili před měřicím prostorem dvěma Prandtlovými trubnicemi. První byla ve výšce 0,3 m (rychlost ve výšce střechy modelu budovy) a druhá ve výšce 1,2 m (rychlost volného proudu). Dále jsme průběžně sledovali rozdíl referenčního statického tlaku uvnitř měřicího prostoru a statického tlaku vně tunelu.

Na základě statického a dynamického výpočtu nosného systému modelu programem FEAT jsme na nosných stěnách vybrali místa pro nalepení tenzometrů pro měření poměrných deformací. Kritériem bylo co největší oddělení deformací od kroutícího a obou ohybových momentů. Elektrickým propojením tenzometrů vznikly tři snímače poměrných deformací. Každý z nich měřil jednu složku odezvy - ohyb v rovině  $xz$ , ohyb v rovině  $yz$  a kroucení kolem osy  $z$ . Tenzometry byly připojeny k univerzálnímu zesilovači KWS 673.A2 a odezvu modelu jsme zaznamenávali přímo do paměti osobního počítače. Tyto snímače jsme staticky „kalibrovali“ momenty od sil, působících na úrovni vrcholu budovy. Modální analýzou jsme vyhodnotili vlastní frekvence  $f_i$  a logaritmické dekrementy útlumu  $\delta_i$  pro nejnižší tvary kmitání modelu. Použili jsme k tomu přenosové funkce mezi silami působícími na vrchol budovy a odezvou modelu upevněného na ocelové desce. Zjištěné hodnoty jsou uvedeny v tab. 2.

**Tab. 2 - Dynamické charakteristiky modelu budovy**

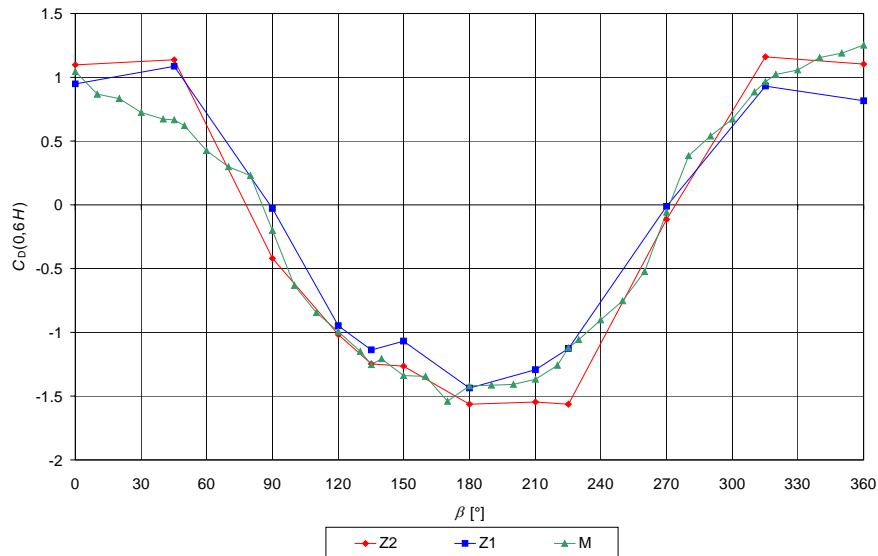
Číslo tvaru $i$	$f_i$ [Hz]	$\delta_i$	Popis
1	60,5	0,25	ohyb v rovině $xz$
2	89,0	0,29	ohyb v rovině $yz$
3	104	0,29	kroucení - osa $z$

## Střední hodnoty součinitelů sil a momentů

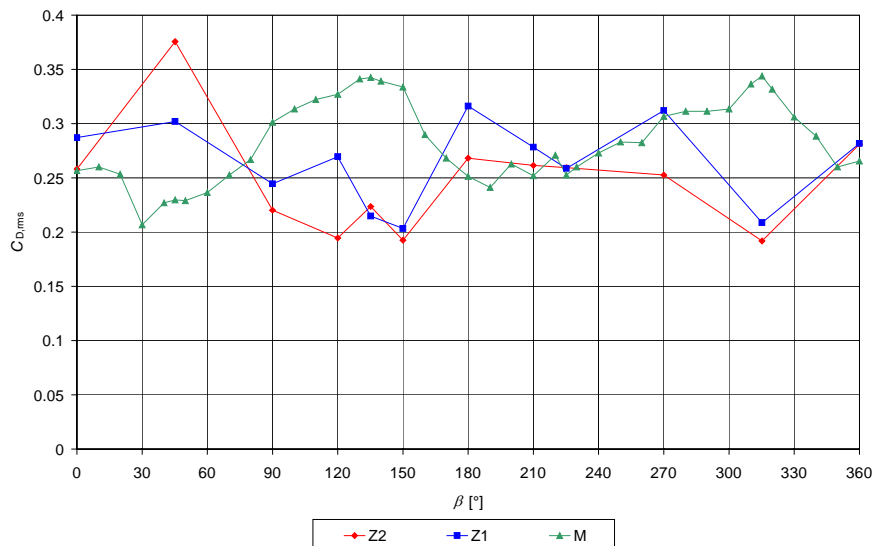
Silový účinek vzdušného proudu na budovu se definuje ekvivalentními statickými silami ve směru os ( $F_x$  a  $F_y$ ) a kroutícím momentem  $M_k$ . Tyto síly a momenty působící na skutečnou budovu se stanoví pomocí aerodynamických součinitelů čelního odporu  $C_D$ , vztlaku  $C_L$  (síla ve směru osy  $y$ ) a kroutícího momentu kolem svislé osy modelu  $C_m$ . Jejich hodnoty jsou vztaženy ke střední hodnotě dynamického tlaku vzdušného proudu ve výšce vrcholu modelu budovy  $p(H)$ , rozměrům modelu a naměřeným středním hodnotám výše uvedených sil a momentu podle následujících vztahů [3]:

$$C_D = \frac{\overline{F_x}}{B_R H \frac{\overline{p(H)}}{1+2\alpha}}; \quad C_L = \frac{\overline{F_y}}{B_R H \frac{\overline{p(H)}}{1+2\alpha}}; \quad C_m = \frac{M_k}{\frac{B_R^2 H}{8} \frac{\overline{p(H)}}{(1+2\alpha)}} \quad (1)$$

Hodnoty součinitelů  $C_D$  a  $C_L$  jsou přepočteny na referenční výšku  $z = 0,6.H \approx 0,175$  m [2]. Na obr. 3 jsou vyneseny naměřené hodnoty součinitelů čelního odporu  $C_D$  v závislosti na úhlu náběhu pro samostatně stojící model budovy a model umístěný v obou variantách zástavby. Na obr. 4 jsou vyneseny analogicky definované efektivní hodnoty součinitelů čelního odporu  $C_{D,rms}$  pro flukuační složky sil a momentů závislosti na úhlu náběhu. Rozdíly součinitelů ukazují vliv okolní zástavby na velikost statické a dynamické složky zatížení modelu.

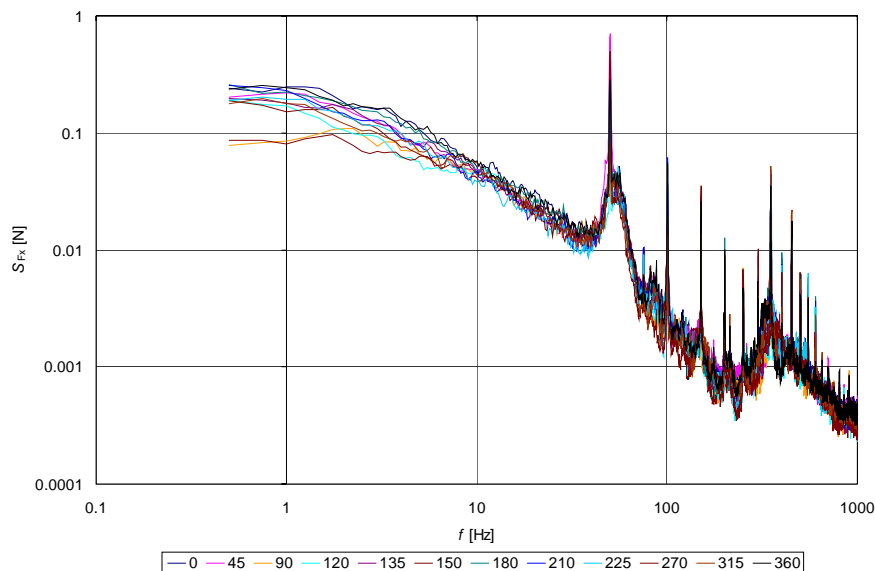


**Obr. 3** Závislost součinitele čelního odporu  $C_D$  na úhlu náběhu pro samostatně stojící model budovy a model v zástavbách Z1 a Z2



**Obr. 4** Závislost efektivní hodnoty součinitele čelního odporu  $C_{D,rms}$  na úhlu náběhu pro samostatně stojící model budovy a model v zástavbách Z1 a Z2

Frekvenční složení flukтуаční složky sil popisují spektra ekvivalentních sil a momentů. Na obr. 5 je příklad spektra ekvivalentní síly ve směru osy  $x$  pro model v zástavbě Z2 a pro různé úhly náběhu. Ostré vrcholy jsou projevem pulsací, způsobených lopatkami ventilátoru.



**Obr. 5** Spektra ekvivalentních sil ve směru osy  $x$  pro různé úhly náběhu

## Závěr

Modelová měření umožňují kvalitativně i kvantitativně posoudit vliv blízkých staveb na statické i dynamické zatížení posuzované budovy větrem. Podobně lze posoudit vliv projektované budovy na zatížení větrem již existujících staveb, jejich částí a větrnou pohodu v jejich okolí.

Modelová měření byla provedena pro Spojprojekt Praha a.s. s využitím výsledků řešení projektu GA ČR č. 103/03/1395 a Výzkumného záměru CEZ: J04/98:210000029. Autor děkuje za finanční podporu projektů. Poděkování patří také Ing. M. Jirsákovi, CSc. z VZLÚ a.s. za proměření vlastností modelované mezní vrstvy a spolupracovníkům za výrobu modelů.

## References

- [1] Jirsák, M.: *Úprava simulace pro modelování větrné zátěže výškových budov*, zpráva VZLÚ, Praha, 2003.
- [2] ČSN P ENV 1991-2-4: 1997. *Zásady navrhování a zatížení konstrukcí*, Část 2-4: Zatížení konstrukcí - Zatížení větrem, CNI 1997.
- [3] Fischer, O., Koloušek, Vl., Pirner, M.: *Aeroelasticita stavebních konstrukcí*, Academia, Praha, 1977.