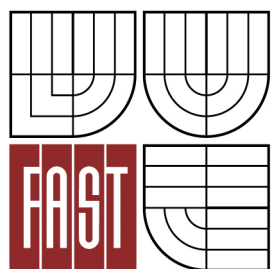




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

ÚČINKY VĚTRU NA VÝŠKOVÉ KONSTRUKCE WIND ACTION ON HIGH-RISE BUILDINGS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MAREK DAMEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. ALEŠ NEVAŘIL, Ph.D.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav stavební mechaniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Marek Damek
Název	Účinky větru na výškové konstrukce
Vedoucí bakalářské práce	Ing. Aleš Nevařil, Ph.D.
Datum zadání bakalářské práce	30. 11. 2012
Datum odevzdání bakalářské práce	24. 5. 2013
V Brně dne 30. 11. 2012	

.....
prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

SACHS, P. Wind Forces in Engineering. International Series of Monographs in Civil Engineering 3. Pergamon Press, 1972.

PIRNER, M., FISCHER, O. Zatížení stavebních konstrukcí. Informační centrum ČKAIT, Praha, 2003.

KOLOUŠEK, V., PIRNER, M., FISCHER, O., NÁPRSTEK, J. Wind Effects on Civil Engineering Structures. Academia Praha, 1983.

SIMIU, E., SCANLAN, R. H. Wind Effects on Structures. 3rd Edd. John Willey & Sons, Inc., 1996.

Hebák, P. – Hustopecký, J. – Jarošová, E. – Pecáková, I.: Vícerozměrné statistické metody (1). Informatorium, Praha, 240 str. ISBN 80-7333-025-3.

Hebák, P. – Hustopecký, J. – Malá, I.: Vícerozměrné statistické metody (2). Informatorium, Praha, 240 str. ISBN 80-7333-036-9.

Hebák, P. – Hustopecký, J. – Pecáková, I. – Průša, M. – Řezanková, H. – Svobodová, A. – Vlach, P.: Vícerozměrné statistické metody (3). Informatorium, Praha, 256 str. ISBN 80-7333-039-3.

Zásady pro vypracování

Cílem práce je srovnání deterministického a stochastického přístupu stanovení odezvy výškové konstrukce na zatížení větrem. Bude zkoumán účinek středního tlaku větru a jeho fluktuací ve smyslu normy ČSN EN 1991-1-4 a časový účinek zatížení větrem jako náhodného procesu.

Předepsané přílohy

.....
Ing. Aleš Nevařil, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

Práce s zaměřuje na porovnání dvou přístupů zatížení větrem na výškové konstrukce. Deterministický přístup bude posouzen dle normy na zatížení ČSN EN 1991-1-4. Stochastický přístup dle reálně naměřených rychlostí větru a dále dle synteticky generovaných rychlostí větru. Vítr jako náhodná veličina mění se s časem a výškou. Pro porovnání nám poslouží model vodojemu.

Klíčová slova

Vítr, deterministický přístup, stochastický přístup, syntetický, generování, Weibullovo rozdělení, vodojem, norma, metoda konečných prvků

Abstract

This thesis is focusing on comparison two approaches wind actions on high rise buildings. Determinist approach will consider by norm ČSN EN 1991-1-4. Stochastic approach by real wind speeds and synthetic generate wind speeds. Wind as a random value, variable on time and height. Model of water tower will use for the comparison.

Keywords

Wind, determinism approach, stochastic approach, synthtic, generation, weibull distribution, water tower, norm, finite elementh method.

Bibliografická citace VŠKP

DAMEK, Marek. *Účinky větru na výškové konstrukce*. Brno, 2013. 63 stran.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební
mechaniky. Vedoucí práce Ing. Aleš Nevařil, Ph.D..

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 24.5.2013

.....
podpis autora
Marek Damek

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval mému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Aleši Nevařilovi Ph.D. za jeho odbornou pomoc, ochotu, rady a připomínky při zpracování této bakalářské práce. Děkuji také všem, kteří mi s vypracováním pomáhali.

Obsah

Kapitola 1	Úvod.....	10
Kapitola 2	Deterministický přístup.....	12
2.1	Rychlost větru a zatížení	12
2.2	Zásady výpočtu dle normy ČSN EN 1991-1-4.....	13
2.3	Základní hodnoty.....	14
2.4	Střední rychlost větru	15
2.4.1	Drsnost terénu	15
2.4.2	Orografie	16
2.5	Turbulence větru.....	17
2.5.1	Turbulenční složka.....	17
2.6	Maximální dynamický tlak.....	18
2.7	Síly od větru	19
2.8	Součinitel konstrukce	20
2.9	Součinitel síly	20
2.9.1	Součinitel síly pro kouli	20
2.10	Výpočet odezvy konstrukce dle normy ČSN EN 1991-1-1.....	23
Kapitola 3	Stochastický přístup	28
3.1	Histogram	29
3.2	Markovův řetězec	30

3.3	Tvorba přechodových matic	32
3.4	Generování syntetických rychlostí větru	36
3.5	Weibullovo rozdělení	44
3.5.1	Definice	46
3.5.2	Metody pro odhad parametrů	47
3.6	Porovnání hodnot parametrů	51
3.7	Výpočet odezvy konstrukce deterministickým přístupem	54
Kapitola 4	Závěr	56
Literatura		57
Seznam tabulek		58
Seznam obrázků		59
Seznam zkratek		61

KAPITOLA 1

ÚVOD

Cílem této bakalářské práce je porovnání odezvy deterministického a stochastického přístupu na zatížení výškových konstrukcí větrem. Práce se zaměřuje na stochastický přístup a především na vytvoření generátoru syntetického větru podle reálně naměřených hodnot rychlostí větru. Jako příklad na zatížení větrem použijeme model vodojemu (Obr. 1) v lokalitě Brno-venkov. Z této lokality použijeme reálně naměřená data rychlostí větru.



Obr. 1.1 Vodojem

Deterministický přístup bude prezentován zatížením dle stávající normy ČSN EN 1991-1-4.

Stochastický (náhodný) proces bude prezentován jako zatížení od skutečně naměřených hodnot a dále dle generovaných hodnot.

Dále bude provedeno srovnání obou přístupů. Stochastický přístup bude uveden ve více variantách, z reálně naměřených dat a také z vygenerovaných dat syntetického větru.

KAPITOLA 2

DETERMINISTICKÝ PŘÍSTUP

V této části budou popsány základní vztahy pro výpočet účinků větru dle normy. Nejprve bude prezentován postup výpočtu dle normy ČSN EN 1991-1-4. Prvně určíme maximální dynamický tlak a následně bude určena celková síla od větru na konstrukci. V závěru kapitoly bude proveden výpočet zatížení větrem na reálně konstrukci, a dále bude stanovena odezva konstrukce.

2.1 Rychlost větru a zatížení

Zatížení větrem může na konstrukci působit obecně všemi směry, ale v obvyklých případech se uvažuje, že působí vodorovně a to v tom směru, který je pro posouzení konstrukce či její části nejnepríznivější.

Narazí-li proud větru kolmo na překážku a změní směr, sníží se jeho rychlost z původní rychlosti v na rychlost v_0 . Projeví se tlak w na překážku. U stavebních objektů se rychlost v sníží na $v_0 = 0$.

$$w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (2.1)$$

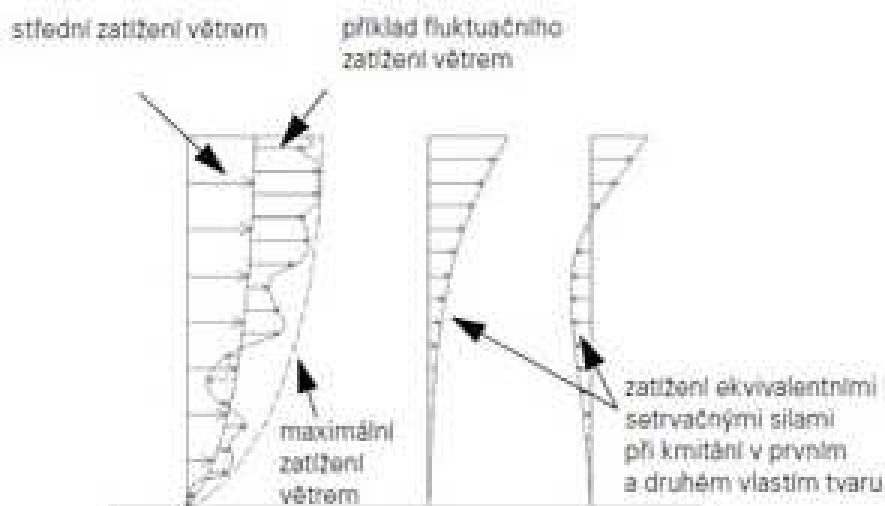
Rychlost větru není na stejném místě stále konstantní, dochází ke změně rychlosti. Je třeba rozlišovat okamžitou rychlost větru v a střední rychlost v v určitém časovém intervalu (norma ČSN EN 1991-1-4 vychází z 10 minutové střední rychlosti větru).



Obr. 2.1 Nahodilý charakter zatížení větrem

2.2 Zásady výpočtu dle normy ČSN EN 1991-1-4

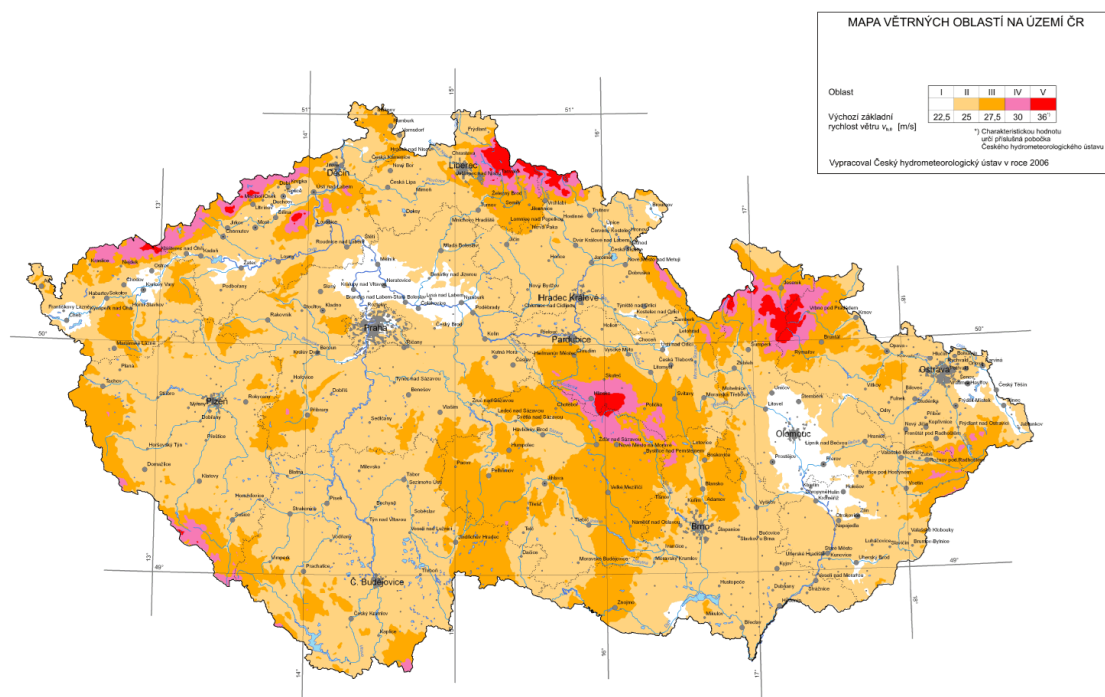
Rychlost větru a dynamický tlak jsou složeny ze střední a flukтуаční složky. Střední rychlost větru se má stanovit ze základní rychlosti větru v_b , která závisí na větrných podmínkách, a na změně větru s výškou, stanovené z drsnosti terénu a orografie. Hodnota v_b je dána mapou větrných oblastí. Maximální dynamický tlak je definován ve výrazu (2.10). Flukтуаční složka větru je vyjádřena intenzitou turbulence.



Obr. 2.2 Střední složka zatížení větrem, flukтуаční složka zatížení větrem a zatížení ekvivalentními setrvačnými silami při kmitání konstrukce

2.3 Základní hodnoty

Výchozí základní rychlosti větru $v_{b,0}$ jsou uvedeny v mapě větrných oblastí na území ČR. Jsou stanoveny pro terén typu II ($z_0 = 0,05$ m), výšku 10 m. Zahrnují vliv nadmořské výšky, nejsou rozlišeny podle ročního období ($c_{season} = 1$) a směru větru ($c_{dir} = 1$).



Obr. 2.3 Mapa větrných oblastí

Základní rychlosti větru v_b budou proto ve většině případů rovné výchozím základním rychlostem $v_{b,0}$. Střední rychlosti $v_m(z)$ se mění s výškou a zahrnují vliv drsnosti a orografie terénu.

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} \quad (2.2)$$

kde v_b je základní rychlost větru ve výšce 10 m nad zemí v terénu kategorie II, definovaná jako směr větru a ročního období, $v_{b,0}$ je výchozí základní rychlost větru, c_{dir} je součinitel směru větru, c_{season} je součinitel ročního období

2.4 Střední rychlost větru

Střední rychlost $v_m(z)$ větru se mění s výškou a zahrnuje místní vlivy jako je drsnost terénu a orografie terénu

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b \quad (2.3)$$

kde $v_m(z)$ je střední rychlost větru ve výšce nad terénem, $c_r(z)$ je součinitel drsnosti terénu, $c_o(z)$ je součinitel orografie, který je roven 1,0 pokud není uvedeno jinak

2.4.1 DRSNOST TERÉNU

Model turbulentního proudu je postaven na předpokladu, že při maximálních rychlostech větru je turbulence proudu způsobena pouze obtékáním překážek na povrchu terénu. Vliv jiných faktorů, např. gradientů teploty nebo vlhkosti vzduchu, se zanedbává. Důsledkem drsnosti terénu je změna střední rychlosti s výškou a vznik turbulence.

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{pro } z_{min} \leq z \leq z_{max} \quad (2.4)$$

$$c_r(z) = c_r(z_{min}) \quad \text{pro } z \leq z_{min} \quad (2.5)$$

kde k_r je součinitel terénu, který závisí na uvažovaném parametru drsnosti terénu z_0

$$k_r = 0,19 \left(\frac{z}{z_{0,II}} \right)^{0,07} \quad (2.6)$$

kde $z_{0,II}=0,05$ (kategorie terénu II), z_{min} je minimální výška definovaná v Tab. 2.1, z_{max} se uvažuje 200 m

Tab. 2.1 Kategorie terénů a jejich parametry

Kategorie terénu	$z_0[m]$	$z_{min}[m]$
0 Moře nebo pobřežní oblasti vystavené otevřenému moři	0,003	1
I Jezera nebo vodorovné oblasti se zanedbatelnou vegetací a bez překážek	0,01	1
II Oblasti s nízkou vegetací jako je tráva a s izolovanými překážkami (stromy, budovy), jejichž vzdálenost je větší než 20násobek výšky překážek	0,05	2
III Oblasti rovnoměrně pokryté vegetací nebo budovami nebo s izolovanými překážkami, jejichž vzdálenost je maximálně 20násobek výšky překážek (jako jsou vesnice, předměstský terén, souvislý les)	0,3	5
IV Oblasti, ve kterých je nejméně 15 % povrchu pokryto pozemními stavbami, jejichž průměrná výška je větší než 15 m	1,0	10

Parametr z_0 a výška z_{min} závisí na kategorii terénu, Doporučené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 2.1 v závislosti na pěti reprezentativních kategoriích terénu.

Výraz (2.4) je platný, pokud je drsnost terénu na návětrné straně neměnná na dostatečně dlouhé vzdálenosti, nutné pro stabilizaci profilu.

2.4.2 OROGRAFIE

Použitý model pro zatížení větrem je definován pro rovinný terén. Lze ho použít i pro mírně zvlněnou krajinu. Vliv orografie lze zanedbat, pokud je sklon svahu menší než 3°. Na návětrném svahu se přízemní vrstvy proudu vzduchu zrychlují, na závětrném svahu se zpomalují. Ke zvýšení střední rychlosti může docházet např. při určitých směrech větru v úzkých údolích nebo v horských oblastech.

2.5 Turbulence větru

Intenzita turbulence $I_v(z)$ ve výšce je definována jako podíl směrodatné odchylky turbulence a střední rychlosti větru

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_I}{c_0(z) \cdot \ln(z/z_0)} \quad \text{pro } z_{min} \leq z \leq z_{max} \quad (2.7)$$

$$I_v(z) = I_v(z_{min}) \quad \text{pro } z \leq z_{min} \quad (2.8)$$

kde k_I je součinitel turbulence, doporučená hodnota 1,0, z_0 je parametr drsnosti terénu, uvedený v Tab. 2.1, c_0 je součinitel orografie

2.5.1 TURBULENČNÍ SLOŽKA

Turbulentní složka rychlosti větru má střední hodnotu 0 a směrodatnou odchylku σ_v . Směrodatnou odchylku stanovíme:

$$\sigma_v = k_r \cdot v_b \cdot k_I \quad (2.9)$$

kde σ_v je směrodatná odchylka turbulence

2.6 Maximální dynamický tlak

Pro určení výsledného zatížení větrem je významný charakteristický maximální dynamický tlak $q_p(z)$. Zahrnuje krátké a střednědobé fluktuace větru

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) = c_e(z) \cdot q_b \quad (2.10)$$

kde ρ je měrná hmotnost vzduchu, která závisí na nadmořské výšce, teplotě a barometrickém tlaku, který je v oblasti očekáván při silné vichřici, doporučená hodnota 1,25 kg/m³

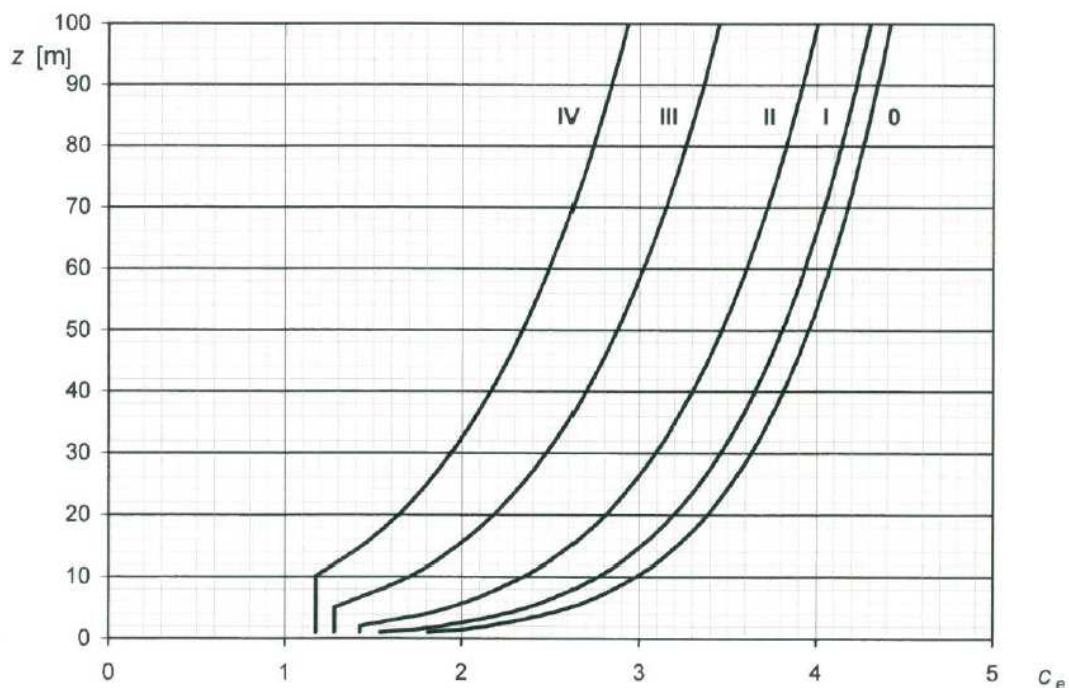
$c_e(z)$...součinitel expozice

$$c_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b} \quad (2.11)$$

q_b ...základní dynamický tlak větru

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2(z) \quad (2.12)$$

Vliv turbulence je zohledněn vynásobením základního tlaku větru výrazem $[1+7 \cdot I_v(z)]$, kde $I_v(z)$ je intenzita turbulence



Obr. 2.4 Součinitele expozice $c_e(z)$ pro $c_0 = 1,0$ a $k_I = 1,0$

2.7 Síly od větru

Sílu od větru F_w působící na konstrukci nebo na nosný prvek, lze stanovit přímo použitím výrazu:

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \quad (2.13)$$

kde $c_s c_d$ je součinitel konstrukce, c_f je součinitel síly pro konstrukce nebo nosné prvky, $q_p(z_e)$ je maximální dynamický tlak v referenční výšce z_e , A_{ref} je referenční plocha konstrukce nebo nosného prvku

2.8 Součinitel konstrukce

Flukтуаční složka zatížení je náhodná v čase i v prostoru. Náhodnost v prostoru se u konstrukcí větších rozměrů projevuje zmenšením odezvy, resp. ekvivalentního statického zatížení v důsledku nesoučasného působení náhodného zatížení v různých místech na povrchu konstrukce. Vliv velikosti konstrukce vyjadřuje součinitel c_s . Pro malé konstrukce je jeho hodnota rovna 1, pro velké konstrukce je menší než 1.

Součinitel c_d vyjadřuje vliv dynamických vlastností konstrukce a zpravidla zvyšuje velikost ekvivalentního zatížení. Při zatížení ve směru větru se v této normě uvažuje pouze nejnižší tvar kmitání. Oba vlivy nelze od sebe úplně oddělit. V ČSN EN 1991-1-4 je definován součinitel konstrukce $c_s c_d$, který vyjadřuje celkový účinek obou vlivů. Minimální přípustná hodnota součinitele konstrukce je $c_s c_d = 0,85$.

2.9 Součinitel síly

Součinitele síly udávají celkový účinek větru na konstrukci, nosný prvek nebo dílec jako celek včetně tření, pokud to není výslovně vyloučeno.

2.9.1 SOUČINITEL SÍLY PRO KOULE

Součinitel síly ve směru $c_{f,x}$, pro koule se stanoví jako funkce Reynoldsova čísla R_e a ekvivalentní drsnosti k/b .

$$R_e = \frac{b \cdot v(z_e)}{\nu} \quad (2.14)$$

b ...průměr

ν ...kinematická viskozita vzduchu ($\nu = 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)

Doporučené hodnoty $c_{f,x}$, stanovené z měření v proudu vzduchu s malou turbulencí jsou uvedeny na následujícím obrázku. Hodnoty jsou odvozeny pro Reynoldsovo číslo

$$v = \sqrt{2 \cdot q_p / \rho}$$

Součinitele svislé síly $c_{f,z}$:

$$c_{f,z} = 0 \quad \text{pro} \quad z_e > b/2$$

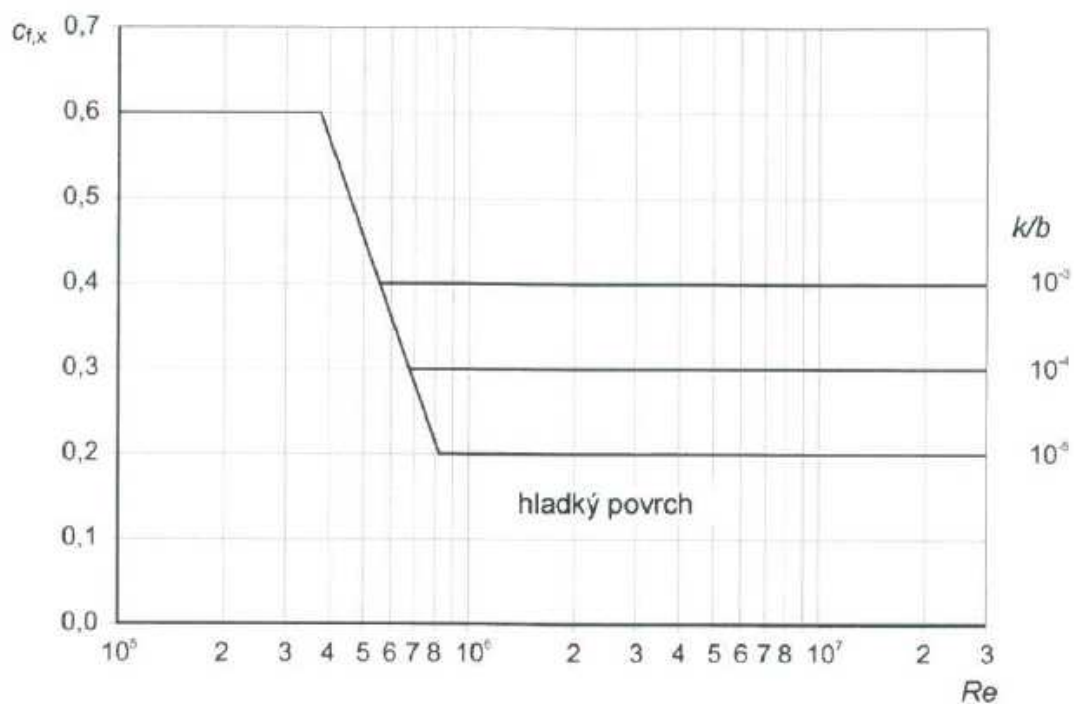
$$c_{f,z} = 0,6 \quad \text{pro} \quad z_e < b/2$$

Referenční plocha A_{ref} pro oba případy odpovídá

$$A_{\text{ref}} = \pi \cdot b^2/4 \quad (2.15)$$

Referenční výška z_e

$$z_e = z_g + b/2 \quad (2.16)$$



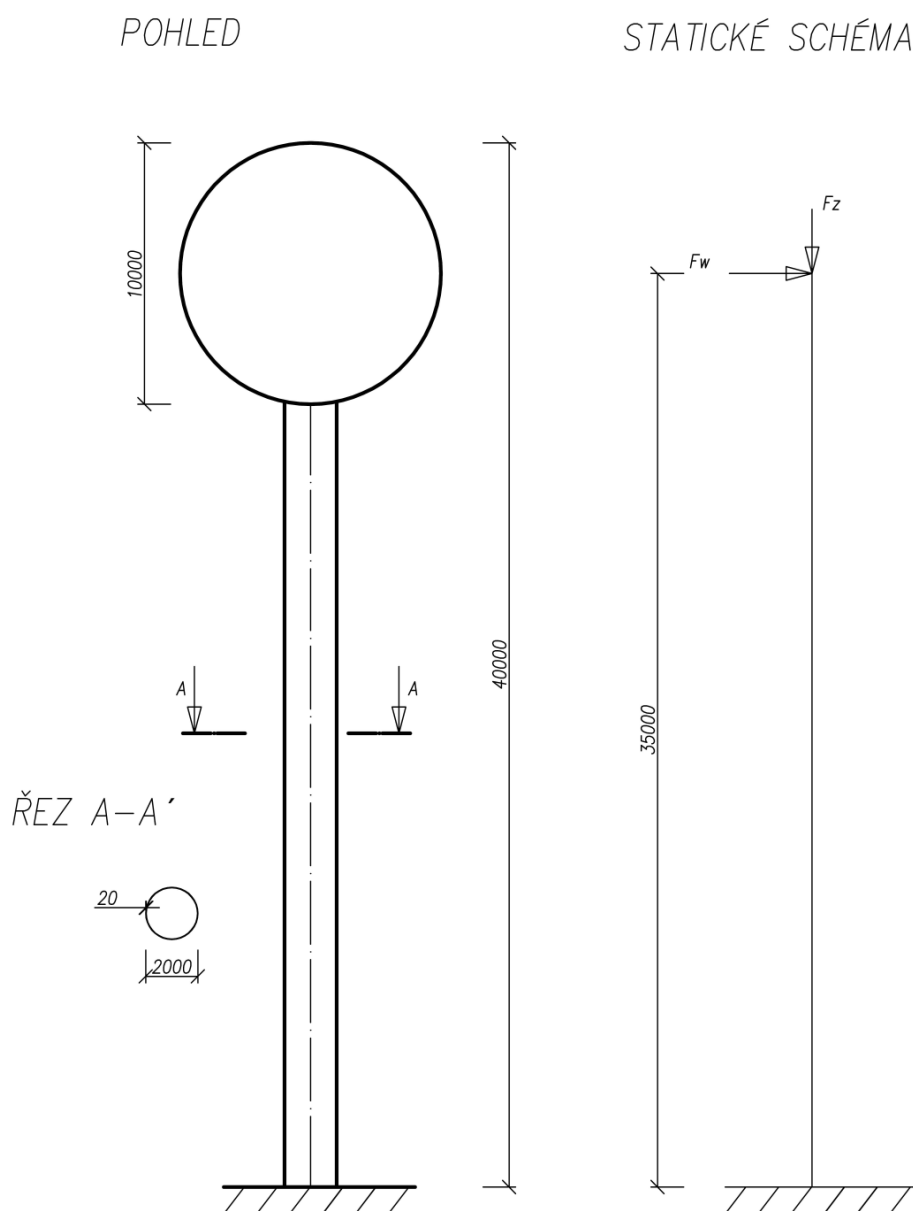
Obr. 2.5 Součinitel síly ve směru větru pro kouli

Tab. 2.2 Ekvivalentní drsnost povrchu k

Druh povrchu	Ekvivalentní drsnost k [mm]	Druh povrchu	Ekvivalentní drsnost k [mm]
Sklo	0,0015	hladký beton	0,2
leštěný kov	0,002	hoblované dřevo	0,5
jemný nátěr	0,006	drsňý beton	1,0
stříkaný nátěr	0,02	neopracované řezivo	2,0
lesklá ocel	0,05	rez	2,0
šedá litina	0,2	cihelne stěny	3,0
pozinkovaná ocel	0,2		

2.10 Výpočet odezvy konstrukce dle normy ČSN EN 1991-1-1

Vodojem o celkové výšce 40 metrů, průřez nosné konstrukce z oceli S355 tvořené svařovanou ocelovou rourou 2000 x 20 mm o výšce 30 metrů. Zásobník vody je tvořen dutou ocelovou koulí o objemu 500 m^3 . Průměr koule je 10 metrů. Plechy jsou z vnější strany ošetřeny jemným nátěrem. Vodojem je umístěn v lokalitě Brno-venkov.



Obr. 2.6 Pohled a statické schéma vodojemu

Základní rychlost větru odpovídá umístění objektu dle mapy větrných oblastí a ze součinitele směru větru a ročního období:

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 25,0 = \mathbf{25 \text{ m/s}}$$

Střední rychlost větru:

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b$$

$$k_r = 0,19 \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} = 0,19 \left(\frac{0,5}{0,5} \right)^{0,07} = 0,19$$

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) = 0,19 \cdot \ln \left(\frac{35}{0,05} \right) = 1,245$$

$$c_o = 1,0$$

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b = 1,245 \cdot 1,0 \cdot 25 = \mathbf{31,12 \text{ m/s}}$$

Intenzita turbulence:

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_I}{c_0(z) \cdot \ln(z/z_0)}$$

$$\sigma_v = k_r \cdot v_b \cdot k_I = 0,19 \cdot 25 \cdot 1,0 = 4,75$$

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_I}{c_0(z) \cdot \ln(z/z_0)} = \frac{4,75}{31,12} = \mathbf{0,153}$$

Maximální dynamický tlak:

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) = c_e(z) \cdot q_b = [1 + 7 \cdot 0,153] \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 31,12^2 \\ = \mathbf{1,252 \text{ kN/m}^2}$$

Síly od větru:

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref}$$

Reynoldsovo číslo R_e

$$R_e = \frac{b \cdot \sqrt{2 \cdot q_p / \rho}}{\nu} = \frac{10 \cdot \sqrt{2 \cdot 1252 / 1,25}}{15 \cdot 10^{-6}} = 2 \cdot 10^7$$

Ekvivalentní drsnost k/b .

$$k/b = 0,006/10 = 6 \cdot 10^{-4}$$

Referenční plocha A_{ref}

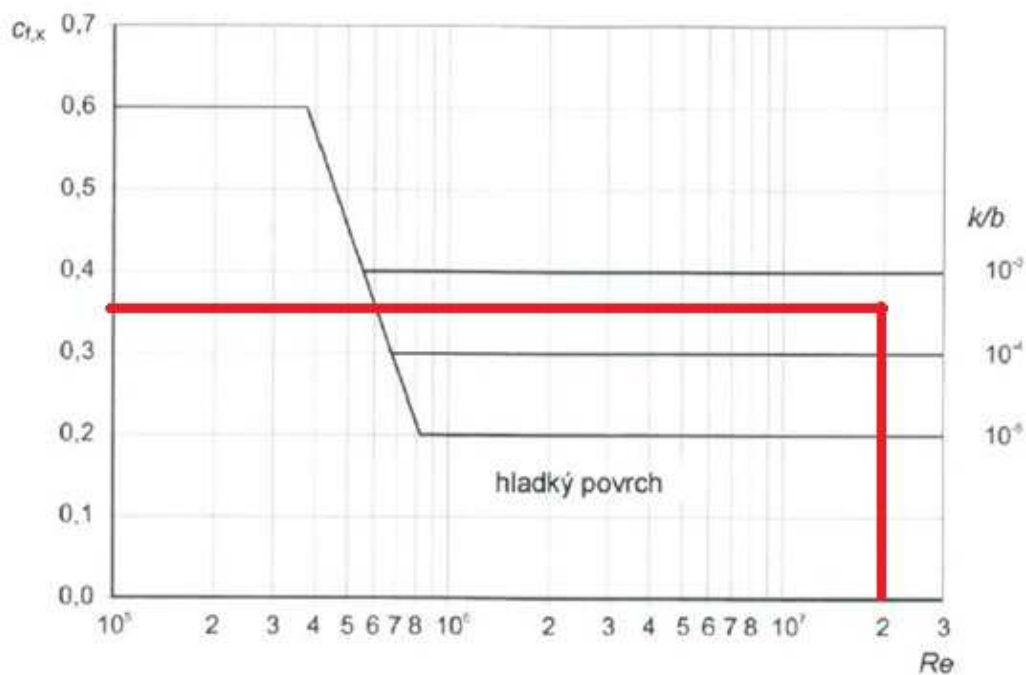
$$A_{ref} = \pi \cdot \frac{b^2}{4} = \pi \cdot \frac{10^2}{4} = 78,54 \text{ m}^2$$

Referenční výška z_e

$$z_e = z_g + \frac{b}{2} = 30 + \frac{10}{2} = 35 \text{ m}$$

Součinitel síly od větru na kouli, odečtený z grafu:

$$c_f = 0,36$$



Obr. 2.7 Odečtení součinitele síly ve směru větru pro kouli

Součinitel konstrukce $c_s c_d$ budeme brát roven 1,0

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} = 1,0 \cdot 0,36 \cdot 1252 \cdot 78,54 = \mathbf{35,4 \text{ kN}}$$

Svislé zatížení

Vlastní tíha konstrukce ve vetknutí

$$F_{z,1} = \mathbf{835 \text{ kN}}$$

Zatížení od vody:

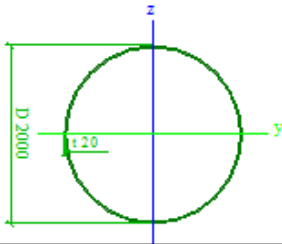
$$F_{z,2} = \mathbf{5000 \text{ kN}}$$

Celkové svislé zatížení

$$F_z = \mathbf{5835 \text{ kN}}$$

Průřezové charakteristiky viz Obr. 2.8

Jméno	CS1	
Typ	Trubka	
Detailní	2000; 20	
Materiál	S 355	
Výroba	obecný	
Vzpěr y-y, z-z	b	b
Výpočet FEM	x	



A [m ²]	1,2438e-01	
A y, z [m ²]	7,9184e-02	7,9184e-02
I y, z [m ⁴]	6,0947e-02	6,0947e-02
I w [m ⁵], t [m ⁴]	0,0000e+00	1,2193e-01
Wey y, z [m ³]	6,0947e-02	6,0947e-02
WpI y, z [m ³]	7,8387e-02	7,8387e-02
d y, z [mm]	0	0
c YLSS, ZLSS [mm]	0	0
alfa [deg]	0,00	
AL [m ² /m]	6,2829e+00	

Obr. 2.8 Průřezové charakteristiky

Vnitřní síly ve vetknutí:

$$N = F_z = 5835 \text{ kN}$$

$$M = F_w \cdot h = 35,4 \cdot 35 = 1239 \text{ kNm}$$

Napětí ve vetknutí:

$$\sigma_N = N/A = 5835/0,12438 = 46,9 \text{ MPa}$$

$$\sigma_M = M/W_{el} = 1239/0,060947 = 20,3 \text{ MPa}$$

$$\sigma = \sigma_N + \sigma_M = 46,9 + 20,3 = 67,2 \text{ MPa}$$

Maximální vodorovné posunutí vypočtené programem SCIA:

$$u_x = 7,1 \text{ mm}$$

KAPITOLA 3

STOCHASTICKÝ PŘÍSTUP

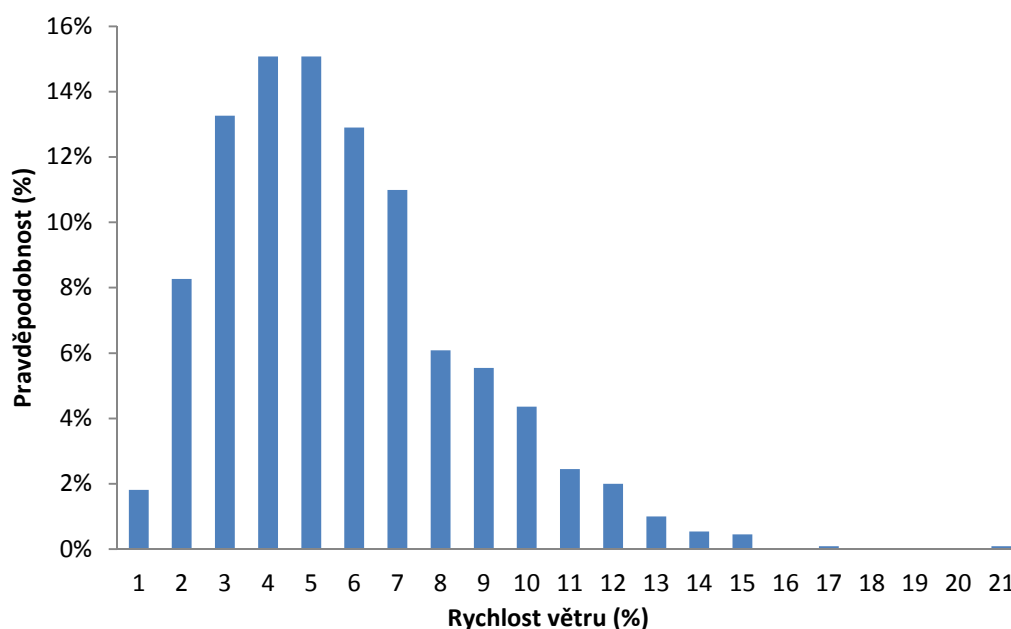
Pro použití generovaného větru, budou použita data naměřená v dané lokalitě. Pro stochasticky synteticky generovaný vítr bude využita stochastická matice využívající Markovův řetězec. Stochastická pravděpodobností matice bude vytvořena použitím 2 rozdílných přístupů. V prvním přístupu bude použit 1. úroveň stochastické pravděpodobností matice Markovova řetězce a v druhém přístupu bude použita 2. úroveň stochastické pravděpodobností matice Markovova řetězce, která využívá aktuální a předešlé hodnoty pro generování nadcházející hodnoty. Rovnoměrně generované náhodné hodnoty budou použity pro změnu mezi po sobě jdoucími hodnotami a mezi hodnotami rychlosti větru, které byly naměřeny. Hlavní statické veličiny, které budou dále používány: střední hodnota, směrodatná odchylka, medián, percentily, parametry Weibullova rozdělení a spektrální hustota hodnot rychlosti větru. V závěru bude prezentováno porovnání mezi synteticky generovaným větrem a se skutečně naměřenými hodnotami rychlosti větru.

Pro Markovův proces je pravděpodobnost současného stavu vyvozena z informací z předešlého stavu. Markovův řetězec reprezentuje systém elementárního postupu z jednoho stavu do druhého v čase. Úroveň řetězce udává počet kroků v čase z předešlého účinku rozdělení pravděpodobnosti do současné úrovně, který může být větší než jedna.

První úroveň Markovova řetězce je obecně používána pro generování hodnot rychlosti větru, přičemž od druhého a vyššího Markovova řetězce je očekáváno zlepšení výsledků synteticky generovaných hodnot rychlosti větru.

3.1 Histogram

Z reálně naměřených rychlostí větru vytvoříme histogram, který nám grafickou formou znázorňuje distribuci. Na Obr. 3.1 je zřejmé, jak vypadá standartní rozdělení větru. Kdy minimální hodnoty jsou nejčastěji obsaženy a maximální hodnoty jsou obsažené pouze výjimečně.



Obr. 3.1 Histogram naměřených hodnot

3.2 Markovův řetězec

Markovův řetězec je proces, který může být vyjádřen pomocí parametrů pomocí empiricky odhadnuté přechody pravděpodobností mezi diskrétními stavy v pozorovaných stavech. Markovův řetězec první úrovně je příkladem, kde je každý následující stav závislý pouze na okamžitém předešlém stavu. Markovovi řetězce vyšších úrovní jsou závislé na předchozích dvou hodnotách nebo více než dvou hodnotách, závisí na stupni úrovně.

Nechť $X(t)$ je náhodný proces, mající diskrétní stavy $S=\{1,2,..., K\}$. Obecně pro danou časovou řadu $t_1 < t_2 < \dots < t_{n-1} < t_n$ budou vlastnosti pravděpodobnosti:

$$\begin{aligned} Pr\{X(t_n) = i_n | X(t_1 = i_1, \dots, X(t_{n-1}) = i_{n-1})\} \\ = Pr\{X(t_n) = i_n | X(t_{n-1}) = i_{n-1}\} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Vlastnosti pravděpodobností $Pr\{X(t) = j | X(s) = i\} = P_{ij}(s, t)$ jsou přechody pravděpodobností $r = t - s$ ze stavu i do stavu j pro $0 \leq s \leq t$, kdy $1 \leq i$ a $j \leq k$.

Pro k stavů, první úroveň matici pravděpodobnostního přechodu má velikost $k \times k$ a následující formu:

$$P = \begin{bmatrix} p_{1,1} & p_{1,2} & \dots & p_{1,k} \\ p_{2,1} & p_{2,2} & \dots & p_{2,k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{k,1} & p_{k,2} & \dots & p_{k,k} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Úrovně pravděpodobnosti v čase t jsou získány z vlastních frekvencí v úrovni k . Když n_{ij} je počet změn ze stavu i do stavu j v pořadí rychlosti, maximální pravděpodobnost získáme z přechodových pravděpodobností:

$$p_{ij} = n_{ij} / \sum_j n_{ij} \quad (3.3)$$

Přechodové pravděpodobnosti v každém stavu jsou mezi 0 a 1. Součet v řádku se rovná 1. Matematicky vyjádřeno:

$$\sum_{j=1} p_{ij} = 1 \quad (3.4)$$

Druhá úroveň matice pravděpodobnostního přechodu:

$$P = \begin{bmatrix} p_{1,1,1} & p_{1,1,2} & \cdots & p_{1,1,k} \\ p_{1,2,1} & p_{1,2,2} & \cdots & p_{1,2,k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{1,k,1} & p_{1,k,2} & \cdots & p_{1,k,k} \\ p_{2,1,1} & p_{2,1,2} & \cdots & p_{2,1,k} \\ p_{2,2,1} & p_{2,2,2} & \cdots & p_{2,2,k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{k,k,1} & p_{k,k,2} & \cdots & p_{k,k,k} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

V této matici pravděpodobnost $p_{i,j,k}$ je pravděpodobnost nadcházejícího stavu rychlosti větru k , když současný stav rychlosti větru je j a předcházející stav rychlosti větru byl i . Tyto matice jsou základem pro výpočet rychlosti větru. Pokud přechodová pravděpodobnost v i -tém a j -tém řádku v k -tém stavu je $p_{i,j,k}$, pak distribuční funkce je:

$$P_{i,j,k} = \sum_{l=1}^k p_{i,j,l} \quad (3.6)$$

Distribuční funkce nám pomůže k získání nadcházející rychlosti větru použitím generátoru náhodných čísel.

3.3 Tvorba přechodových matic

Matice budou převedeny do stavů rychlosti větru. Každý stav má dolní a horní mez. Každý stav obsahuje rychlosti větru mezi mezemi.

Matice budou provedeny prvního a druhého řádu. Matice prvního řádu závisující pouze na jednom předchozím stavu, bude vytvořena tak že ve sloupcích je předešlý stav a v řádcích se nachází následující stav. Vždy hledáme předcházející hodnotu a k tomu odpovídající následující hodnotu. Takto rozdělíme všechna data do tabulky, ve které získáme, kolikrát z naměřených dat padla ze stavu x do stavu y viz Tab. 2.1. Po rozdělení všech hodnot do tabulky sečteme každý celý řádek, a jednotlivé hodnoty přechodových pravděpodobností podělíme sumou všech hodnot v řádku. Tímto získáme přechodovou matici prvního řádu.(

Přechodová matice druhého řádu závisí na dvou předešlých stavech, postup je obdobný jako u přechodové matice prvního řádu avšak vznikne nám matice, s počtem řádků umocněných na počet stavů.

Matice by měla prokazovat největší pravděpodobnosti vyskytující se na diagonále matice. To značí, že s největší pravděpodobností následující rychlost větru bude ve stejném stavu, čili blízké rychlosti předchozího stavu.

Tab. 3.1 Počet přechodů ze stavu x do stavu y

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	4	11	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	11	29	15	16	8	5	4	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1	17	42	29	25	18	6	4	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	2	12	32	30	36	13	17	2	10	4	4	2	1	0	1	0	0	0	0	0	0
5	1	8	21	32	35	25	15	12	5	4	3	3	1	0	0	0	1	0	0	0	0
6	0	7	10	23	21	20	21	12	6	8	4	4	3	0	2	0	0	0	0	0	0
7	1	2	13	6	17	23	15	13	16	4	4	4	2	1	0	0	0	0	0	0	0
8	0	3	5	9	11	10	7	5	6	8	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	3	8	4	14	15	7	6	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
10	0	1	1	7	3	6	8	6	5	3	4	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	3	4	8	2	0	5	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	1	3	2	1	1	3	1	4	2	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	1	3	2	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1
14	0	0	1	0	0	0	2	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0

3.4 Generování syntetických rychlostí větru

Máme-li spočtené přechodové matice obou řádů, převedeme tyto matice na distribuční rozdělení matice, to znamená, že budeme postupně v řádku matice sčítat jednotlivé pravděpodobnosti, správným postupem bychom měli docílit, že matice by měla v posledním sloupci každého řádku končit 1. Nebo v řádcích kde je nulová pravděpodobnost končit 0.

Pro generování stavů rychlostí větrů si zvolíme náhodně první stav. Poté uniformovaným generátorem náhodných čísel vygenerujeme náhodná čísla v mezích 0 a 1. Pro následující stav rychlosti větru prvního řádu Markovova procesu, hodnota bude porovnána s hodnotou v i-tém řádku distribuční pravděpodobnostní matice. Pokud je náhodné číslo větší než distribuční pravděpodobnost než předcházejícího stavu, ale menší než nebo rovna distribuční funkci následujícího stavu, bude převzán následující stav.

V případě druhého řádu Markovova procesu, bude opět náhodně zvolen první stav, od kterého se bude pomocí distribuční pravděpodobnostní matice odvozovat následující hodnoty. Postup shodný jako v prvním řádu, s rozdílem že následující stav je založen na dvou předcházejících stavech oproti jednomu stavu prvního řádu. Najde se odpovídající řádek matice odpovídající předešlého stavu a řádek současného stavu větru. Následující stav bude vyčíslen pomocí distribuční matice v i-tém sloupci.

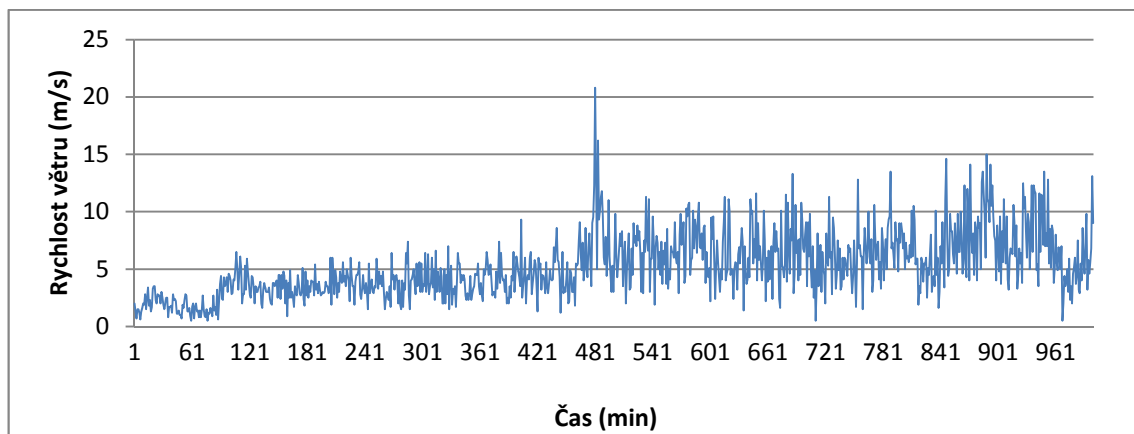
Stavy rychlosti větru byly převedeny na aktuální rychlosti větru použitím následujícího vztahu:

$$V = V_l + z_i \cdot (V_l - V_r) \quad (3.7)$$

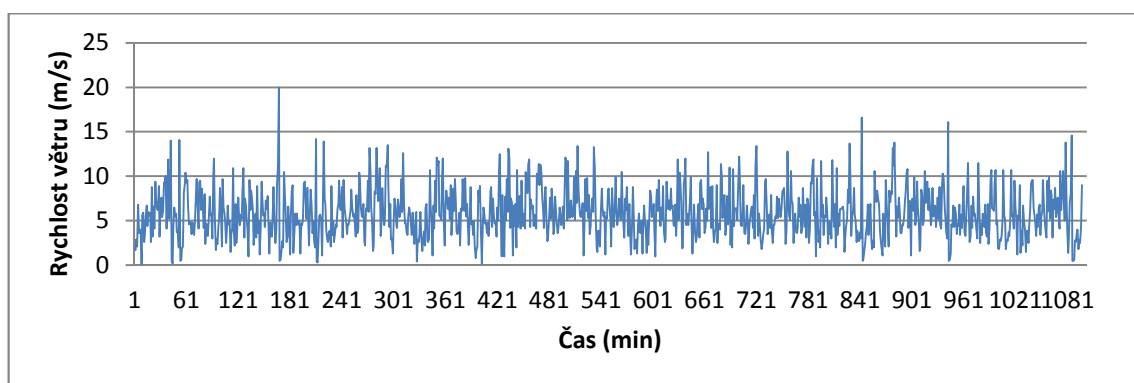
kde V_l a V_r jsou dolní a horní mez stavu rychlostí větru a z_i je generované náhodné číslo v mezích 0 a 1. Z tohoto vztahu může být vygenerován libovolně dlouhý záznam rychlostí větru.

Tab. 3.7 Porovnání počtu reálně naměřených hodnot a generovaných hodnot dle Markova řetězce 2. řádu

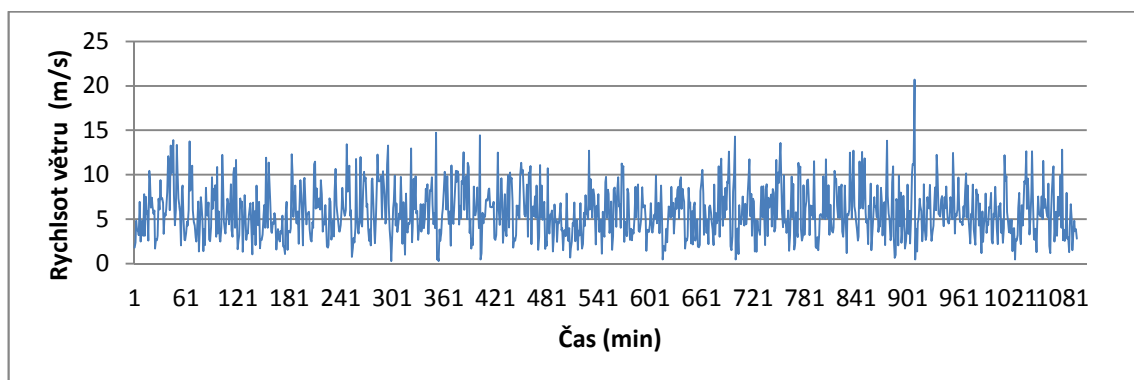
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Měř Gen	Měř Gen	Měř Gen	Měř Gen	Měř Gen	Měř Gen	Měř Gen	Měř Gen	Měř Gen	Měř Gen	Měř Gen	Měř Gen	Měř Gen	Měř Gen	Měř Gen	Měř Gen	Měř Gen	Měř Gen	Měř Gen	Měř Gen	Měř Gen
1	4	2	11	5	2	1	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	11	0	29	5	15	17	16	16	8	10	5	6	4	2	0	2	2	0	0	0
3	1	2	17	10	42	20	29	27	25	18	18	7	6	9	4	1	1	9	2	3
4	2	2	12	6	32	22	30	31	36	28	13	21	17	14	2	10	10	7	4	2
5	1	1	8	19	21	7	32	17	35	25	24	15	23	12	9	5	6	4	3	3
6	0	0	7	2	10	16	23	6	21	33	20	31	21	19	12	15	6	30	8	6
7	1	1	2	6	13	12	6	19	17	36	23	24	15	18	13	8	16	15	4	14
8	0	0	3	0	5	4	9	12	11	6	10	15	7	20	5	7	6	5	8	2
9	0	0	0	2	3	0	8	16	4	9	14	11	15	11	7	8	6	8	3	5
10	0	0	1	0	1	0	7	0	3	4	6	11	8	18	6	4	5	0	3	16
11	0	0	0	0	4	0	4	3	5	4	1	8	1	2	3	0	0	0	5	10
12	0	0	0	1	0	3	0	2	6	1	11	1	6	3	0	1	0	4	1	2
13	0	0	0	0	2	0	0	1	0	3	1	2	7	0	0	0	2	1	5	1
14	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	2	1	0	3	1	0
15	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



Obr. 3.2 Časový záznam reálně naměřených rychlostí větru



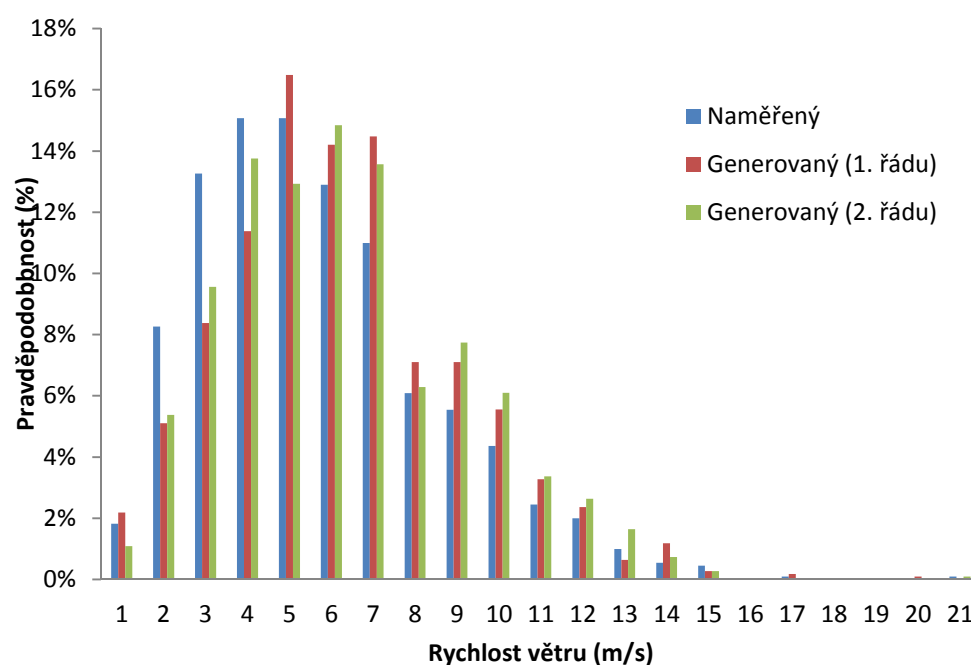
Obr. 3.3 Časový záznam syntetických rychlostí větru dle 1. řádu



Obr. 3.4 Časový záznam syntetických rychlostí větru dle 2. řádu

Tab. 3.8 Hlavní statistické parametry naměřených hodnota a synteticky generovaných hodnot

Lokalita	Data	Průměr	Směrodatná odchylka	Maximum	Minimum
Brno-venkov	Naměřená	5,32	2,78	20,80	0,50
	Syntetický 1. řád	5,83	2,83	20,00	0,10
	Syntetický 2. řád	5,83	2,86	20,70	0,30



Obr. 3.5 Porovnání histogramů

Jak je patrné z časových záznamů, vítr je závislý na části dne, kdy je měřen. Vítr se v ranních a nočních hodinách pohybuje v menších hodnotách než za dne. Toto je dáno oteplováním povrchu Země důsledkem slunečního záření.

Drobné rozdíly jsou zapříčiněny generováním náhodných čísel, s jinými hodnotami můžeme dosáhnout lepších, ale i horších výsledků.

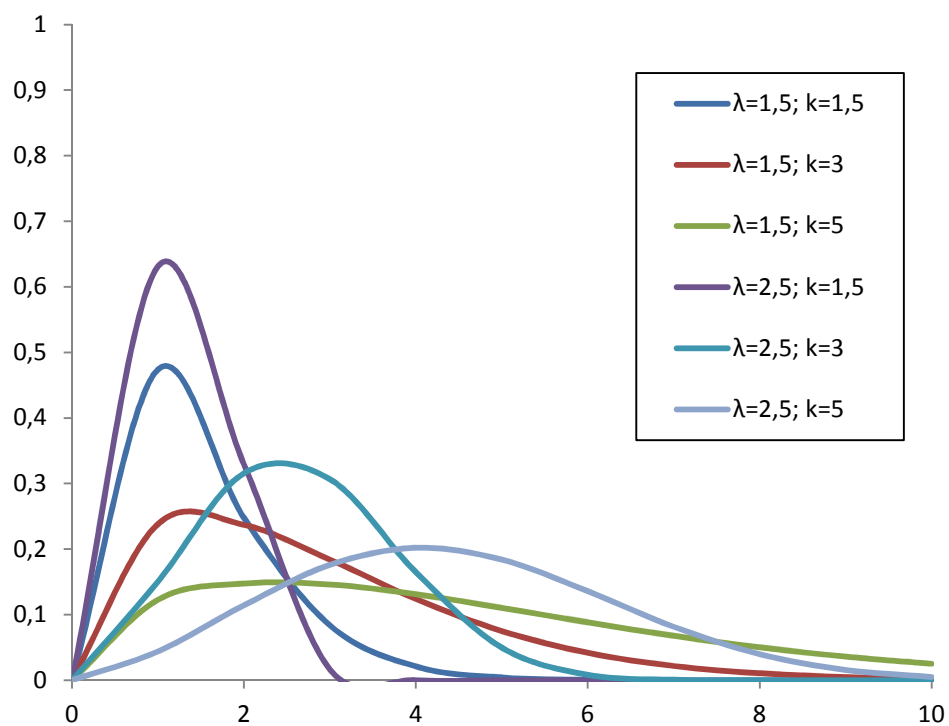
3.5 Weibullovo rozdělení

V pravděpodobnosti a statistice je Weibullovo rozdělení spojité rozdělení, které je pojmenováno po švédském matematikovi Waloddi Weibullovi, který ji popsal v roce 1951.

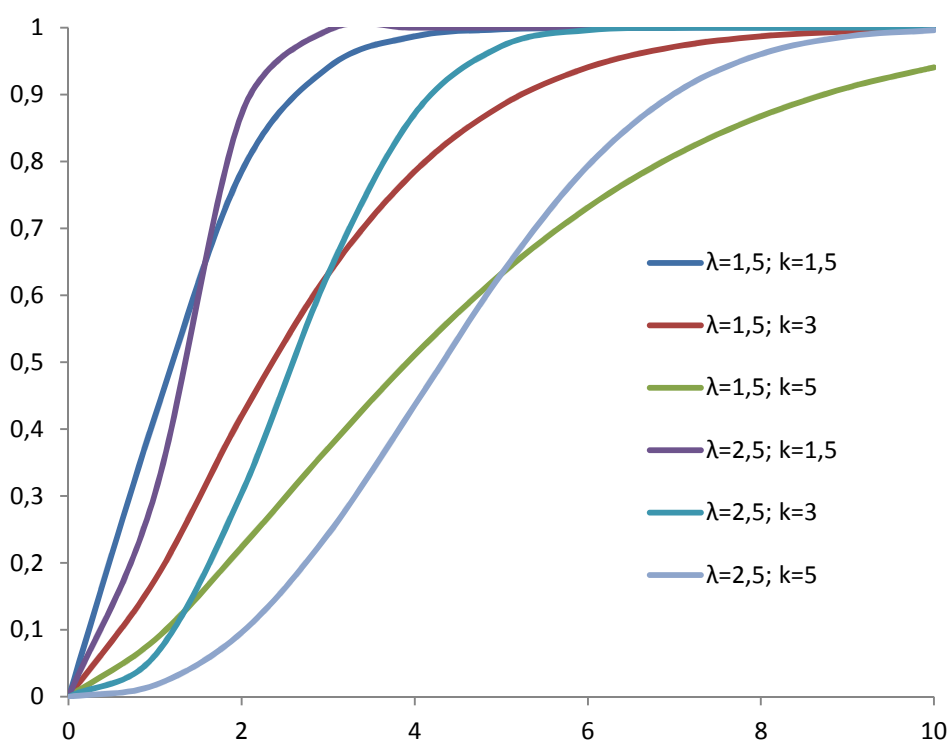
Pravděpodobnostní distribuce naměřených hodnot a synteticky generovaných hodnot rychlostí větru je charakterizován tímto rozdělením.

Toto rozdělení se blízce podobá skutečnému rozdělení větru a je proto v současnosti nejvíce využíváno.

Rozdělení je závislé pouze na dvou parametrech, proto odvození těchto dvou parametrů je nesmírně důležité. Získání těchto parametrů je základem pro správné vyčíslení rozdělení. Parametry budou získány z vícera metod a na závěr porovnány. Tvarový (shape) parametr odpovídá rozmezí 1,2 až 2,75 pro všechny větrné podmínky na světě.



Obr. 3.6 Hustota pravděpodobnosti



Obr. 3.7 Distribuční funkce

3.5.1 DEFINICE

Obor hodnot

$$x \in [0; +\infty) \quad (3.8)$$

Pravděpodobnostní hodnota funkce:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{k}{\lambda} \cdot \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} \cdot e^{-(x/\lambda)^k} \\ 0 \end{cases} \quad (3.9)$$

Distribuční hodnota funkce:

$$F(x) = 1 - e^{-(x/\lambda)^k} \quad (3.10)$$

průměr	$\lambda \Gamma(1 + 1/k)$	(3.11)
--------	---------------------------	--------

medián	$\lambda (\ln(2))^{1/k}$	(3.12)
--------	--------------------------	--------

rozptyl	$\lambda^2 \Gamma(1 + 2/k) - \mu^2$	(3.13)
---------	-------------------------------------	--------

λ ... scale parametr (rozměrový parametr) [–]

k ...shape parametr (tvarový parametr) [m/s²]

3.5.2 METODY PRO ODHAD PARAMETRŮ

3.5.2.1 Grafická metoda (graphic method)

Grafická metoda je založena na derivování distribuční funkce $F(x)$, při použití dvojitého logaritmu distribuční funkce

$$\ln[-\ln[1 - F(x)]] = \lambda \cdot \ln x - \lambda \cdot \ln k \quad (3.14)$$

vyjádřením $\ln[-\ln[1-F(x)]]$ získáme $y = ax + b$, $\ln x$ a λ . Použitím distribuční funkce, získáme $(\ln x_i; \ln[-\ln[1-F(x_i)]])$ páry a poté pomocí metody nejmenších čtverců získáme koeficienty přímek a , b . Kde:

$$\lambda = a \quad (3.15)$$

$$k = \exp(-b/a) \quad (3.16)$$

3.5.2.2 Metoda maximální věrohodnosti (maximum likelihood method) MLM

Tato metoda vyžaduje rozsáhlé výpočty iterací, Tvarový parametr (shape = λ) a rozměrový parametr (scale = k) jsou odhadnuty z rovnic:

$$\lambda = \left(\frac{\sum_{i=1}^n v_i^k \ln(v_i)}{\sum_{i=1}^n v_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln(v_i)}{n} \right)^{-1} \quad (3.17)$$

$$k = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (v_i)^\lambda}{n} \right)^{\frac{1}{\lambda}} \quad (3.18)$$

kde: $v_i \dots$ je rychlost větru, $n \dots$ je počet nenulových hodnot rychlostí větru

Tato metoda se počítá ve dvou fázích: 1) použití dat rychlosti větru a výpočet sumací dle vzorců a s opatrností na nulové rychlosti větru, které dělají logaritmus neurčitý, pak vypočítáme parametr tvaru dle rovnice 2) nalezení parametru rozměru použitím numerických výpočtů hledáním kořene z rovnice

3.5.2.3 Momentová metoda (moment method)

Máme-li střední rychlost větru $\bar{V}$ a směrodatnou odchylku σ , můžeme oba parametry vypočítat touto metodou a použitím vzorců:

$$k = \frac{\bar{V}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\lambda}\right)} \quad (3.19)$$

$$\left(\frac{\sigma}{\bar{V}}\right)^2 = \left[\frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{\lambda}\right)}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\lambda}\right)^2} \right] - 1 \quad (3.20)$$

$$\bar{V} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \right) \quad (3.21)$$

$$\sigma = \left[\left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{V}) \right) \right]^{0,5} \quad (3.22)$$

$\Gamma \dots$ gama funkce

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} \exp(-t) dt \quad (3.23)$$

3.5.2.4 Metoda hustoty energie (power density method) PD

Jedna z novějších metod, která je doporučena pro výpočet obou parametrů, má jednoduché vzorce, jednodušeji se používá a je také méně náročná na výpočet. Metoda vychází z:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \int_0^{\infty} v^3 f(v) dv \quad (3.24)$$

kde ρ je hustota vzduchu v oblasti

$$\frac{\overline{V^3}}{(\bar{V})^3} = \frac{\Gamma(1 + 3/\lambda)}{\Gamma(1 + 1/\lambda)^3} \quad (3.25)$$

kde $\overline{V^3}$ je kubická střední rychlost větru

$$\overline{V^3} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^3 \quad (3.26)$$

kde $\overline{V^3}/(\bar{V})^3$ je faktor energie (E_{pf}), hodnoty mezi 1,45 – 4,4 pro většinu rozdělení větru

$$\lambda = 1 + \frac{3,69}{(E_{pf})^2} \quad (3.27)$$

3.5.2.5 Empirická metoda

Je speciálním tvarem momentové metody, nenáročná na výpočetní čas a podává přijatelné hodnoty parametrů.

$$\lambda = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}} \right)^{-1,086} \quad 1 \leq \lambda \leq 10 \quad (3.28)$$

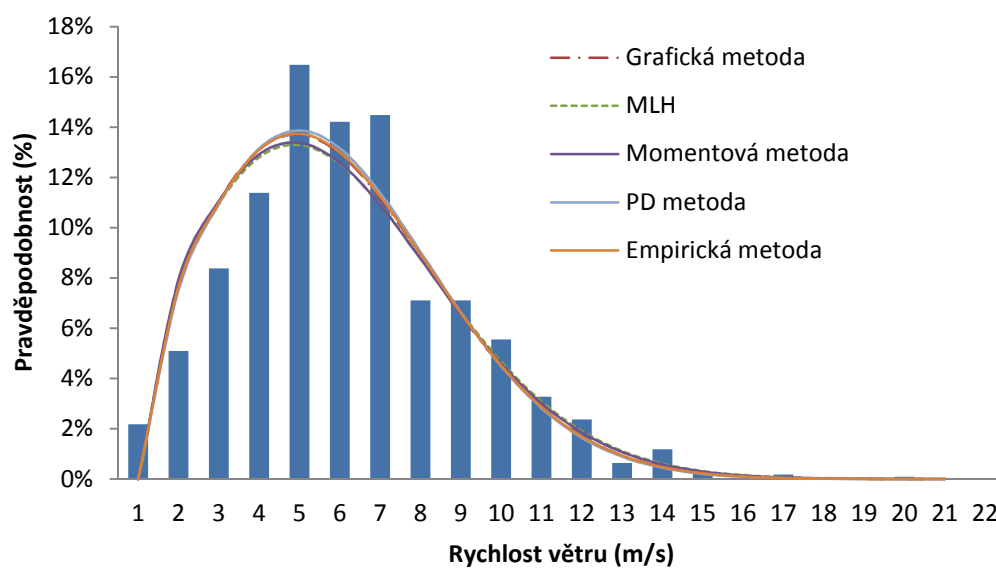
$$\bar{v} = k\Gamma(1 + 1/\lambda) \quad (3.29)$$

3.6 Porovnání hodnot parametrů

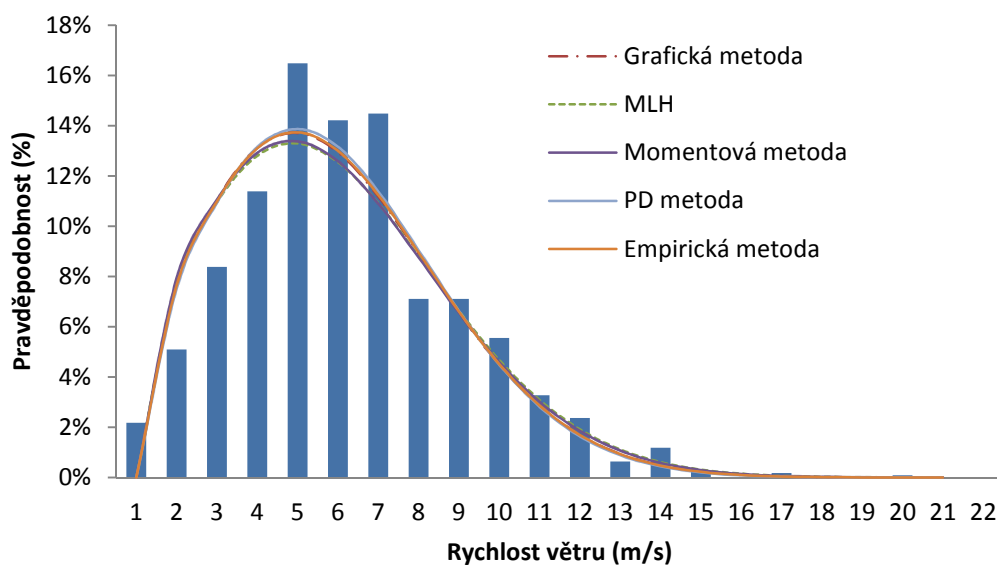
Jak je zřejmé z Tab. 3.9 jsou všechny hodnoty obou parametrů přibližně totožné. Z tohoto plyne, že když použijeme PD metodu anebo empirickou metodu budou parametry dostatečně přesné a nespornou výhodou obou těchto metod je rychlost jejich výpočtu.

Tab. 3.9 Porovnání hodnot parametrů

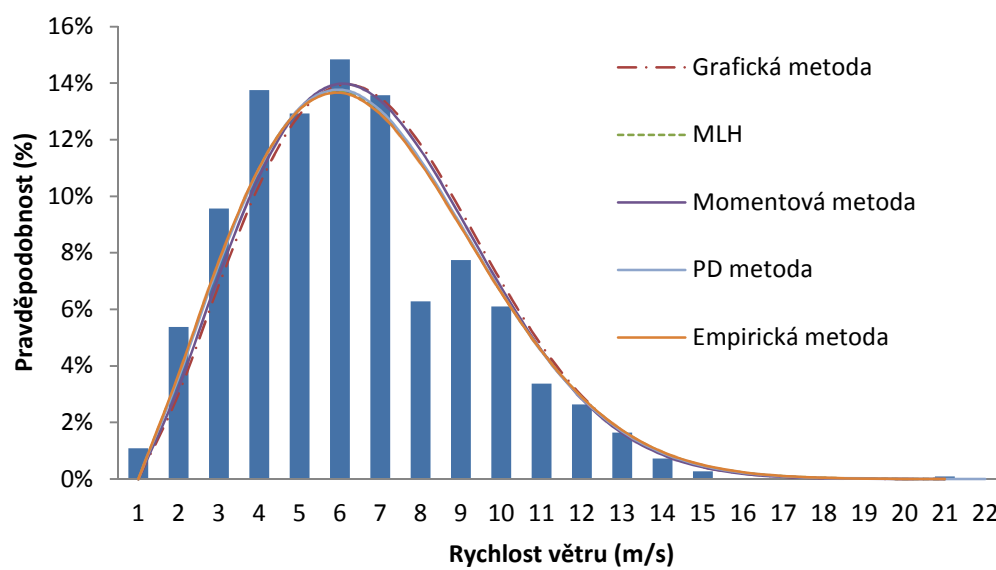
Lokalita	Metoda	Naměřené		Generované 1.řádu		Generované 2.řádu	
		λ	k	λ	k	λ	k
Brno-venkov	Grafická metoda	2,020	6,320	2,148	6,566	2,262	6,702
	MLH metoda	1,870	6,020	2,089	6,640	2,152	6,582
	Momentová metoda	1,980	6,100	2,090	6,598	2,231	6,620
	PD metoda	1,976	6,007	2,187	6,579	2,166	6,580
	Empirická metoda	2,026	6,009	2,159	6,579	2,143	6,579



Obr. 3.8 Porovnání histogramu naměřeného větru a Weibullova rozdělení



Obr. 3.9 Porovnání histogramu generovaného větru 1. řádu a Weibullova rozdělení

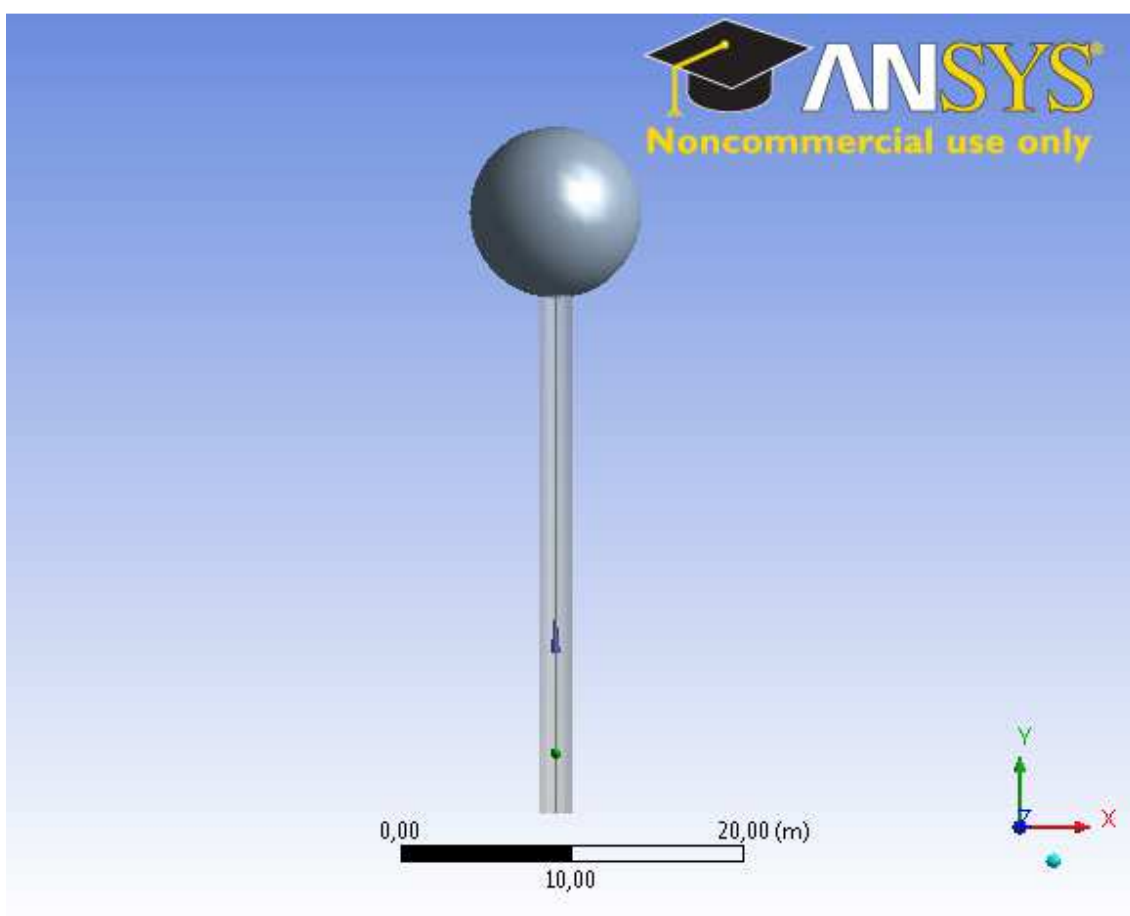


Obr. 3.10 Porovnání histogramu generovaného větru 2. řádu a Weibullova rozdělení

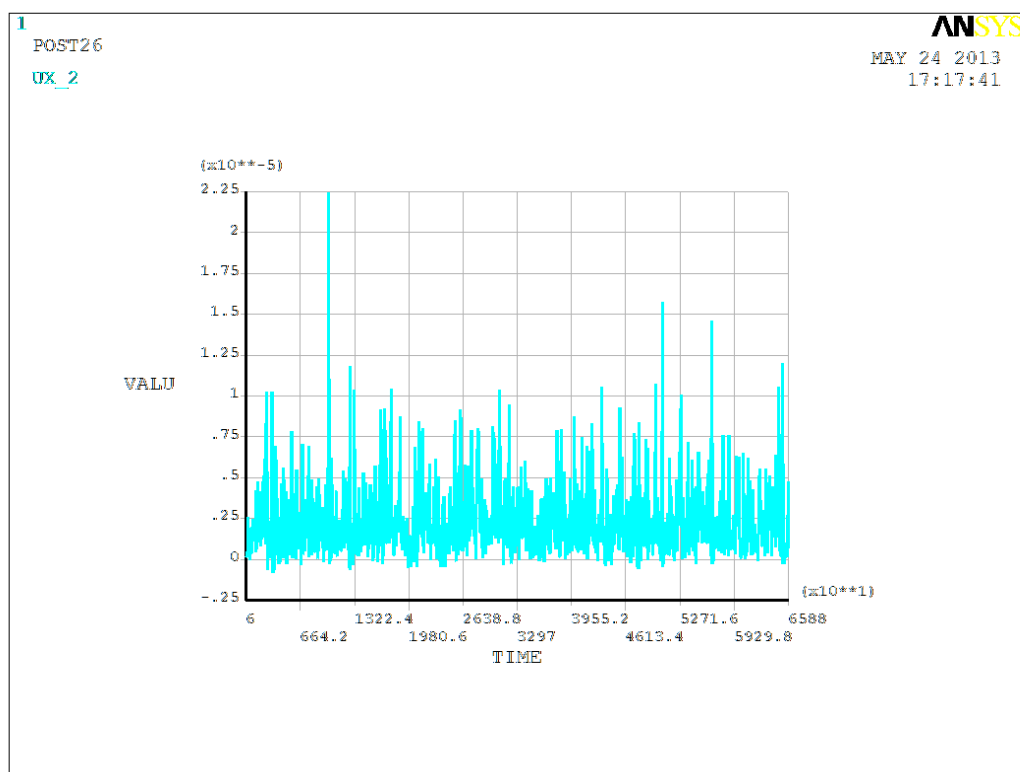
3.7 Výpočet odezvy konstrukce deterministickým přístupem

Výpočet odezvy konstrukce bude proveden programem ANSYS. Posouzení provedeme pro 3 případy, reálně naměřená rychlosti větru, syntetickým větrem dle Markovova řetězce prvního řádu a syntetickým větrem dle Markovova řetězce druhého řádu.

Jednotlivé rychlosti větru převedeme na tlak větru působící na kulovou plochu a dále na jednotlivé síly, kterými zatížíme vodojem. Použijeme stejný model viz. Obr. 3.11



Obr. 3.11 Model pro metodu konečných prvků



Obr. 3.12 Graf hodnot vodorovného posunu konstrukce pro generovaný vítr v čase

Byly provedeny simulace pro všechny tři vzorky dat. Z výsledků je patrné, že z důvodu zatížení menšími silami než u zatížení dle normy ČSN EN 1991-1-4, je konstrukce méně namáhána a napětí a posunutí je nižší.

Tab. 3.10 Srovnání vodorovného posunu konstrukce

	Naměřený	Generovaný 1. řádu	Generovaný 2. řádu
Maximální posun (mm)	2,38	2,24	2,35

Největší posunutí vznikne od reálně naměřených hodnot z důvodu, že ve vzorku dat rychlostí větru, je nejvyšší rychlost ze všech tří vzorků dat.

KAPITOLA 4

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo srovnání stochastického a deterministického přístupu stanovení odezvy výškové konstrukce na zatížení větrem. Postupně byly představeny postupy výpočtu a dosaženo výpočtů na modelu. Byl vybrán model vodojemu a na něm porovnány oba přístupy.

Deterministický přístup byl vypočten dle normy ČSN EN 1991-1-4. Zatížení dle normy má různá omezení a zatížení působí pouze jako statické zatížení konstantní silou, která se mění po výšce. U některých konstrukcí jako jsou lávky, mosty, štíhlé budovy, je důležité jak se bude chovat konstrukce při zatížení skutečným větrem. V normě jsou dynamické účinky uvažovány v součinitelích, které převádějí výpočet na statický. V závěru kapitoly bylo posouzeno maximální vodorovné posunutí.

Více pozornosti v této práci bylo zaměřeno na stochastický přístup stanovení odezvy a byl vytvořen generátor syntetického větru, který byl úspěšně použit, a byly vygenerovány dva vzorky dat rychlostí syntetického větru. Hlavní statické parametry vykazaly jen drobné výchyly. Při zpracování byla použita data minutových rychlostí větru z dané lokality.

Dále byla provedena simulace na modelu z konečných prvků a zatížena naměřenými rychlostmi větru a synteticky generovanými rychlostmi větru. Síly měnící se v čase namáhají konstrukci více než pouze statické zatížení. Dochází ke kmitání konstrukce. Z důvodu, že v datech nebyla hodnota rychlosti větru vyšší než základní hodnota rychlosti větru, jsou deformace z deterministického přístupu nižší.

Cíl mé bakalářské práce považuji za splněný. Věřím, že tato bakalářská práce poslouží jako podklad pro generování syntetického větru v různých lokalitách a na různých konstrukcích.

LITERATURA

ČSN EN 1991-1-4 Eurokód 1: Zatížení stavebních konstrukcí – Část 1-4: Obecná zatížení – Zatížení větrem 2007

KRÁL, J.. Navrhování staveb na zatížení větrem podle ČSN EN 1991-1-4, Časopis Stavebnictví, číslo 02/2007

SHAMSHAD, A., BAWADI, M.A, WAN HUSSIVERTSEN, W.M.A., MAJID, T.A, SANUSI, S.A.M.. First and second order Markov chain models for synthetic generation of wind speed time series University of Civil Engineering Malaysia 2003

WALCK, Christian. Hand-book on STATISTICAL DISTRIBUTIONS for experimentalists University of Stockholm Sweden 2007

AKDAG, A., DINLER, Ali. Seyit A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications Turkey 2008

ROCHA, P.A.C, DE SOUSA, Ricardo Coelho, DE ANDRADE, Carla Freitas, DA SILVA, Maria Eugenia. Comparasion of seven numerical methods for determinig Weibull parametrs for wind energy generation in the northeast region of Brazil Brazil 2011

BHATTACHARYA, Paritosh. A study on Weibull distribution for estimating the parametrs India 2010

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1 Kategorie terénů a jejich parametry	16
Tab. 2.2 Ekvivalentní drsnost povrchu k	22
Tab. 3.1 Počet přechodů ze stavu x do stavu y	33
Tab. 3.2 Pravděpodobnostní přechodová matice prvního řádu pro lokalitu Brno-venkov	34
Tab. 3.3 Pravděpodobnostní přechodová matice druhého řádu pro lokalitu Brno-venkov (pouze část)	35
Tab. 3.4 Distribuční pravděpodobnostní přechodová matice prvního řádu pro lokalitu Brno-venkov.....	37
Tab. 3.5 Distribuční pravděpodobnostní přechodová matice druhého řádu pro lokalitu Brno-venkov (pouze část)	38
Tab. 3.6 Porovnání počtu reálně naměřených hodnot a generovaných hodnot dle Markova řetězce 1. řádu	40
Tab. 3.7 Porovnání počtu reálně naměřených hodnot a generovaných hodnot dle Markova řetězce 2. řádu	41
Tab. 3.8 Hlavní statistické parametry naměřených hodnota a synteticky generovaných hodnot.....	43
Tab. 3.9 Porovnání hodnot parametrů.....	51
Tab. 3.10 Srovnání vodorovného posunu konstrukce	55

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Vodojem.....	10
Obr. 2.1 Nahodilý charakter zatížení větrem	13
Obr. 2.2 Střední složka zatížení větrem, flukтуаční složka zatížení větrem a zatížení ekvivalentními setrvačnými silami při kmitání konstrukce	13
Obr. 2.3 Mapa větrných oblastí.....	14
Obr. 2.4 Součinitele expozice	19
Obr. 2.5 Součinitel síly ve směru větru pro kouli	21
Obr. 2.6 Pohled a statické schéma vodojemu	23
Obr. 2.7 Odečtení součinitele síly ve směru větru pro kouli.....	25
Obr. 2.8 Průřezové charakteristiky.....	26
Obr. 3.1 Histogram naměřených hodnot	29
Obr. 3.2 Časový záznam reálně naměřených rychlostí větru.....	42
Obr. 3.3 Časový záznam syntetických rychlostí větru dle 1. řádu.....	42
Obr. 3.4 Časový záznam syntetických rychlostí větru dle 2. řádu.....	42
Obr. 3.5 Porovnání histogramů	43
Obr. 3.6 Hustota pravděpodobnosti	45
Obr. 3.7 Distribuční funkce.....	45
Obr. 3.8 Porovnání histogramu naměřeného větru a Weibullova rozdělení.....	52
Obr. 3.9 Porovnání histogramu generovaného větru 1. řádu a Weibullova rozdělení	52

Obr. 3.10 Porovnání histogramu generovaného větru 2. řádu a Weibullova rozdělení..	53
Obr. 3.11 Model pro metodu konečných prvků	54
Obr. 3.12 Graf hodnot vodorovného posunu konstrukce pro generovaný vítr v čase	55

SEZNAM ZKRATEK

Velká písmena latinské abecedy:

A	průřezová plocha
A_{ref}	referenční plocha konstrukce nebo nosného prvku
E_{pf}	faktor energie
F_w	výsledná síla od větru
$F(x)$	distribuční hodnota funkce
I_v	intenzita turbulence
M	návrhový ohybový moment
N	návrhová osová síla
P	matice pravděpodobnostního přechodu
Pr	vlastnosti pravděpodobnosti
Re	Reynoldsovo číslo
V	stav rychlosti větru
$\overline{V^3}$	kubická střední rychlost větru
$\overline{V}$	střední rychlost větru
V_l	dolní mez stavu rychlosti větru
V_r	horní mez stavu rychlosti větru
W_{el}	elastický modul průřezu

Malá písmena latinské abecedy:

b	průměr konstrukce
c_d	dynamický součinitel
c_{dir}	součinitel směru větru

c_e	součinitel expozice
c_f	součinitel síly
c_o	součinitel orografie
c_r	součinitel drsnosti terénu
c_s	součinitel velikosti konstrukce
$c_s c_d$	součinitel konstrukce
c_{season}	součinitel ročního období
$f(x)$	pravděpodobnostní hodnota funkce
h	výška konstrukce
k	ekvivalentní drsnost
k	tvarový parametr
k_I	součinitel turbulence
k_r	součinitel terénu
q_b	základní dynamický tlak
q_p	maximální hodnota dynamického tlaku
v	rychlost větru
v_0	rychlost větru
$v_{b,0}$	výchozí základní rychlost větru
v_b	základní rychlost větru
v_m	střední rychlost větru
w	tlak větru
x	obor hodnot
z_0	parametr drsnosti terénu
z_e	referenční výška
z_g	vzdálenost od země k uvažovanému prvku
z_i	generované náhodné číslo

z_{max} maximální výška

z_{min} minimální výška

Písmena řecké abecedy:

σ_M napětí od momentu

σ_N napětí od normálové síly

σ_v směrodatná odchylka turbulence

Γ gamma funkce

λ rozměrový parametr

ν kinematická viskozita vzduchu

ρ měrná hmotnost vzduchu