



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 PŘÍHRADOVÉ VÝŠKOVÉ KONSTRUKCE

WIND LOAD ON TRUSS HIGH-RISE STRUCTURES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Petra Komárková

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	Petra Komárková
Název	Účinky větru na příhradové 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

ANSYS Users Manual Revision 14.0, SAS Inc., 2011.

Kolář V., Němec I., Kanický V. FEM Principy a praxe metody konečných prvků, Computer Press, Praha, 1997.

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

ČSN EN 1991-1-4 (730035) Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-4: Obecná zatížení - Zatížení větrem, ČNI Praha, 2007.

Zásady pro vypracování

Práce řeší problematiku zatížení větrem dle norem řady ČSN EN na příhradové konstrukci.

Cílem je popsat odezvu konstrukce na účinek středního tlaku větru, fluktuací a odtrhávání vírů.

V práci bude zahrnut vliv námrazy na změnu aerodynamických vlastností profilů. Úloha bude analyzována s využitím MKP programového systému ANSYS.

Předepsané přílohy

.....

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

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá účinky zatížení větru na výškové příhradové konstrukci. Cílem je popsat odezvu konstrukce na účinek středního tlaku větru, fluktuací a odtrhávání vírů. Dále je zahrnut vliv účinků námrazy na aerodynamické vlastnosti profilů. Analýza konstrukce je prováděna pomocí výpočetního programu ANSYS. V teoretické části práce jsou popsány postupy stanovení jednotlivých zatížení a základní teorie výpočtu. Praktická část potom navazuje na část teoretickou a popisuje práci v programu ANSYS.

Klíčová slova

dynamický tlak větru, aerodynamický součinitel, síla od větru, ekvivalentní statická metoda, součinitel plnosti, referenční plocha, zatížení námrazou, odtrhávání vírů

Abstract

This Bachelor's thesis concerns wind load effects on truss high-rise structure. The aim is to describe response of lattice tower on effects of mean wind load, fluctuations and vortex shedding action. Further problem includes an influence of rime on aerodynamic characteristics of profiles. The structure is performed by means of computing software ANSYS. In the theoretical part there are procedures describing how to determine load on structure and basic theory of calculation. Then the applied part follows the theoretical one and describes operations in ANSYS.

Keywords

peak velocity pressure, wind force coefficient, wind force, equivalent static procedure, solidity ratio, reference area, glaze and rime ice load, vortex shedding

Bibliografická citace VŠKP

KOMÁRKOVÁ, Petra. *Účinky větru na příhradové výškové konstrukce*. Brno, 2013. 119 s.
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(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 9.3.2013

.....

podpis autora

Petra Komárková

Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucímu bakalářské práce Ing. Aleši Nevařilovi, Ph.D. za cenné rady a odborné vedení práce.

OBSAH	8
1. ÚVOD	9
2. ZATÍŽENÍ OBECNĚ	10
2.1 Vítř.....	10
2.2 Námraza všeobecně.....	21
2.2.1 Námraza.....	22
2.2.2 Ledovka.....	27
2.3 Odtrhávání vírů	29
3. TEORIE VÝPOČTU	31
3.1 Statická analýza.....	31
3.2 Modální analýza.....	31
4. ŘEŠENÝ PŘÍKLAD	33
4.1 Model.....	33
4.2 Výpočet zatížení.....	38
4.2.1 Zatížení větrem.....	38
4.2.2 Zatížení námrazou.....	62
4.2.3 Zatížení ledovkou.....	81
4.2.4 Rekapitulace sledovaných veličin.....	92
4.2.5 Odezva kolmo na směr větru.....	94
4.3 Účinky zatížení na příhradovou věž.....	100
4.3.1 Výstupy ze statické analýzy.....	100
4.3.2 Ruční výpočet.....	104
5. ZÁVĚR	108
LITERATURA	111
SEZNAM TABULEK	112
SEZNAM OBRÁZKŮ	115
SEZNAM ZKRATEK	117
PŘÍLOHA 1	119

1. ÚVOD

Předmětem této práce je stanovení účinků zatížení větrem na výškové příhradové konstrukci s rozšířením o kombinaci větru s námrazou. Toto téma bylo vybráno z důvodu prohloubení znalostí o zatížení větrem na stavební konstrukce, jemuž je v předmětech bakalářského studia věnováno velice málo času. Zatížení větrem je probíráno následujícím způsobem: nadiktování rychlosti větru, některých součinitelů a dosazení do vzorce. Student tak ztrácí představu o tom, co vlastně počítá. Není veden vlastním úsudkem či zamyšlením, jelikož je to pro něj daná věc. Přitom zatížení větrem je pro některé konstrukce hlavní složkou zatížení, mnohdy není lehké jej stanovit a v nemálo případech vyžaduje odborné posouzení specialisty či experimentální modelování.

Další zatížení, neprobíráno již vůbec, je zatížení námrazou. Námraza je opět složitý jev, ostatně obdobně jako vítr – je závislá na mnoha parametrech, není tak prozkoumána, obtížně standardizována, atd. Při řešení tohoto zatížení se naskytlo několik problémů a není vyloučeno, že zvolené řešení stanovení zatížení námrazou nemusí zcela odpovídat skutečnosti, v tomto případě však na stranu bezpečnou.

Posledním řešeným „typem“ zatížení je aeroelastický jev – odtrhávání vírů. Tento jev v podstatě řeší odezvu konstrukce ve směru kolmém na směr větru. Zvýšené pozornosti tomuto zatížení je věnováno při řešení komínů a obecně konstrukcí kruhových tvarů. Tato práce se však zabývá příhradovou věží s úhelníkovými průřezy, kde tento jev není tak typický. V práci se postupovalo zjednodušeným způsobem.

Veškeré výpočty jsou prováděny ve výpočetním programu ANSYS 13.0. Problémy, které v něm byly řešeny, by zvládl jakýkoli jiný výpočetní program (SCIA Engineer, RFEM, atd.), ANSYS byl však zvolen za účelem obohacení zkušeností a rozšíření obzoru v odvětví výpočetních programů. Při pracování v tomto programu je třeba se maximálně koncentrovat a interaktivně využívat jeho nápovědu. Tento software uživatele donutí k řádnému uvědomění si významu zadávaných parametrů. Díky značné složitosti tohoto programu je zabráněno nesmyslnému modelování reálných konstrukcí.

2. ZATÍŽENÍ OBECNĚ

2.1 Vítr

Vítr vzniká vyrovnáváním tlaku v atmosféře, která je nerovnoměrně ohřátá Sluncem (sluneční radiací) nebo Zemí (zemní radiací). Je to vektor, který popisuje pohyb částic hmoty vzduchu. Horizontální složka tohoto vektoru je pro projektanta rozhodující [3]. Pro stanovení zatížení stavebních konstrukcí větrem je třeba znát veličiny, které jej charakterizují. Mezi tyto veličiny patří např. směr větru, střední neboli stálá složka rychlosti větru, gradient rychlosti větru, maximální rychlosti větru, proměnná neboli flukтуаční složka rychlosti větru, turbulence vzdušného proudu, režim obtékání, atd. [3].

Při určování zatížení staveb větrem lze využívat postupy a metody uvedené v normě [1]. Následující text obsahuje řadu veličin a pojmů charakterizujících vítr podle [1]:

Výchozí základní rychlost větru v_{b0} je desetiminutová střední rychlost větru s roční pravděpodobností překročení 0,02 nezávisle na směru ve výšce 10 m nad plochým terénem bez překážek (kategorie II), zahrnující vliv nadmořské výšky, pokud je to vyžadováno. Česká republika je rozdělena do pěti větrných oblastí s různými výchozími základními rychlostmi větru (viz NA.4 v [1])

Základní rychlost větru v_b upravená s ohledem na uvažovaný směr větru, roční období popř. roční pravděpodobnost překročení této hodnoty:

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} \cdot c_{prob}, \quad (2.1)$$

kde doporučené hodnoty pro součinitele c_{dir} a c_{season} jsou rovny 1,0, součinitel pravděpodobnosti c_{prob} lze stanovit dle výrazu:

$$c_{prob} = \left(\frac{1 - K \cdot (-\ln(1 - p))}{1 - K \cdot (-\ln(0,98))} \right)^n, \quad (2.2)$$

kde parametr K a exponent n lze nalézt v [1].

Střední rychlost větru $v_m(z)$ závisí na výšce z nad terénem, na drsnosti terénu $c_r(z)$, orografii $c_o(z)$ a základní rychlosti větru v_b určenou podle mapy větrných oblastí na území ČR.

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

Drsnost terénu, která je popsána součinitelem drsnosti $c_r(z)$, vyjadřující změnu střední rychlosti větru v místě konstrukce způsobenou výškou nad úrovní terénu a drsností povrchu terénu na návětrné straně konstrukce pro uvažovaný směr větru.

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln(z/z_0) \quad \text{pro } z_{\min} \leq z \leq z_{\max} = 200 \text{ m} \quad (2.4)$$

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

Součinitel terénu k_r , který závisí na uvažovaném parametru drsnosti terénu z_0 se stanoví podle vztahu:

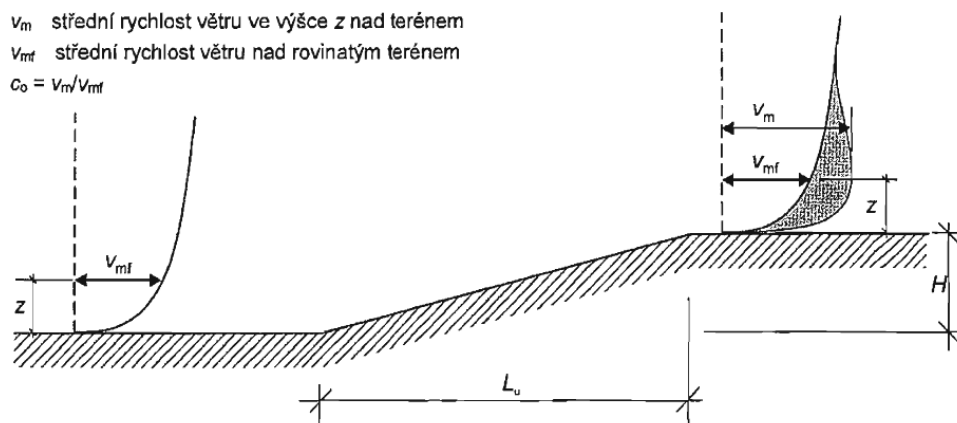
$$k_r = 0,19 \cdot (z_0/z_{0,II})^{0,07}, \text{ kde } z_{0,II} = 0,05 \quad (2.6)$$

Doporučené hodnoty parametrů z_0 a $z_{\min}$ jsou uvedeny v tab.2.1v závislosti na pěti reprezentativních kategoriích terénu.

Tabulka 2.1. Kategorie terénů a jejich parametry [1]

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
	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	10

Vliv orografie. Tam, kde orografie (tj. kopce, útesy apod.) zvyšuje rychlost větru o více než 5%, mají se tyto účinky vzít v úvahu použitím součinitele c_o . Na izolovaných kopcích, hřebenech nebo srážech (útesech) a strmých svazích se vyskytují jiné rychlosti větru, závislé na sklonu $\Phi = H/L_u$ návětrného svahu ve směru větru, kde výška H a délka L_u jsou definované na obr. 2.1. Podrobný postup pro určení součinitele orografie c_o lze najít v [1].



Obr. 2.1: Zvýšení rychlosti větru způsobené orografií [1]

Intenzita turbulence $I_v(z)$ ve výšce z je definována jako podíl směrodatné odchylky turbulence a střední rychlosti větru. Doporučená pravidla pro stanovení $I_v(z)$ jsou dána výrazem:

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

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

kde k_I je součinitel turbulence. Doporučená hodnota k_I je 1,0.

Maximální dynamický tlak $q_p(z)$, který zahrnuje střední a krátkodobé fluktuace rychlosti větru má být stanoven dle výrazu:

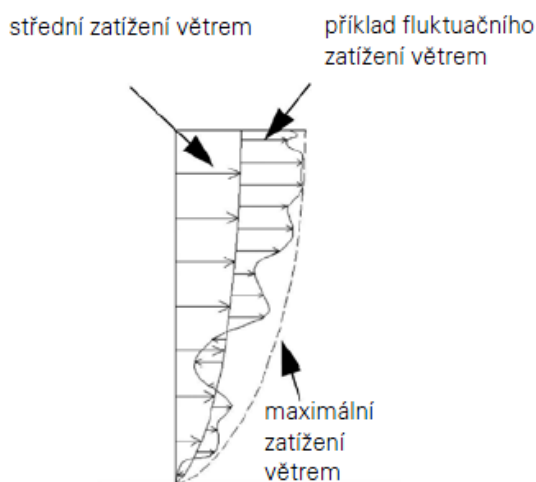
$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) = c_e(z) \cdot q_b, \quad (2.9)$$

kde ρ je měrná hmotnost vzduchu (doporučená hodnota je $1,25 \text{ kg/m}^3$), $c_e(z)$ je součinitel expozice, definovaný výrazem (2.10) a q_b je základní dynamický tlak větru, definovaný výrazem (2.11):

$$c_e(z) = q_p(z)/q_b \quad (2.10)$$

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2(z) \quad (2.11)$$

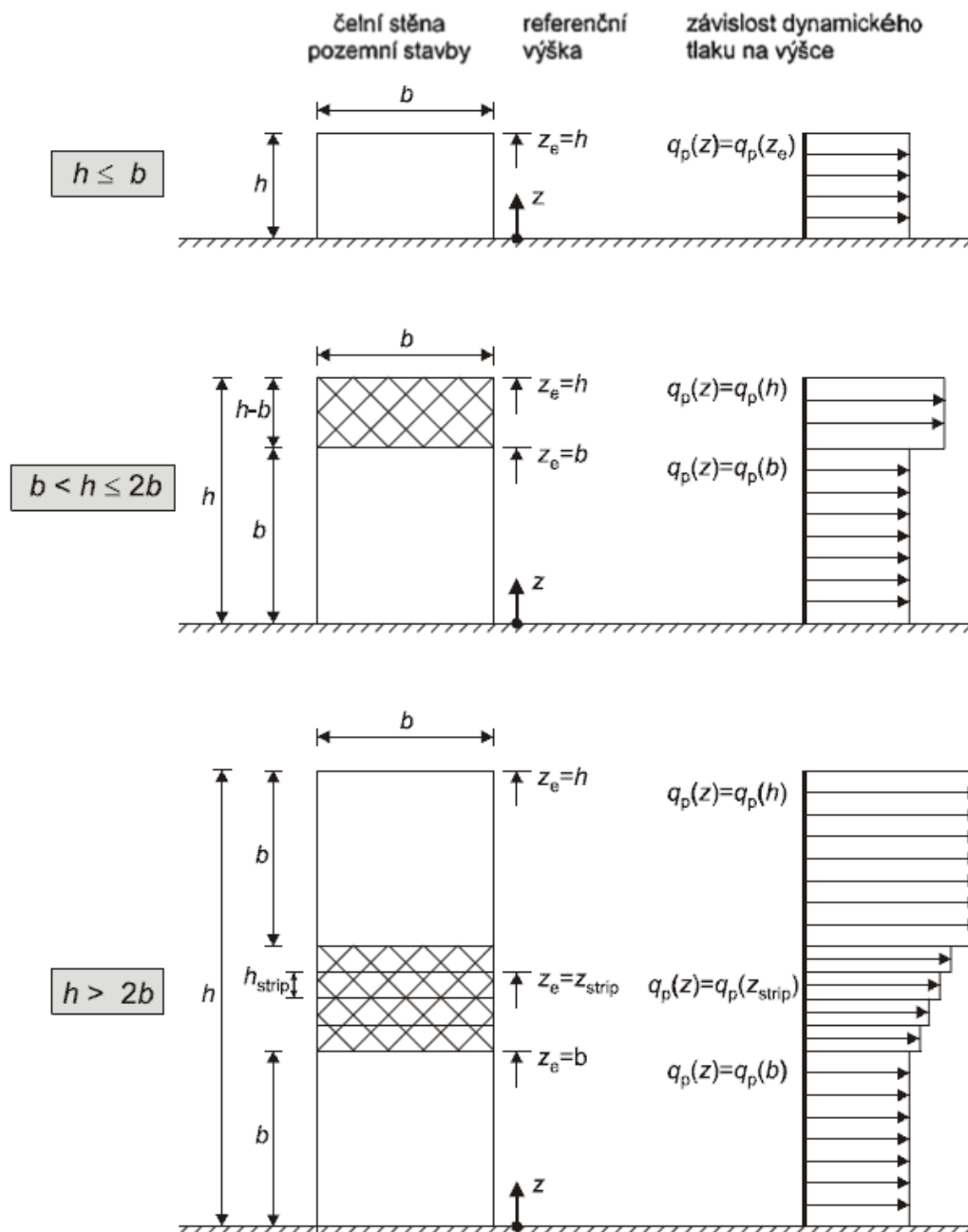
Výše popsané veličiny charakterizují vítr v dané lokalitě a poskytují tak vstupní data pro stanovení zatížení větrem na stavební konstrukce. Na základě těchto veličin lze dospět k průběhu střední a flukтуаční složky rychlosti a dynamického tlaku větru po výšce.



Obr. 2.2: Příkladné znázornění střední a flukтуаční složky rychlosti větru [7]

Postupy stanovení zatížení větrem na stavební konstrukci či pouze její část se poměrně liší. Proto je třeba znát celkovou geometrii objektu, popř. jeho konstrukční systém, materiál, ze kterého bude postaven, opláštění, nenosné prvky zvětšující expozici objektu atd.

Zejména pak rozměry objektu (výška h a šířka b) a následné stanovení tzv. **referenční výšky** z_e ovlivňují způsob zatěžování konstrukce dynamickým tlakem (viz obr. 2.3).



Obr. 2.3: Referenční výška z_e a odpovídající profil dynamického tlaku [1]

Jelikož je problematika stanovení zatížení větrem velice rozsáhlá, dále se výklad omezuje na postupy při řešení příhradových věží s výškou do 200m. Podle [1] je potřeba stanovit **součinitele konstrukce** $c_s c_d$ a **síly od větru** F_w vypočtené ze **součinitelů sil** c_f .

Odezva větru na příhradové věže se na základě ekvivalentní statické metody (2.30) stanoví podle vztahů:

$$F_{m,w}(z) = \frac{q_p(z)}{1+7I_V(z)} A_{ref} \cdot c_f, \quad (2.12)$$

$$F_{T,w}(z) = F_{m,w}(z) \left[1 + (1 + 0,2((z/h)^2) \frac{[1 + 7I_V(z)]c_s c_d - 1}{c_0(z)} \right] \quad (2.13)$$

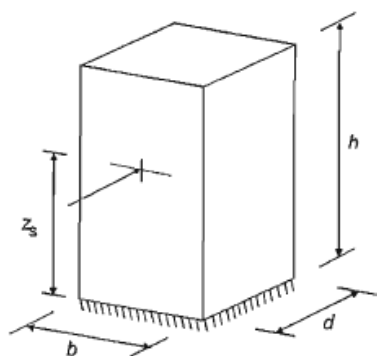
kde c_f (2.21) je součinitel síly a A_{ref} (2.29) je referenční plocha konstrukce nebo nosného prvku [1][4].

Součinitel konstrukce $c_s c_d$ je stanoven jako součin součinitele velikosti konstrukce ($c_s < 1$) a dynamického součinitele ($c_d > 1$). Součinitel velikosti konstrukce c_s vyjadřuje míru korelace náhodného zatížení větrem na návětrné straně konstrukce v čase a prostoru. V daném časovém okamžiku není tlak větru ve všech bodech návětrné plochy stejný a součinitel velikosti konstrukce c_s lze definovat jako poměr mezi skutečným účinkem tlaku větru a účinkem maximálního tahu na stejnou plochu. Dynamický součinitel c_d vyjadřuje vliv dynamických vlastností konstrukce a flukтуаční složky zatížení. [2] Součinitel konstrukce $c_s c_d$ může být určen dle výrazu:

$$c_s c_d = \frac{1 + 2 \cdot k_p \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 \cdot I_v(z_s)} \geq 0,85, \quad (2.14)$$

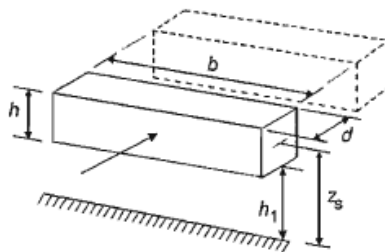
kde z_s je **referenční výška pro stanovení součinitele konstrukce** dle obr. 2.4. Pro konstrukce, na které se obr. 2.4 nevztahuje, se může brát z_s rovno výšce konstrukce h . Výraz (2.14) se použije tehdy, pokud konstrukce odpovídá jednomu z obecných tvarů na obr. 2.4 a je-li významné pouze kmitání ve směru větru v základním tvaru a tento tvar má konstantní znaménko. Podrobný postup výpočtu lze najít v [1].

a) vertikální konstrukce, jako jsou pozemní stavby apod.



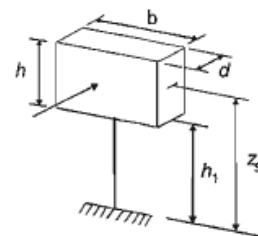
$$z_s = 0,6 \cdot h \geq z_{\min}$$

b) vodorovně orientované stavební konstrukce, jako jsou nosníky apod.



$$z_s = h_1 + \frac{h}{2} \geq z_{\min}$$

c) bodově působící stavební objekty, jako jsou informační tabule apod.



$$z_s = h_1 + \frac{h}{2} \geq z_{\min}$$

Obr. 2.4: Stanovení referenční výšky z_s [1]

Při výpočtu součinitele konstrukce $c_s c_d$ je potřeba znát dynamické charakteristiky vyšetřované konstrukce, proto je nutné je nějakým způsobem stanovit. Norma [1] uvádí doporučené výpočtové postupy založené na předpokladu, že konstrukce mají lineárně pružné vlastnosti a klasické běžné tvary kmitání. Dynamické vlastnosti konstrukce jsou charakterizovány následujícími veličinami:

Základní frekvence n_1 . U konzol s jednou hmotou na konci se pro výpočet základní ohybové frekvence n_1 konstrukcí použije zjednodušený výraz:

$$n_1 = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{g}{x_1}}, \quad (2.15)$$

kde g je tíhové zrychlení $g=9,81 \text{ m/s}^2$, x_1 je maximální výchylka od vlastní tíhy, působící ve směru kmitání v [m]. Pro vícepodlažní budovy vyšší než 50m, jednopodlažní budovy a věže lze použít výraz:

$$n_1 = \frac{46}{h}, \quad (2.16)$$

kde h je výška budovy (věže).

Základní tvar ohybového kmitání $\Phi_1(z)$ budov, věží a komínů, které působí jako konzoly uložené v zemi, lze odhadnout použitím výrazu:

$$\Phi_1(z) = (z/h)^\zeta \quad (2.17)$$

kde ζ se liší v závislosti na typu konstrukce [1]. Pro příhradové ocelové věže $\zeta=2,5$.

Ekvivalentní hmotnost m_e je veličina udávající hmotnost na jednotku délky pro základní tvar kmitání $\Phi_1(z)$ je definována:

$$m_e = \frac{\int_0^l m(s) \Phi_1^2(s) \cdot ds}{\int_0^l \Phi_1^2(s) \cdot ds}, \quad (2.18)$$

kde l je výška nebo rozpětí konstrukce, m je hmotnost na jednotku délky. Pro svislé konzolové konstrukce s nerovnoměrně rozdělenou hmotou lze m_e přibližně aproximovat jako průměrnou hodnotu m v horní třetině konstrukce.

Logaritmický dekrement útlumu δ

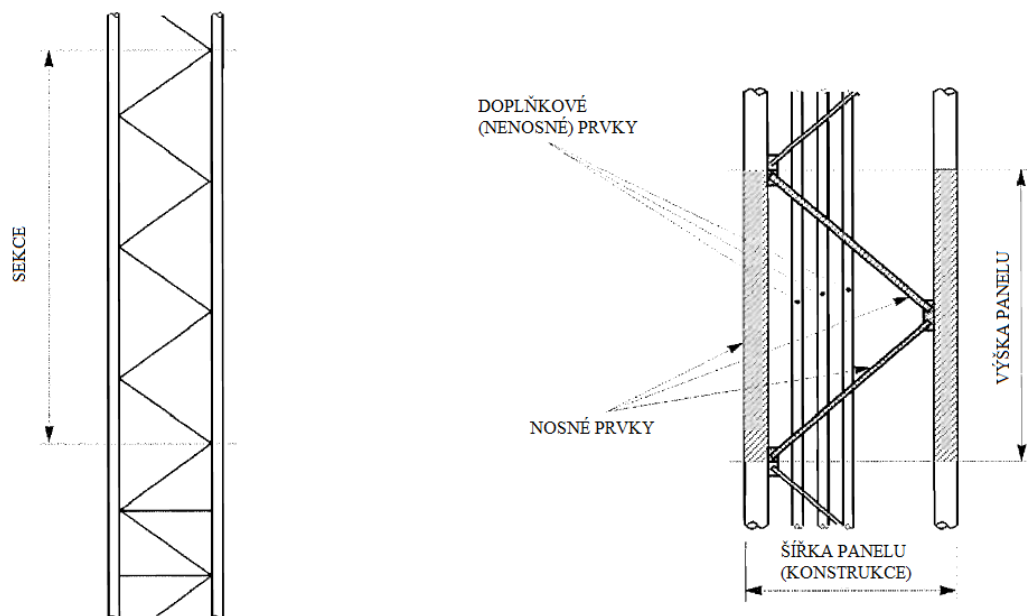
$$\delta = \delta_s + \delta_a + \delta_d, \quad (2.19)$$

kde δ_s je logaritmický dekrement konstrukčního útlumu [1], δ_d je logaritmický dekrement útlumu od zvláštních zařízení (laděné pohlčovače kmitání, nádrže s vodou apod.), který se má stanovit vhodnými teoretickými nebo experimentálními postupy a δ_a , což je logaritmický dekrement aerodynamického útlumu při základním tvaru kmitání $\Phi_1(z)$, odhadován výrazem:

$$\delta_a = \frac{c_f \cdot b \cdot v_m(z_s)}{2 \cdot n_1 \cdot m_e} \quad (2.20)$$

Z výrazu pro výpočet síly od větru F_w (2.12) zbývá objasnit již jen součinitel c_f . Součinitel c_f je **aerodynamický součinitel** udávající celkový účinek větru na konstrukci. Jak již bylo výše zmíněno, výklad je zaměřen na výškové příhradové ocelové konstrukce. S výhodou lze tedy využít postup pro stanovení aerodynamického součinitele c_f podle normy [4].

Pro účely výpočtu síly od větru F_w a tedy i aerodynamického součinitele c_f je vhodné konstrukci rozdělit do několika sekcí. Sekce může sdružovat několik panelů, které obsahují prvky (pruty) se stejným nebo téměř stejným průřezem (obr. 2.5). A to z důvodu toho, že součinitel síly c_f vychází z rozměrů daných prvky.



Obr. 2.5: K definici sekce a panelu [4]

Celkový součinitel síly se má stanovit podle vztahu:

$$c_f = c_{f,S} + c_{f,A}, \quad (2.21)$$

kde $c_{f,S}$ je součinitel síly nosných prvků, definovaný vztahem:

$$c_{f,S} = K_\theta \cdot c_{f,S,0}, \quad (2.22)$$

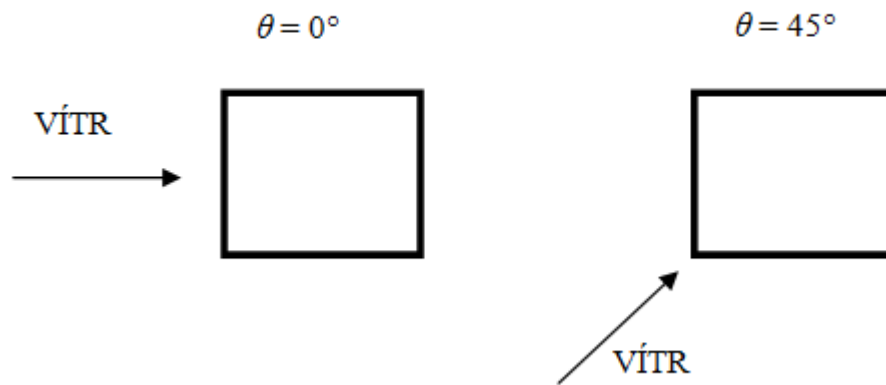
kde K_θ je součinitel zohledňující směr větru vůči návětrné straně konstrukce a lze jej pro věže o čtvercovém půdorysném tvaru stanovit podle výrazu:

$$K_\theta = 1,0 + K_1 \cdot K_2 \cdot \sin^2 2\theta, \quad (2.23)$$

$$K_1 = \frac{0,55A_f}{A_s} + \frac{0,88(A_c + A_{c,sup})}{A_s} \quad (2.24)$$

$$\begin{aligned}
 K_2 &= 0,2 && \text{pro } 0 \leq \varphi \leq 0,8 \text{ a } 0,8 \leq \varphi \leq 1,0 \\
 K_2 &= \varphi && \text{pro } 0,2 \leq \varphi \leq 0,5 \\
 K_2 &= 1 - \varphi && \text{pro } 0,5 \leq \varphi \leq 0,8,
 \end{aligned}
 \tag{2.25}$$

kde úhel θ je úhel, který svírá směr dopadajícího větru na čelní plochu konstrukce s normálou této plochy v půdorysu (viz obr. 2.6).



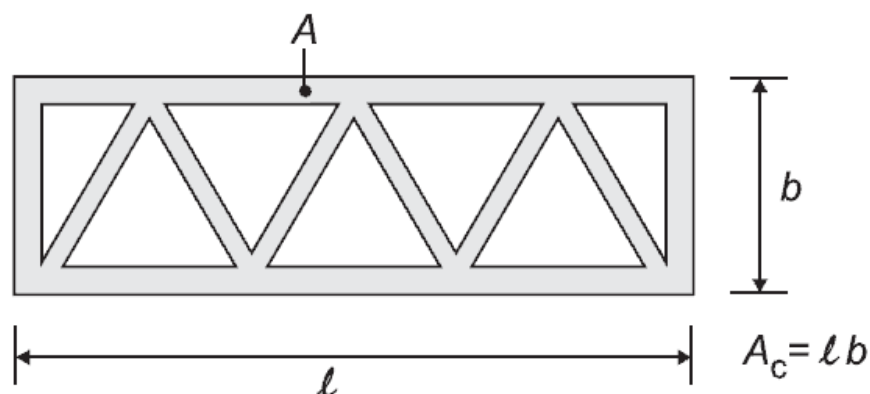
Obr. 2.6: K vysvětlení úhlu θ

Součinitel K_1 zohledňuje průměty ploch prutů různých průřezů: A_f – úhelníkový průřez, A_c , ($A_{c,sup}$) – kruhový průřez v subkritickém (superkritickém) režimu. A_s je potom součet ploch A_f, A_c a $A_{c,sup}$. Z výše uvedených výrazů pro součinitel K_2 je patrné, že je potřeba stanovit součinitele plnosti φ .

Součinitel plnosti φ je poměr součtu průmětů ploch prvků A k celkové ploše sekce A_c

$$\varphi = \frac{A}{A_c},
 \tag{2.26}$$

Zde dochází ke stejnému označení dvou různých veličin, kde zkratkou A_c podle normy [1] je označována plocha ohraničující okraje čelní plochy (plocha sekce), zatímco v normě [4] toto označení zaujímá plocha kruhových průřezů.



Obr. 2.7: Definice součinitele plnosti [1]

Ve výrazu (2.22) se vyskytuje součinitel $c_{f,s,0}$, který lze stanovit ze vztahu:

$$c_{f,s,0} = c_{f,0,f} \frac{A_f}{A_s} + c_{f,0,c} \frac{A_c}{A_s} + c_{f,0,c,sup} \frac{A_{c,sup}}{A_s}, \quad (2.27)$$

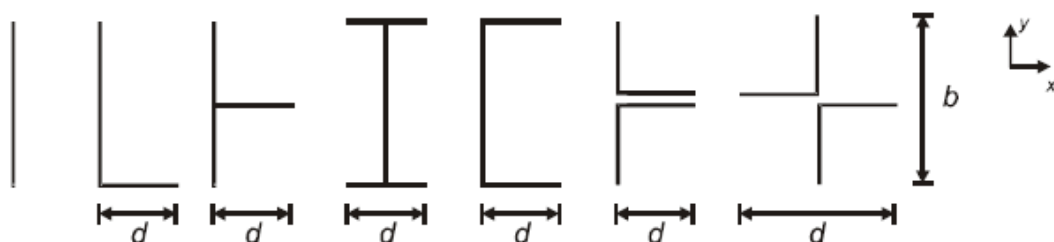
$$c_{f,0,f} = 1,76 \cdot C_1 (1 - C_2 \cdot \varphi + \varphi^2), \quad (2.28)$$

kde vztahy pro $c_{f,0,c}$ a $c_{f,0,c,sup}$ jsou uvedeny v [4], $C_1 = 2,25$; $C_2 = 1,5$ pro čtvercovou věž.

Ve vztahu (2.12) se vyskytuje zkratka A_{ref} , což značí **referenční plochu prvku**, která vzdoruje účinkům větru, je definována vztahem:

$$A_{ref,x(y)} = l \cdot b \cdot (d), \quad (2.29)$$

kde l je délka prvku, b a d jsou rozměry v patřičných směrech (obr. 2.8)



Obr. 2.8: Definice referenční plochy [1]

Aby bylo možné použít ekvivalentní statickou proceduru tj. použít vztahy (2.12) a (2.13) měla by být splněna následující podmínka:

$$\frac{7m_T}{\rho_s c_{f,T} A_T \cdot \sqrt{d_B \tau_0}} \left(\frac{5}{6} - \frac{h_T}{h} \right)^2 < 1,00, \quad (2.30)$$

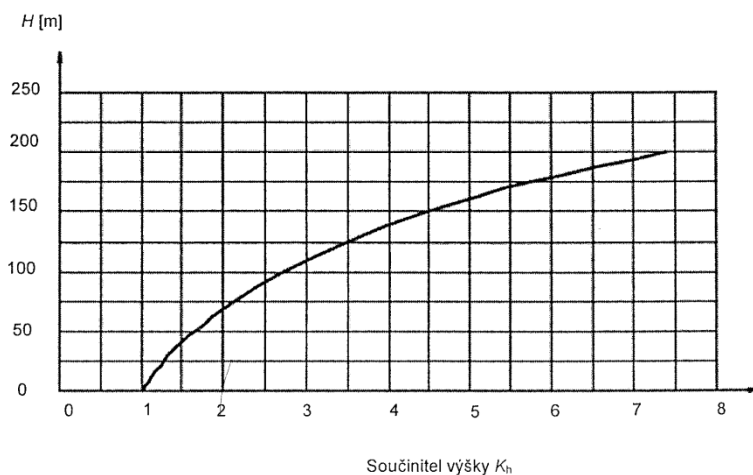
kde $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$, $c_{f,T} A_T$ je suma součinu součinitele síly c_f a referenční plochy jednotlivých panelů A_{ref} , která tvoří méně než jednu třetinu celkové sumy $c_f A_T$, m_T je potom hmotnost panelů odpovídající sumě $c_{f,T} A_T$, h a d_b jsou výška a šířka základny věže, h_T odpovídá sumě $c_{f,T} A_T$ nebo je menší než třetina celkové výšky h a $\tau_0 = 0,001$ [4].

2.2 Námraza všeobecně

Výraz „námraza“ zahrnuje všechny jevy, kdy mrznou vodní kapky, déšť, mrholení, mokřý sníh a ulpívají na objektech vystavených povětrnostním podmínkám. Vlivem námrazy se zvětšují svislá zatížení na konstrukci a zvětšením plochy expozice se zvyšuje účinek větru. Zatížení větrem u namrzlé konstrukce může být stanoveno podle stejných zásad jako zatížení na konstrukci bez námrazy (viz [1]). Rozměry prvků konstrukce a jejich součinitelé odporu c_i (c_f) jsou však odlišné. Významným faktorem ovlivňujícím dynamické chování konstrukce jsou její **vlastní frekvence**. Pokud je konstrukce zatížena námrazou, obvykle její frekvence významně klesá. Tento poznatek je důležitý z hlediska dynamické odezvy konstrukce, neboť menší frekvence jsou většinou kritické [5].

Množství námrazy na konstrukci se může značně měnit s výškou prvku nad terénem. Dosud však není k dispozici jednoduchý model pro závislost množství námrazy na výšce. Proto se zjednodušeně zavádí součinitel výšky K_h (2.31) pro zatížení námrazou ve výšce H nad terénem (obr. 2.9).

$$K_h = e^{0,01H} \quad (2.31)$$



Obr. 2.9: Typická variabilita velikosti námrazy s výškou H nad terénem [5]

Námraza je tradičně klasifikována podle dvou rozdílných procesů jejího vzniku. V případě zmrznutí srážek se jedná o **ledovku** (Glaze), pokud namrzají přechlazené vodní kapky v oblacích nebo mlze, jedná se o **námrazu** (Rime) [5].

2.2.1 Námraza

Při stanovení zatížení námrazou je prvním krokem přiřadit lokalitě, ve které se nachází posuzovaná konstrukce, tzv. třídu námrazy ICR. Území ČR je rozděleno do devíti tříd námraz (viz NA.1 v [5]). Třídy námrazy ICR jsou definovány jistou hmotností m na referenčním kolektoru (tab. 2.2). Referenční kolektor je tyč o průměru 30mm a délce alespoň $0,5\text{m}$, který je umístěn ve výšce 10m nad terénem a pomalu se otáčí kolem své osy.

Tabulka 2.2. Třídy námraz (ICR) [5]

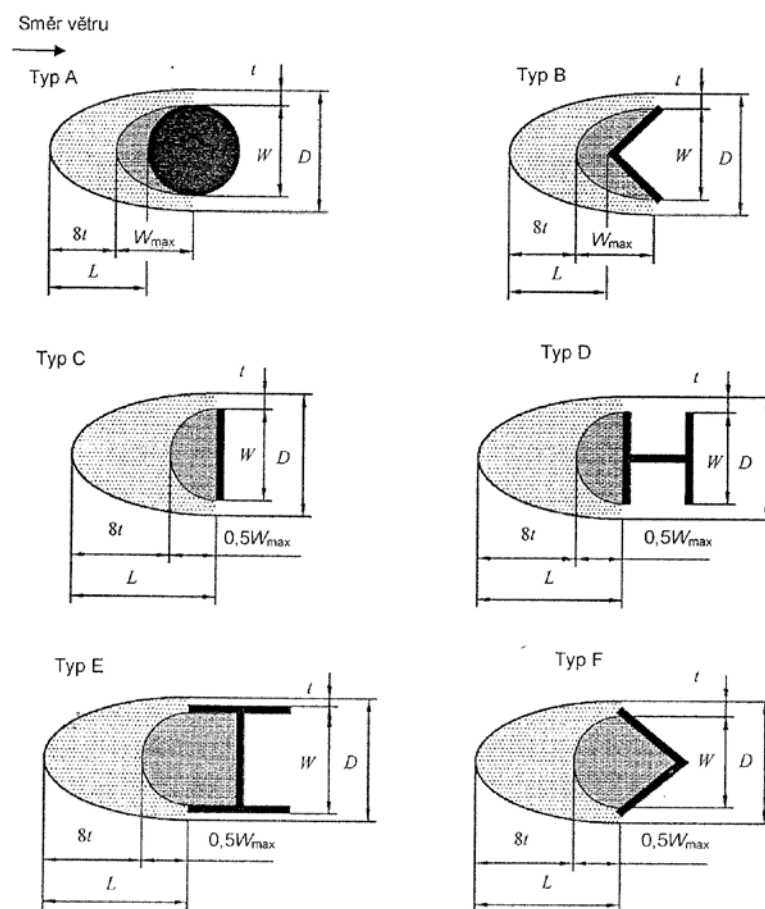
TŘÍDA (IC)	HMOTNOST LEDU m [kg/m]	PRŮMĚR NÁMRAZY D [mm] PRO PRVEK O PRŮMĚRU 30m			
		OBJEMOVÁ HMOTNOST NÁMRAZY [kg/m ³]			
		300	500	700	900
R1	0,5	55	47	43	40
R2	0,9	69	56	50	47
R3	1,6	88	71	62	56
R4	2,8	113	90	77	70
R5	5	149	117	100	89
R6	8,9	197	154	131	116
R7	16	262	204	173	153
R8	28	346	269	228	201
R9	50	462	358	303	268
R10	POUŽÍJE SE PRO EXTRÉMNÍ NÁMRAZY				

Předpokládá se, že námraza má na prvcích o šířce $W < 300\text{mm}$ oválný tvar (obr. 2.10). **Modely narůstání námrazy** se rozdělují do několika typů podle tvaru průřezu prvku. Je proto vhodné předem navrhnout tvary průřezů prvků na konstrukci a dodatečně měnit pouze jejich rozměry, jelikož u jednotlivých typů modelů narůstání námrazy se liší postup výpočtu rozměrů námrazy.

Vliv výšky lze vyjádřit na základě tříd námraz pro různé výškové úrovně konstrukce, jako jsou např. stožáry, věže, lyžařské vleky apod.

$$m(z) = m \cdot K_h, \quad (2.32)$$

kde m je hmotnost ledu [kg/m] z tab. 2.2 příslušné třídy ICR, do které spadá lokalita, kde je umístěna vyšetřovaná konstrukce a $m(z)$ je potom hmotnost ledu [kg/m] na prvku ve výšce z nad terénem. Hodnota $m(z)$ zároveň určuje náhradní třídu ICR pro daný prvek ve výšce z .



Obr. 2.10: Modely narůstání námrazy [5]

Pokud je známa hmotnost ledu $m(z)$ a objemovou hmotnost námrazy γ , lze dopočítat plochu ledu A_{ICE} :

$$A_{ICE} = m(z)/\gamma \quad (2.33)$$

Pomoci obr. 2.10 a vztahu (2.33) lze vyjádřit rozměr W_{max} [mm]

$$W_{max} = \sqrt{8 \cdot 10^6 / \pi \cdot m(z) / \gamma} \quad (2.34)$$

$$W_{max} = \sqrt{8 \cdot 10^6 / (\pi + 2) \cdot m(z) / \gamma} \quad (2.35)$$

Přičemž vztah (2.34) platí pro modely nárůstu námrazy typu A,B,C a D, vztah (2.35) pak pro modely typu E,F. Průměr námrazy D [mm] se vypočítá podle vztahu (2.36).

$$D = \left(\frac{4 \cdot 10^6 \cdot m(z)}{\gamma \cdot \pi} + W^2 \right)^{0,5} \quad (2.36)$$

Dále je třeba stanovit tloušťku námrazy t , pokud platí $W < W_{max}$:

$$t = 1/32 \left(-10 \cdot W + \sqrt{68 \cdot W^2 + 8,149 \cdot 10^7 \cdot m(z)/\gamma} \right) \quad (2.37)$$

$$t = 1/32 \left(-9 \cdot W + \sqrt{49 \cdot W^2 + 8,149 \cdot 10^7 \cdot m(z)/\gamma} \right) \quad (2.38)$$

$$t = 0,0398 \left(-7,07 \cdot W + \sqrt{17,68 \cdot W^2 + 5,027 \cdot 10^7 \cdot m(z)/\gamma} \right) \quad (2.39)$$

Vztah (2.37), (2.38) a (2.39) platí po řadě modelům typu A(B), C(D) a E(F). Pokud nastane případ, kdy $W \geq W_{max}$, pak tloušťka námrazy t vyplývá z obr. 2.10 a je rovna:

$$t = (D - W)/2 \quad (2.40)$$

Délka zaoblení námrazy L [mm] na obr. 2.10 zvětšuje expozici původních profilů a při výpočtu zatížením větrem s námrazou se musí připočítat k rozměru W (bez námrazy).

$$L = W/2 + 8 \cdot t \quad \text{pro } W < W_{max} \quad (2.41)$$

$$L = W + 2 \cdot t \quad \text{pro } W \geq W_{max} \quad (2.42)$$

Vztahy (2.41) a (2.42) jsou platné pro modely typu A,B,C,D. Pro modely E a F:

$$L = 0 \quad \text{pro } W \leq \sqrt{2 \cdot 10^6 \cdot m(z)/\gamma} \quad (2.43)$$

$$L = 4 \cdot 10^3 \cdot m(z)/(\pi \cdot \gamma \cdot W) - W/\pi \quad \text{pro } W \geq W_{max} \quad (2.44)$$

$$L = W/2 + 8 \cdot t \quad \text{pro } W < W_{max} \quad (2.45)$$

A na základě následujících podmínek lze stanovit rozměr D (viz obr. 2.10):

$$D = W \quad \text{pro } L < W/2 \quad (2.46)$$

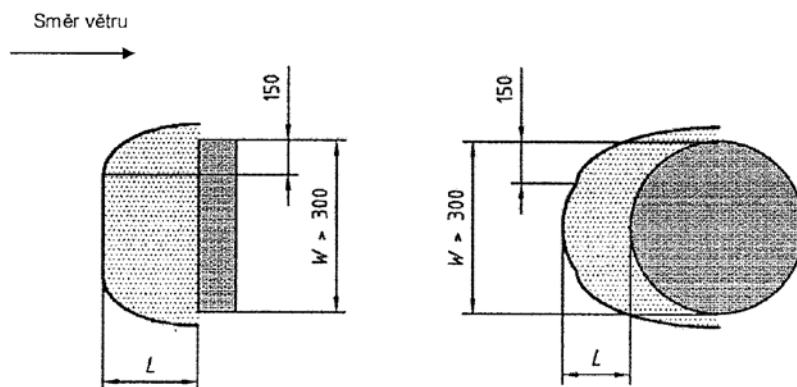
$$D = W + 2 \cdot t \quad \text{pro } L \geq W/2 \quad (2.47)$$

Rozměr D se potom dosazuje do (2.29) místo rozměrů b , popř. d a společně s délkou profilu l určuje referenční plochu prvku.

Pokud rozměr prvku $W \geq 300$ mm (tzv. **velké profily**), platí pro něj jiný model nárůstu námrazy (obr. 2.11) a počítá se s větší hmotností námrazy m_w [kg/m]:

$$m_w = m(z) + (W - 300) \cdot L \cdot \gamma \cdot 10^{-6}, \quad (2.48)$$

kde délka zaoblení L se vypočte podle vztahů (2.41) nebo (2.42) s tím rozdílem, že místo skutečného rozměru W se dosazuje 300mm.



Obr. 2.11: Model námrazy u velkých prvků [5]

Následujícím krokem je určení **součinitele aerodynamického odporu** objektu s námrazou c_i , je počítán pomocí součinitele c_o , což je součinitel aerodynamického odporu bez námrazy (v [1] a [4] je značen c_f a nazýván součinitelem síly).

$$c_i = c_o - \left(\frac{c_o - 1,6}{9} \right) X, \quad (2.49)$$

kde X představuje třídu námrazy $ICRX$.

Pro velké prvky potom platí vztah:

$$c_i = c_{o,3} - \left(\frac{c_{o,3} - c_o}{4,7} \right) (W - 0,3), \quad (2.50)$$

kde $c_{o,3}$ je určen dle vztahu (2.49) pro prvek o šířce 300mm, W je potom skutečná šířka prvku, která je větší než 300mm.

2.2.2 Ledovka

Obdobně jako námraza je i ledovka rozdělena do tříd. Třídy ledovky ICG jsou tentokrát definovány na základě **tloušťky** referenčního kolektoru (tab. 2.3). Třída ledovky by se opět měla stanovit s ohledem na lokalitu, kde je konstrukce umístěna na základě informací poskytovaných ČHMÚ. Při výškových konstrukcích lze však postupovat, obdobně jako u námrazy. Jednotlivým výškovým úrovním konstrukce se přiřadí třída ledovky ICG na základě tloušťky t přepočtené z tloušťky ledovky t_{Gx} na kolektoru o průměru 30mm s využitím součinitele výšky K_h (2.31):

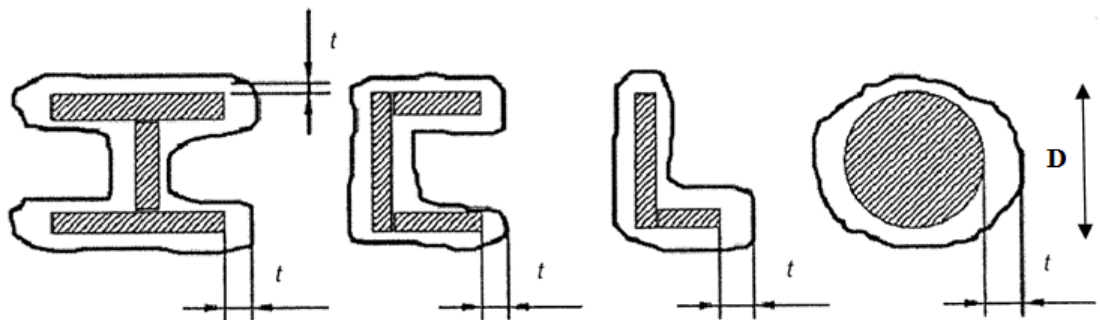
$$t = -15 + \sqrt{225 + K_h(z) \cdot t_{Gx}(30 + t_{Gx})}, \quad (2.51)$$

kde t_{Gx} je tloušťka ledovky dle tab.

Tabulka 2.3. Třídy ledovky (ICG) [5]

TŘÍDA (IC)	TLOUŠŤKA LEDU t [mm]	HMOTNOST LEDOVKY m [kg/m] PRŮMĚR VÁLCE [mm]			
		10	30	100	300
G1	0.5	0.6	1.1	3.1	8.8
G2	0.9	1.7	2.8	6.8	18.1
G3	1.6	3.4	5.1	11	28
G4	2.8	5.7	7.9	15.8	38.5
G5	5	8.5	11.3	21.2	49.5
G6	POUŽÍJE SE PŘI EXTRÉMNÍ LEDOVCE				
POZNÁMKA: OBJEMOVÁ HMOTNOST LEDU $\gamma = 900 \text{ kg/m}^3$					

Model ledovky již není tak komplikovaný jako model námrazy (obr. 2.10). Předpokládá se, že je průřez obalen ledovkou o konstantní tloušťce t . Tento předpoklad platí i pro velké prvky. Ledovka tedy výrazně nemění rozměry prvku jako námraza, má však největší objemovou hmotnost γ .



Obr. 2.12: Model ledovky [5]

Stanovení rozměru t je vysvětleno výrazem (2.52). **Rozměr D** je patrný z obr. 2.12:

$$D = L + 2 \cdot t \quad (2.52)$$

Hmotnost ledovky na jednotku délky se stanoví podle vztahu:

$$m = \gamma \cdot A_{ICE}, \quad (2.53)$$

kde A_{ICE} se vypočítá v závislosti na tvaru průřezu, např. pro rovnoramenný úhelník:

$$A_{ICE} = 4 \cdot t (L + t), \quad (2.54)$$

kde L je šířka příruby rovnoramenného úhelníku.

Postup stanovení **součinitele aerodynamického odporu** objektu s **ledovkou** c_i je zcela identický jako u námrazy a vypočítá se vztahu:

$$c_i = c_o - \left(\frac{c_o - 1,4}{5} \right) X, \quad (2.55)$$

kde X představuje třídu ledovky ICGX.

2.3 Odtrhávání vírů

Při obtékání konstrukce větrem, se za určitých podmínek mohou na opačných stranách průřezu střídavě odtrhávat víry. Konstrukce je tak buzena periodickou silou ve směru kolmém na směr větru s frekvencí, která závisí na rychlosti větru a tvaru průřezu [2].

Pokud je frekvence odtrhávání vírů stejná jako vlastní frekvence konstrukce, může nastat kmitání konstrukce ve směru kolmém na směr větru [1]. Účinek odtrhávání vírů se má vyšetřovat, pokud je splněna následující podmínka:

$$v_{crit,i} < 1,25 \cdot v_m, \quad (2.56)$$

kde v_m je definována () a $v_{crit,i}$ se vypočítá podle vztahu:

$$v_{crit,i} = b \cdot n_{i,y} / St, \quad (2.57)$$

kde b je referenční šířka průřezu (obr. 2.8), $n_{i,y}$ je vlastní frekvence i -tého ohybového tvaru kmitání v rovině kolmé na směr větru a St je Strouhalovo číslo definované v [1].

Účinek odtrhávání vírů se stanoví ekvivalentní statickou metodou, která spočívá v nalezení síly $F_w(s)$ (2.58) působící kolmo ke směru větru v místě s na konstrukci. V [1] jsou uvedeny dva postupy jak stanovit amplitudu kmitání kolmo na směr větru $y_{F,max}$. V ČR se má použít metoda 1.

$$F_W(s) = m(s) \cdot (2\pi \cdot n_{i,y})^2 \cdot \Phi_{i,y}(s) \cdot y_{F,max}, \quad (2.58)$$

kde $m(s)$ je kmitající hmotnost konstrukce na jednotku délky a $\Phi_{i,y}(s)$ je vlastní tvar kmitání konstrukce normovaný na jednotku délky v bodě maximální výchylky. Největší výchylka $y_{F,max}$ se může stanovit výrazem (2.59).

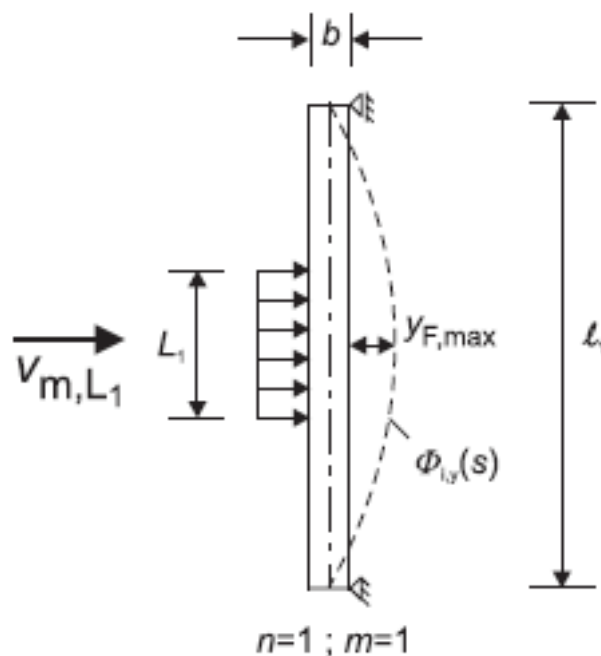
$$\frac{y_{F,max}}{b} = \frac{1}{S_t^2} \cdot \frac{1}{S_c} K \cdot K_w \cdot c_{lat} . \quad (2.59)$$

Ke stanovení $y_{F,max}$ je nutné znát korelační délku L_j (obr. 2.13), ta je však funkcí amplitudy kmitání $y_{F,(sj)}$. Proto se korelační délka odborně odhaduje nebo je určována iteračním postupem. Podrobný postup lze najít v [1].

Tabulka 2.4. Korelační délka L_j jako funkce amplitudy kmitání $y_{F,(sj)}$ [1]

$y_{F,(sj)}/b$	L_j / b
< 0,1	6
0,1 to 0,6	$4,8+12 \cdot \frac{y_{F,(sj)}}{b}$
> 0,6	12

Pozn.: ve většině případů $y_{F,(sj)} = y_{F,max}$.



Obr. 2.13: Korelační délka L_j pro prvek uložený kloubově na obou koncích [1]

3. Teorie výpočtu

Program ANSYS provádí výpočty na základě metody konečných prvků (MKP). MKP je založena na diskretizaci tělesa na konečný počet prvků, jež jsou popisovány pomocí polí (pole posunutí, deformací a napětí). Pro lineární materiál platí:

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon^{el}\}, \quad (3.1)$$

$$kde \{\sigma\} = [\sigma_x \sigma_y \sigma_z \sigma_{xy} \sigma_{yz} \sigma_{xz}]^T a \{\varepsilon^{el}\} = [\varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_z \varepsilon_{xy} \varepsilon_{yz} \varepsilon_{xz}]^T$$

$[D]$ je matice pružnostních konstant.

$$\{\varepsilon^{el}\} = [B]\{u\}, \quad (3.2)$$

kde $\{u\}$ je vektor uzlových posunů a $[B]$ je matice popisující vztahy mezi polem napětí a polem posunů na základě tvarových funkcí. Podrobnější výklad viz [6].

3.1 Statická analýza

Lineární statická analýza je založena na globálních podmínkách rovnováhy systému:

$$[K]\{u\} = \{F^a\} + \{F^r\}, \quad (3.3)$$

kde $[K]$ je celková matice tuhosti (suma matic jednotlivých konečných prvků), $\{F^a\}$ je vektor aplikovaných zatížení a $\{F^r\}$ je zatěžovací vektor reakcí. Podrobné vysvětlení lze najít v [6].

3.2 Modální analýza

Pomocí modální analýzy se určují dynamické charakteristiky (vlastní frekvence, vlastní tvary kmitání) konstrukcí nebo jednotlivých prvků. Obecně jsou tyto charakteristiky důležitými parametry v oblasti dynamického zatěžování. Vítr lze pomyslně oddělit na dvě složky tj. kvazistatickou a dynamickou. V [1] je dynamická složka větru zahrnuta prostřednictvím různých součinitelů do výrazů udávající hodnotu odezvy zatížení větrem na konstrukci. Např. při stanovení součinitele konstrukce $c_s c_d$ (2.14). Norma [1]

uvádí zjednodušené vztahy pro dynamické charakteristiky, je-li však konstrukce modelována pomocí výpočetního programu, není zde důvod nevyužít přesných charakteristik, jež jsou výsledkem modální analýzy dané konstrukce.

Pro nalezení vlastních frekvencí a vlastních tvarů kmitání se s výhodou využívá lineární algebry, konkrétně vlastních čísel. Program ANSYS využívá k nalezení vlastních čísel rovnici (3.4) a nabízí několik metod pro její řešení. Jednou z nich je např. Bloková Lanczova metoda, která je založena na Lanczosových iteracích [6].

$$[K]\{\phi_i\} = \lambda_i[M]\{\phi_i\}, \quad (3.4)$$

kde $[K]$ je matice tuhosti konstrukce, $\{\phi_i\}$ je vlastní vektor, λ_i vlastní číslo a $[M]$ je matice hmotnosti konstrukce.

4. ŘEŠENÝ PŘÍKLAD

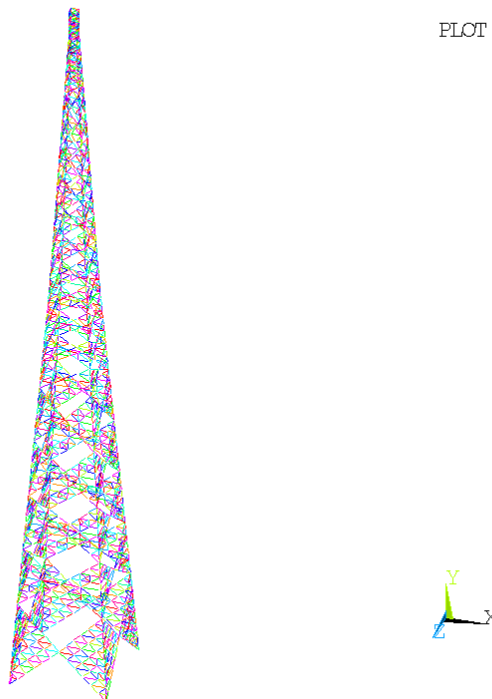
4.1 Model

Jedná se o model příhradové ocelové věže. Věž má tvar čtyřbokého pravidelného komolého jehlanu, ve vrchní části má tvar kvádru. Výška věže je 150m , šířka základny věže je $19,8\text{m}$, v nejvyšším místě má šířku $1,6\text{m}$. Sklon stěn věží vůči svislé rovině není jednotný, spodní část věže má sklon $4,02^\circ$, střední část $3,04^\circ$. Průřezy jednotlivých prutů se taktéž mění po výšce věže (viz příloha 1). Tento model byl vytvořen na základě podkladu návrhu Atmosférické stanice Košetice. Jedná se o alternativu, která nakonec nebyla realizována.

Celá věž byla vytvořena jako drátový 3D model v AutoCAD 2013. Posléze exportována do souboru IGES a následně importována do programu ANSYS. Tímto způsobem byl získán předběžný tzv. solid model sestavený z čar a bodů (LINES, KEYPOINTS) (viz obr. 4.1).

LINES
TYPE NUM


Noncommercial use only
PLOT NO. 1



Obr. 4.1: 3D Solid model věže

Z konstrukčního hlediska lze dělit věž do třech typů prvků tj. nárožníky, diagonály a výplet. Tohoto dělení bylo využito i při sestavování dílčích částí věže (celkem 57) v programu ANSYS. Vzhledem k velikosti modelu umožňovaly vytvořené komponenty snadnější a přehlednější práci s nimi.

Jelikož se jedná o příhradovou konstrukci, bylo stanoveno, že jednotlivé pruty výpletu a diagonál budou kloubově uchyceny. Výjimku tvoří prut v místě změny sklonu stěn věží (tuhé spojení). Nárožníky, jakožto hlavní nosné prvky, budou tuze spojeny, tedy svařeny.

Aby bylo docíleno kloubového spojení mezi požadovanými pruty, musí mít každá čára svůj vlastní bod (KEYPOINT). Kdyby bylo nadále pracováno s předběžným solid modelem (tj. model, ve kterém mají čáry společné body), nebyla by respektována skutečnost kloubového spojení.

Primárně bylo zapotřebí zjistit, kterých čar se týká kloubové uchycení. Tento problém byl jednoduše vyřešen pomocí selektování jednotlivých komponent. Pro vytvoření resp. nakopírování požadovaných bodů byl použit příkaz LGEN, který v místech původních bodů vytvořil nové body s příslušnou novou čarou. Vzhledem k množství čar (, které bylo třeba nakopírovat, bylo pro usnadnění vytvořeno macro využívající cyklické funkce *ENDDO, popř. funkce podmínky *IF (tab. 4.1).

Tabulka 4.1 Macra na nakopírování čar

<pre>aa=2072 *dowhile,aa lgen,2,aa,,,,,,0 aa=aa-1 *enddo</pre>	<pre>bb=2189 *dowhile,bb lgen,2,bb,,,,,,0 bb=bb-1 *if,bb,lt,2127,exit *enddo</pre>
--	--

Po vykonání těchto příkazů se vytvořily nové dílčí komponenty obsahující již nové čáry a body, jelikož původní čáry se z modelu následně vymazaly (včetně jejich bodů, pokud tedy nebyly součástí čáry, která mazána nebyla). V případě diagonál složených z více jak dvou čar bylo třeba provést funkci sjednocení (NUMMRG) bodů,

které představovaly vnitřní uzly diagonály, přitom koncové body, představující kloubové uchycení diagonál, musely být odselektovány.

Tabulka 4.2 Macro na sjednocení vnitřních bodů diagonál

```
cmsel,s,diagonaly
ksll
ksel,u,loc,y,0
ksel,u,loc,y,9
ksel,u,loc,y,18
ksel,u,loc,y,24
ksel,u,loc,y,30
.
.
.
nummrg,KP
```

Dalším nezbytným krokem je definování materiálového modelu. Jak již bylo zmíněno, jedná se o ocelovou věž, čili lineární, izotropní materiál s hustotou 7850 kg/m^3 , modulem pružnosti $E=210 \text{ GPa}$ a Poissonovým číslem $\nu=0,3$.

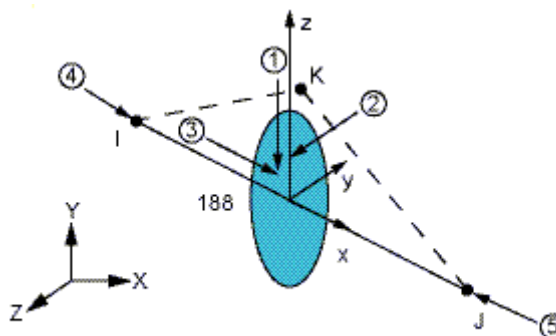
Dále by mělo následovat definování průřezů. Bylo potřeba nadefinovat poměrně hodně průřezů, proto bylo vytvořeno další macro. Speciálně při zadávání přídavné hmotnosti prvkům vystavených námrazou popř. ledovkou (odst. 4.2.2 nebo 4.2.3). Věž se skládá pouze z jednoho typu průřezu tj. rovnoramenný úhelník o různých dimenzích. V tab. 4.3 je ukázka definice průřezu L 250x20 s přídavnou hmotností 5,99 kg/m.

Tabulka 4.3 Ukázka definování průřezů prvků s námrazou

```
sectype,1,BEAM,L,,0
secdata,0.25,0.25,0.020,0.020
secoffset,cent
seccontrols,0,,0,5.99
```

Následující krokem je vytvoření MKP modelu tj. vytvoření uzlů a prvků (NODES and ELEMENTS). K tomu je zapotřebí definovat typ konečného prvku (ELEMENT TYPE). Příhradová věž je řešena jako 3D prutový model, proto typ prvku

přicházející v úvahu může být např. BEAM 188. Tento prvek je definovaný třemi uzly, dvěma koncovými a jedním orientačním uzlem. Popis tohoto prvku lze najít v [6].



Obr. 4.2: Typ konečného prvku – BEAM 188

Před samotným vytvořením sítě konečných prvků (LMESH) je třeba přiřadit jednotlivým čarám nadefinované vlastnosti (tj. průřezy, typ konečného prvku, orientace průřezu atd.) příkazem LATT. Opět byl tento krok řešen hromadným příkazem – selekce dané části věže a přiřazení jednotlivých vlastností. Při tomto postupu byly však celé dílčí části věže přiřazeny stejné vlastnosti. Problém spočíval v orientaci průřezů. Proto bylo nutné přiřadit jednotlivým stěnám věže správný orientační bod (ORIENTATION KEYPOINT). S výhodou bylo využíváno funkce definování argumentu hodnotou -1, která ponechává vlastnosti nezměněné. Po vymeshování byl získán MKP model skládající se ze stejného počtu konečných prvků (BEAM 188) jako počtu čar v solid modelu (NDIV = 1)

Tabulka 4.4 Ukázka přiřazení vlastností diagonálám v částech L, K, J a úprava orientací průřezů ve stěně číslo 3

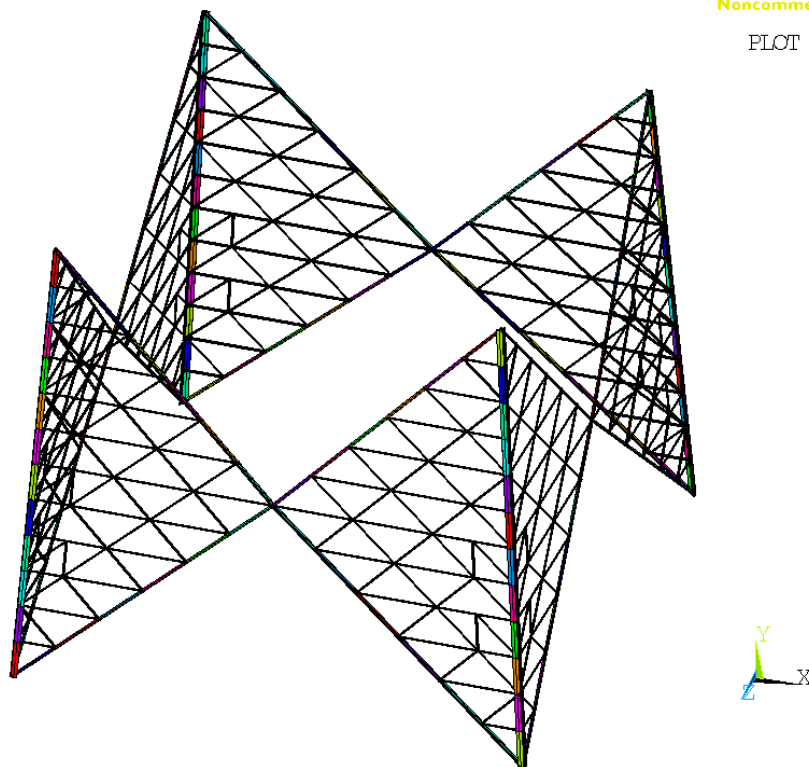
<pre> cysel,s,l29 latt,1,,19,,29 cysel,s,k30 latt,1,,19,,30 cysel,s,j31 latt,1,,19,,31 </pre>	<pre> cysel,s,diagonaly_horni3 cysel,a,diahor3 latt,-1,,-1,,17,,-1 </pre>
---	---

Posledním krokem pro vytvoření fungujícího MKP modelu je sestavení okrajových podmínek. Prostřednictvím příkazu CPINTF se sdružily posuny (UX,UY,UZ) koincidentních uzlů (tj. uzly, které mají stejné souřadnice) a tím tak vznikly klouby. Dále se vybraly všechny uzly, které tvoří klouby (tj. koncové uzly výpletu a diagonál) a aplikovaly se na ně navíc nulové rotace (ROTX, ROTY, ROTZ) prostřednictvím příkazu D. Staticky je věž řešena jako konzola vetknutá do základu, proto byly uzlům s nulovou výškou aplikovány nulové posuny a rotace. Opět bylo vytvořeno macro na aplikování těchto podmínek a jemu předcházející mezikroky jako selekce uzlů, vytvoření komponentů uzlů atd.

ELEMENTS
ELEM NUM

 ANSYS
Noncommercial use only

PLOT NO. 1



Obr. 4.3: Vymeshovaná část věže (panel Z)

4.2 Výpočet zatížení

4.2.1 Zatížení větrem

Zatížení bylo stanoveno podle normy [1]. Rozsah platnosti normy se však nevztahuje na příhradové věže s nerovnoběžnými stěnami, což je případ, který je zde řešen. Odklon stěn věže je však vůči svislé rovině nepatrný a při výpočtu zatížení se zanedbává, takže se regulérně postupuje podle [1] a pro určení některých hodnot podle [4].

Konstrukce se nachází poblíž obce Košetice na Pelhřimovsku. Podle mapy větrných oblastí [1] spadá tato lokalita do oblasti III s výchozí základní rychlostí větru $v_{b0} = 27,5$ m/s. Tato rychlost větru byla upravena podle vztahu (2.1). Dále bylo třeba stanovit kategorii terénu a sní související součinitel drsnosti $c_r(z)$. Konstrukce je umístěna na otevřeném prostranství s nízkou vegetací a polem, ve větší vzdálenosti je pak obklopena lesy. Byl uvažován možný přechod mezi kategoriemi drsnosti terénu dle postupu 2 v normě [1]. Na základě měření vzdáleností (na mapě) mezi konstrukcí a hranicí kategorie s nižší drsností se však ukázalo, že musí být uvažována kategorie I (viz tab. 2.1). Postup stanovení střední i fluktuační složky rychlosti a dynamického tlaku větru je uveden [1] a v kap.2 této práce.

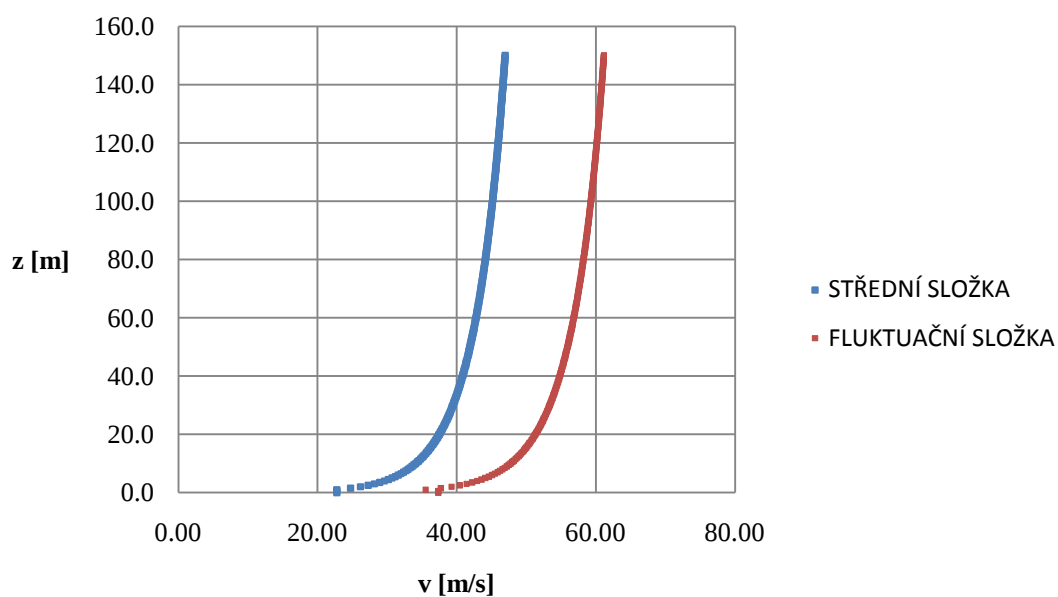
Tabulka 4.5 Vstupní data

$v_{b,0}$	27.5	m/s	$z_{\min}$	1	m
v_b	27.52802	m/s	$z_{\max}$	200	m
c_{dir}	1		z_0	0.01	m
c_{season}	1		$z_{0,\text{II}}$	0.05	m
c_{prob}	1.001019		H^*	80	m
K	0.2		L_u^*	890	m
n	0.5		X^*	-388	(m)
p	0.01		L_e^*	890	m
ρ	1.25	kg/m ³	Φ^*	0.089888	
k_r	0.169756		k_l	1	
* HODNOTY BYLY ZÍSKÁNY NA ZÁKLADĚ PROZKOUMÁNÍ OROGRAFIE OKOLNÍHO TERÉNU					

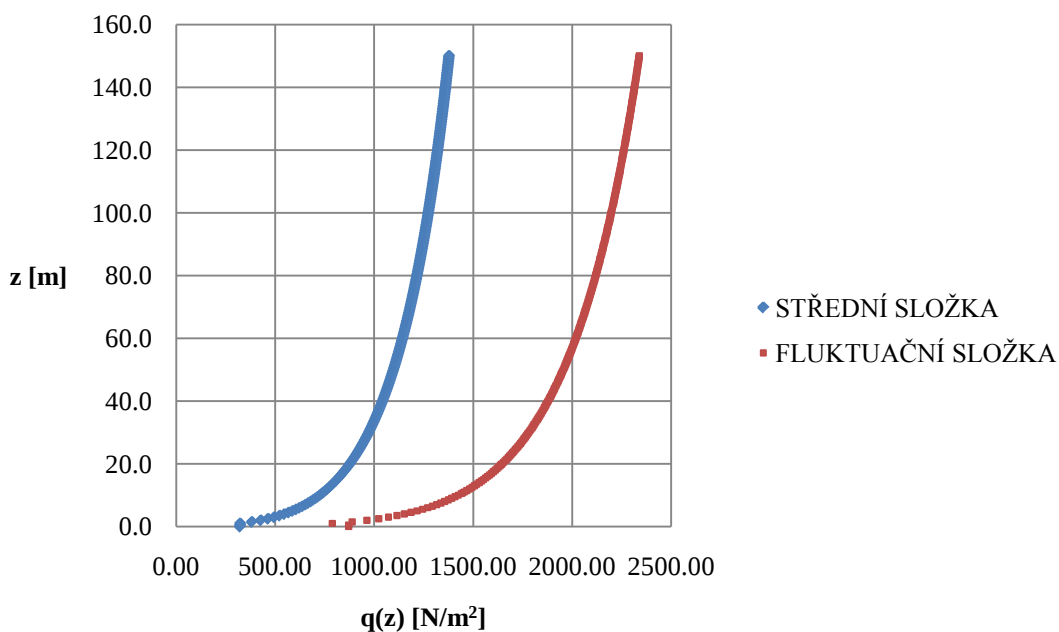
Tabulka 4.6 Výpočet rychlosti a dynamického tlaku větru (střední a fluktuační složka)

NÁZEV ČÁSTI	z [m]	$c_r(z)$	A	B	s	$c_o(z)$	$v_m(z)$ [m/s]	$q_m(z)$ [N/m ²]	$I_v(z)$	$v_p(z)$ [m/s]	$q_p(z)$ [N/m ²]
Z	18	1.27	0.97	2.62	0.31	1.056	36.98	854.77	0.126	50.77	1 610.84
V	30	1.36	0.95	2.61	0.30	1.055	39.46	973.27	0.118	53.37	1 780.06
U	42	1.42	0.93	2.60	0.30	1.054	41.08	1 054.69	0.114	55.06	1 894.54
T	54	1.46	0.90	2.58	0.29	1.053	42.28	1 117.00	0.111	56.30	1 981.30
R	66	1.49	0.88	2.57	0.29	1.052	43.22	1 167.52	0.108	57.29	2 051.15
P	72	1.51	0.87	2.56	0.28	1.051	43.63	1 189.60	0.107	57.71	2 081.55
O	78	1.52	0.86	2.56	0.28	1.051	44.00	1 210.00	0.106	58.10	2 109.56
N	84	1.53	0.85	2.55	0.28	1.050	44.34	1 228.94	0.105	58.45	2 135.52
M	90	1.55	0.84	2.54	0.28	1.050	44.66	1 246.63	0.105	58.78	2 159.70
L	96	1.56	0.83	2.54	0.27	1.049	44.96	1 263.20	0.104	59.09	2 182.33
K	102	1.57	0.82	2.53	0.27	1.049	45.23	1 278.79	0.103	59.38	2 203.58
J	108	1.58	0.81	2.52	0.27	1.048	45.49	1 293.51	0.103	59.65	2 223.60
I	114	1.59	0.80	2.52	0.27	1.048	45.74	1 307.45	0.102	59.90	2 242.53
1H	120	1.59	0.79	2.51	0.26	1.047	45.97	1 320.67	0.102	60.14	2 260.48
1G	126	1.60	0.78	2.50	0.26	1.047	46.19	1 333.26	0.101	60.37	2 277.53
F	132	1.61	0.77	2.50	0.26	1.046	46.39	1 345.26	0.101	60.58	2 293.77
E	138	1.62	0.76	2.49	0.26	1.046	46.59	1 356.72	0.100	60.79	2 309.27
D	144	1.63	0.75	2.48	0.25	1.045	46.78	1 367.70	0.100	60.98	2 324.09
CR	150	1.63	0.74	2.48	0.25	1.045	46.96	1 378.22	0.100	61.17	2 338.28

Postup výpočtu součinitelů A , B a s lze najít v příloze A normy [1].



Obr. 4.4: Rychlostní profil větru



Obr. 4.5: Tlakový profil větru

Při určování zatížení větrem byly uvažovány dva směry větru tj. kolmo na stěnu věže a diagonálně na nárožník, kdy směr větru a normála roviny stěny věže svírají 45° (viz obr. 2.6). Postup stanovení aerodynamických součinitelů pro oba směry je zcela identický, pouze se mění součinitelé plnosti φ (2.26).

Konstrukce byla rozdělena do 19-ti částí (viz příloha 1), kterým byl dopočítán patřičný součinitel plnosti na základě geometrie konstrukce a referenčních ploch průřezů (2.29). Postup výpočtu je vysvětlen v odst. 2.1 a v normě [1]. Při výpočtu c_f podle (2.21) byly zanedbávány doplňkové prvky, jako jsou antény, osvětlení aj.

Tabulka 4.7 Výpočet aerodynamického součinitele c_f (kolmý směr větru)

NÁZEV ČÁSTI	$A=A_f [m^2]$	$A_c [m^2]$	φ	K_2	K_1	θ	K_θ	$c_f=c_{f,s}$
Z	29.575	333.648	0.09	0.20	0.55	0.00	1.00	3.46
V	19.205	197.148	0.10	0.20	0.55	0.00	1.00	3.42
U	17.061	176.916	0.10	0.20	0.55	0.00	1.00	3.42
T	16.147	156.690	0.10	0.20	0.55	0.00	1.00	3.39
R	14.388	136.464	0.11	0.20	0.55	0.00	1.00	3.38
P	6.442	60.645	0.11	0.20	0.55	0.00	1.00	3.37
O	6.178	55.587	0.11	0.20	0.55	0.00	1.00	3.35
N	5.471	50.529	0.11	0.20	0.55	0.00	1.00	3.36
M	6.028	45.987	0.13	0.20	0.55	0.00	1.00	3.25
L	4.943	42.066	0.12	0.20	0.55	0.00	1.00	3.32
K	4.771	38.247	0.12	0.20	0.55	0.00	1.00	3.28
J	4.316	34.428	0.13	0.20	0.55	0.00	1.00	3.28
I	4.106	30.609	0.13	0.20	0.55	0.00	1.00	3.23
1H	3.553	26.787	0.13	0.20	0.55	0.00	1.00	3.24
1G	3.400	22.968	0.15	0.20	0.55	0.00	1.00	3.17
F	3.255	19.149	0.17	0.20	0.55	0.00	1.00	3.06
E	2.758	15.330	0.18	0.20	0.55	0.00	1.00	3.02
D	2.628	11.511	0.23	0.23	0.55	0.00	1.00	2.81
CR	2.572	9.600	0.27	0.27	0.55	0.00	1.00	2.65

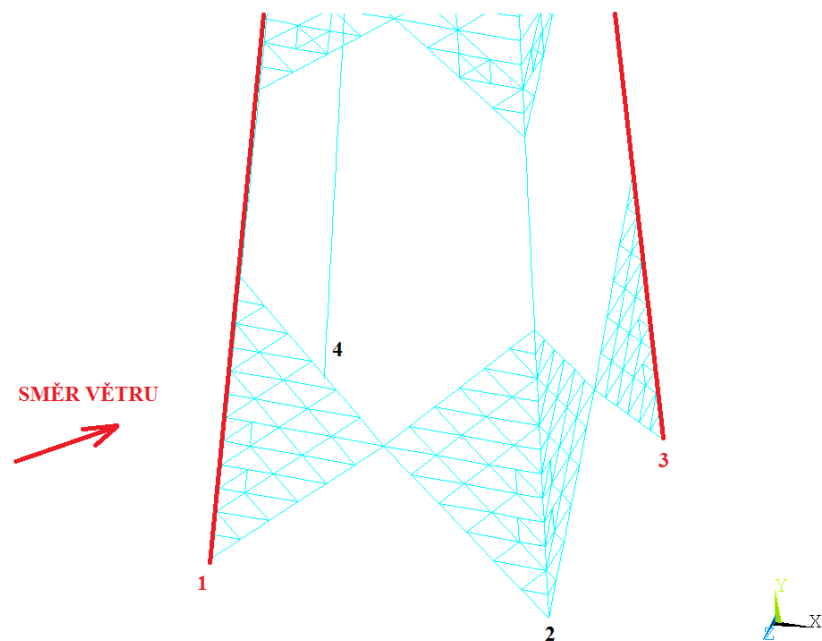
Tabulka 4.8 Výpočet aerodynamického součinitele c_f (diagonální směr větru)

NÁZEV ČÁSTI	$A=A_f [m^2]$	$A_c [m^2]$	φ	K_2	K_1	θ	K_θ	$c_f=c_{f,s}$
Z	56.502	471.843	0.12	0.20	0.55	0.79	1.11	3.67
V	36.645	278.808	0.13	0.20	0.55	0.79	1.11	3.60
U	32.710	250.200	0.13	0.20	0.55	0.79	1.11	3.61
T	30.882	221.592	0.14	0.20	0.55	0.79	1.11	3.56
R	27.364	192.984	0.14	0.20	0.55	0.79	1.11	3.55
P	12.248	85.764	0.14	0.20	0.55	0.79	1.11	3.54
O	11.721	78.612	0.15	0.20	0.55	0.79	1.11	3.51
N	10.377	71.460	0.15	0.20	0.55	0.79	1.11	3.53
M	11.492	65.037	0.18	0.20	0.55	0.79	1.11	3.37
L	9.358	59.490	0.16	0.20	0.55	0.79	1.11	3.47
K	9.013	54.090	0.17	0.20	0.55	0.79	1.11	3.42
J	8.138	48.690	0.17	0.20	0.55	0.79	1.11	3.42
I	7.718	43.287	0.18	0.20	0.55	0.79	1.11	3.36
1H	6.647	37.884	0.18	0.20	0.55	0.79	1.11	3.37
1G	6.342	32.484	0.20	0.20	0.55	0.79	1.11	3.28
F	6.052	27.081	0.22	0.22	0.55	0.79	1.12	3.18
E	5.093	21.678	0.23	0.23	0.55	0.79	1.13	3.14
D	4.832	16.278	0.30	0.30	0.55	0.79	1.16	2.96
CR	4.792	13.578	0.35	0.35	0.55	0.79	1.19	2.81

Při diagonálním směru větru je součinitel c_f upraven prostřednictvím úhlu $\theta = 45^\circ$. Z obr. (4.6) je zřejmé, že pro vyznačené nárožníky tento úhel neplatí. Proto bylo nutné stanovit pro tyto dva nárožníky c_f jako v tab. 4.7, ovšem se součinitelem plnosti φ z tab. (4.8).

Tabulka 4.9 Výpočet aerodynamického součinitele c_f pro nárožníky 1,3 (diagonální směr větru)

NÁZEV ČÁSTI	$A=A_f[m^2]$	$A_c[m^2]$	φ	K_2	K_1	Θ	K_Θ	$c_f=c_{f,s}$
Z	56.502	471.843	0.12	0.20	0.55	0.00	1.00	3.31
V	36.645	278.808	0.13	0.20	0.55	0.00	1.00	3.25
U	32.710	250.200	0.13	0.20	0.55	0.00	1.00	3.25
T	30.882	221.592	0.14	0.20	0.55	0.00	1.00	3.21
R	27.364	192.984	0.14	0.20	0.55	0.00	1.00	3.20
P	12.248	85.764	0.14	0.20	0.55	0.00	1.00	3.19
O	11.721	78.612	0.15	0.20	0.55	0.00	1.00	3.16
N	10.377	71.460	0.15	0.20	0.55	0.00	1.00	3.18
M	11.492	65.037	0.18	0.20	0.55	0.00	1.00	3.03
L	9.358	59.490	0.16	0.20	0.55	0.00	1.00	3.12
K	9.013	54.090	0.17	0.20	0.55	0.00	1.00	3.08
J	8.138	48.690	0.17	0.20	0.55	0.00	1.00	3.08
I	7.718	43.287	0.18	0.20	0.55	0.00	1.00	3.03
1H	6.647	37.884	0.18	0.20	0.55	0.00	1.00	3.04
1G	6.342	32.484	0.20	0.20	0.55	0.00	1.00	2.95
F	6.052	27.081	0.22	0.22	0.55	0.00	1.00	2.83
E	5.093	21.678	0.23	0.23	0.55	0.00	1.00	2.78
D	4.832	16.278	0.30	0.30	0.55	0.00	1.00	2.55
CR	4.792	13.578	0.35	0.35	0.55	0.00	1.00	2.36



Obr. 4.6: K objasnění problému stanovení c_f pro nárožníky 1,3

Nyní je třeba ověřit, zda se může při stanovení zatížení využít ekvivalentní statické metody (2.30):

Tabulka 4.10 Ověření použití ekvivalentní statické metody

	d_B [m]	τ_0 [m]	h [m]	ρ_s [kg/m ³]		
	19.8	0.001	150	7580		
	m_T [kg]	$c_{f,T AT}$ [m ²]	h_T [m]	(2.30)		
Kolmý směr větru	29752.16	345.10	50	0.141452	<	1
Diagonální směr větru	20967.50	594.59	50	0.057858	<	1

Následujícím krokem bylo stanovit dynamické charakteristiky věže pomocí modální analýzy v programu ANSYS. Model byl tedy zatížen vlastní tíhou prostřednictvím příkazu ACEL, byla vybrána modální analýza, zvolena metoda určující vlastní čísla (BLOCK LANCZOS METHOD), nastaven interval frekvence a spuštěn

výpočet. Na následujícím obrázku lze vidět úryvek výstupu modální analýzy a vyhledání první vlastní frekvence konstrukce v hledaném směru x.

***** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION ***** X DIRECTION							
MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC. FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF.MASS TO TOTAL MASS
1	1.04760	0.95448	-104.16	0.776332	10848.3	0.234393	0.154319
2	1.04787	0.95432	124.86	0.930655	15589.9	0.571235	0.221769
3	2.11940	0.47183	-0.31752	0.002367	0.160819	0.571237	0.143417E-05
4	2.11954	0.47180	-0.87680	0.006535	0.768781	0.571253	0.109360E-04
5	2.11958	0.47179	2.0907	0.015583	4.37089	0.571348	0.621768E-04
6	2.11961	0.47178	1.0697	0.007973	1.14419	0.571372	0.162763E-04
7	2.62870	0.38042	-42.875	0.319572	1838.25	0.611090	0.261494E-01
8	2.62883	0.38040	-134.16	1.000000	17999.7	1.00000	0.256049
9	3.30520	0.30255	0.80691E-04	0.000001	0.651096E-08	1.00000	0.926196E-13
10	3.30695	0.30239	0.83759E-03	0.000006	0.701551E-06	1.00000	0.997969E-11
sum					46282.6		0.658378

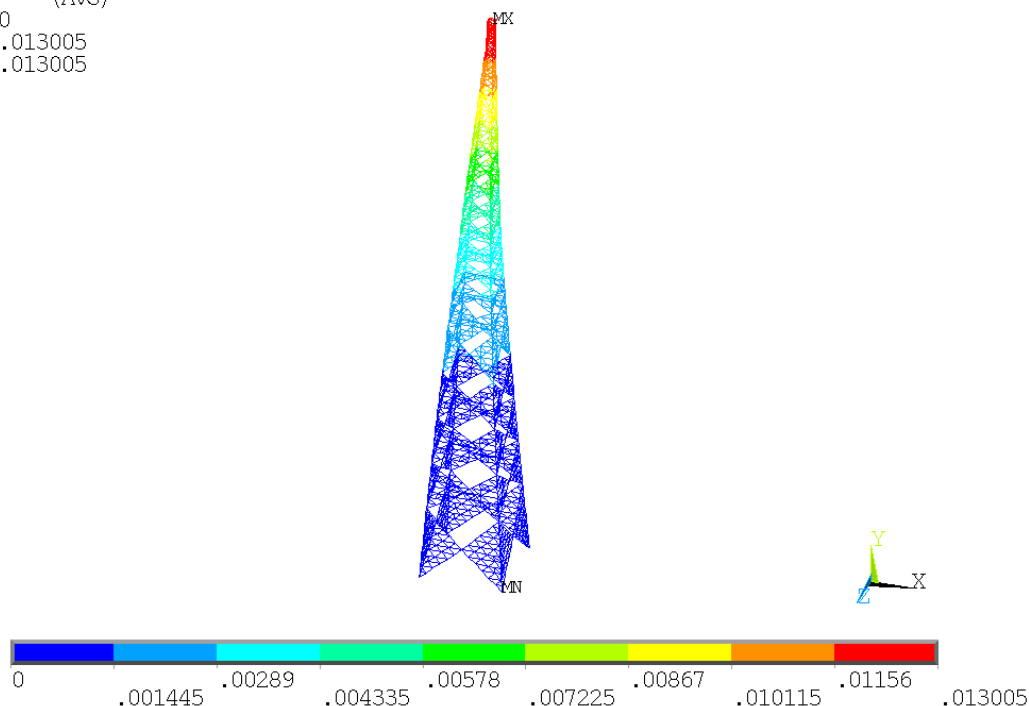
Obr. 4.7: Výstupy modální analýzy (vlastní tíha)

V postprocesoru bylo vykresleno uzlové řešení (NODAL SOLUTION) a bylo možné tak shlédnout vlastní tvar ohybového kmitání.

NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =2
FREQ=1.04787
USUM (AVG)
RSYS=0
DMX =.013005
SMX =.013005



PLOT NO. 1



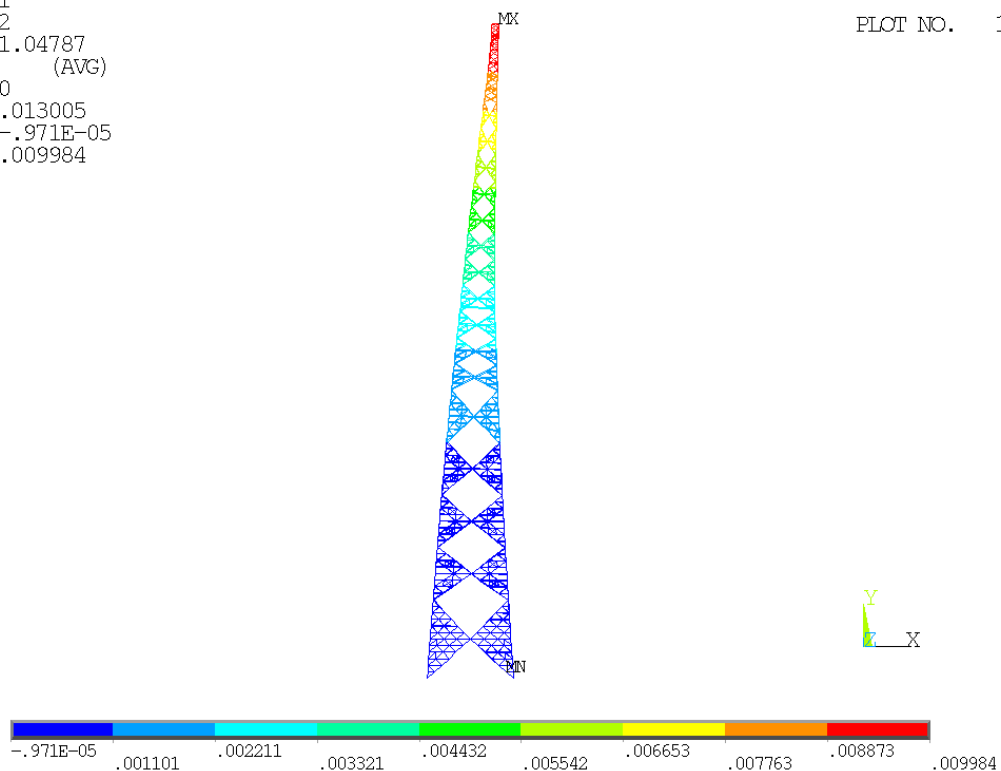
Obr. 4.8: Vlastní tvar $\Phi_{1,x}$ při $f_x = 1,048$ Hz – prostorový

NODAL SOLUTION

STEP=1
SUB =2
FREQ=1.04787
UX (AVG)
RSYS=0
DMX =.013005
SMN =-.971E-05
SMX =.009984



PLOT NO. 1



Obr. 4.9: Vlastní tvar $\Phi_{1,x}$ při $f_x=1,048$ Hz – z posunů UX

Z programu ANSYS byly exportovány výsledky modální analýzy, konkrétně posuny UX odpovídající vlastní frekvenci $f_x= 1,048$ Hz, nutné pro stanovení vlastního tvaru kmitání a dosazení do příslušných vzorců (2.18), (2.19), (2.20) a (2.14) a získání veličin uvedených v tab. 4.11. a tab. 4.12.

Tabulka 4.11 Výpočet ekvivalentní hmotnosti m_e (vlastní tíha)

UX	s	z	$\Phi_{1,x}^*$	$(\Phi_{1,x})^2$	m(s) [kg/m]	m(s) $(\Phi_{1,x})^2$	$\int m(s) (\Phi_{1,x})^2 ds$	$\int \Phi_{1,x}^2 ds$
0.00E+00		0	0.000	0.000		0.00	2.9930722	0.0038
2.05E-04	18	18	0.021	0.000	787.62	0.33	7.9531367	0.01011
3.55E-04	12	30	0.036	0.001	786.14	0.99	27.206179	0.03841
7.16E-04	12	42	0.072	0.005	689.14	3.54	70.783987	0.10632
1.12E-03	12	54	0.112	0.013	656.25	8.26	152.30629	0.24721
1.69E-03	12	66	0.169	0.029	598.47	17.13	110.96109	0.2043
1.98E-03	6	72	0.199	0.039	503.01	19.86	142.68063	0.29058
2.39E-03	6	78	0.240	0.057	482.78	27.70	171.76822	0.40738
2.80E-03	6	84	0.280	0.078	376.90	29.55	220.28275	0.56337
3.30E-03	6	90	0.331	0.109	401.13	43.87	278.18523	0.76896
3.83E-03	6	96	0.383	0.147	332.47	48.86	336.63384	1.03239
4.43E-03	6	102	0.444	0.197	321.30	63.36	418.48888	1.36418
5.07E-03	6	108	0.507	0.258	295.64	76.14	511.134	1.771
5.76E-03	6	114	0.577	0.333	283.17	94.24	541.50721	2.26517
6.49E-03	6	120	0.650	0.422	204.29	86.26	569.63648	2.84717
7.25E-03	6	126	0.726	0.527	196.69	103.61	677.18466	3.51296
8.01E-03	6	132	0.803	0.644	189.56	122.11	700.2446	4.24108
8.76E-03	6	138	0.877	0.769	144.64	111.30	703.45762	4.98337
9.43E-03	6	144	0.944	0.892	138.16	123.19	753.10938	5.67488
9.98E-03	6	150	1.000	1.000	127.85	127.85		
s - výška samotného panelu								
z - výška panelu nad terénem						Σ	6396.5173	30.3326
* vlastní tvar je normovaný na jednotku v bodě maximální výchylky							m_e [kg/m]	210.879

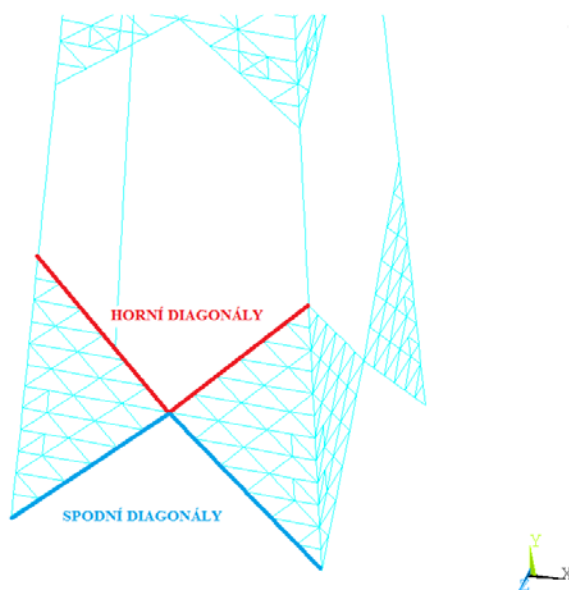
Posléze bylo nutno dopočítat potřebné hodnoty pro stanovení součinitele $c_s c_d$ (podrobný postup v [1]). Výška z_s byla stanovena dle obr (2.4), konstrukční tlumení δ_s převzato z [1] z hodnot pro případ ocelové příhradové věže se spoji z vysokopevnostních šroubů a se svařovanými spoji a následně proveden aritmetický průměr těchto hodnot. Ostatní hodnoty stanoveny dle vztahů uvedených v [1].

 Tabulka 4.12 Výpočet $c_s c_d$, a dynamických charakteristik

i	z_s	$c_o(z_s)$	$I_v(z_s)$	$L(z_s)$ [m]	B^2	$n_{1,x}$ [Hz]	f_L	S_L	δ_s	m_e [kg/m]
1	90	1.050	0.105	196.523	0.561	1.048	4.611	0.049	0.035	210.879
i	δ_a	δ	η_h	η_b	R_h	R_b	R^2	v [Hz]	k_p	$c_s c_d$
1	3.008	3.043	16.190	0.791	0.060	0.629	0.003	0.080	2.984	0.850

V tab. (4.) položka i udává: 1- vlastní tíha.

Posledním krokem je samotný výpočet síly od větru F_w působící na konstrukci. Opět bylo využíváno výše zmíněného rozdělení věže do jednotlivých částí (příloha 1), zde dokonce s dalším, podrobnějším rozdělením dle funkcí prutů v daném panelu tj. nárožník, diagonála a výplet. Vzhledem ke tvaru věže (viz obr. 4.1) bylo účelné rozdělit diagonály na spodní a horní, jelikož se lišily jejich délky. (viz obr. 4.10) Jednotlivé pruty výpletu byly také roztrženy podle horizontálního, vertikálního a dvou diagonálních směrů.



Obr. 4.10: K vysvětlení spodní a horní diagonály

V následujících tabulkách (4.13 – 4.21) jsou uvedeny síly od větru vždy pro reprezentativní prvky daného panelu (části). Následně jsou síly přepočítány v závislosti na geometrii modelu. Položka n_{line} udává počet čar, do nichž je prut o délce l rozdělen v solid modelu (viz obr. 4.1). V místě změny sklonu stěny věže (část M) jsou pruty rozděleny do čar o různých délkách. Síla $F_{p,node}$ potom představuje uzlové zatížení. Nutno ještě podotknout, že diagonály v částech věže D, E a CR jsou zařazeny do výpletu. Jelikož jsou tvořeny jednou čarou (jedním konečným prvkem), tak jako pruty výpletu.

Tabulka 4.13 Síla F_w na nárožník (kolmý směr větru)

NÁZEV ČÁSTI	z [m]	b [mm]	l [mm]	A_{ref} [m ²]	c_f	$l_v(z)$	$q_p(z)$ [N/m ²]	$F_{m,w}(z)$ [kN]	$c_{o(z)}$	$F_{p,w(z)}$ [kN]	n_{line}	$F_{p,node}$ [N]
Z	18	250	18089	4.52	3.46	0.13	1610.84	13.39	1.06	21.05	12	877.02
V	30	250	12059	3.01	3.42	0.12	1780.06	10.03	1.05	15.35	8	959.30
U	42	200	12059	2.41	3.42	0.11	1894.54	8.71	1.05	13.13	8	820.80
T	54	200	12059	2.41	3.39	0.11	1981.30	9.13	1.05	13.65	8	853.20
R	66	200	12059	2.41	3.38	0.11	2051.15	9.51	1.05	14.15	8	884.09
P	72	180	6030	1.09	3.37	0.11	2081.55	4.36	1.05	6.47	4	808.59
O	78	180	6030	1.09	3.35	0.11	2109.56	4.40	1.05	6.52	4	815.55
N	84	160	6030	0.96	3.36	0.11	2135.52	3.99	1.05	5.91	4	739.11
M*	90	160	6019	0.96	3.25	0.10	2159.70	3.90	1.05	5.78	viz níže	
L	96	150	6017	0.90	3.32	0.10	2182.33	3.78	1.05	5.61	4	701.01
K	102	150	6017	0.90	3.28	0.10	2203.58	3.79	1.05	5.62	4	702.44
J	108	140	6017	0.84	3.28	0.10	2223.60	3.57	1.05	5.31	4	663.20
I	114	140	6017	0.84	3.23	0.10	2242.53	3.56	1.05	5.30	4	662.39
1H	120	130	6017	0.78	3.24	0.10	2260.48	3.35	1.05	4.99	4	623.71
1G	126	130	6017	0.78	3.17	0.10	2277.53	3.30	1.05	4.93	4	616.36
F	132	130	6017	0.78	3.06	0.10	2293.77	3.22	1.05	4.82	4	603.02
E	138	120	6017	0.72	3.02	0.10	2309.27	2.96	1.05	4.44	4	554.42
D	144	120	6017	0.72	2.81	0.10	2324.09	2.78	1.05	4.17	4	521.57
CR	150	100	6000	0.60	2.65	0.10	2338.28	2.19	1.05	3.31	6	275.63
* ZMĚNA SKLONU VĚŽE	90	160	1005	0.16	3.25	0.10	2159.70	0.65	1.05	0.97	1	482.87
	90	160	502	0.08	3.25	0.10	2159.70	0.33	1.05	0.48	1	241.19
	90	160	1504	0.24	3.25	0.10	2159.70	0.97	1.05	1.45	1	722.62
	(nárožník v části M je tvořen 5-ti čarami, z nichž 3 mají shodnou délku - 1504mm)											

Tabulka 4.14 Síla F_w na spodní diagonálu (kolmý směr větru)

NÁZEV ČÁSTI	z [m]	b [mm]	l [mm]	A_{ref} [m ²]	c_f	$l_v(z)$	$q_p(z)$ [N/m ²]	$F_{m,w}(z)$ [kN]	$c_{o(z)}$	$F_{p,w(z)}$ [kN]	n_{line}	$F_{p,node}$ [N]
Z	18	110	13394	1.47	3.46	0.13	1610.84	4.36	1.06	6.86	6	571.46
V	30	110	10524	1.16	3.42	0.12	1780.06	3.85	1.05	5.89	4	736.73
U	42	110	9844	1.08	3.42	0.11	1894.54	3.91	1.05	5.90	4	737.04
T	54	110	9191	1.01	3.39	0.11	1981.30	3.83	1.05	5.72	4	715.31
R	66	110	8572	0.94	3.38	0.11	2051.15	3.72	1.05	5.53	4	691.29
P	72	100	6063	0.61	3.37	0.11	2081.55	2.43	1.05	3.61	2	903.35
O	78	100	5701	0.57	3.35	0.11	2109.56	2.31	1.05	3.43	2	856.73
N	84	90	5347	0.48	3.36	0.11	2135.52	1.99	1.05	2.95	2	737.31

Pokračování tab. 4.14 Síla F_w na spodní diagonálu (kolmý směr větru)

NÁZEV ČÁSTI	z [m]	b [mm]	l [mm]	A_{ref} [m ²]	c_f	$l_v(z)$	$q_p(z)$ [N/m ²]	$F_{m,w}(z)$ [kN]	$c_{o(z)}$	$F_{p,w(z)}$ [kN]	n_{line}	$F_{p,node}$ [N]
M*	90	90	843.2	0.08	3.25	0.10	2159.70	0.31	1.05	0.46	1	227.88
M*	90	90	1668	0.15	3.25	0.10	2159.70	0.61	1.05	0.90	1	450.80
M*	90	90	2494	0.22	3.25	0.10	2159.70	0.91	1.05	1.35	1	674.03
L	96	90	4739	0.43	3.32	0.10	2182.33	1.79	1.05	2.65	2	662.54
K	102	90	4497	0.40	3.28	0.10	2203.58	1.70	1.05	2.52	2	629.99
J	108	80	4266	0.34	3.28	0.10	2223.60	1.45	1.05	2.15	2	537.38
I	114	80	4046	0.32	3.23	0.10	2242.53	1.37	1.05	2.04	2	509.04
1H	120	70	3840	0.27	3.24	0.10	2260.48	1.15	1.05	1.71	2	428.67
1G	126	70	3650	0.26	3.17	0.10	2277.53	1.08	1.05	1.61	2	402.65
F	132	70	3479	0.24	3.06	0.10	2293.77	1.00	1.05	1.50	2	375.48
*(spodní diagonála v části M je tvořena 3-mi čarami)												

Tabulka 4.15 Síla F_w na horní diagonálu (kolmý směr větru)

NÁZEV ČÁSTI	z [m]	b [mm]	l [mm]	A_{ref} [m ²]	c_f	$l_v(z)$	$q_p(z)$ [N/m ²]	$F_{m,w}(z)$ [kN]	$c_{o(z)}$	$F_{p,w(z)}$ [kN]	n_{line}	$F_{p,node}$ [N]
Z	18	110	12489	1.37	3.46	0.13	1610.84	4.07	1.06	6.39	6	532.85
V	30	110	9844	1.08	3.42	0.12	1780.06	3.60	1.05	5.51	4	689.12
U	42	110	9191	1.01	3.42	0.11	1894.54	3.65	1.05	5.51	4	688.15
T	54	110	8572	0.94	3.39	0.11	1981.30	3.57	1.05	5.34	4	667.14
R	66	110	7993	0.88	3.38	0.11	2051.15	3.47	1.05	5.16	4	644.60
P	72	100	5701	0.57	3.37	0.11	2081.55	2.29	1.05	3.40	2	849.42
O	78	100	5347	0.53	3.35	0.11	2109.56	2.17	1.05	3.21	2	803.53
N	84	90	5005	0.45	3.36	0.11	2135.52	1.86	1.05	2.76	2	690.15
M	90	90	4739	0.43	3.25	0.10	2159.70	1.73	1.05	2.56	2	640.38
L	96	90	4497	0.40	3.32	0.10	2182.33	1.70	1.05	2.51	2	628.70
K	102	90	4266	0.38	3.28	0.10	2203.58	1.61	1.05	2.39	2	597.63
J	108	80	4046	0.32	3.28	0.10	2223.60	1.37	1.05	2.04	2	509.66
I	114	80	3840	0.31	3.23	0.10	2242.53	1.30	1.05	1.93	2	483.12
1H	120	70	3650	0.26	3.24	0.10	2260.48	1.09	1.05	1.63	2	407.46
1G	126	70	3479	0.24	3.17	0.10	2277.53	1.03	1.05	1.54	2	383.79
F	132	70	3330	0.23	3.06	0.10	2293.77	0.96	1.05	1.44	2	359.40

Tabulka 4.16 Síla F_w na pruty výpletu (kolmý směr větru)

NÁZEV ČÁSTI	z [m]	b [mm]	l [mm]	A_{ref} [m ²]	c_f	$l_v(z)$	$q_p(z)$ [N/m ²]	$F_{m,w}(z)$ [kN]	$c_{o(z)}$	$F_{p,w(z)}$ [kN]	n_{line}	$F_{p,node}$ [N]
Z	18	60	1545	0.09	3.46	0.13	1610.84	0.27	1.06	0.43	216	431.465
Z	18	60	3090	0.19	3.46	0.13	1610.84	0.55	1.06	0.86	431	862.931
Z	18	60	1507	0.09	3.46	0.13	1610.84	0.27	1.06	0.42	210	420.853
Z	18	60	2232	0.13	3.46	0.13	1610.84	0.40	1.06	0.62	312	623.321
Z	18	60	2082	0.12	3.46	0.13	1610.84	0.37	1.06	0.58	291	581.431
V	30	60	2054	0.12	3.42	0.12	1780.06	0.41	1.05	0.63	314	627.444
V	30	60	4108	0.25	3.42	0.12	1780.06	0.82	1.05	1.25	627	1254.89
V	30	60	1507	0.09	3.42	0.12	1780.06	0.30	1.05	0.46	230	460.35
V	30	60	2631	0.16	3.42	0.12	1780.06	0.53	1.05	0.80	402	803.703
V	30	60	1315.5	0.08	3.42	0.12	1780.06	0.26	1.05	0.40	201	401.851
V	30	60	2461	0.15	3.42	0.12	1780.06	0.49	1.05	0.75	376	751.772
V	30	60	1230.5	0.07	3.42	0.12	1780.06	0.25	1.05	0.38	188	375.886
U	42	60	1843	0.11	3.42	0.11	1894.54	0.40	1.05	0.60	301	602.135
U	42	60	3686	0.22	3.42	0.11	1894.54	0.80	1.05	1.20	602	1204.27
U	42	60	1507	0.09	3.42	0.11	1894.54	0.33	1.05	0.49	246	492.359
U	42	60	2461	0.15	3.42	0.11	1894.54	0.53	1.05	0.80	402	804.045
U	42	60	1230.5	0.07	3.42	0.11	1894.54	0.27	1.05	0.40	201	402.023
U	42	60	2298	0.14	3.42	0.11	1894.54	0.50	1.05	0.75	375	750.791
U	42	60	1149	0.07	3.42	0.11	1894.54	0.25	1.05	0.38	188	375.395
T	54	60	1632	0.10	3.39	0.11	1981.30	0.37	1.05	0.55	277	554.244
T	54	60	3264	0.20	3.39	0.11	1981.30	0.74	1.05	1.11	554	1108.49
T	54	60	1507	0.09	3.39	0.11	1981.30	0.34	1.05	0.51	256	511.793
T	54	60	2298	0.14	3.39	0.11	1981.30	0.52	1.05	0.78	390	780.425
T	54	60	1149	0.07	3.39	0.11	1981.30	0.26	1.05	0.39	195	390.212
T	54	60	2143	0.13	3.39	0.11	1981.30	0.49	1.05	0.73	364	727.785
T	54	60	1071.5	0.06	3.39	0.11	1981.30	0.24	1.05	0.36	182	363.892
R	66	60	1422	0.09	3.38	0.11	2051.15	0.34	1.05	0.50	250	500.411
R	66	60	2844	0.17	3.38	0.11	2051.15	0.67	1.05	1.00	500	1000.82
R	66	60	1507	0.09	3.38	0.11	2051.15	0.36	1.05	0.53	265	530.323
R	66	60	2143	0.13	3.38	0.11	2051.15	0.51	1.05	0.75	377	754.136
R	66	60	1998	0.12	3.38	0.11	2051.15	0.47	1.05	0.70	352	703.109
P	72	50	2527	0.13	3.37	0.11	2081.55	0.51	1.05	0.75	377	753.016
P	72	50	1507	0.08	3.37	0.11	2081.55	0.30	1.05	0.45	225	449.068
P	72	50	3031	0.15	3.37	0.11	2081.55	0.61	1.05	0.90	452	903.203

Pokračování tab. 4.16 Síla F_w na pruty výpletu (kolmý směr větru)

NÁZEV ČÁSTI	z [m]	b [mm]	l [mm]	A_{ref} [m ²]	c_f	$l_v(z)$	$q_p(z)$ [N/m ²]	$F_{m,w}(z)$ [kN]	$c_{o(z)}$	$F_{p,w(z)}$ [kN]	n_{line}	$F_{p,node}$ [N]
O	78	50	2316	0.12	3.35	0.11	2109.56	0.47	1.05	0.70	348	696.083
O	78	50	1507	0.08	3.35	0.11	2109.56	0.31	1.05	0.45	226	452.935
O	78	50	2850	0.14	3.35	0.11	2109.56	0.58	1.05	0.86	428	856.579
N	84	50	2105	0.11	3.36	0.11	2135.52	0.44	1.05	0.65	323	645.032
N	84	50	1507	0.08	3.36	0.11	2135.52	0.31	1.05	0.46	231	461.788
N	84	50	2674	0.13	3.36	0.11	2135.52	0.55	1.05	0.82	410	819.39
M	90	50	1912	0.10	3.25	0.10	2159.70	0.39	1.05	0.57	287	574.156
M	90	50	1263	0.06	3.25	0.1	2159.7	0.26	1.05	0.38	190	379.267
M	90	50	5340	0.27	3.25	0.1	2159.7	1.08	1.05	1.60	802	1603.55
M	90	50	1504	0.08	3.25	0.1	2159.7	0.30	1.05	0.45	226	451.637
M	90	50	2494	0.12	3.25	0.1	2159.7	0.51	1.05	0.75	374	748.925
L	96	50	1753	0.09	3.32	0.10	2182.33	0.37	1.05	0.54	272	544.618
L	96	50	1504	0.08	3.32	0.1	2182.33	0.32	1.05	0.47	234	467.26
L	96	50	2369	0.12	3.32	0.1	2182.33	0.50	1.05	0.74	368	735.996
K	102	50	1594	0.08	3.28	0.10	2203.58	0.33	1.05	0.50	248	496.233
K	102	50	1504	0.08	3.28	0.1	2203.58	0.32	1.05	0.47	234	468.215
K	102	50	2249	0.11	3.28	0.1	2203.58	0.47	1.05	0.70	350	700.144
J	108	50	1434	0.07	3.28	0.10	2223.60	0.30	1.05	0.45	226	451.592
J	108	50	1504	0.08	3.28	0.1	2223.6	0.32	1.05	0.47	237	473.636
J	108	50	2133	0.11	3.28	0.1	2223.6	0.45	1.05	0.67	336	671.719
I	114	50	1275	0.06	3.23	0.10	2242.53	0.27	1.05	0.40	201	401.028
I	114	50	2550	0.13	3.23	0.1	2242.53	0.54	1.05	0.80	401	802.057
I	114	50	1920	0.10	3.23	0.1	2242.53	0.41	1.05	0.60	302	603.902
I	114	50	2023	0.10	3.23	0.1	2242.53	0.43	1.05	0.64	318	636.298
1H	120	45	1116	0.05	3.24	0.10	2260.48	0.22	1.05	0.32	160	320.352
1H	120	45	2232	0.10	3.24	0.1	2260.48	0.43	1.05	0.64	320	640.704
1H	120	45	1825	0.08	3.24	0.1	2260.48	0.35	1.05	0.52	262	523.873
1H	120	45	1920	0.09	3.24	0.1	2260.48	0.37	1.05	0.55	276	551.144
1G	126	45	957	0.04	3.17	0.10	2277.53	0.18	1.05	0.27	136	271.472
1G	126	45	1914	0.09	3.17	0.1	2277.53	0.36	1.05	0.54	271	542.944

Pokračování tab. 4.16 Síla F_w na pruty výpletu (kolmý směr větru)

NÁZEV ČÁSTI	z [m]	b [mm]	l [mm]	A_{ref} [m ²]	c_f	$l_v(z)$	$q_p(z)$ [N/m ²]	$F_{m,w}(z)$ [kN]	$c_{o(z)}$	$F_{p,w(z)}$ [kN]	n_{line}	$F_{p,node}$ [N]
1G	126	45	1740	0.08	3.17	0.1	2277.53	0.33	1.05	0.49	247	493.586
1G	126	45	1825	0.08	3.17	0.1	2277.53	0.35	1.05	0.52	259	517.698
F	132	45	798	0.04	3.06	0.10	2293.77	0.15	1.05	0.22	111	221.47
F	132	45	1596	0.07	3.06	0.1	2293.77	0.30	1.05	0.44	221	442.94
F	132	45	1665	0.07	3.06	0.1	2293.77	0.31	1.05	0.46	231	462.09
F	132	45	1740	0.08	3.06	0.1	2293.77	0.32	1.05	0.48	241	482.904
E	138	45	2555	0.11	3.02	0.10	2309.27	0.47	1.05	0.71	353	706.273
E	138	45	1631	0.07	3.02	0.1	2309.27	0.30	1.05	0.45	225	450.854
E	138	45	1562	0.07	3.02	0.1	2309.27	0.29	1.05	0.43	216	431.78
E	138	45	1494	0.07	3.02	0.1	2309.27	0.28	1.05	0.41	206	412.983
E	138	45	1428	0.06	3.02	0.1	2309.27	0.26	1.05	0.39	197	394.739
E	138	45	1541	0.07	3.02	0.1	2309.27	0.28	1.05	0.43	213	425.975
E	138	45	1471	0.07	3.02	0.1	2309.27	0.27	1.05	0.41	203	406.625
E	138	45	1401	0.06	3.02	0.1	2309.27	0.26	1.05	0.39	194	387.275
E	138	45	1333	0.06	3.02	0.1	2309.27	0.25	1.05	0.37	184	368.478
D	144	50	2237	0.11	2.81	0.10	2324.09	0.43	1.05	0.65	323	646.359
D	144	50	1918	0.10	2.81	0.1	2324.09	0.37	1.05	0.55	277	554.187
D	144	50	1363	0.07	2.81	0.1	2324.09	0.26	1.05	0.39	197	393.826
D	144	50	1300	0.07	2.81	0.1	2324.09	0.25	1.05	0.38	188	375.622
D	144	50	1239	0.06	2.81	0.1	2324.09	0.24	1.05	0.36	179	357.997
D	144	50	1180	0.06	2.81	0.1	2324.09	0.23	1.05	0.34	170	340.95
D	144	50	1266	0.06	2.81	0.1	2324.09	0.24	1.05	0.37	183	365.798
D	144	50	1200	0.06	2.81	0.1	2324.09	0.23	1.05	0.35	173	346.728
D	144	50	1136	0.06	2.81	0.1	2324.09	0.22	1.05	0.33	164	328.236
D	144	50	1073	0.05	2.81	0.1	2324.09	0.21	1.05	0.31	155	310.033
CR	150	50	1600	0.08	2.65	0.10	2338.28	0.29	1.05	0.44	221	441.007
CR	150	50	943	0.05	2.65	0.1	2338.28	0.17	1.05	0.26	130	259.919

Další tabulky se týkají zatěžovacího stavu, kdy je věž vystavena diagonálnímu větru. Síla $F_{p,W(z),1}$ představuje sinovou popř. kosinovou složku síly $F_{p,W(z)}$. Tímto jednoduchým rozkladem je vyjádřena okolnost, že prvky nejsou kolmé vůči směru větru.

Tabulka 4.17 Síla F_w na nárožník 2,4 (diagonální vítr)

NÁZ. ČÁSTI	z [m]	b [mm]	l [mm]	A_{ref} [m ²]	c_f	$q_p(z)$ [N/m ²]	$F_{m,w}(z)$ [kN]	$c_{o(z)}$	$F_{p,W(z)}$ [kN]	$F_{p,W(z),1}$ [kN]	n_{line}	$F_{p,node}$ [N]
Z	18	250	18089	4.52	3.67	1611	14.18	1.06	22.29	15.76	12	656.75
V	30	250	12059	3.01	3.60	1780	10.58	1.05	16.18	11.44	8	715.23
U	42	200	12059	2.41	3.61	1895	9.18	1.05	13.84	9.79	8	611.71
T	54	200	12059	2.41	3.56	1981	9.60	1.05	14.34	10.14	8	633.94
R	66	200	12059	2.41	3.55	2051	9.99	1.05	14.86	10.51	8	656.86
P	72	180	6030	1.09	3.54	2082	4.58	1.05	6.79	4.80	4	600.56
O	78	180	6030	1.09	3.51	2110	4.61	1.05	6.84	4.84	4	604.50
N	84	160	6030	0.96	3.53	2136	4.19	1.05	6.21	4.39	4	548.67
M*	90	160	6019	0.96	3.37	2160	4.04	1.05	5.99	4.24	viz níže	
L	96	150	6017	0.90	3.47	2182	3.95	1.05	5.86	4.15	4	518.19
K	102	150	6017	0.90	3.42	2204	3.95	1.05	5.86	4.14	4	517.64
J	108	140	6017	0.84	3.42	2224	3.72	1.05	5.53	3.91	4	488.81
I	114	140	6017	0.84	3.36	2243	3.70	1.05	5.50	3.89	4	486.52
1H	120	130	6017	0.78	3.37	2260	3.49	1.05	5.19	3.67	4	459.01
1G	126	130	6017	0.78	3.28	2278	3.42	1.05	5.10	3.61	4	450.75
F	132	130	6017	0.78	3.18	2294	3.34	1.05	5.00	3.54	4	442.19
E	138	120	6017	0.72	3.14	2309	3.08	1.05	4.62	3.26	4	408.02
D	144	120	6017	0.72	2.96	2324	2.92	1.05	4.40	3.11	4	388.60
CR	150	100	6000	0.60	2.81	2338	2.33	1.05	3.51	2.48	6	206.76
*nárožník v části M je tvořen 5-ti čarami, z nichž 3 mají shodnou délku - 1504mm												
	90	160	1005	0.16	3.37	2160	0.68	1.05	1.00	0.71	1	353.88
	90	160	502	0.08	3.37	2160	0.34	1.05	0.50	0.35	1	176.76
	90	160	1504	0.24	3.37	2160	1.01	1.05	1.50	1.06	1	529.58

Tabulka 4.18 Síla F_w na nárožník 1,3 (diagonální vítr)

NÁZ. ČÁSTI	z [m]	b [mm]	l [mm]	A_{ref} [m ²]	c_f	$l_v(z)$	$q_p(z)$ [N/m ²]	$F_{m,w}(z)$ [kN]	$c_{o(z)}$	$F_{p,w(z)}$ [kN]	n_{line}	$F_{p,node}$ [N]
Z	18	354	18089	6.40	3.31	0.13	1611	18.07	1.06	28.40	12	1183.34
V	30	354	12059	4.26	3.25	0.12	1780	13.48	1.05	20.62	8	1288.71
U	42	283	12059	3.41	3.25	0.11	1895	11.70	1.05	17.63	8	1102.18
T	54	283	12059	3.41	3.21	0.11	1981	12.23	1.05	18.28	8	1142.24
R	66	283	12059	3.41	3.20	0.11	2051	12.73	1.05	18.94	8	1183.53
P	72	255	6030	1.53	3.19	0.11	2082	5.83	1.05	8.66	4	1082.09
O	78	255	6030	1.53	3.16	0.11	2110	5.87	1.05	8.71	4	1089.20
N	84	226	6030	1.36	3.18	0.11	2136	5.33	1.05	7.91	4	988.59
*M	90	226	6019	1.36	3.03	0.10	2160	5.15	1.05	7.64	viz níže	
L	96	212	6017	1.28	3.12	0.10	2182	5.04	1.05	7.47	4	933.67
K	102	212	6017	1.28	3.08	0.10	2204	5.03	1.05	7.46	4	932.69
J	108	198	6017	1.19	3.08	0.10	2224	4.74	1.05	7.05	4	880.73
I	114	198	6017	1.19	3.03	0.10	2243	4.71	1.05	7.01	4	876.61
1H	120	184	6017	1.11	3.04	0.10	2260	4.44	1.05	6.62	4	827.05
1G	126	184	6017	1.11	2.95	0.10	2278	4.35	1.05	6.50	4	812.17
F	132	184	6017	1.11	2.83	0.10	2294	4.21	1.05	6.30	4	787.58
E	138	170	6017	1.02	2.78	0.10	2309	3.86	1.05	5.78	4	722.67
D	144	170	6017	1.02	2.55	0.10	2324	3.56	1.05	5.34	4	668.11
CR	150	141	6000	0.85	2.36	0.10	2338	2.76	1.05	4.16	6	346.30
*(nárožník v části M je tvořen 5-ti čárami, z nichž 3 mají shodnou délku - 1504mm)												
	90	226	1005	0.23	3.03	0.10	2160	0.86	1.05	1.28	1	637.62
	90	226	502	0.11	3.03	0.10	2160	0.43	1.05	0.64	1	318.49
	90	226	1504	0.34	3.03	0.10	2160	1.29	1.05	1.91	1	954.20

 Tabulka 4.19 Síla F_w na spodní diagonálu (diagonální vítr)

NÁZ. ČÁSTI	z [m]	b [mm]	l [mm]	A_{ref} [m ²]	c_f	$l_v(z)$	$q_p(z)$ [N/m ²]	$F_{m,w}(z)$ [kN]	$c_{o(z)}$	$F_{p,w(z)}$ [kN]	$F_{p,w(z),1}$ [kN]	n_{line}	$F_{p,node}$ [N]
Z	18	110	13394	1.47	3.67	0.13	1611	4.62	1.06	7.26	5.14	6	427.94
V	30	110	10524	1.16	3.60	0.12	1780	4.06	1.05	6.21	4.39	4	549.29
U	42	110	9844	1.08	3.61	0.11	1895	4.12	1.05	6.21	4.39	4	549.29
T	54	110	9191	1.01	3.56	0.11	1981	4.02	1.05	6.01	4.25	4	531.49
R	66	110	8572	0.94	3.55	0.11	2051	3.91	1.05	5.81	4.11	4	513.61
P	72	100	6063	0.61	3.54	0.11	2082	2.56	1.05	3.80	2.68	2	670.94
O	78	100	5701	0.57	3.51	0.11	2110	2.42	1.05	3.59	2.54	2	635.02
N	84	90	5347	0.48	3.53	0.11	2136	2.09	1.05	3.10	2.19	2	547.33

Pokračování tab. 4.19 Síla F_w na spodní diagonálu (diagonální vítr)

NÁZ. ČÁSTI	z [m]	b [mm]	l [mm]	A_{ref} [m ²]	c_f	$l_v(z)$	$q_p(z)$ [N/m ²]	$F_{m,w}(z)$ [kN]	$c_{o(z)}$	$F_{p,w(z)}$ [kN]	$F_{p,w(z),1}$ [kN]	n_{line}	$F_{p,node}$ [N]
M	90	90	831	0.07	3.37	0.10	2160	0.31	1.05	0.47	0.33	1	164.59
M	90	90	1668	0.15	3.37	0.10	2160	0.63	1.05	0.93	0.66	1	330.37
M	90	90	2494	0.22	3.37	0.10	2160	0.94	1.05	1.40	0.99	1	493.97
L	96	90	4739	0.43	3.47	0.10	2182	1.87	1.05	2.77	1.96	2	489.75
K	102	90	4497	0.40	3.42	0.10	2204	1.77	1.05	2.63	1.86	2	464.25
J	108	80	4266	0.34	3.42	0.10	2224	1.51	1.05	2.24	1.58	2	396.07
I	114	80	4046	0.32	3.36	0.10	2243	1.42	1.05	2.12	1.50	2	373.88
1H	120	70	3840	0.27	3.37	0.10	2260	1.20	1.05	1.78	1.26	2	315.47
1G	126	70	3650	0.26	3.28	0.10	2278	1.12	1.05	1.67	1.18	2	294.47
F	132	70	3479	0.24	3.18	0.10	2294	1.04	1.05	1.56	1.10	2	275.34

Tabulka 4.20 Síla F_w na horní diagonálu (diagonální vítr)

NÁZ. ČÁSTI	z [m]	b [mm]	l [mm]	A_{ref} [m ²]	c_f	$l_v(z)$	$q_p(z)$ [N/m ²]	$F_{m,w}(z)$ [kN]	$c_{o(z)}$	$F_{p,w(z)}$ [kN]	$F_{p,w(z),1}$ [kN]	n_{line}	$F_{p,node}$ [N]
Z	18	110	12489	1.37	3.67	0.13	1611	4.31	1.06	6.77	4.79	6	399.02
V	30	110	9844	1.08	3.60	0.12	1780	3.80	1.05	5.81	4.11	4	513.80
U	42	110	9191	1.01	3.61	0.11	1895	3.85	1.05	5.80	4.10	4	512.85
T	54	110	8572	0.94	3.56	0.11	1981	3.75	1.05	5.61	3.97	4	495.70
R	66	110	7993	0.88	3.55	0.11	2051	3.64	1.05	5.42	3.83	4	478.92
P	72	100	5701	0.57	3.54	0.11	2082	2.40	1.05	3.57	2.52	2	630.88
O	78	100	5347	0.53	3.51	0.11	2110	2.27	1.05	3.37	2.38	2	595.59
N	84	90	5005	0.45	3.53	0.11	2136	1.95	1.05	2.90	2.05	2	512.33
M	90	90	4739	0.43	3.37	0.10	2160	1.79	1.05	2.65	1.88	2	469.32
L	96	90	4497	0.40	3.47	0.10	2182	1.77	1.05	2.63	1.86	2	464.74
K	102	90	4266	0.38	3.42	0.10	2204	1.68	1.05	2.49	1.76	2	440.41
J	108	80	4046	0.32	3.42	0.10	2224	1.43	1.05	2.12	1.50	2	375.64
I	114	80	3840	0.31	3.36	0.10	2243	1.35	1.05	2.01	1.42	2	354.85
1H	120	70	3650	0.26	3.37	0.10	2260	1.14	1.05	1.70	1.20	2	299.86
1G	126	70	3479	0.24	3.28	0.10	2278	1.06	1.05	1.59	1.12	2	280.67
F	132	70	3330	0.23	3.18	0.10	2294	1.00	1.05	1.49	1.05	2	263.55

Tabulka 4.21 Síla F_w na pruty výpletu (diagonální vítr)

NÁZ. ČÁSTI	z [m]	b [mm]	l [mm]	A_{ref} [m ²]	c_f	$l_v(z)$	$q_p(z)$ [N/m ²]	$F_{m,w}(z)$ [kN]	$c_{o(z)}$	$F_{p,w(z)}$ [kN]	$F_{p,w(z),1}$ [kN]	$F_{p,node}$ [N]
Z	18	60	1545	0.09	3.67	0.13	1611	0.29	1.06	0.46	0.32	161.55
Z	18	60	3090	0.19	3.67	0.13	1611	0.58	1.06	0.91	0.65	323.10
Z	18	60	1507	0.09	3.67	0.13	1611	0.28	1.06	0.45	0.32	157.58
Z	18	60	2232	0.13	3.67	0.13	1611	0.42	1.06	0.66	0.47	233.39
Z	18	60	2082	0.12	3.67	0.13	1611	0.39	1.06	0.62	0.44	217.7
V	30	60	2054	0.12	3.60	0.12	1780	0.43	1.05	0.66	0.47	233.9
V	30	60	4108	0.25	3.6	0.12	1780	0.86	1.05	1.32	0.94	467.81
V	30	60	1507	0.09	3.6	0.12	1780	0.32	1.05	0.49	0.34	171.61
V	30	60	2631	0.16	3.6	0.12	1780	0.55	1.05	0.85	0.60	299.61
V	30	60	1316	0.08	3.6	0.12	1780	0.28	1.05	0.42	0.30	149.81
V	30	60	2461	0.15	3.6	0.12	1780	0.52	1.05	0.79	0.56	280.25
V	30	60	1231	0.07	3.6	0.12	1780	0.26	1.05	0.40	0.28	140.13
U	42	60	1843	0.11	3.61	0.11	1895	0.42	1.05	0.63	0.45	224.37
U	42	60	3686	0.22	3.61	0.11	1895	0.84	1.05	1.27	0.90	448.75
U	42	60	1507	0.09	3.61	0.11	1895	0.34	1.05	0.52	0.37	183.47
U	42	60	2461	0.15	3.61	0.11	1895	0.56	1.05	0.85	0.60	299.61
U	42	60	1231	0.07	3.61	0.11	1895	0.28	1.05	0.42	0.30	149.81
U	42	60	2298	0.14	3.61	0.11	1895	0.52	1.05	0.79	0.56	279.77
U	42	60	1149	0.07	3.61	0.11	1895	0.26	1.05	0.40	0.28	139.88
T	54	60	1632	0.10	3.56	0.11	1981	0.39	1.05	0.58	0.41	205.91
T	54	60	3264	0.20	3.56	0.11	1981	0.78	1.05	1.16	0.82	411.81
T	54	60	1507	0.09	3.56	0.11	1981	0.36	1.05	0.54	0.38	190.14
T	54	60	2298	0.14	3.56	0.11	1981	0.55	1.05	0.82	0.58	289.94
T	54	60	1149	0.07	3.56	0.11	1981	0.27	1.05	0.41	0.29	144.97
T	54	60	2143	0.13	3.56	0.11	1981	0.51	1.05	0.76	0.54	270.38
T	54	60	1072	0.06	3.56	0.11	1981	0.26	1.05	0.38	0.27	135.19
R	66	60	1422	0.09	3.55	0.11	2051	0.35	1.05	0.53	0.37	185.90
R	66	60	2844	0.17	3.55	0.11	2051	0.71	1.05	1.05	0.74	371.79
R	66	60	1507	0.09	3.55	0.11	2051	0.37	1.05	0.56	0.39	197.01
R	66	60	2143	0.13	3.55	0.11	2051	0.53	1.05	0.79	0.56	280.15
R	66	60	1998	0.12	3.55	0.11	2051	0.50	1.05	0.74	0.52	261.20
P	72	50	2527	0.13	3.54	0.11	2082	0.53	1.05	0.79	0.56	279.64
P	72	50	1507	0.08	3.54	0.11	2082	0.32	1.05	0.47	0.33	166.77

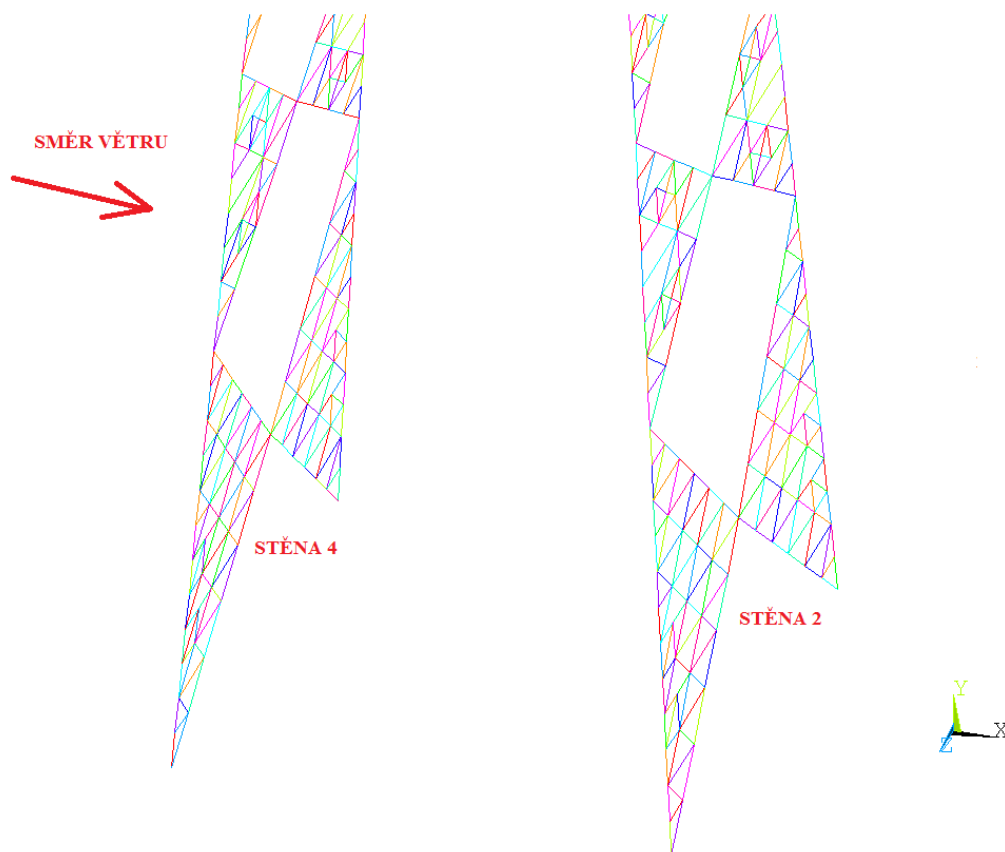
Pokračování tab. 4.21 Síla F_w na pruty výpletu (diagonální vítr)

NÁZ. ČÁSTI	z [m]	b [mm]	l [mm]	A_{ref} [m ²]	c_f	$l_v(z)$	$q_p(z)$ [N/m ²]	$F_{m,w}(z)$ [kN]	$c_{o(z)}$	$F_{p,w(z)}$ [kN]	$F_{p,w(z),1}$ [kN]	$F_{p,node}$ [N]
P	72	50	3031	0.15	3.54	0.11	2082	0.64	1.05	0.95	0.67	335.41
O	78	50	2316	0.12	3.51	0.11	2110	0.49	1.05	0.73	0.52	257.98
O	78	50	1507	0.08	3.51	0.11	2110	0.32	1.05	0.47	0.34	167.86
O	78	50	2850	0.14	3.51	0.11	2110	0.61	1.05	0.90	0.63	317.46
N	84	50	2105	0.11	3.53	0.11	2136	0.46	1.05	0.68	0.48	239.42
N	84	50	1507	0.08	3.53	0.11	2136	0.33	1.05	0.48	0.34	171.40
N	84	50	2674	0.13	3.53	0.11	2136	0.58	1.05	0.86	0.61	304.13
M	90	50	1912	0.10	3.37	0.10	2160	0.40	1.05	0.60	0.42	210.39
M	90	50	7860	0.39	3.37	0.1	2160	1.65	1.05	2.45	1.73	864.89
M	90	50	1504	0.08	3.37	0.1	2160	0.32	1.05	0.47	0.33	165.49
M	90	50	2494	0.12	3.37	0.1	2160	0.52	1.05	0.78	0.55	274.43
L	96	50	1753	0.09	3.47	0.10	2182	0.38	1.05	0.57	0.40	201.29
L	96	50	1504	0.08	3.47	0.1	2182	0.33	1.05	0.49	0.35	172.70
L	96	50	2369	0.12	3.47	0.1	2182	0.52	1.05	0.77	0.54	272.03
K	102	50	1594	0.08	3.42	0.10	2204	0.35	1.05	0.52	0.37	182.84
K	102	50	1504	0.08	3.42	0.1	2204	0.33	1.05	0.49	0.35	172.52
K	102	50	2249	0.11	3.42	0.1	2204	0.49	1.05	0.73	0.52	257.98
J	108	50	1434	0.07	3.42	0.10	2224	0.32	1.05	0.47	0.33	166.42
J	108	50	1504	0.08	3.42	0.1	2224	0.33	1.05	0.49	0.35	174.55
J	108	50	2133	0.11	3.42	0.1	2224	0.47	1.05	0.70	0.50	247.54
I	114	50	1275	0.06	3.36	0.10	2243	0.28	1.05	0.42	0.29	147.28
I	114	50	2550	0.13	3.36	0.1	2243	0.56	1.05	0.83	0.59	294.55
I	114	50	1920	0.10	3.36	0.1	2243	0.42	1.05	0.63	0.44	221.78
I	114	50	2023	0.10	3.36	0.1	2243	0.44	1.05	0.66	0.47	233.68
1H	120	45	1116	0.05	3.37	0.10	2260	0.22	1.05	0.33	0.24	117.88
1H	120	45	2232	0.10	3.37	0.1	2260	0.45	1.05	0.67	0.47	235.76
1H	120	45	1825	0.08	3.37	0.1	2260	0.37	1.05	0.55	0.39	192.77
1H	120	45	1920	0.09	3.37	0.1	2260	0.38	1.05	0.57	0.41	202.80

Pokračování tab. 4.21 Síla F_w na pruty výpletu (diagonální vítr)

NÁZ. ČÁSTI	z [m]	b [mm]	l [mm]	A_{ref} [m ²]	c_f	$l_v(z)$	$q_p(z)$ [N/m ²]	$F_{m,w}(z)$ [kN]	$c_{o(z)}$	$F_{p,w(z)}$ [kN]	$F_{p,w(z),1}$ [kN]	$F_{p,node}$ [N]
1G	126	45	957	0.04	3.28	0.10	2278	0.19	1.05	0.28	0.20	99.266
1G	126	45	1914	0.09	3.28	0.1	2278	0.38	1.05	0.56	0.40	198.53
1G	126	45	1740	0.08	3.28	0.1	2278	0.34	1.05	0.51	0.36	180.48
1G	126	45	1825	0.08	3.28	0.1	2278	0.36	1.05	0.54	0.38	189.30
F	132	45	798	0.04	3.18	0.10	2294	0.15	1.05	0.23	0.16	81.201
F	132	45	1596	0.07	3.18	0.1	2294	0.31	1.05	0.46	0.32	162.4
F	132	45	1665	0.07	3.18	0.1	2294	0.32	1.05	0.48	0.34	169.42
F	132	45	1740	0.08	3.18	0.1	2294	0.33	1.05	0.50	0.35	177.06
E	138	45	2555	0.11	3.14	0.10	2309	0.49	1.05	0.74	0.52	259.89
E	138	45	1631	0.07	3.14	0.1	2309	0.31	1.05	0.47	0.33	165.9
E	138	45	1562	0.07	3.14	0.1	2309	0.30	1.05	0.45	0.32	158.88
E	138	45	1494	0.07	3.14	0.1	2309	0.29	1.05	0.43	0.30	151.97
E	138	45	1428	0.06	3.14	0.1	2309	0.27	1.05	0.41	0.29	145.25
E	138	45	1541	0.07	3.14	0.1	2309	0.30	1.05	0.44	0.31	156.75
E	138	45	1471	0.07	3.14	0.1	2309	0.28	1.05	0.42	0.30	149.63
E	138	45	1401	0.06	3.14	0.1	2309	0.27	1.05	0.40	0.29	142.51
E	138	45	1333	0.06	3.14	0.1	2309	0.26	1.05	0.38	0.27	135.59
D	144	50	2237	0.11	2.96	0.10	2324	0.45	1.05	0.68	0.48	240.79
D	144	50	1918	0.10	2.96	0.1	2324	0.39	1.05	0.58	0.41	206.45
D	144	50	1363	0.07	2.96	0.1	2324	0.28	1.05	0.41	0.29	146.71
D	144	50	1300	0.07	2.96	0.1	2324	0.26	1.05	0.40	0.28	139.93
D	144	50	1239	0.06	2.96	0.1	2324	0.25	1.05	0.38	0.27	133.36
D	144	50	1180	0.06	2.96	0.1	2324	0.24	1.05	0.36	0.25	127.01
D	144	50	1266	0.06	2.96	0.1	2324	0.26	1.05	0.39	0.27	136.27
D	144	50	1200	0.06	2.96	0.1	2324	0.24	1.05	0.37	0.26	129.17
D	144	50	1136	0.06	2.96	0.1	2324	0.23	1.05	0.35	0.24	122.28
D	144	50	1073	0.05	2.96	0.1	2324	0.22	1.05	0.33	0.23	115.50
CR	150	50	1600	0.08	2.81	0.10	2338	0.31	1.05	0.47	0.33	165.41
CR	150	50	943	0.05	2.81	0.1	2338	0.18	1.05	0.28	0.19	97.487

Nyní zbývá konstrukci zatížit silami $F_{p,node}$. Tento zdánlivě triviální úkol se ukázal poměrně pracným. Primárně bylo nutné si uvědomit, které stěny věže budou zatíženy při daném směru větru. V případě směru větru kolmého ke stěně věže je zatížení aplikováno pouze na stěny 4 a 2 (viz obr. 4.11). V případě diagonálního větru je zatížení aplikováno na všechny stěny věže, nárožníky 1,3 jsou však zatíženy silami z tab. 4.18.



Obr. 4.11: Zatížení větrem kolmo na stěnu věže

Pro aplikování zatížení bylo vytvořeno macro (tab. 4.22). Problém spočíval ve vyselektování správných uzlů a přisouzení jim příslušné síly $F_{p,node}$. V případě prutů výpletu zde bylo s výhodou použito příkazu vybrání čáry dle její délky (LSEL,R,LENGTH,,). V případě diagonál byl tento postup zvolen pouze při výběru uzlů v místě křížení. V ostatních případech bylo třeba mít na pozoru, kdy jde do uzlu tzv. plná hodnota ($2 \times F_{p,node}$) a kdy pouze poloviční ($F_{p,node}$). Jinými slovy řečeno, kdy se jedná o vnitřní a kdy o koncový uzel (vnitřní uzel z hlediska prutu, z hlediska

konečného prvku jsou všechny uzly koncové (viz BEAM 188 v [6]). U nárožníku se tento fakt ještě komplikuje o uzly, které spojují jednotlivé části věže ($F_{p,node \text{ (část } i)} + F_{p,node \text{ (část } j)}$).

*Tabulka 4.22 Ukázka macra pro zadání zatížení na uzly diagonál a nárožníků
v části věže V při kolmém směru větru (zde diagonály pouze na stěnuč.4)*

diagonály (vnitřní uzly)	diagonály (uzly v místě křížení)	diagonály (koncové uzly)	nárožníky
cmsel,s,diagonaly_spodni 4 cmsel,r,cm_21 esll nsle nsel,r,loc,y,18.02,23.98 f,all,fx, 1473.454802	cmsel,s,diagonaly_spodni 4 cmsel,r,d21 lsel,r,length,,2.631 esll nsle nsel,r,loc,y,24 f,all,fx,1378.25	cmsel,s,diagonaly_spodni 4 cmsel,r,d21 lsel,r,length,,2.631 esll nsle nsel,r,loc,y,18 f,all,fx, 736.73	cmsel,s,cm_2 esll nsle nsel,u,loc,y,18 nsel,u,loc,y,30 f,all,fx,1918.6 0
cmsel,s,diagonaly_spodni 4 cmsel,r,cm_21 esll nsle nsel,r,loc,y,24.02,29.98 f,all,fx,1378.25	cmsel,s,diagonaly_spodni 4 cmsel,r,d21 lsel,r,length,,2.461 esll nsle nsel,r,loc,y,24 f,all,fx,689.12	cmsel,s,diagonaly_spodni 4 cmsel,r,d21 lsel,r,length,,2.461 esll nsle nsel,r,loc,y,30 f,all,fx, 689.12	cmsel,s,cm_2 esll nsle nsel,r,loc,y,18 f,all,fx,1836.3 2

4.2.2 Zatížení námrazou

Zatížení námrazou bylo stanoveno pomocí normy [5]. Obec Košetice na Pelhřimovsku spadá podle mapy tříd námraz do třídy ICR5 viz [5]. Výchozí hmotnost námrazy je podle tab. 2.2 $m=5\text{kg/m}$, objemová hmotnost námrazy $\gamma=300\text{ kg/m}^3$. Z důvodu značné výšky věže byl uvažován vliv výšky na hmotnost námrazy podle vztahu (2.23) viz tab. 4.23.

Dalším krokem bylo stanovit rozměry námrazy. K tomu bylo ovšem zapotřebí stanovit model nárůstu námrazy (obr. 2.10). Pro směr větru kolmo na stěnu věže byl všem prvkům přiřazen model typu C. Typ E by přicházel v úvahu pro prvky patřící stěně, která je zatížena na jejím rubu (např. stěna 2 podle obr. 4.11). Tento typ však vykazuje menší rozměry prvku s námrazou, proto nebyl dále uvažován. Rozměry námrazy pro typ C byly stanoveny dle vztahů (2.33), (2.34), (2.38), (2.41) nebo (2.42) a (2.46) nebo (2.47). V tab. 4.23 jsou **tučně** vysazeny.

Tabulka 4.23 Rozměry námrazy pro nárožníky – model C (kolmý směr větru)

NÁZEV ČÁSTI	z [m]	W [mm]	$K_h(z)$	$m \cdot K_h(z)$ [kg/m]	$W_{\max}$ [mm]	D [mm]	t [mm]	L [mm]	D [mm]
Z	18	250	1.20	5.99	225	296.49	23	102	250
V	30	250	1.35	6.75	239	301.90	26	115	250
U	42	200	1.52	7.61	254	268.88	6	152	213
T	54	200	1.72	8.58	270	276.43	8	168	217
R	66	200	1.93	9.67	287	284.71	11	185	221
P	72	180	2.05	10.27	295	275.67	15	208	210
O	78	180	2.18	10.91	304	280.52	16	218	212
N	84	160	2.32	11.58	314	273.41	21	244	201
M	90	160	2.46	12.30	323	278.92	22	256	204
L	96	150	2.61	13.06	333	279.14	25	277	200
K	102	150	2.77	13.87	343	285.22	27	289	204
J	108	140	2.94	14.72	354	286.51	30	312	200
I	114	140	3.13	15.63	364	293.18	32	325	204
1H	120	130	3.32	16.60	375	295.56	36	350	201
1G	126	130	3.53	17.63	387	302.84	37	365	205
F	132	130	3.74	18.72	399	310.38	39	380	209

Pokrč. Tab. 4.23 Rozměry námrazy pro nárožníky – model C (kolmý směr větru)

NÁZEV ČÁSTI	z [m]	W [mm]	$K_h(z)$	$m \cdot K_h(z)$ [kg/m]	W_{max} [mm]	D [mm]	t [mm]	L [mm]	D [mm]
E	138	120	3.97	19.87	411	314.25	43	408	207
D	144	120	4.22	21.10	423	322.44	46	424	211
CR	150	100	4.48	22.41	436	324.20	52	466	204

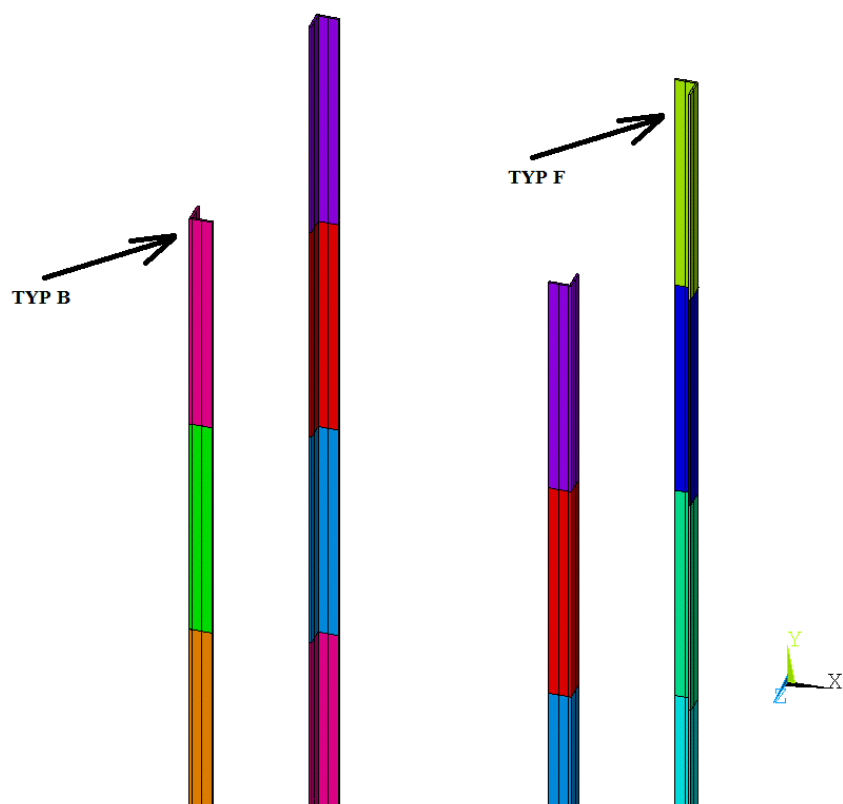
Tabulka 4.24 Rozměry námrazy pro diagonály – model C (kolmý směr větru)

NÁZEV ČÁSTI	z [m]	W [mm]	$K_h(z)$	$m \cdot K_h(z)$ [kg/m]	W_{max} [mm]	D [mm]	t [mm]	L [mm]	D [mm]
Z	18	110	1.20	5.99	225	194	16	180	141
V	30	110	1.35	6.75	239	202	18	197	145
U	42	110	1.52	7.61	254	211	20	215	150
T	54	110	1.72	8.58	270	220	22	235	155
R	66	110	1.93	9.67	287	231	25	256	160
P	72	100	2.05	10.27	295	232	28	278	157
O	78	100	2.18	10.91	304	237	30	290	160
N	84	90	2.32	11.58	314	239	34	313	157
M	90	90	2.46	12.30	323	246	35	326	160
L	96	90	2.61	13.06	333	252	37	339	163
K	102	90	2.77	13.87	343	259	38	353	167
J	108	80	2.94	14.72	354	262	42	379	165
I	114	80	3.13	15.63	364	270	44	394	168
1H	120	70	3.32	16.60	375	275	48	422	167
1G	126	70	3.53	17.63	387	282	50	438	171
F	132	70	3.74	18.72	399	290	52	454	175

Tabulka 4.25 Rozměry námrazy pro pruty výpletu – model C (kolmý směr větru)

NÁZEV ČÁSTI	z [m]	W [mm]	$K_h(z)$	$m \cdot K_h(z)$ [kg/m]	W_{max} [mm]	D [mm]	t [mm]	L [mm]	D [mm]
Z	18	60	1.20	5.99	225	170	25	231	110
V	30	60	1.35	6.75	239	180	27	249	115
U	42	60	1.52	7.61	254	189	30	269	120
T	54	60	1.72	8.58	270	200	33	291	125
R	66	60	1.93	9.67	287	211	35	314	131
P	72	50	2.05	10.27	295	215	39	339	129
O	78	50	2.18	10.91	304	221	41	352	132
N	84	50	2.32	11.58	314	227	42	364	135
M	90	50	2.46	12.30	323	234	44	378	138
L	96	50	2.61	13.06	333	241	46	391	142
K	102	50	2.77	13.87	343	248	48	406	145
J	108	50	2.94	14.72	354	255	49	420	149
I	114	50	3.13	15.63	364	262	51	435	153
1H	120	45	3.32	16.60	375	269	54	458	154
1G	126	45	3.53	17.63	387	277	56	474	158
F	132	45	3.74	18.72	399	285	58	490	162
D	144	50	4.22	21.10	423	303	62	517	173
CR	150	50	4.48	22.41	436	312	64	535	178

Při uvažování diagonálního směru větru (obr. 2.6) bylo rovněž využito modelu narůstání námrazy typu C a to u všech prvků, vyjímaje nárožníky 1 a 3 (viz obr. 4.6 a 4.12). Rozměry stanoveny dle vztahů (2.33), (2.34), (2.38), (2.41) nebo (2.42) a (2.46) nebo (2.47). Rozměry nárožníků v částech jsou počítány jako velké prvky (obr. 2.11, rozměr $W > 300\text{mm}$). U modelu typu B se navíc ještě projeví větší hmotnost námrazy podle vztahu (2.48) viz tab. 4.28.



Obr. 4.12: Přiřazení modelů námrazy nárožníkům

Tabulka 4.26 Rozměry námrazy pro nárožníky – model B (diagonální směr větru)

NÁZEV ČÁSTI	z [m]	W [mm]	$K_h(z)$	$m \cdot K_h(z)$ [kg/m]	W_{max} [mm]	D [mm]	t [mm]	L [mm]	D [mm]
Z	18	354	1.20	5.99	225	388	17	85	354
V	30	354	1.35	6.75	239	392	19	95	354
U	42	283	1.52	7.61	254	335	26	114	283
T	54	283	1.72	8.58	270	341	29	129	283
R	66	283	1.93	9.67	287	348	0	144	284
P	72	255	2.05	10.27	295	329	4	162	263
O	78	255	2.18	10.91	304	333	5	170	265
N	84	226	2.32	11.58	314	317	10	191	246
M	90	226	2.46	12.30	323	322	11	200	248
L	96	212	2.61	13.06	333	317	14	218	240
K	102	212	2.77	13.87	343	322	15	229	243
J	108	198	2.94	14.72	354	319	19	249	236
I	114	198	3.13	15.63	364	325	20	261	239
1H	120	184	3.32	16.60	375	323	24	285	232
1G	126	184	3.53	17.63	387	330	26	298	235
F	132	184	3.74	18.72	399	337	27	312	239
E	138	170	3.97	19.87	411	336	32	339	233
D	144	170	4.22	21.10	423	344	34	354	237
CR	150	141	4.48	22.41	436	339	41	399	224

Tabulka 4.27 Rozměry námrazy pro nárožníky – model F (diagonální směr větru)

NÁZEV ČÁSTI	z [m]	W [mm]	$K_h(z)$	$m \cdot K_h(z)$ [kg/m]	W_{max} [mm]	D [mm]	t [mm]	L [mm]	D [mm]
Z	18	354	1.20	5.99	176.2005	388	-28	0	354
V	30	354	1.35	6.75	187.0961	392	-27	0	354
U	42	283	1.52	7.61	198.6655	335	-14	0	283
T	54	283	1.72	8.58	210.9503	341	-12	0	283
R	66	283	1.93	9.67	223.9947	348	-10	0	283
P	72	255	2.05	10.27	230.8163	329	-4	0	255
O	78	255	2.18	10.91	237.8457	333	-3	0	255
N	84	226	2.32	11.58	245.0892	317	3	141	233
M	90	226	2.46	12.30	252.5533	322	5	152	236
L	96	212	2.61	13.06	260.2447	317	9	179	230
K	102	212	2.77	13.87	268.1703	322	11	191	233

NÁZEV ČÁSTI	z [m]	W [mm]	$K_h(z)$	$m \cdot K_h(z)$ [kg/m]	W_{max} [mm]	D [mm]	t [mm]	L [mm]	D [mm]
J	108	198	2.94	14.72	276.3373	319	15	219	228
I	114	198	3.13	15.63	284.7531	325	17	233	231
1H	120	184	3.32	16.60	293.4251	323	21	263	227
1G	126	184	3.53	17.63	302.3612	330	23	278	230
F	132	184	3.74	18.72	311.5695	337	25	293	234
E	138	170	3.97	19.87	321.0582	336	30	327	230
D	144	170	4.22	21.10	330.8358	344	32	343	234
CR	150	141	4.48	22.41	340.9113	339	41	398	223

Tabulka 4.28 Hmotnost námrazy pro velké prvky ($W > 300\text{mm}$)

W>300mm - větší hmotnost námrazy				
ČÁST	z [m]	W [mm]	L [mm]	m_w [kg/m]
Z	18	354	85	7.35
V	30	354	95	8.28

U kolmého směru větru se stěny věže rovnoběžné se směrem větru (na obr. 4.11, tj. stěny 1,3) nezatažují účinkem větru (obdobně jako v odst. 4.2.1), přisuzuje se jim pouze část hmotnosti námrazy, jak je uvedeno v [5] tj. $m \cdot K_h(z) \cdot \sin 10^\circ$, což odpovídá jakési změně směru větru o úhel 10° . Prvkům, které jsou orientovány kolmo ke směru větru, je přisouzena plná hodnota hmotnosti $m \cdot K_h(z)$. Prvky, které jsou šikmé vůči směru větru (všechny prvky při směru diagonálního větru vyjímaje nárožníky 1,3) je přisouzena hmotnost $m \cdot K_h(z) \cdot \sin 45^\circ$.

Tabulka 4.29 Shrnutí hmotností námrazy (přídavná hmotnost)

NÁZEV ČÁSTI	z [m]	$m \cdot K_h(z)$ [kg/m]	$m \sin 10^\circ$ [kg/m]	$m \sin 45^\circ$ [kg/m]
Z	18	5.99	1.04	4.23
V	30	6.75	1.17	4.77
U	42	7.61	1.32	5.38
T	54	8.58	1.49	6.07
R	66	9.67	1.68	6.84
P	72	10.27	1.78	7.26
O	78	10.91	1.89	7.71
N	84	11.58	2.01	8.19
M	90	12.30	2.14	8.70
L	96	13.06	2.27	9.23
K	102	13.87	2.41	9.80
J	108	14.72	2.56	10.41
I	114	15.63	2.71	11.05
1H	120	16.60	2.88	11.74
1G	126	17.63	3.06	12.46
F	132	18.72	3.25	13.23
E	138	19.87	3.45	14.05
D	144	21.10	3.66	14.92
CR	150	22.41	3.89	15.85

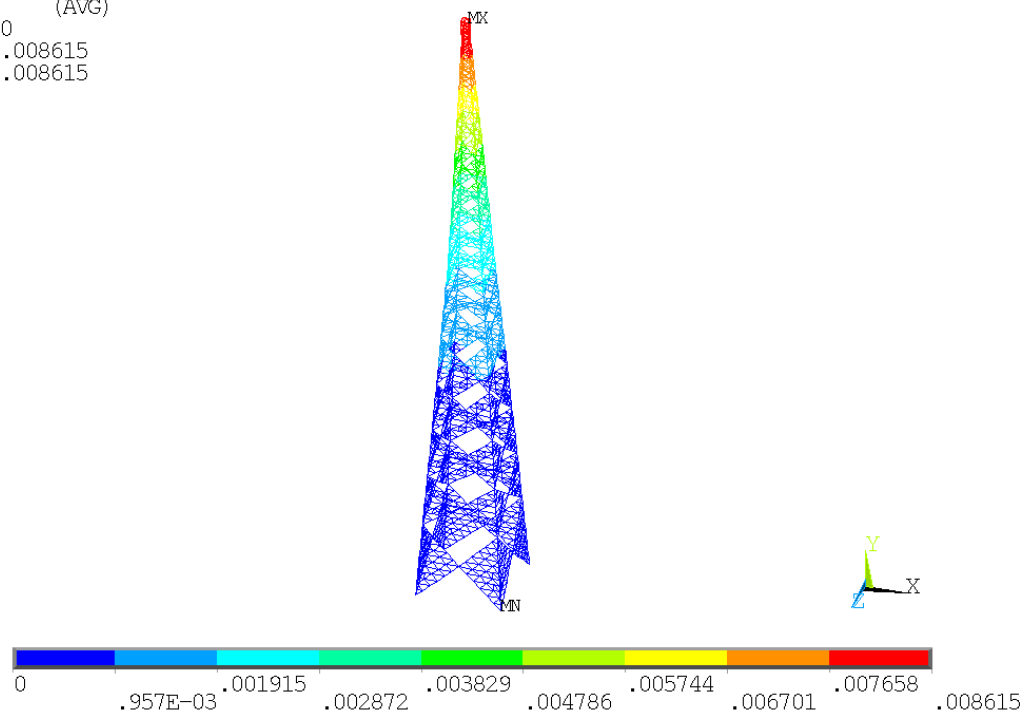
Nyní je třeba stanovit dynamické charakteristiky na základě modální analýzy v programu ANSYS. Bylo postupováno zcela identicky jako v odst. 4.2.1, rozdíl pouze spočíval v tom, že se průřezům přidávala hmotnost námrazy (ADDED MASS) viz tab. 4.3. V obou případech bylo tedy nutné předefinovat průřezy a navíc definovat další průřezy pro prvky s jinou hodnotou námrazy tzn. tam, kde bylo třeba stejnému průřezu definovat různé hmotnosti (kolmý směru větru pro diagonály a výplet, při diagonální směru větru u nárožníků dokonce musely být nadefinovány tři různé průřezy, z důvodu tří různých modelů nárůstání námrazy).

NODAL SOLUTION

STEP=1
SUB =2
FREQ=.6637
USUM (AVG)
RSYS=0
DMX =.008615
SMX =.008615

 **ANSYS**
Noncommercial use only

PLOT NO. 1



Obr. 4.13: Vlastní tvar $\Phi_{1,x}$ při $f_x=0,664$ Hz – prostorový (kolmý směr větru)

NODAL SOLUTION

STEP=1

SUB =2

FREQ=.6637

UX (AVG)

RSYS=0

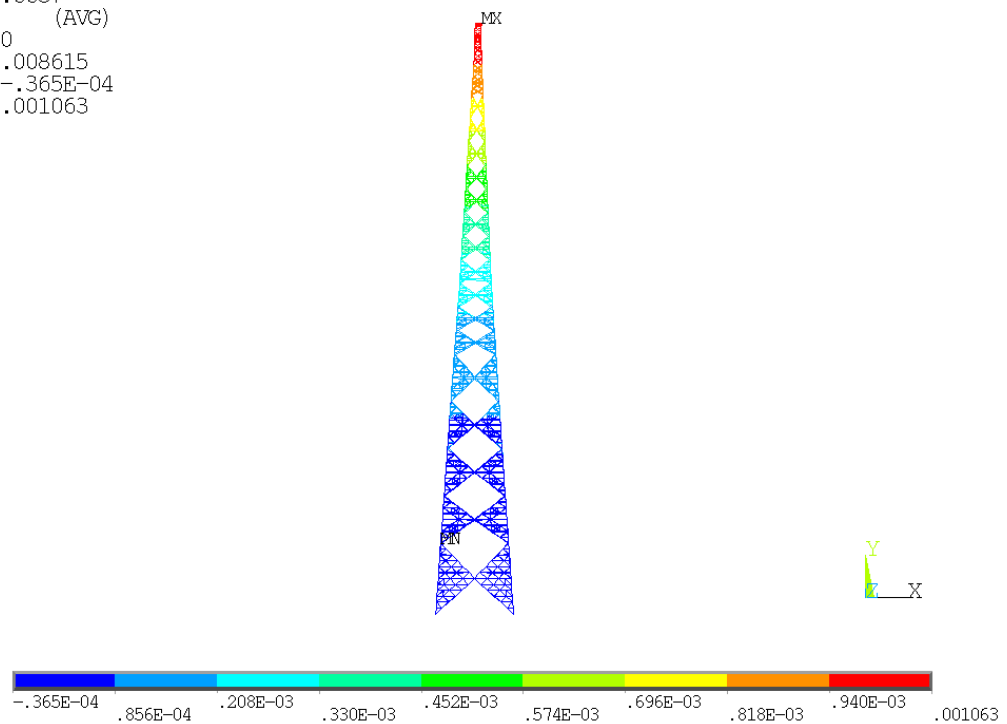
DMX =.008615

SMN =-.365E-04

SMX =.001063



PLOT NO. 1



Obr. 4.14: Vlastní tvar $\Phi_{1,x}$ při $f_x=0,664$ Hz – z posunů UX (kolmý směr větru)

Tabulka 4.30 Výpočet ekvivalentní hmotnosti (vlastní tíha + námraza $\theta=0^\circ$)

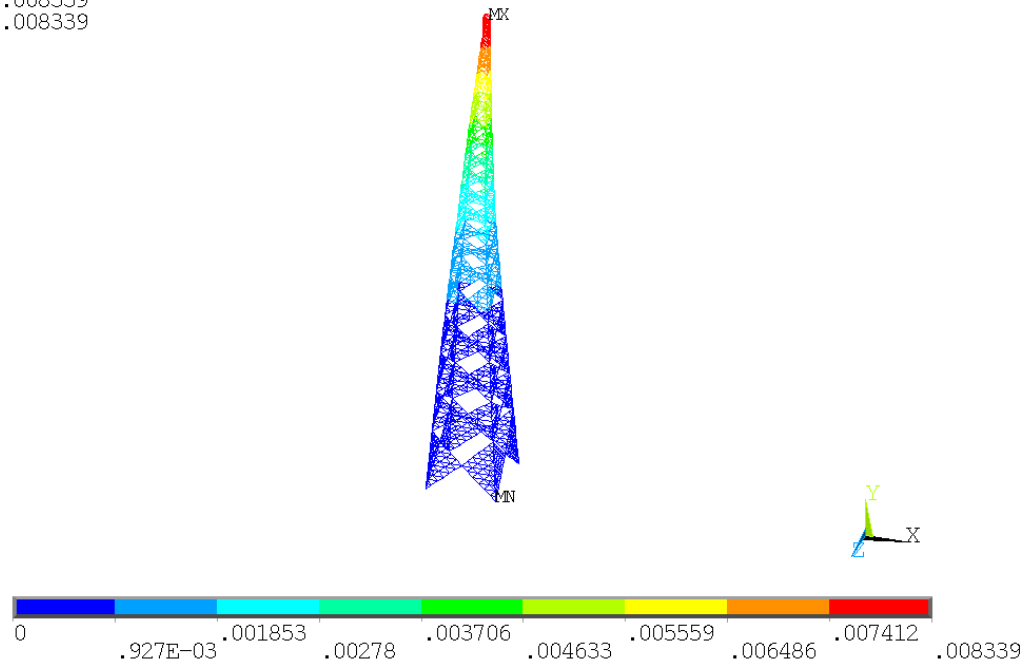
UX	s	z	$\Phi_{1,x}^*$	$(\Phi_{1,x})^2$	m(s) [kg/m]	m(s) $(\Phi_{1,x})^2$	$\int m(s) (\Phi_{1,x})^2 ds$	$\int \Phi_{1,x}^2 ds$
0.00E+00		0	0.000	0.000		0.00	1.20112	0.00115
9.65E-05	18	18	0.011	0.000	1045.12	0.13	6.42326	0.00608
2.54E-04	12	30	0.030	0.001	1058.37	0.94	24.14474	0.02429
4.80E-04	12	42	0.056	0.003	976.11	3.09	70.21680	0.07295
8.10E-04	12	54	0.095	0.009	957.80	8.62	163.38457	0.17992
1.24E-03	12	66	0.145	0.021	886.77	18.61	129.46741	0.15581
1.50E-03	6	72	0.176	0.031	793.04	24.54	176.47349	0.22566
1.80E-03	6	78	0.210	0.044	774.34	34.28	229.70891	0.32235
2.15E-03	6	84	0.251	0.063	669.35	42.29	331.17185	0.45477
2.54E-03	6	90	0.297	0.088	770.28	68.10	436.24230	0.63338
2.99E-03	6	96	0.350	0.123	630.01	77.31	544.10098	0.86953
3.49E-03	6	102	0.409	0.167	622.61	104.06	716.24794	1.17448
4.05E-03	6	108	0.474	0.224	600.33	134.69	921.51346	1.55887
4.64E-03	6	114	0.543	0.295	584.16	172.48	1097.20757	2.03661
5.29E-03	6	120	0.619	0.384	503.78	193.26	1305.62496	2.61993
5.98E-03	6	126	0.700	0.490	494.08	241.95	1615.61096	3.30613
6.68E-03	6	132	0.783	0.612	484.34	296.59	1849.16783	4.07513
7.38E-03	6	138	0.864	0.746	428.67	319.80	2062.89884	4.87661
8.01E-03	6	144	0.938	0.880	418.22	367.83	2477.39333	5.63851
8.54E-03	6	150	1.000	1.000	457.97	457.97		
s - výška samotného panelu								
z - výška panelu nad terénem						Σ	14158.2003	28.2322
* vlastní tvar je normovaný na jednotku v bodě maximální výchylky							m_e [kg/m]	501.492

NODAL SOLUTION

STEP=1
SUB =2
FREQ=.642135
USUM (AVG)
RSYS=0
DMX =.008339
SMX =.008339

 **ANSYS**
Noncommercial use only

PLOT NO. 1



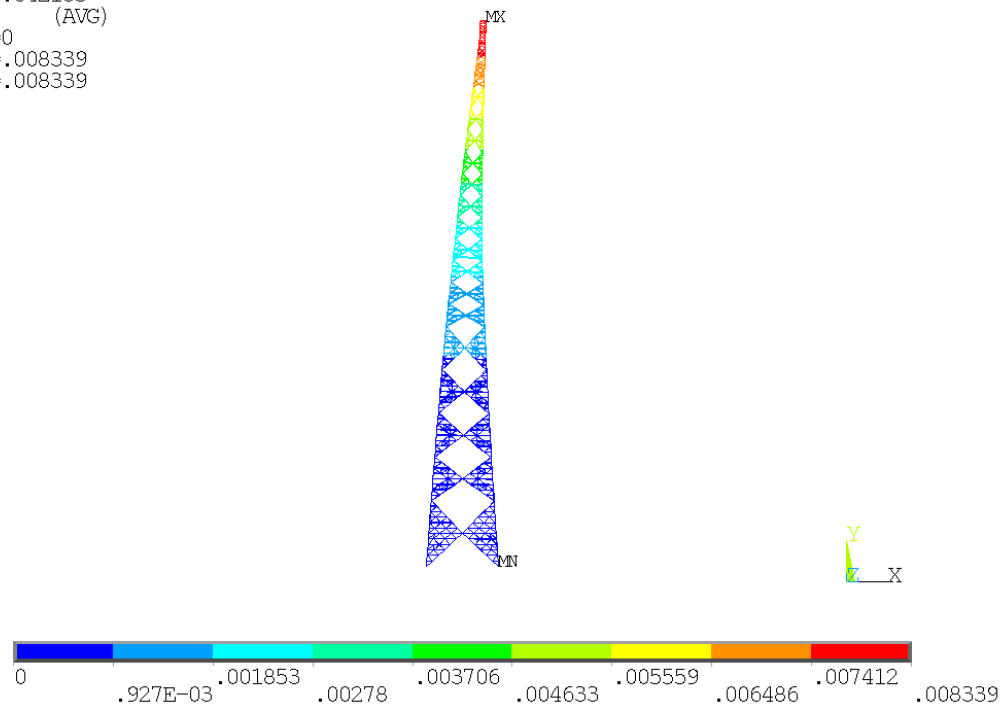
Obr. 4.15: Vlastní tvar $\Phi_{1,x}$ při $f_x=0,642$ Hz – prostorový (diagonální směr větru)

NODAL SOLUTION

STEP=1
SUB =2
FREQ=.642135
USUM (AVG)
RSYS=0
DMX =.008339
SMX =.008339



PLOT NO. 1



Obr. 4.16: Vlastní tvar $\Phi_{1,x}$ při $f_x=0,642$ Hz – z posunů UX (diagonální směr větru)

Tabulka 4.31 Výpočet ekvivalentní hmotnosti (vlastní tíha + námraza $\theta=45^\circ$)

UX	s	z	$\Phi_{1,x}^*$	$(\Phi_{1,x})^2$	m(s) [kg/m]	m(s) $(\Phi_{1,x})^2$	$\int m(s) (\Phi_{1,x})^2 ds$	$\int \Phi_{1,x}^2 ds$
0.00E+0		0	0.000	0.000		0.00	2.75939	0.00253
1.07E-04	18	18	0.017	0.000	1090.81	0.31	7.55498	0.00685
1.88E-04	12	30	0.029	0.001	1106.18	0.95	28.27394	0.02719
3.88E-04	12	42	0.061	0.004	1024.19	3.76	78.82683	0.07788
6.18E-04	12	54	0.096	0.009	1007.49	9.38	178.44453	0.18691
9.47E-04	12	66	0.148	0.022	932.20	20.36	137.84947	0.15713
1.12E-03	6	72	0.175	0.031	837.98	25.59	188.00021	0.22748
1.36E-03	6	78	0.213	0.045	818.70	37.08	245.78656	0.32460
1.61E-03	6	84	0.251	0.063	712.93	44.85	357.32965	0.45759
1.92E-03	6	90	0.299	0.090	828.61	74.26	470.50424	0.63717
2.24E-03	6	96	0.350	0.123	672.59	82.57	583.48640	0.87336
2.63E-03	6	102	0.410	0.168	664.82	111.92	768.02397	1.17832
3.03E-03	6	108	0.474	0.224	642.03	144.09	986.88767	1.56236
3.49E-03	6	114	0.544	0.296	623.82	184.88	1179.01661	2.04158
3.97E-03	6	120	0.620	0.384	541.77	208.13	1403.78943	2.62253
4.48E-03	6	126	0.700	0.490	530.19	259.80	1730.59706	3.30497
5.01E-03	6	132	0.782	0.612	518.38	317.07	1977.48900	4.07147
5.53E-03	6	138	0.863	0.746	458.88	342.10	2202.39943	4.87426
6.01E-03	6	144	0.938	0.879	445.88	392.04	2658.51172	5.63772
6.41E-03	6	150	1.000	1.000	494.13	494.13		
s - výška samotného panelu								
z - výška panelu nad terénem						Σ	15185.53107	28.27191
* vlastní tvar je normovaný na jednotku v bodě maximální výchylky							m_e [kg/m]	537.124

Součinitel $c_s c_d$ počítán dle postupu 1 [1] viz tab. 4.32

 Tabulka 4.32 Výpočet $c_s c_d$, a dynamických charakteristik

i	z_s	$c_o(z_s)$	$I_v(z_s)$	$L(z_s)$ [m]	B^2	$n_{1,x}$ [Hz]	f_L	S_L	δ_s	m_e [kg/m]
2	90	1.050	0.105	196.523	0.561	0.663	2.919	0.066	0.035	501.492
3	90	1.050	0.105	196.523	0.561	0.642	2.826	0.067	0.035	537.124
i	δ_a	δ	η_h	η_b	R_h	R_b	R^2	v [Hz]	k_p	$c_s c_d$
2	1.209	1.244	10.249	0.501	0.093	0.735	0.018	0.116	3.120	0.864
3	1.225	1.260	9.921	0.485	0.096	0.742	0.019	0.115	3.117	0.864

V tab. (4.) položka i udává: 2- vlastní tíha + námraza při kolmém směru větru, 2- vlastní tíha + námraza při diagonálním směru větru.

Posléze se stanoví součinitel c_i podle vztahu (2.49) na základě $c_0(=c_f)$. Následně síly F_w od působení větru na prvky s námrazou podle vztahů v (2.12) a (2.13). Vzhledem k tomu, že hodnoty dynamického tlaku větru, intenzita turbulence a součinitel orografie se nemění, v následujících tabulkách již nebudou vypisovány.

Tabulka 4.33 Ověření použití ekvivalentní statické metody

	d_B [m]	τ_0 [m]	h [m]	ρ_s [kg/m ³]		
	19.8	0.001	150	7580		
	m_T [kg]	$c_{f,TAT}$ [m ²]	h_T [m]	()		
Kolmý směr větru	13065.72	347.93	50	0.061614	<	1
Diagonální směr větru	12923.41	682.07	50	0.031087	<	1

Tabulka 4.34 Síla F_w na nárožník (kolmý směr větru s námrazou)

NÁZEV ČÁSTI	z [m]	l [mm]	A_{ref} [m ²]	ICR	c_i	$l_v(z)$	$q_p(z)$ [N/m ²]	$F_{m,w}(z)$ [kN]	$C_{o(z)}$	$F_{p,w(z)}$ [kN]
Z	18	18089	5.36	6	2.22	0.13	1610.84	10.18	1.06	16.26
V	30	12059	3.64	6	2.21	0.12	1780.06	7.82	1.05	12.15
U	42	12059	3.24	6	2.21	0.11	1894.54	7.55	1.05	11.57
T	54	12059	3.33	6	2.20	0.11	1981.30	8.18	1.05	12.43
R	66	12059	3.43	7	2.00	0.11	2051.15	8.00	1.05	12.09
P	72	6030	1.66	7	1.99	0.11	2081.55	3.94	1.05	5.95
O	78	6030	1.69	7	1.99	0.11	2109.56	4.07	1.05	6.14
N	84	6030	1.65	7	1.99	0.11	2135.52	4.04	1.05	6.08
M	90	6019	1.68	7	1.97	0.10	2159.70	4.12	1.05	6.20
L	96	6017	1.68	7	1.98	0.10	2182.33	4.20	1.05	6.34
K	102	6017	1.72	7	1.97	0.10	2203.58	4.33	1.05	6.54
J	108	6017	1.72	7	1.97	0.10	2223.60	4.40	1.05	6.65
I	114	6017	1.76	7	1.96	0.10	2242.53	4.53	1.05	6.85
1H	120	6017	1.78	8	1.78	0.10	2260.48	4.19	1.05	6.35
1G	126	6017	1.82	8	1.77	0.10	2277.53	4.31	1.05	6.55
F	132	6017	1.87	8	1.76	0.10	2293.77	4.43	1.05	6.74
E	138	6017	1.89	8	1.76	0.10	2309.27	4.51	1.05	6.88
D	144	6017	1.94	8	1.73	0.10	2324.09	4.60	1.05	7.04
CR	150	6000	1.95	8	1.72	0.10	2338.28	4.60	1.05	7.07

Vzhledem k tomu, že se hodnoty F_w liší nepatrně (pouze z důvodu různých délek), jsou dále uvedeny hodnoty F_w např. pro horní diagonálu (tab. 4.35), u výpletu pak pouze pro jeden horizontální prut (tab. 4.36).

Tabulka 4.35 Síla F_w na horní diagonálu (kolmý směr větru s námrazou)

NÁZEV ČÁSTI	z [m]	l [mm]	A_{ref} [m ²]	ICR	c_i	$l_v(z)$	$q_p(z)$ [N/m ²]	$F_{m,w}(z)$ [kN]	$C_{o(z)}$	$F_{p,w(z)}$ [kN]
Z	18	12489	1.76	6	2.22	0.13	1610.84	3.35	1.06	5.35
V	30	9844	1.43	6	2.21	0.12	1780.06	3.08	1.05	4.78
U	42	9191	1.38	6	2.21	0.11	1894.54	3.21	1.05	4.92
T	54	8572	1.33	6	2.20	0.11	1981.30	3.26	1.05	4.95
R	66	7993	1.28	7	2.00	0.11	2051.15	2.98	1.05	4.51
P	72	5701	0.89	7	1.99	0.11	2081.55	2.12	1.05	3.20
O	78	5347	0.85	7	1.99	0.11	2109.56	2.06	1.05	3.10
N	84	5005	0.79	7	1.99	0.11	2135.52	1.92	1.05	2.90
M	90	4739	0.76	7	1.97	0.10	2159.70	1.86	1.05	2.81
L	96	4497	0.74	7	1.98	0.10	2182.33	1.84	1.05	2.78
K	102	4266	0.71	7	1.97	0.10	2203.58	1.80	1.05	2.71
J	108	4046	0.67	7	1.97	0.10	2223.60	1.70	1.05	2.57
I	114	3840	0.65	7	1.96	0.10	2242.53	1.66	1.05	2.51
1H	120	3650	0.61	8	1.78	0.10	2260.48	1.43	1.05	2.17
1G	126	3479	0.59	8	1.77	0.10	2277.53	1.41	1.05	2.13
F	132	3330	0.58	8	1.76	0.10	2293.77	1.38	1.05	2.10

Tabulka 4.36 Síla F_w na horizontální prut výpletu (kolmý směr větru s námrazou)

NÁZEV ČÁSTI	z [m]	l [mm]	A_{ref} [m ²]	ICR	c_i	$l_v(z)$	$q_p(z)$ [N/m ²]	$F_{m,w}(z)$ [kN]	$C_{o(z)}$	$F_{p,w(z)}$ [kN]
Z	18	1545	0.1702	6	2.22	0.1264	1610.843	0.32	1.0558	0.52
V	30	2054	0.2359	6	2.21	0.1184	1780.056	0.51	1.05473	0.79
U	42	1843	0.2209	6	2.21	0.1138	1894.544	0.51	1.05368	0.79
T	54	1632	0.2043	6	2.2	0.1105	1981.303	0.50	1.05265	0.76
R	66	1422	0.1862	7	2	0.1081	2051.151	0.43	1.05163	0.66
P	72	2527	0.3248	7	1.99	0.1071	2081.553	0.77	1.05113	1.16
O	78	2316	0.3049	7	1.99	0.1062	2109.562	0.73	1.05064	1.11
N	84	2105	0.2839	7	1.99	0.1054	2135.521	0.69	1.05015	1.05
M	90	1504	0.2078	7	1.97	0.1046	2159.702	0.51	1.04966	0.77
L	96	1753	0.2482	7	1.98	0.1039	2182.326	0.62	1.04918	0.94

Pokračování tab. 4.36 Síla F_w na horizontální prut výpletu (kolmý směr větru s námrazou)

NÁZEV ČÁSTI	z [m]	l [mm]	A_{ref} [m ²]	ICR	c_i	$l_v(z)$	$q_p(z)$ [N/m ²]	$F_{m,w}(z)$ [kN]	$C_{o(z)}$	$F_{p,w(z)}$ [kN]
K	102	1594	0.2313	7	1.97	0.1033	2203.575	0.58	1.0487	0.88
J	108	1434	0.2133	7	1.97	0.1027	2223.602	0.54	1.04823	0.82
I	114	1275	0.1945	7	1.96	0.1022	2242.533	0.50	1.04776	0.76
1H	120	1116	0.1717	8	1.78	0.1017	2260.477	0.40	1.04729	0.61
1G	126	957	0.1511	8	1.77	0.1012	2277.529	0.36	1.04683	0.54
F	132	798	0.1293	8	1.76	0.1007	2293.769	0.31	1.04638	0.47
D	144	2237	0.3872	8	1.73	0.0999	2324.085	0.92	1.04548	1.41
CR	150	1600	0.2842	8	1.72	0.0995	2338.278	0.67	1.04504	1.03

Tabulka 4.37 Síla F_w na nárožník typu B (diagonální vítr s námrazou)

NÁZEV ČÁSTI	z [m]	l [mm]	A_{ref} [m ²]	ICR	c_i	$l_v(z)$	$q_p(z)$ [N/m ²]	$F_{m,w}(z)$ [kN]	$C_{o(z)}$	$F_{p,w(z)}$ [kN]	$F_{p,w(z),1}$ [kN]
Z	18	18089	6.40	6	2.18	0.13	1610.8	18.07	1.06	28.86	20.41
V	30	12059	4.26	6	2.17	0.12	1780.1	13.48	1.05	20.95	14.82
U	42	12059	3.41	6	2.15	0.11	1894.5	7.74	1.05	11.85	8.38
T	54	12059	3.41	6	2.14	0.11	1981.3	8.14	1.05	12.37	8.74
R	66	12059	3.42	7	1.95	0.11	2051.2	7.81	1.05	11.80	8.34
P	72	6030	1.59	7	1.95	0.11	2081.6	3.69	1.05	5.57	3.94
O	78	6030	1.60	7	1.95	0.11	2109.6	3.77	1.05	5.68	4.02
N	84	6030	1.48	7	1.95	0.11	2135.5	3.55	1.05	5.36	3.79
M	90	6019	1.49	7	1.92	0.10	2159.7	3.57	1.05	5.39	3.81
L	96	6017	1.45	7	1.94	0.10	2182.3	3.54	1.05	5.34	3.77
K	102	6017	1.46	7	1.93	0.10	2203.6	3.60	1.05	5.44	3.85
J	108	6017	1.42	7	1.93	0.10	2223.6	3.54	1.05	5.34	3.78
I	114	6017	1.44	7	1.92	0.10	2242.5	3.60	1.05	5.45	3.85
1H	120	6017	1.40	8	1.76	0.10	2260.5	3.24	1.05	4.92	3.48
1G	126	6017	1.42	8	1.75	0.10	2277.5	3.30	1.05	5.02	3.55
F	132	6017	1.44	8	1.74	0.10	2293.8	3.36	1.05	5.11	3.61
E	138	6017	1.40	8	1.73	0.10	2309.3	3.30	1.05	5.03	3.56
D	144	6017	1.43	8	1.71	0.10	2324.1	3.33	1.05	5.09	3.60
CR	150	6000	1.34	8	1.68	0.10	2338.3	3.11	1.05	4.78	3.38

Tabulka 4.38 Síla F_w na nárožník typu F (diagonální vítr s námrazou)

NÁZEV ČÁSTI	z [m]	l [mm]	A_{ref} [m ²]	ICR	c_i	$l_v(z)$	$q_p(z)$ [N/m ²]	$F_{m,w}(z)$ [kN]	$c_{o(z)}$	$F_{p,w(z)}$ [kN]
Z	18	18089	6.40	6	2.18	0.13	1610.84	11.94	1.06	19.08
V	30	12059	4.26	6	2.17	0.12	1780.06	8.99	1.05	13.97
U	42	12059	3.41	6	2.15	0.11	1894.54	7.74	1.05	11.85
T	54	12059	3.41	6	2.14	0.11	1981.30	8.14	1.05	12.37
R	66	12059	3.41	7	1.95	0.11	2051.15	7.79	1.05	11.77
P	72	6030	1.53	7	1.95	0.11	2081.55	3.57	1.05	5.39
O	78	6030	1.53	7	1.95	0.11	2109.56	3.62	1.05	5.46
N	84	6030	1.41	7	1.95	0.11	2135.52	3.37	1.05	5.08
M	90	6019	1.42	7	1.92	0.10	2159.70	3.40	1.05	5.12
L	96	6017	1.39	7	1.94	0.10	2182.33	3.39	1.05	5.12
K	102	6017	1.40	7	1.93	0.10	2203.58	3.46	1.05	5.23
J	108	6017	1.37	7	1.93	0.10	2223.60	3.42	1.05	5.17
I	114	6017	1.39	7	1.92	0.10	2242.53	3.49	1.05	5.28
1H	120	6017	1.36	8	1.76	0.10	2260.48	3.17	1.05	4.81
1G	126	6017	1.39	8	1.75	0.10	2277.53	3.23	1.05	4.91
F	132	6017	1.41	8	1.74	0.10	2293.77	3.29	1.05	5.01
E	138	6017	1.38	8	1.73	0.10	2309.27	3.25	1.05	4.97
D	144	6017	1.41	8	1.71	0.10	2324.09	3.29	1.05	5.03
CR	150	6000	1.34	8	1.68	0.10	2338.28	3.11	1.05	4.77

Tabulka 4.39 Síla F_w na nárožník typu C (diagonální vítr s námrazou)

NÁZEV ČÁSTI	z [m]	l [mm]	A_{ref} [m ²]	ICR	c_i	$l_v(z)$	$q_p(z)$ [N/m ²]	$F_{m,w}(z)$ [kN]	$c_{o(z)}$	$F_{p,w(z)}$ [kN]	$F_{p,w(z),1}$ [kN]
Z	18	18089	4.52	6	2.29	0.13	1610.84	8.85	1.06	14.13	9.99
V	30	12059	3.01	6	2.27	0.12	1780.06	6.66	1.05	10.34	7.31
U	42	12059	2.57	6	2.27	0.11	1894.54	6.15	1.05	9.41	6.66
T	54	12059	2.62	6	2.25	0.11	1981.30	6.59	1.05	10.00	7.07
R	66	12059	2.67	7	2.03	0.11	2051.15	6.34	1.05	9.57	6.77
P	72	6030	1.26	7	2.03	0.11	2081.55	3.05	1.05	4.61	3.26
O	78	6030	1.28	7	2.02	0.11	2109.56	3.13	1.05	4.72	3.34
N	84	6030	1.21	7	2.03	0.11	2135.52	3.02	1.05	4.56	3.22
M	90	6019	1.23	7	1.99	0.10	2159.70	3.05	1.05	4.60	3.25
L	96	6017	1.21	7	2.01	0.10	2182.33	3.07	1.05	4.63	3.27
K	102	6017	1.22	7	2.00	0.10	2203.58	3.14	1.05	4.74	3.35
J	108	6017	1.21	7	2.00	0.10	2223.60	3.13	1.05	4.72	3.34
I	114	6017	1.23	7	1.99	0.10	2242.53	3.19	1.05	4.83	3.42
1H	120	6017	1.21	8	1.80	0.10	2260.48	2.87	1.05	4.35	3.08
1G	126	6017	1.23	8	1.79	0.10	2277.53	2.94	1.05	4.46	3.15
F	132	6017	1.26	8	1.78	0.10	2293.77	3.00	1.05	4.57	3.23
E	138	6017	1.25	8	1.77	0.10	2309.27	2.99	1.05	4.56	3.23
D	144	6017	1.27	8	1.75	0.10	2324.09	3.04	1.05	4.65	3.29
CR	150	6000	1.22	8	1.73	0.10	2338.28	2.93	1.05	4.49	3.18

Tabulka 4.40 Síla F_w na horní diagonálu (diagonální vítr s námrazou)

NÁZEV ČÁSTI	z [m]	l [mm]	A_{ref} [m ²]	ICR	c_i	$l_v(z)$	$q_p(z)$ [N/m ²]	$F_{m,w}(z)$ [kN]	$c_{o(z)}$	$F_{p,w(z)}$ [kN]	$F_{p,w(z),1}$ [kN]
Z	18	12489	1.76	6	2.29	0.13	1610.84	3.45	1.06	5.51	3.90
V	30	9844	1.43	6	2.27	0.12	1780.06	3.16	1.05	4.91	3.47
U	42	9191	1.38	6	2.27	0.11	1894.54	3.30	1.05	5.06	3.58
T	54	8572	1.33	6	2.25	0.11	1981.30	3.35	1.05	5.08	3.59
R	66	7993	1.28	7	2.03	0.11	2051.15	3.04	1.05	4.60	3.25
P	72	5701	0.89	7	2.03	0.11	2081.55	2.16	1.05	3.26	2.31
O	78	5347	0.85	7	2.02	0.11	2109.56	2.09	1.05	3.16	2.23
N	84	5005	0.79	7	2.03	0.11	2135.52	1.96	1.05	2.95	2.09
M	90	4739	0.76	7	1.99	0.10	2159.70	1.89	1.05	2.84	2.01

Pokračování tab. 4.40 Síla F_w na horní diagonálu (diagonální vítr s námrazou)

NÁZEV ČÁSTI	z [m]	l [mm]	A_{ref} [m ²]	ICR	c_i	$l_v(z)$	$q_p(z)$ [N/m ²]	$F_{m,w}(z)$ [kN]	$c_{o(z)}$	$F_{p,w(z)}$ [kN]	$F_{p,w(z),1}$ [kN]
L	96	4497	0.74	7	2.01	0.10	2182.33	1.87	1.05	2.82	1.99
K	102	4266	0.71	7	2.00	0.10	2203.58	1.82	1.05	2.75	1.95
J	108	4046	0.67	7	2.00	0.10	2223.60	1.73	1.05	2.61	1.85
I	114	3840	0.65	7	1.99	0.10	2242.53	1.68	1.05	2.55	1.80
1H	120	3650	0.61	8	1.80	0.10	2260.48	1.45	1.05	2.19	1.55
1G	126	3479	0.59	8	1.79	0.10	2277.53	1.41	1.05	2.15	1.52
F	132	3330	0.58	8	1.78	0.10	2293.77	1.39	1.05	2.12	1.50

Tabulka 4.41 Síla F_w na horizontální prut výpletu (diagonální vítr s námrazou)

z [m]	l [mm]	A_{ref} [m ²]	ICR	c_i	$l_v(z)$	$q_p(z)$ [N/m ²]	$F_{m,w}(z)$ [kN]	$c_{o(z)}$	$F_{p,w(z)}$ [kN]	$F_{p,w(z),1}$ [kN]
18	1545	0.1702	6	2.29	0.13	1611	0.33	1.06	0.53	0.38
30	2054	0.2359	6	2.27	0.12	1780	0.52	1.05	0.81	0.57
42	1843	0.2209	6	2.27	0.11	1895	0.53	1.05	0.81	0.57
54	1632	0.2043	6	2.25	0.11	1981	0.51	1.05	0.78	0.55
66	1422	0.1862	7	2.03	0.11	2051	0.44	1.05	0.67	0.47
72	2527	0.3248	7	2.03	0.11	2082	0.79	1.05	1.18	0.84
78	2316	0.3049	7	2.02	0.11	2110	0.75	1.05	1.13	0.80
84	2105	0.2839	7	2.03	0.11	2136	0.71	1.05	1.07	0.75
90	2494	0.3446	7	1.99	0.10	2160	0.86	1.05	1.29	0.91
96	1504	0.2130	7	2.01	0.10	2182	0.54	1.05	0.82	0.58
102	1504	0.2183	7	2.00	0.10	2204	0.56	1.05	0.84	0.60
108	1504	0.2237	7	2.00	0.10	2224	0.58	1.05	0.88	0.62
114	2550	0.3889	7	1.99	0.10	2243	1.01	1.05	1.53	1.08
120	2232	0.3434	8	1.80	0.10	2260	0.82	1.05	1.23	0.87
126	1914	0.3021	8	1.79	0.10	2278	0.72	1.05	1.09	0.77
132	1596	0.2585	8	1.78	0.10	2294	0.62	1.05	0.94	0.66
144	1918	0.3320	8	1.75	0.10	2324	0.80	1.05	1.22	0.86
150	943	0.1675	8	1.73	0.10	2338	0.40	1.05	0.61	0.43

4.2.3 Zatížení ledovkou

Stejně jako v předešlých dvou případech je třeba přiřadit dané lokalitě třídu ledovky ICG. Tento údaj poskytuje ČHMÚ. Okolí Košetice spadá do třídy ICG3. Z tab. 2.3 lze vyčíst tloušťku ledovky pro tuto třídu: $t=1,6\text{mm}$. Tloušťka t je přepočítána na hodnoty v tab. 4.42 tj. s uvažováním vlivu výšky (2.31) a použití vztahu (2.51).

Je předpokládáno, že ledovka obalí profily rovnoměrně (obr. 2.12) a není závislá na směru větru, tak jako námraza (měnící se modely nárůstu námrazy obr. 2.10). Použitím vztahů (2.52-2.54) byly vypočítány rozměry a hmotnost ledovky.

Tabulka 4.42 Rozměry a hmotnost ledovky na nárožníku

NÁZEV ČÁSTI	z [m]	L [mm]	d [mm]	Kh (z)	t [mm]	m [kg/m]	D [mm]
Z	18	250	20	1.20	0.62	0.56	251
V	30	250	20	1.35	0.69	0.63	251
U	42	200	20	1.52	0.78	0.56	202
T	54	200	20	1.72	0.88	0.63	202
R	66	200	20	1.93	0.99	0.71	202
P	72	180	16	2.05	1.05	0.68	182
O	78	180	16	2.18	1.11	0.72	182
N	84	160	15	2.32	1.17	0.68	162
M	90	160	15	2.46	1.24	0.72	162
L	96	150	14	2.61	1.32	0.72	153
K	102	150	14	2.77	1.40	0.76	153
J	108	140	15	2.94	1.48	0.75	143
I	114	140	15	3.13	1.57	0.80	143
1H	120	130	12	3.32	1.66	0.79	133
1G	126	130	12	3.53	1.75	0.83	134
F	132	130	12	3.74	1.86	0.88	134
E	138	120	11	3.97	1.96	0.86	124
D	144	120	11	4.22	2.08	0.91	124
CR	150	100	10	4.48	2.20	0.81	104

Tabulka 4.43 Rozměry a hmotnost ledovky na horní diagonále

NÁZEV ČÁSTI	z [m]	L [mm]	d [mm]	Kh (z)	t [mm]	m [kg/m]	D [mm]
Z	18	110	10	1.20	0.60	0.24	111
V	30	110	10	1.35	0.67	0.27	111
U	42	110	10	1.52	0.75	0.30	112
T	54	110	10	1.72	0.85	0.34	112
R	66	110	10	1.93	0.95	0.38	112
P	72	100	10	2.05	1.01	0.37	102
O	78	100	10	2.18	1.07	0.39	102
N	84	90	8	2.32	1.13	0.37	92
M	90	90	8	2.46	1.20	0.39	92
L	96	90	8	2.61	1.27	0.42	93
K	102	90	8	2.77	1.35	0.44	93
J	108	80	8	2.94	1.43	0.42	83
I	114	80	8	3.13	1.51	0.44	83
1H	120	70	7	3.32	1.60	0.41	73
1G	126	70	7	3.53	1.70	0.44	73
F	132	70	7	3.74	1.80	0.46	74

Tabulka 4.44 Rozměry a hmotnost ledovky na horizontálním prutu výpletu

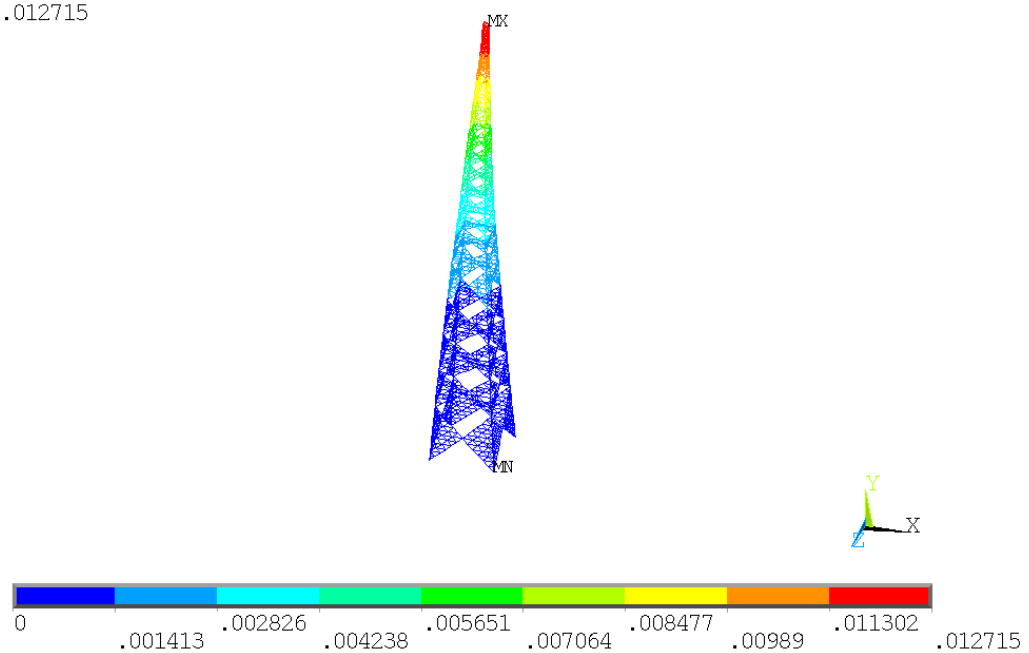
NÁZEV ČÁSTI	z _m [m]	L [mm]	d [mm]	Kh (z)	t [mm]	m [kg/m]	D [mm]
Z	18	60	6.00	1.20	0.60	0.13	61
V	30	60	6.00	1.35	0.67	0.15	61
U	42	60	6.00	1.52	0.75	0.17	62
T	54	60	6.00	1.72	0.85	0.19	62
R	66	60	6.00	1.93	0.95	0.21	62
P	72	50	5.00	2.05	1.01	0.19	52
O	78	50	5.00	2.18	1.07	0.20	52
N	84	50	5.00	2.32	1.13	0.21	52
M	90	50	5.00	2.46	1.20	0.22	52
L	96	50	5.00	2.61	1.27	0.24	53
K	102	50	5.00	2.77	1.35	0.25	53
J	108	50	5.00	2.94	1.43	0.26	53
I	114	50	5.00	3.13	1.51	0.28	53
1H	120	45	4.00	3.32	1.60	0.27	48
1G	126	45	4.00	3.53	1.70	0.29	48
F	132	45	4.00	3.74	1.80	0.30	49

Pokračování tab. 4.44 Rozměry a hmotnost ledovky na horizontálním prutu výpletu							
NÁZEV ČÁSTI	z_m [m]	L [mm]	d [mm]	Kh (z)	t [mm]	m [kg/m]	D [mm]
D	144	50	5.00	4.22	2.01	0.38	54
CR	150	50	5.00	4.48	2.13	0.40	54

Následujícím krokem je zjištění dynamických charakteristik na základě modální analýzy v programu ANSYS. Opět bylo nutné nadefinovat průřezy s přídatnou hmotností od ledovky.

NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =2
 FREQ=1.02119
 USUM (AVG)
 RSYS=0
 DMX =.012715
 SMX =.012715


 Noncommercial use only
 PLOT NO. 1



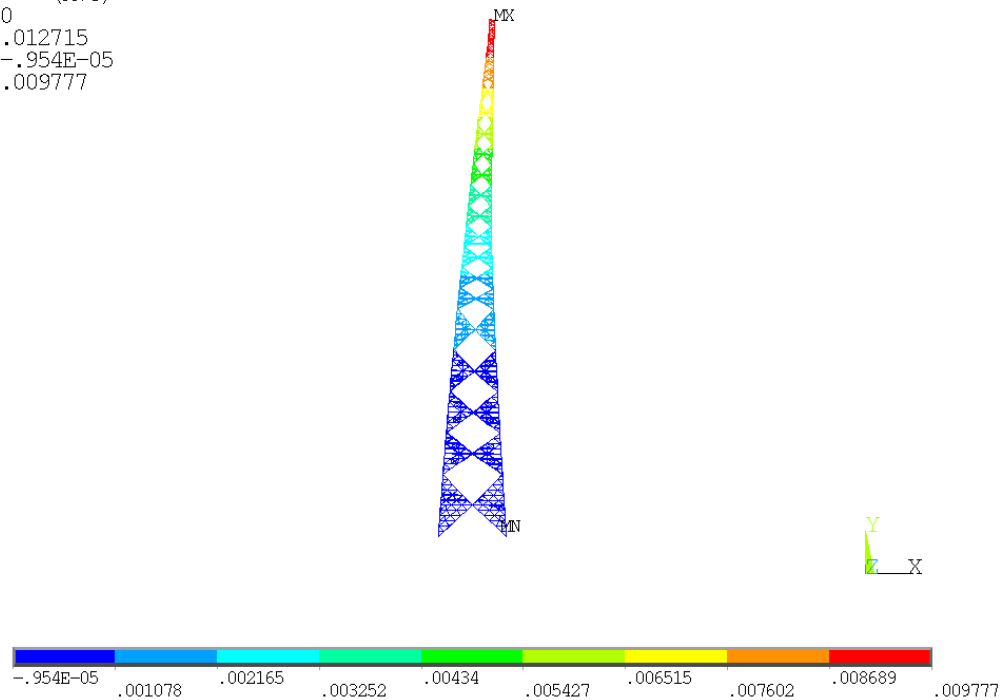
Obr. 4.17: Vlastní tvar $\Phi_{1,x}$ při $f_x=1,021$ Hz – prostorový

NODAL SOLUTION

STEP=1
SUB =2
FREQ=1.02119
UX (AVG)
RSYS=0
DMX =.012715
SMN =-.954E-05
SMX =.009777

 **ANSYS**
Noncommercial use only

PLOT NO. 1



Obr. 4.18: Vlastní tvar $\Phi_{1,x}$ při $f_x=1,021$ Hz – z posunů UX

Tabulka 4.45 Výpočet ekvivalentní hmotnosti (vlastní tíha + ledovka)

UX	s	z	$\Phi_{1,x}^*$	$(\Phi_{1,x})^2$	m(s) [kg/m]	m(s) $(\Phi_{1,x})^2$	$\int m(s) (\Phi_{1,x})^2 ds$	$\int \Phi_{1,x}^2 ds$
0.00E+00		0	0.000	0.000		0.000	2.9538	0.0037
1.98E-04	18	18	0.020	0.000	799.743	0.328	7.8787	0.0099
3.43E-04	12	30	0.035	0.001	799.370	0.985	27.0945	0.0375
6.93E-04	12	42	0.071	0.005	702.612	3.531	70.8054	0.1042
1.09E-03	12	54	0.111	0.012	670.465	8.270	152.9456	0.2427
1.64E-03	12	66	0.168	0.028	612.423	17.221	111.8023	0.2008
1.93E-03	6	72	0.197	0.039	516.261	20.047	144.2465	0.2860
2.32E-03	6	78	0.238	0.057	496.140	28.036	174.4299	0.4014
2.72E-03	6	84	0.278	0.077	389.448	30.108	225.1118	0.5559
3.21E-03	6	90	0.329	0.108	416.088	44.930	285.1881	0.7597
3.73E-03	6	96	0.381	0.145	345.130	50.133	346.0807	1.0214
4.32E-03	6	102	0.442	0.195	334.155	65.227	431.4863	1.3515
4.94E-03	6	108	0.505	0.255	307.891	78.602	528.5359	1.7569
5.62E-03	6	114	0.575	0.330	295.380	97.577	563.8470	2.2502
6.33E-03	6	120	0.648	0.420	215.307	90.372	597.8938	2.8323
7.08E-03	6	126	0.724	0.524	207.727	108.926	713.2063	3.4994
7.83E-03	6	132	0.801	0.642	200.613	128.810	740.5792	4.2301
8.57E-03	6	138	0.876	0.768	153.722	118.050	749.0530	4.9764
9.23E-03	6	144	0.944	0.891	147.763	131.634	810.0682	5.6725
9.78E-03	6	150	1.000	1.000	138.389	138.389		
s - výška samotného panelu								
z - výška panelu nad terénem						Σ	6683.207	30.193
* vlastní tvar je normovaný na jednotku v bodě maximální výchylky							m_e [kg/m]	221.353

Tabulka 4.46 Ověření použití ekvivalentní statické metody

	d_B [m]	τ_0 [m]	h [m]	ρ_s [kg/m ³]		
	19.8	0.001	150	7580		
	m_T [kg]	$c_{f,T AT}$ [m ²]	h_T [m]	()		
Kolmý směr větru	12923.41	244.85	50	0.086601	<	1
Diagonální směr větru	18087.57	416.27	50	0.071292	<	1

Následujícím krokem je výpočet $c_s c_d$ (2.14) podle postupu 1 v [1].

Tabulka 4.47 Výpočet $c_s c_d$, a dynamických charakteristik

i	z_s	$c_o(z_s)$	$I_v(z_s)$	$L(z_s)$ [m]	B^2	$n_{1,x}$ [Hz]	f_L	S_L	δ_s	m_e [kg/m]
4	90	1.05	0.104634	196.523	0.561	1.021	4.494	0.05	0.035	221.353
i	δ_a	δ	η_h	η_b	R_h	R_b	R^2	v [Hz]	k_p	$c_s c_d$
4	2.941	2.976	15.77727	0.77088	0.061	0.6359	0.003	0.080	2.99	0.8500

V tab. (4.) položka i udává: 4 - vlastní tíha + ledovka.

Výpočet součinitele c_i a síly F_w proveden podle vztahů (2.55) a (2.12) a (2.13).

Tabulka 4.48 Síla F_w na nárožník (kolmý směr větru s ledovkou)

NÁZEV ČÁSTI	z [m]	l [mm]	A_{ref} [m ²]	ICG	c_i	$l_v(z)$	$q_p(z)$ [N/m ²]	$F_{m,w}(z)$ [kN]	$c_{o(z)}$	$F_{p,w(z)}$ [kN]
Z	18	18089	4.54	2	2.64	0.13	1610.84	10.25	1.06	16.11
V	30	12059	3.03	2	3.42	0.12	1780.06	10.09	1.05	15.43
U	42	12059	2.43	2	3.42	0.11	1894.54	8.78	1.05	13.24
T	54	12059	2.43	2	3.39	0.11	1981.30	9.21	1.05	13.77
R	66	12059	2.44	3	3.38	0.11	2051.15	9.60	1.05	14.29
P	72	6030	1.10	3	3.37	0.11	2081.55	4.41	1.05	6.54
O	78	6030	1.10	3	3.35	0.11	2109.56	4.45	1.05	6.60
N	84	6030	0.98	3	3.36	0.11	2135.52	4.05	1.05	6.00
M	90	6019	0.98	3	3.25	0.10	2159.70	3.96	1.05	5.87
L	96	6017	0.92	3	3.32	0.10	2182.33	3.85	1.05	5.71
K	102	6017	0.92	3	3.28	0.10	2203.58	3.86	1.05	5.72
J	108	6017	0.86	3	3.28	0.10	2223.60	3.65	1.05	5.42
I	114	6017	0.86	3	3.23	0.10	2242.53	3.64	1.05	5.42
1H	120	6017	0.80	3	3.24	0.10	2260.48	3.43	1.05	5.12
1G	126	6017	0.80	3	3.17	0.10	2277.53	3.39	1.05	5.06
F	132	6017	0.80	3	3.06	0.10	2293.77	3.32	1.05	4.96
E	138	6017	0.75	3	3.02	0.10	2309.27	3.05	1.05	4.58
D	144	6017	0.75	3	2.81	0.10	2324.09	2.87	1.05	4.32
CR	150	6000	0.63	3	2.65	0.10	2338.28	2.29	1.05	3.45

Tabulka 4.49 Síla F_w na horní diagonále (kolmý směr větru s ledovkou)

NÁZEV ČÁSTI	z [m]	l [mm]	A_{ref} [m ²]	ICG	c_i	$l_v(z)$	$q_p(z)$ [N/m ²]	$F_{m,w}$ (z) [kN]	$c_{o(z)}$	$F_{p,w(z)}$ [kN]
Z	18	12489	1.39	2	2.64	0.13	1610.84	3.13	1.06	4.92
V	30	9844	1.10	2	2.61	0.12	1780.06	2.79	1.05	4.26
U	42	9191	1.02	2	2.61	0.11	1894.54	2.83	1.05	4.26
T	54	8572	0.96	2	2.59	0.11	1981.30	2.77	1.05	4.15
R	66	7993	0.89	3	2.59	0.11	2051.15	2.70	1.05	4.02
P	72	5701	0.58	3	2.58	0.11	2081.55	1.79	1.05	2.66
O	78	5347	0.55	3	2.57	0.11	2109.56	1.70	1.05	2.52
N	84	5005	0.46	3	2.58	0.11	2135.52	1.46	1.05	2.17
M	90	4739	0.44	3	2.51	0.10	2159.70	1.37	1.05	2.03
L	96	4497	0.42	3	2.55	0.10	2182.33	1.34	1.05	1.99
K	102	4266	0.40	3	2.53	0.10	2203.58	1.28	1.05	1.90
J	108	4046	0.34	3	2.53	0.10	2223.60	1.10	1.05	1.63
I	114	3840	0.32	3	2.50	0.10	2242.53	1.04	1.05	1.55
1H	120	3650	0.27	3	2.51	0.10	2260.48	0.88	1.05	1.32
1G	126	3479	0.26	3	2.46	0.10	2277.53	0.84	1.05	1.25
F	132	3330	0.25	3	2.40	0.10	2293.77	0.79	1.05	1.18

Tabulka 4.50 Síla F_w na horizontálním prutu výpletu (kolmý směr větru s ledovkou)

NÁZEV ČÁSTI	z [m]	l [mm]	A_{ref} [m ²]	ICG	c_i	$l_v(z)$	$q_p(z)$ [N/m ²]	$F_{m,w}(z)$ [kN]	$c_{o(z)}$	$F_{p,w(z)}$ [kN]
Z	18	1545	0.0945	2	2.64	0.126	1610.84	0.21	1.056	0.34
V	30	2054	0.1260	2	2.61	0.118	1780.06	0.32	1.055	0.49
U	42	1843	0.1134	2	2.61	0.114	1894.54	0.313	1.054	0.47
T	54	1632	0.1007	2	2.59	0.111	1981.3	0.292	1.053	0.44
R	66	1422	0.0880	3	2.59	0.108	2051.15	0.266	1.052	0.40
P	72	2527	0.1315	3	2.58	0.107	2081.55	0.404	1.051	0.60
O	78	2316	0.1208	3	2.57	0.106	2109.56	0.375	1.051	0.56
N	84	2105	0.1100	3	2.58	0.105	2135.52	0.349	1.05	0.52
M	90	1504	0.0788	3	2.51	0.105	2159.7	0.247	1.05	0.37
L	96	1753	0.0921	3	2.55	0.104	2182.33	0.297	1.049	0.44
K	102	1594	0.0840	3	2.53	0.103	2203.58	0.272	1.049	0.40
J	108	1434	0.0758	3	2.53	0.103	2223.6	0.248	1.048	0.37
I	114	1275	0.0676	3	2.50	0.102	2242.53	0.221	1.048	0.33
1H	120	1116	0.0538	3	2.51	0.102	2260.48	0.178	1.047	0.27
1G	126	957	0.0463	3	2.46	0.101	2277.53	0.152	1.047	0.23
F	132	798	0.0388	3	2.40	0.101	2293.77	0.125	1.046	0.19
D	144	2237	0.1208	3	2.25	0.1	2324.09	0.371	1.045	0.56
CR	150	1600	0.0868	3	2.15	0.1	2338.28	0.257	1.045	0.39

Tabulka 4.51 Síla F_w na nárožník 1,3(diagonální směr větru s ledovkou)

NÁZEV ČÁSTI	z [m]	l [mm]	A_{ref} [m ²]	ICG	c_i	$l_v(z)$	$q_p(z)$ [N/m ²]	$F_{m,w}(z)$ [kN]	$c_{o(z)}$	$F_{p,w(z)}$ [kN]	$F_{p,w(z),1}$ [kN]
Z	18	18089	6.42	2	0.98	0.13	1610.84	5.38	1.06	8.46	5.98
V	30	12059	4.26	2	0.99	0.12	1780.06	4.12	1.05	6.31	4.46
U	42	12059	3.41	2	2.51	0.11	1894.54	9.03	1.05	13.62	9.63
T	54	12059	3.41	2	2.49	0.11	1981.30	9.47	1.05	14.15	10.01
R	66	12059	3.41	3	2.48	0.11	2051.15	9.87	1.05	14.68	10.38
P	72	6030	1.53	3	2.48	0.11	2081.55	4.52	1.05	6.71	4.75
O	78	6030	1.53	3	2.46	0.11	2109.56	4.56	1.05	6.77	4.79
N	84	6030	1.36	3	2.47	0.11	2135.52	4.14	1.05	6.14	4.34
M	90	6019	1.36	3	2.38	0.10	2159.70	4.04	1.05	5.99	4.24
L	96	6017	1.28	3	2.43	0.10	2182.33	3.92	1.05	5.82	4.12
K	102	6017	1.28	3	2.41	0.10	2203.58	3.93	1.05	5.83	4.12
J	108	6017	1.19	3	2.41	0.10	2223.60	3.71	1.05	5.51	3.90
I	114	6017	1.19	3	2.38	0.10	2242.53	3.70	1.05	5.51	3.89
1H	120	6017	1.11	3	2.38	0.10	2260.48	3.48	1.05	5.19	3.67

Pokračování tab. 4.51 Síla F_w na nárožník 1,3(diagonální směr větru s ledovkou)

NÁZEV ČÁSTI	z [m]	l [mm]	A_{ref} [m ²]	ICG	c_i	$l_v(z)$	$q_p(z)$ [N/m ²]	$F_{m,w}(z)$ [kN]	$C_{o(z)}$	$F_{p,w(z)}$ [kN]	$F_{p,w(z),1}$ [kN]
1G	126	6017	1.11	3	2.33	0.10	2277.53	3.44	1.05	5.13	3.63
F	132	6017	1.11	3	2.26	0.10	2293.77	3.36	1.05	5.03	3.55
E	138	6017	1.02	3	2.23	0.10	2309.27	3.09	1.05	4.63	3.28
D	144	6017	1.02	3	2.09	0.10	2324.09	2.92	1.05	4.38	3.10
CR	150	6000	0.85	3	1.97	0.10	2338.28	2.31	1.05	3.48	2.46

Tabulka 4.52 Síla F_w na nárožník 2,4(diagonální směr větru s ledovkou)

NÁZEV ČÁSTI	z [m]	l [mm]	A_{ref} [m ²]	ICG	c_i	$l_v(z)$	$q_p(z)$ [N/m ²]	$F_{m,w}(z)$ [kN]	$C_{o(z)}$	$F_{p,w(z)}$ [kN]	$F_{p,w(z),1}$ [kN]
Z	18	18089.00	4.54	2	2.76	0.13	1610.84	10.73	1.06	16.86	11.92
V	30	12059.00	3.01	2	2.72	0.12	1780.06	7.99	1.05	12.22	8.64
U	42	12059.00	2.41	2	2.73	0.11	1894.54	6.93	1.05	10.45	7.39
T	54	12059.00	2.41	2	2.70	0.11	1981.30	7.27	1.05	10.86	7.68
R	66	12059.00	2.41	3	2.69	0.11	2051.15	7.57	1.05	11.26	7.96
P	72	6030.00	1.09	3	2.69	0.11	2081.55	3.47	1.05	5.15	3.64
O	78	6030.00	1.09	3	2.67	0.11	2109.56	3.50	1.05	5.19	3.67
N	84	6030.00	0.96	3	2.68	0.11	2135.52	3.18	1.05	4.71	3.33
M	90	6019.00	0.96	3	2.58	0.10	2159.70	3.10	1.05	4.59	3.25
L	96	6017.00	0.90	3	2.64	0.10	2182.33	3.01	1.05	4.46	3.16
K	102	6017.00	0.90	3	2.61	0.10	2203.58	3.01	1.05	4.47	3.16
J	108	6017.00	0.84	3	2.61	0.10	2223.60	2.84	1.05	4.22	2.99
I	114	6017.00	0.84	3	2.58	0.10	2242.53	2.84	1.05	4.22	2.98
1H	120	6017.00	0.78	3	2.58	0.10	2260.48	2.67	1.05	3.98	2.81
1G	126	6017.00	0.78	3	2.53	0.10	2277.53	2.63	1.05	3.93	2.78
F	132	6017.00	0.78	3	2.47	0.10	2293.77	2.60	1.05	3.88	2.75
E	138	6017.00	0.72	3	2.45	0.10	2309.27	2.40	1.05	3.59	2.54
D	144	6017.00	0.72	3	2.34	0.10	2324.09	2.31	1.05	3.47	2.45
CR	150	6000.00	0.60	3	2.25	0.10	2338.28	1.86	1.05	2.80	1.98

Tabulka 4.53 Síla F_w na horní diagonálu (diagonální směr větru s ledovkou)

NÁZEV ČÁSTI	z [m]	l [mm]	A_{ref} [m ²]	ICG	c_i	$l_v(z)$	$q_p(z)$ [N/m ²]	$F_{m,w}(z)$ [kN]	$c_{o(z)}$	$F_{p,w(z)}$ [kN]	$F_{p,w(z),1}$ [kN]
Z	18	12489	1.39	2	2.76	0.13	1610.84	3.28	1.06	5.15	3.64
V	30	9844	1.10	2	2.72	0.12	1780.06	2.90	1.05	4.44	3.14
U	42	9191	1.02	2	2.73	0.11	1894.54	2.95	1.05	4.44	3.14
T	54	8572	0.96	2	2.70	0.11	1981.30	2.88	1.05	4.31	3.05
R	66	7993	0.89	3	2.69	0.11	2051.15	2.81	1.05	4.18	2.95
P	72	5701	0.58	3	2.69	0.11	2081.55	1.86	1.05	2.76	1.95
O	78	5347	0.55	3	2.67	0.11	2109.56	1.76	1.05	2.61	1.85
N	84	5005	0.46	3	2.68	0.11	2135.52	1.52	1.05	2.25	1.59
M	90	4739	0.44	3	2.58	0.10	2159.70	1.41	1.05	2.09	1.48
L	96	4497	0.42	3	2.64	0.10	2182.33	1.39	1.05	2.06	1.46
K	102	4266	0.40	3	2.61	0.10	2203.58	1.32	1.05	1.96	1.39
J	108	4046	0.34	3	2.61	0.10	2223.60	1.13	1.05	1.68	1.19
I	114	3840	0.32	3	2.58	0.10	2242.53	1.07	1.05	1.60	1.13
1H	120	3650	0.27	3	2.58	0.10	2260.48	0.91	1.05	1.36	0.96
1G	126	3479	0.26	3	2.53	0.10	2277.53	0.86	1.05	1.28	0.91
F	132	3330	0.25	3	2.47	0.10	2293.77	0.81	1.05	1.22	0.86

Tabulka 4.54 Síla F_w na horizon. prutu výpletu (diagonální směr větru s ledovkou)

NÁZEV ČÁSTI	z [m]	l [mm]	A_{ref} [m ²]	ICR	c_i	$l_v(z)$	$q_p(z)$ [N/m ²]	$F_{m,w}(z)$ [kN]	$C_{o(z)}$	$F_{p,w(z),1}$ [kN]
Z	18	1545	0.09	2	2.76	0.13	1610.84	0.22	1.06	0.35
V	30	2054	0.13	2	2.72	0.12	1780.06	0.33	1.05	0.51
U	42	1843	0.11	2	2.73	0.11	1894.54	0.33	1.05	0.49
T	54	1632	0.10	2	2.70	0.11	1981.30	0.30	1.05	0.45
R	66	1422	0.09	3	2.69	0.11	2051.15	0.28	1.05	0.41
P	72	2527	0.13	3	2.69	0.11	2081.55	0.42	1.05	0.62
O	78	2316	0.12	3	2.67	0.11	2109.56	0.39	1.05	0.58
N	84	2105	0.11	3	2.68	0.11	2135.52	0.36	1.05	0.54
M	90	2494	0.13	3	2.58	0.10	2159.70	0.42	1.05	0.62
L	96	1504	0.08	3	2.64	0.10	2182.33	0.26	1.05	0.39
K	102	1504	0.08	3	2.61	0.10	2203.58	0.26	1.05	0.39
J	108	1504	0.08	3	2.61	0.10	2223.60	0.27	1.05	0.40
I	114	2550	0.14	3	2.58	0.10	2242.53	0.46	1.05	0.68
1H	120	2232	0.11	3	2.58	0.10	2260.48	0.37	1.05	0.55
1G	126	1914	0.09	3	2.53	0.10	2277.53	0.31	1.05	0.47
F	132	1596	0.08	3	2.47	0.10	2293.77	0.26	1.05	0.38
E	138	2555	0.1247	3	2.446	0.10	2309.27	0.41	1.05	0.62
D	144	1918	0.10	3	2.34	0.10	2324.09	0.33	1.05	0.50
CR	150	943	0.05	3	2.25	0.10	2338.28	0.16	1.05	0.24

4.2.4 Rekapitulace sledovaných veličin

Pro získání přehledu a možnosti porovnávání byly sledované veličiny zařazeny do následující tabulky:

Tabulka 4.55 Přehled aerodynamických součinitelů (c_f , c_i)

NÁZEV ČÁSTI	VÝŠKA z [m]	c_f		c_i			
		1	2	3	4	5	6
Z	18	3.46	3.67	2.22	2.29	2.64	2.76
V	30	3.42	3.60	2.21	2.27	3.42	2.72
U	42	3.42	3.61	2.21	2.27	3.42	2.73
T	54	3.39	3.56	2.20	2.25	3.39	2.70
R	66	3.38	3.55	2.00	2.03	3.38	2.69
P	72	3.37	3.54	1.99	2.03	3.37	2.69
O	78	3.35	3.51	1.99	2.02	3.35	2.67
N	84	3.36	3.53	1.99	2.03	3.36	2.68
M	90	3.25	3.37	1.97	1.99	3.25	2.58
L	96	3.32	3.47	1.98	2.01	3.32	2.64
K	102	3.28	3.42	1.97	2.00	3.28	2.61
J	108	3.28	3.42	1.97	2.00	3.28	2.61
I	114	3.23	3.36	1.96	1.99	3.23	2.58
1H	120	3.24	3.37	1.78	1.80	3.24	2.58
1G	126	3.17	3.28	1.77	1.79	3.17	2.53
F	132	3.06	3.18	1.76	1.78	3.06	2.47
E	138	3.02	3.14	1.76	1.77	3.02	2.45
D	144	2.81	2.96	1.73	1.75	2.81	2.34
CR	150	2.65	2.81	1.72	1.73	2.65	2.25

Poznámka k tab. 4.55

1 - kolmý směr větru na konstrukci

2 - diagonální směr větru na konstrukci

3 - kolmý směr větru na konstrukci s námrazou

4 - diagonální směr větru na konstrukci s námrazou

5 - kolmý směr větru na konstrukci s ledovkou

6 - diagonální směr větru na konstrukci s ledovkou

Tabulka 4.56 Přehled dynamických charakteristik z modální analýzy

	z_s	$c_0(z_s)$	$I_v(z_s)$	$L(z_s)$ [m]	B^2	$n_{1,x}$ [Hz]	f_L	S_L	δ_s	m_e [kg/m]
1	90	1.05	0.104634	196.523	0.561	1.048	4.611	0.049	0.035	210.879
2	90	1.05	0.104634	196.523	0.561	0.663	2.919	0.066	0.035	501.492
3	90	1.05	0.104634	196.523	0.561	0.642	2.826	0.067	0.035	537.124
4	90	1.05	0.104634	196.523	0.561	1.021	4.494	0.05	0.035	221.353
	δ_a	δ	η_h	η_b	R_h	R_b	R^2	v [Hz]	k_p	$c_s c_d$
1	3.008	3.043	16.18977	0.79103	0.06	0.6294	0.003	0.080	2.98	0.8479
2	1.209	1.244	10.24935	0.50078	0.093	0.7354	0.018	0.116	3.12	0.8639
3	1.225	1.26	9.92089	0.48473	0.096	0.7421	0.019	0.115	3.12	0.8636
4	2.941	2.976	15.77727	0.77088	0.061	0.6359	0.003	0.080	2.99	0.8483

Tabulka 4.57 Dynamické charakteristiky podle normy [1]

	z_s	$c_0(z_s)$	$I_v(z_s)$	$L(z_s)$ [m]	B^2	$n_{1,x}$ [Hz]	f_L	S_L	δ_s	m_e [kg/m]
1	90	1.05	0.10463	196.523	0.56107	0.3067	1.34943	0.10327	0.035	211.26
	δ_a	δ	η_h	η_b	R_h	R_b	R^2	v [Hz]	k_p	$c_s c_d$
1	10.26	10.30	4.73792	0.23149	0.18879	0.862	0.00806	0.08	2.73	0.8257

Poznámka k tab. 4.56 a tab. 4.57

1 - vlastní tíha

2 - vlastní tíha + tíha námrazy ($\theta=0^\circ$)

3 - vlastní tíha + tíha námrazy ($\theta=45^\circ$)

4 - vlastní tíha + tíha ledovky

Tabulka 4.58 Srovnání vlastního tvaru kmitání

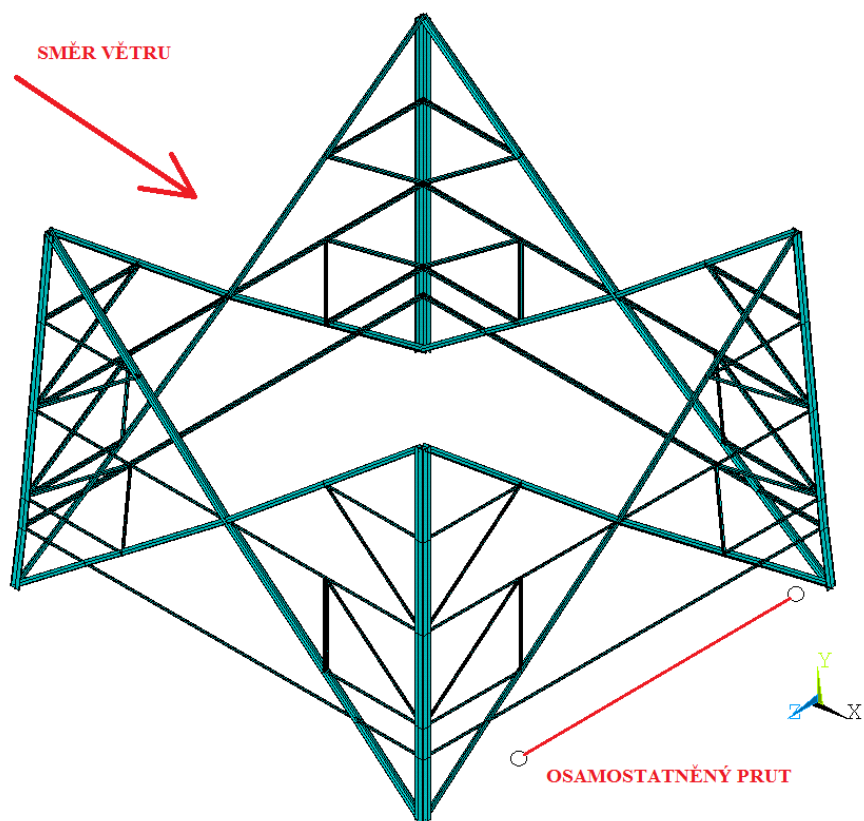
	[1]	ANSYS	
z	$\Phi_{l,x}(z)$	UX [m]	UX(z)/UX(150)
0	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
18	4.99E-03	2.05E-04	2.05E-02
30	1.79E-02	3.55E-04	3.55E-02
42	4.15E-02	7.16E-04	7.17E-02
54	7.78E-02	1.12E-03	1.12E-01
66	1.28E-01	1.69E-03	1.69E-01
72	1.60E-01	1.98E-03	1.99E-01
78	1.95E-01	2.39E-03	2.40E-01
84	2.35E-01	2.80E-03	2.80E-01
90	2.79E-01	3.30E-03	3.31E-01
96	3.28E-01	3.83E-03	3.83E-01
102	3.81E-01	4.43E-03	4.44E-01
108	4.40E-01	5.07E-03	5.07E-01
114	5.04E-01	5.76E-03	5.77E-01
120	5.72E-01	6.49E-03	6.50E-01
126	6.47E-01	7.25E-03	7.26E-01
132	7.26E-01	8.01E-03	8.03E-01
138	8.12E-01	8.76E-03	8.77E-01
144	9.03E-01	9.43E-03	9.44E-01
150	1.00E+00	9.98E-03	1.00E+00

Hodnota $\Phi_{l,x}(z)$ byl určena podle vztahu (2.16). Posuny UX náleží analyzovanému stavu 1, tedy pouze vlastní tíze, $UX/UX(150)$ je tvar ohybového kmitání normovaný na jednotku v bodě maximální výchylky.

4.2.5 Odezva kolmo na směr větru

Vzhledem k tomu, že norma [1] uvádí výpočet ekvivalentní síly $F_w(s)$ odpovídající účinkům rozkmitání konstrukce kolmo na směr větru pouze pro jednotný průřez, zatížení je stanoveno na osamostatněném prutu věže. Je tedy pouze vyšetřován lokální účinek odtrhávání vírů. Navíc norma [4] uvádí, že je-li součinitel plnosti $\varphi > 0,6$, má se vyšetřovat odezva konstrukce kolmo na směr větru. Součinitel plnosti vyšetřované věže je v rozmezí podle tab. 4.7 a tab. 4.8 od 0,09 až 0,35. Z toho tedy vyplývá, že odezva věže kolmo na směr větru nemusí být brána v úvahu.

Problematika odtrhávání vírů se tedy stanovila jen na jednom prutu. Jako reprezentativní prvek věže byl vybrán horizontální prut z části M (viz obr. 4.19), délky $5,340\text{m}$ s průřezem $L\ 50\times 5\text{mm}$, kloubově uložen na obou koncích.

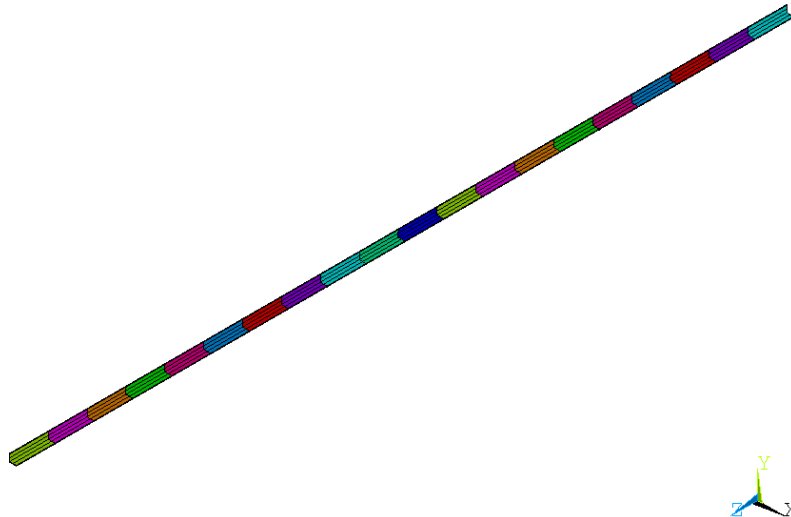


Obr. 4.19: Horizontální prut části M

ELEMENTS
ELEM NUM



PLOT NO. 1



Obr. 4.20: Vymeshovaný (NDIV=20) osamostatněný horizontální prut části M

Následujícím krokem bylo zjistit vlastní frekvenci prvního ohybového tvaru kmitání v rovině kolmé na směr větru tj. rovina yz (viz obr. 4.20). K nalezení dynamických charakteristik se využije modální analýzy.

***** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION *****						Y DIRECTION	
MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC. FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF.MASS TO TOTAL MASS
1	0.00000	0.0000	0.78380E-10	0.000000	0.614340E-20	0.318328E-21	0.308718E-21
2	2.81170	0.35566	2.7875	0.964165	7.77000	0.402613	0.390459
3	5.51994	0.18116	2.8911	1.000000	8.35830	0.835709	0.420022
4	11.3425	0.88164E-01	-0.19111E-04	0.000007	0.365245E-09	0.835709	0.183543E-10
5	21.8118	0.45847E-01	0.12738E-04	0.000004	0.162262E-09	0.835709	0.815402E-11
6	25.8854	0.38632E-01	0.92884	0.321280	0.862748	0.880414	0.433549E-01
7	40.2115	0.24869E-01	-0.53380E-05	0.000002	0.284946E-10	0.880414	0.143191E-11
8	46.9487	0.21300E-01	-0.82141E-04	0.000028	0.674722E-08	0.880414	0.339061E-09
9	47.9530	0.20854E-01	-0.95350	0.329808	0.909160	0.927523	0.456872E-01
10	75.2873	0.13282E-01	0.55627	0.192411	0.309441	0.943557	0.155500E-01

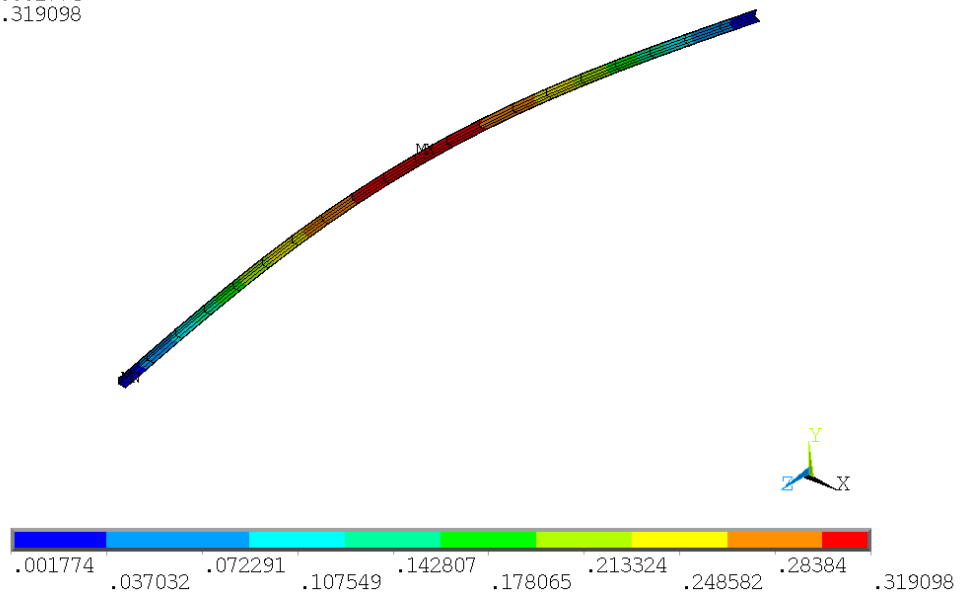
Obr. 4.21: Výstup z modální analýzy

NODAL SOLUTION

STEP=1
SUB =3
FREQ=5.51994
USUM (AVG)
RSYS=0
DMX =.319098
SMN =.001774
SMX =.319098

 **ANSYS**
Noncommercial use only

PLOT NO. 1



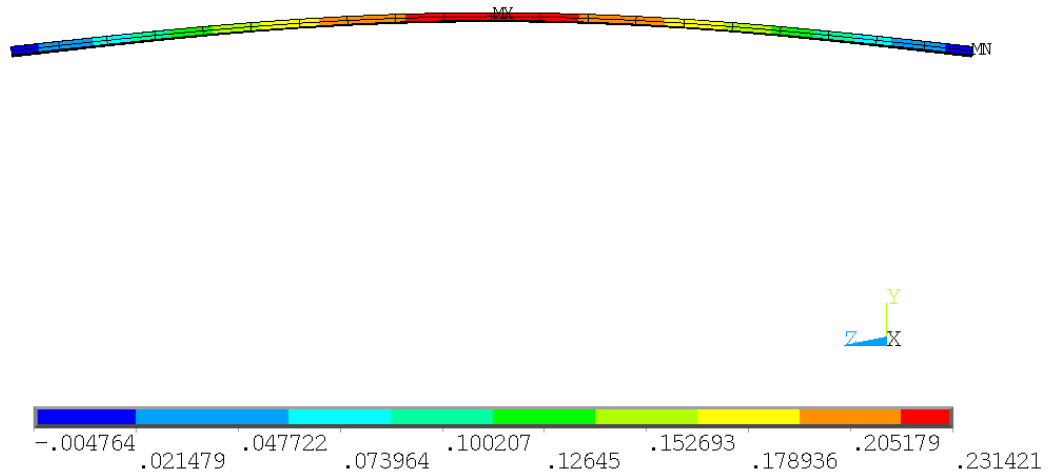
Obr. 4.22: Vlastní tvar Φ_y při frekvenci $f_y=5,512$ Hz (prostorový tvar)

NODAL SOLUTION

STEP=1
SUB =3
FREQ=5.51994
UY (AVG)
RSYS=0
DMX =.319098
SMN =-.004764
SMX =.231421



PLOT NO. 1



Obr. 4.23: Vlastní tvar Φ_y při frekvenci $f_y=5,512$ Hz (z posunů UY)

Dále se postupuje dle vztahů uvedených v odst. 2.3 a dle normy [1]. Během výpočtu síly $F_w(s)$ se objevilo několik problémů. Prvním problémem bylo přisouzení hodnoty Strouhalova čísla danému průřezu. Podle tab. E1 v [1] je Strouhalovo číslo pro profil L v rozmezí 0,11 – 0,07 v závislosti na poměru rozměrů profilu d/b 1,3 – 2,0. Poměr vyšetřovaného profilu je 1,0 (rovnoramenný úhelník) a extrapolace nejsou podle [1] povoleny. K přihlédnutí hodnot Strouhalova čísla jiných průřezů, byla vyšetřovanému prutu přisouzena hodnota 0,12. Obdobný problém nastal při určování C_{lat} .

Tabulka 4.59 Kritérium pro vznik odtrhávání vírů

l [m]	průřez	m_e [kg/m]	z [m]	$n_{i,y}$ [Hz]	b [mm]	St [s ⁻²]	$v_{crit,i}$ [m/s]	$v_m(z)$ [m/s]	$1,25 v_m(z)$
5.34	L50x5	3.72875	85	5.5199	50	0.12	2.30	44.40	55.50

$$v_{crit,1} = 2,30 \text{ m/s} < v_m(z) = 44,40 \text{ m/s} \Rightarrow \text{může docházet k odtrhávání vírů,}$$

kde $v_m(z) = v_m(z = 90m)$ viz tab. 4.6

Tabulka 4.60 Veličiny potřebné k výpočtu $F_w(s)$ stanoveny podle [1]

δs	m_e [kg/m]	ρ [kg/m ³]	Sc	$\Phi_{1,z}$	K	λ
0.025	3.72875	1.25	59.66	1.00E+00	0.1	106.8

Tabulka 4.61 Iterace k nalezení L_j a $y_{F,max}$

	L_j/b		K_w
Předpoklad podle tab.:	6	=> výpočet K_w podle [1]	0.088132
	$y_{F,max}/b$		L_j/b
=> výpočet $y_{f,max}/b$ podle ()	0.008207	=>	6

Tabulka 4.62 Výpočet $F_w(s)$ na jednotku délky

L_j [m]	K_w	$c_{lat,0}$	z_{Lj}	$v_{m,L,j}$	$v_{crit,i}/v_{m,L,j}$	c_{lat}	$y_{F,max}$	$F_w(s)$ [N/m]
0.3	0.088132	0.8	85	44.40	0.0518	0.8	4.103E-04	1.84

Následně by prut byl v místě největší výchylky (tj. v okolí poloviny rozpětí pro prostě podepřený prut viz obr. 2.13) zatížen intenzitou 1.84 N na délce 0.3m.

4.3 Účinky zatížení na příhradovou věž

4.3.1 Výstupy ze statické analýzy věže

Na následujících obrázcích jsou vykresleny deformované stavy konstrukce pro vybrané zatěžovací stavy.

NODAL SOLUTION

STEP=1

SUB =1

TIME=1

USUM (AVG)

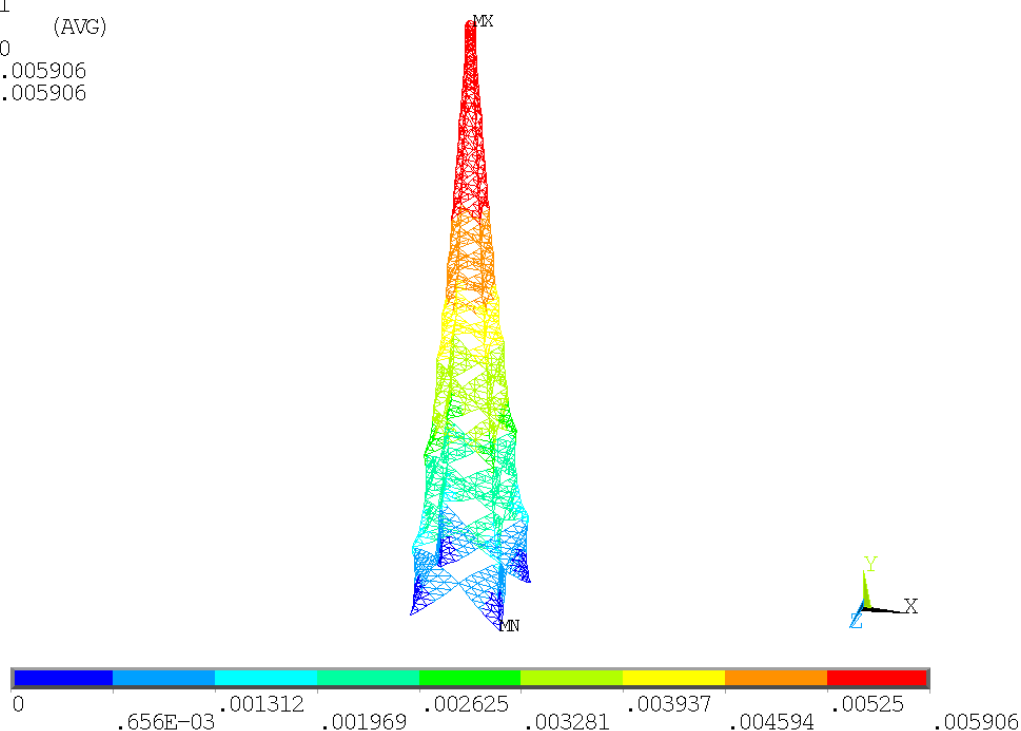
RSYS=0

DMX =.005906

SMX =.005906



PLOT NO. 1



Obr. 4.24: ZS1 – vlastní tíha

NODAL SOLUTION

STEP=1

SUB =1

TIME=1

USUM (AVG)

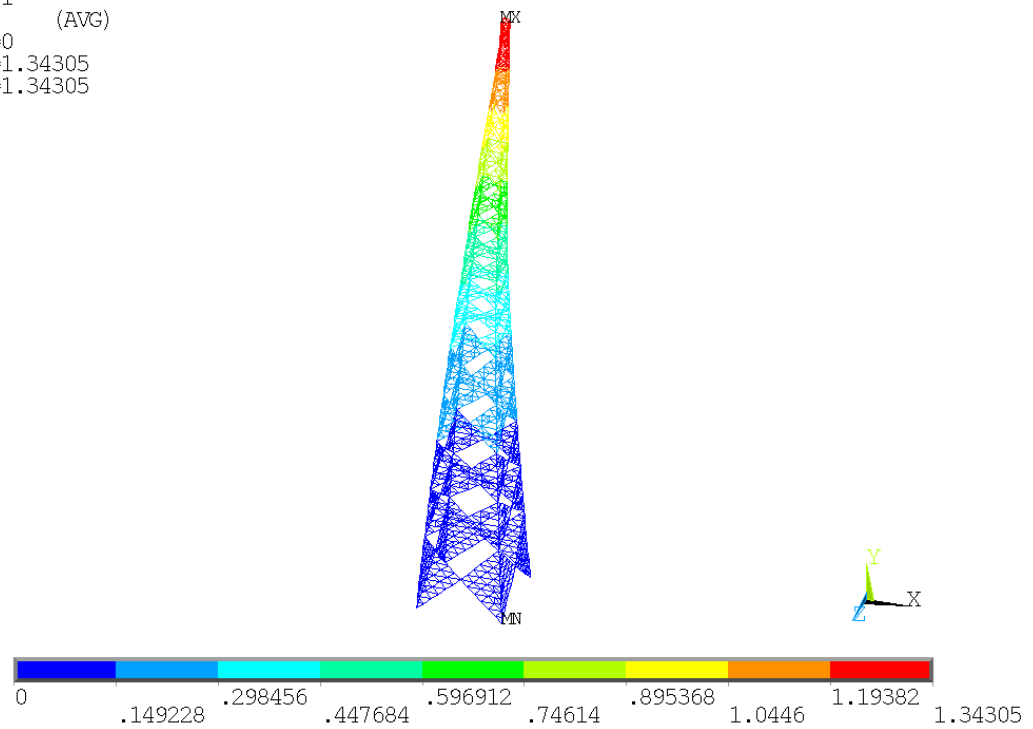
RSYS=0

DMX =1.34305

SMX =1.34305



PLOT NO. 1



Obr. 4.25: ZS2 – kolmý směr větru (ve směru x)

NODAL SOLUTION

STEP=1

SUB =1

TIME=1

USUM (AVG)

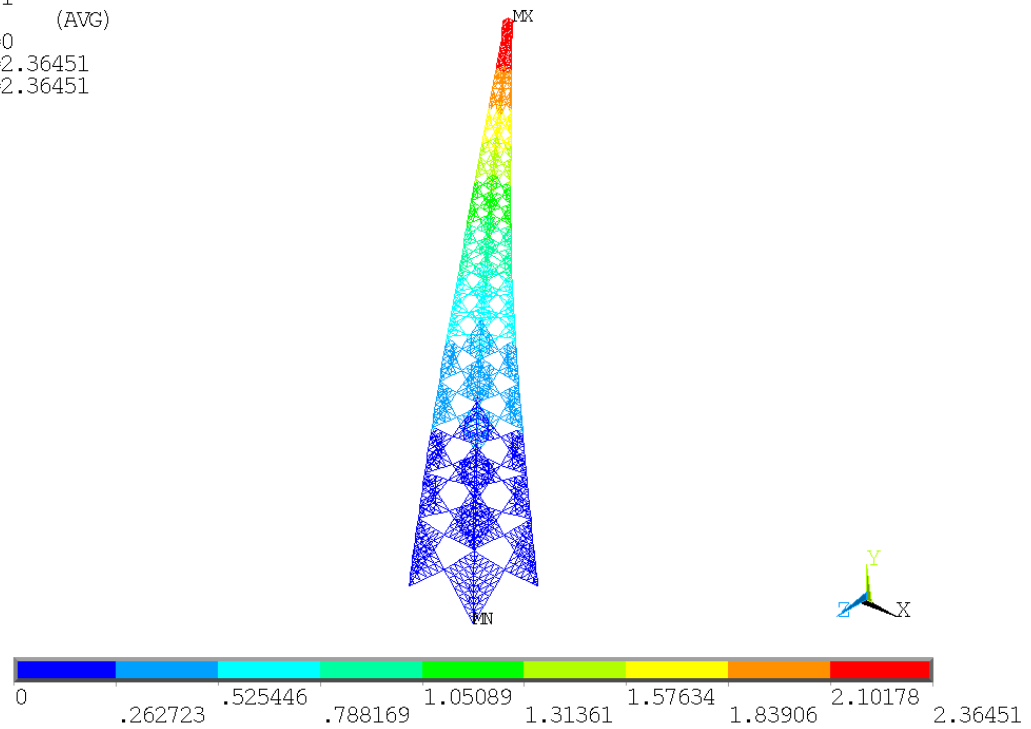
RSYS=0

DMX =2.36451

SMX =2.36451



PLOT NO. 1



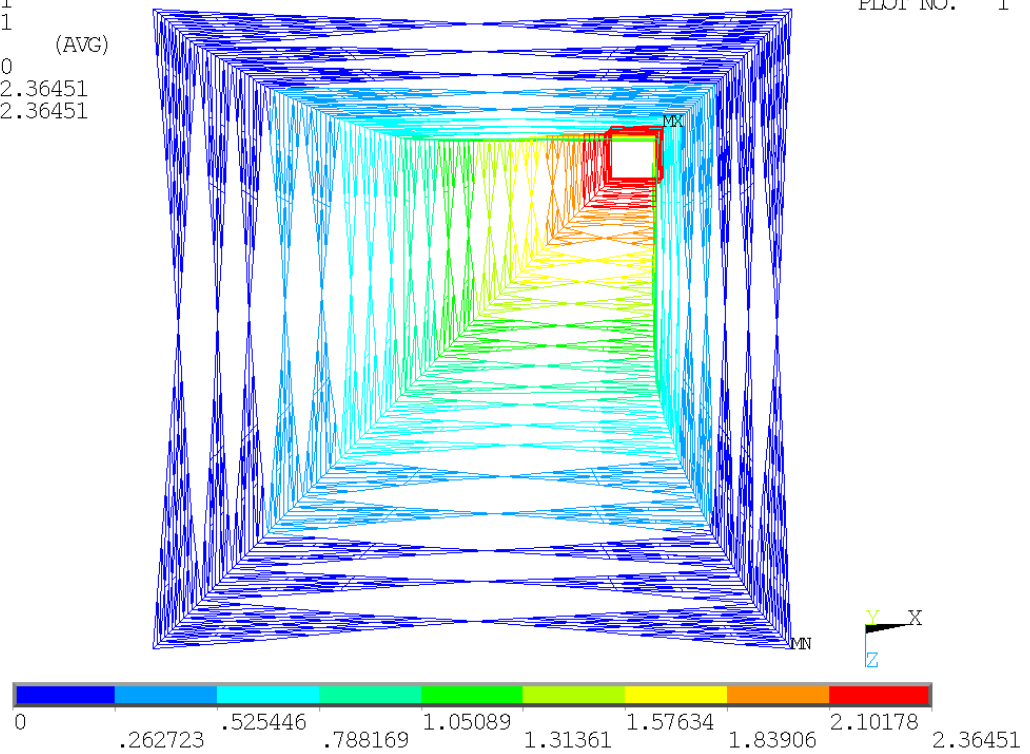
Obr. 4.26: ZS3 – diagonální směr větru (ISO pohled)

NODAL SOLUTION

STEP=1
SUB =1
TIME=1
USUM (AVG)
RSYS=0
DMX =2.36451
SMX =2.36451

 **ANSYS**
Noncommercial use only

PLOT NO. 1



Obr. 4.27: ZS3 – diagonální směr větru (pohled shora)

4.3.2 Ruční výpočet

Tabulka 4.63 Výpočet reakcí ve svislém směru od vlastní tíhy

1	HMOTNOST PRUTŮ V JEDNOTLIVÝCH ČÁSTECH VĚŽE (PRO 4 STĚNY) m [kg]		
NÁZEV ČÁSTI	NÁROŽNÍKY	DIAGONÁLY	VÝPLET
Z	5452.75	3413.45	5310.90
V	3635.06	2686.13	3112.45
U	2877.76	2510.34	2881.61
T	2877.76	2342.58	2654.63
R	2877.76	2184.59	2119.28
P	1042.14	1403.68	572.26
O	1042.14	1318.25	536.28
N	866.24	894.55	500.61
M	864.66	840.97	701.12
L	756.49	798.11	440.23
K	756.49	757.24	414.10
J	751.01	634.74	388.09
I	751.01	602.21	345.82
1H	562.27	437.92	225.56
1G	562.27	416.81	201.06
F	562.27	398.10	177.00
E	475.92	0.00	391.92
D	475.92	0.00	353.02
CR	357.96	0.00	409.15
	Σm	70922.63	kg
	G	695751.00	N
	REAKCE=G/4	173937.75	N
		173.94	kN

Tabulka 4.64 Výpočet destabilizujícího momentu (nárožníky a diagonály)

2	F _w [N]				M=F _w · z [Nm]		
		DIAGONÁLA				DIAGONÁLA	
z	NÁROŽNÍK	SPODNÍ	HORNÍ		NÁROŽNÍK	SPODNÍ	HORNÍ
0.00	877.02	571.46			0.00	0.00	0.00
1.50	1754.04	1142.93			2631.06	1714.39	0.00
3.00	1754.04	1142.93			5262.12	3428.78	0.00
4.50	1754.04	1142.93			7893.18	5143.17	0.00
6.00	1754.04	1142.93			10524.24	6857.55	0.00
7.50	1754.04	1142.93			13155.30	8571.94	0.00
9.00	1754.04	571.46	532.85		15786.36	5143.17	4795.65
10.50	1754.04		1065.70		18417.42	0.00	11189.86
12.00	1754.04		1065.70		21048.48	0.00	12788.41
13.50	1754.04		1065.70		23679.55	0.00	14386.96
15.00	1754.04		1065.70		26310.61	0.00	15985.52
16.50	1754.04		1065.70		28941.67	0.00	17584.07
18.00	1836.32	736.73	532.85		33053.77	13261.09	9591.31
19.50	1918.60	1473.45			37412.71	28732.37	0.00
21.00	1918.60	1473.45			40290.62	30942.55	0.00
22.50	1918.60	1473.45			43168.52	33152.73	0.00
24.00	1918.60	736.73	689.12		46046.42	17681.46	16538.98
25.50	1918.60		1378.25		48924.32	0.00	35145.34
27.00	1918.60		1378.25		51802.22	0.00	37212.71
28.50	1918.60		1378.25		54680.12	0.00	39280.09
30.00	1780.10	737.04	689.12		53403.10	22111.24	20673.73
31.50	1641.61	1474.08			51710.59	46433.61	0.00
33.00	1641.61	1474.08			54173.00	48644.74	0.00
34.50	1641.61	1474.08			56635.41	50855.86	0.00
36.00	1641.61	737.04	688.15		59097.82	26533.49	24773.40

·
·
·

150.00	275.63				41344.44	0.00	0.00
STĚNA 4				Σ	10177590.94	3402354.7	3471094.3
				nasobitel	2	2	2
STĚNA 2				[Nm]	20355181.88	6804709.3	6942188.7
				[kNm]	20355.18188	6804.7093	6942.1887
STĚNA 4 + STĚNA 2						Σ	68204.16

Tabulka 4.65 Výpočet destabilizujícího momentu (výplet)

b [mm]	Σl [mm]	z [m]	A_{ref} [m ²]	r [m]	$F_{p,W(z)}$ [kN]	$M=F_w r$ [kNm]
60	247276	18	14.837	9.00	69.06	310.7506212
60	144916	30	8.695	24.00	44.27	531.2171895
60	134168	42	8.050	36.00	43.83	789.0241957
60	123600	54	7.416	48.00	41.98	1007.420096
60	98674	66	5.920	60.00	34.72	1041.720591
50	38368	72	1.918	69.00	11.43	394.4459501
50	35956	78	1.798	75.00	10.81	405.2519684
50	33564	84	1.678	81.00	10.28	416.5411957
50	47008	90	2.350	87.00	14.12	614.0488117
50	29516	96	1.476	93.00	9.17	426.4036557
50	27764	102	1.388	99.00	8.64	427.8435205
50	26020	108	1.301	105.00	8.19	430.1929
50	23186	114	1.159	111.00	7.29	404.7470627
45	20882	120	0.940	117.00	5.99	350.6642703
45	18614	126	0.838	123.00	5.28	324.7343814
45	16386	132	0.737	129.00	4.55	293.3220176
50	26277	138	1.314	135.00	8.07	544.7767523
50	23669	144	1.183	141.00	6.84	482.1443828
50	27432	150	1.372	147.00	7.56	555.7387403
STĚNA 4 [kNm]					Σ	9750.988303
STĚNA 2 [kNm]					nasobitel	2
STĚNA 4 + STĚNA 2 [kNm]						19501.97661

Tabulka 4.66 Výpočet celkového destabilizujícího momentu

DESTABILIZUJÍCÍ MOMENT z tab. (NÍROŽNÍKY A DIAGONÁLY)	68204.16	kNm
DESTABILIZUJÍCÍ MOMENT z tab. (VÝPLET)	19501.98	kNm
Σ	87706.14	kNm

Tabulka 4.67 Reakce z programu ANSYS a moment od dvojice sil

	Fy [kN]	b [m]	M=2 Fy b [kNm]
1	172.41		
2	2427.5	19.8	96129

Pozn.: 1 - vlastní tíha

2 - kolmý směr větru na stěny věže č.4 a č.2

5. ZÁVĚR

Primárním cílem této práce bylo lépe porozumět problematice zatížení větrem. Tento cíl byl v rámci řešené konstrukce do jisté míry splněn. Práce by se mohla rozšířit o dynamické účinky větru, pravděpodobnostní vyjádření rychlosti větru apod., avšak s touto problematikou se seznámím až v navazujícím studiu.

Postupování podle norem bylo v některých fázích výpočtu poměrně pracné díky stanovování řady součinitelů, navíc se v některých okamžicích poněkud ztrácelo ono inženýrské přemýšlení a výpočet zatížení tak ustrnul na nekonečném dosazování různých hodnot do vztahů udávanými normami. Proto bez odborného vedení by se jen těžko chápaly významy některých součinitelů a vztahů.

Problematika odtrhávání vírů byla řešena pouze okrajově, jelikož normy neuvádí postup výpočtu pro příhradové konstrukce. Nicméně tento jev je velice zajímavý a nadále bych ráda rozšířila své znalosti v oboru aeroelasticky vůbec.

Poměrně velkým přínosem pro mne bylo stanovení zatížení větrem na konstrukci s námrazou. Udělala jsem si tak představu o tom, jak se mění vlastnosti konstrukce a tím její následná odezva na působící zatížení. V tab. 4.55 je shrnutí aerodynamických součinitelů pro jednotlivé zatěžovací stavy. Je zde vidět, jak námraza snižuje odpor profilů vůči působícímu větru a činí tak profilům aerodynamičtější tvar, tento jev však nastává na úkor zvětšení rozměrů profilů, čímž dochází ke zvětšení síly od větru působící na profily.

Vzhledem k tomu, že norma [1] nabízí zjednodušené vztahy pro výpočet dynamických charakteristik konstrukce, bylo provedeno jejich srovnání při výpočtu součinitele konstrukce $c_s c_d$ s charakteristikami vypočtenými modální analýzou v programu ANSYS (tab. 4.56).

Norma [1] zavádí zjednodušené vztahy pro výpočet vlastní frekvence (2.16), vlastního tvaru kmitání (2.17) a odhad ekvivalentní hmotnosti. Na základě těchto vztahů byly získány hodnoty uvedené v tab. 4.57. Provede-li se porovnání frekvencí z tab. 4.56 a tab. 4.57 je vidět, že zjednodušený vztah (2.16) udává téměř třikrát nižší frekvenci než

je frekvence získaná z programu ANSYS. Vztah (2.16) tedy není vhodný pro tento typ konstrukce.

Ekvivalentní hmotnost m_e v tab. 4.56 byla vypočítána podle vztahu (2.18), ovšem s charakteristikami z tab. 4.56. Ekvivalentní hmotnost m_e v tab. 4.57 byla určena jako průměrná hodnota $m(s)$ v horní třetině konstrukce, jak odhaduje m_e norma [1]. Veličina $m(s)$ udává hmotnost konstrukce na jednotku délky (viz např. tab. 4.11). Program ANSYS udává hodnotu ještě další veličinu - efektivní hmotnost (EFFECTIVE MASS = 15 589,9 kg viz obr. 4.7). Vydělíme-li tuto hmotnost délkou 50m (třetina výšky konstrukce), dostaneme hodnotu $15\,589,9/50 = 311,80\text{ kg/m}$, což je srovnatelná hodnota s předešlými m_e s uvážením, že délka by zřejmě mohla být větší. Zde je tedy odhad m_e podle [1] poměrně přesný.

Při výpočtu hodnoty $c_s c_d$ se však značné rozdíly mezi frekvencemi a dalšími veličinami vytratily a díky omezením ve vztahu (2.14), byla použita minimální hodnota pro $c_s c_d$.

Dále je v tab. 4.56 možné sledovat výraznou změnu vlastní frekvence konstrukce s námrazou na téměř poloviční hodnotu vlastní frekvence bez námrazy. Tímto faktem se jen potvrzuje, že by se vliv námrazy neměl zanedbávat a měla by mu být věnována zvýšená pozornost, jak uvádí [5].

Dále se provádělo srovnání vlastních tvarů kmitání. Jak je vidět v tab. 4.58, se vzrůstající výškou se hodnoty vlastních tvarů přibližují. Zjednodušeného vztahu pro odhad $\Phi_{l,x}(z)$ by se tedy dalo využít.

Dalším cílem této práce bylo naučit se základnímu ovládání programu ANSYS. Právě tímto stanoveným cílem se tato práce místy komplikovala, především z důvodu seznamování se s programem. V průběhu tvoření a zatěžování modelu věže jsem přicházela na nové, jiné, elegantnější postupy, jak v tomto programu pracovat a věřím, že stále budu nacházet.

Výpočet účinků zatížení pomocí výpočetních programů je pro konstruktéra nesmírnou pomocí. Vždy je však doporučeno provést kontrolu těchto výsledků na základě odborného odhadu (porovnáním s očekávanými hodnotami na základě zkušeností). V případě absence těchto zkušeností může být využito zjednodušeného ručního výpočtu. Při kontrole bylo využito silové podmínky rovnováhy ve svislém

směru a momentové podmínky rovnováhy vztažené k základně věže, kde ($z=0$). Srovnáním reakcí z tab. 4.63 a tab. 4.67 je vidět, že kontrola svislé podmínky vyšla přesně. U momentové podmínky je rozdíl mezi momenty 8423 kNm , což činí pouhých 9%. Tato odchylka je pravděpodobně způsobena zjednodušením při výpočtu destabilizujících momentů od sil u výpletu. Rameno celkové síly od větru na výplet je vztahováno k místu křížení diagonál, což je těžiště výpletu. Avšak v částech E, D a CR jsou k výpletu připočítávány diagonály, resp. výplet je tvořen pouze diagonálami o různých délkách, takže se těžiště zřejmě posouvá a při poměrně velkém rameni ($>132 \text{ m}$) dojde snadno k nepřesnostem. Tímto se tedy potvrdila správnost modelu vytvořeného v programu ANSYS.

LITERATURA

- [1] ČSN EN 1991-1-4 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-4: Obecná zatížení - Zatížení větrem, ČNI Praha, 2007.

- [2] KRÁL, Jaromír. *Navrhování konstrukcí na zatížení větrem. Příručka k ČSN EN 1991-1-4*. Informační centrum ČKAIT, Praha 2010, 112 s, ISBN 978-80-87438-053.

- [3] PIRNER, M., FISHER, O. *Zatížení staveb větrem*. Informační centrum ČKAIT, Praha, 2003, 256s, ISBN 80-86769-10-0 .

- [4] ČSN EN 1993-3-1 Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 3-1: Stožáry a komíny – Stožáry.

- [5] ČSN ISO 12494 Zatížení konstrukcí námrazou, ČNI Praha, 2007.

- [6] ANSYS Users Manual Revision 13.0, SAS Inc., 2011.

- [7] ČSN 73 0035 Zatížení stavebních konstrukcí, 1986

SEZNAM TABULEK

2.1	<i>Kategorie terénů a jejich parametry [1]</i>	11
2.2	<i>Třídy námraz (ICR) [5]</i>	23
2.3	<i>Třídy ledovky (ICG) [5]</i>	27
2.4	<i>Korelační délka L_j jako funkce amplitudy kmitání $y_F(s_j)$ [1]</i>	
4.1	<i>Macra na nakopírování čar</i>	34
4.2	<i>Macro na sjednocení vnitřních bodů diagonál</i>	35
4.3	<i>Ukázka definování průřezů prvků s námrazou</i>	35
4.4	<i>Ukázka přiřazení vlastností diagonálám v částech L, K, J a úprava orientací průřezů ve stěně číslo 3</i>	36
4.5	<i>Vstupní data</i>	38
4.6	<i>Výpočet rychlosti a dynamického tlaku větru (střední a flukтуаční složka)</i>	39
4.7	<i>Výpočet aerodynamického součinitele c_f (kolmý směr větru)</i>	41
4.8	<i>Výpočet aerodynamického součinitele c_f (diagonální směr větru)</i>	42
4.9	<i>Výpočet aerodynamického součinitele c_f pro nárožníky 1,3 (diagonální směr větru)</i>	43
4.10	<i>Ověření použití ekvivalentní statické metody</i>	44
4.11	<i>Výpočet ekvivalentní hmotnosti m_e (vlastní tíha)</i>	47
4.12	<i>Výpočet $c_s c_d$, a dynamických charakteristik</i>	47
4.13	<i>Síla F_w na nárožník (kolmý směr větru)</i>	49
4.14	<i>Síla F_w na spodní diagonálu (kolmý směr větru)</i>	49
4.15	<i>Síla F_w na horní diagonálu (kolmý směr větru)</i>	50
4.16	<i>Síla F_w na pruty výpletu (kolmý směr větru)</i>	51
4.17	<i>Síla F_w na nárožník 2,4 (diagonální vítr)</i>	54
4.18	<i>Síla F_w na nárožník 1,3 (diagonální vítr)</i>	55

4.19	Síla F_w na spodní diagonálu (diagonální vítr)	55
4.20	Síla F_w na horní diagonálu (diagonální vítr)	56
4.21	Síla F_w na pruty výpletu (diagonální vítr)	57
4.22	Ukázka macra pro zadání zatížení na uzly diagonál a nárožníků v části věže V při kolmém směru větru (zde diagonály pouze na stěnuč.4)	61
4.23	Rozměry námrazy pro nárožníky – model C (kolmý směr větru)	62
4.24	Rozměry námrazy pro diagonály – model C (kolmý směr větru)	63
4.25	Rozměry námrazy pro pruty výpletu – model C (kolmý směr větru)	64
4.26	Rozměry námrazy pro nárožníky – model B (diagonální směr větru)	66
4.27	Rozměry námrazy pro nárožníky – model F (diagonální směr větru)	66
4.28	Hmotnost námrazy pro velké prvky ($W > 300\text{mm}$)	67
4.29	Shrnutí hmotností námrazy (přídavná hmotnost)	68
4.30	Výpočet ekvivalentní hmotnosti (vlastní tíha + námraza $\theta=0^\circ$)	71
4.31	Výpočet ekvivalentní hmotnosti (vlastní tíha + námraza $\theta=45^\circ$)	74
4.32	Výpočet $c_s c_d$, a dynamických charakteristik	74
4.33	Ověření použití ekvivalentní statické metody	75
4.34	Síla F_w na nárožník (kolmý směr větru s námrazou)	75
4.35	Síla F_w na horní diagonálu (kolmý směr větru s námrazou)	66
4.36	Síla F_w na horizontální prut výpletu (kolmý směr větru s námrazou)	76
4.37	Síla F_w na nárožník typu B (diagonální vítr s námrazou)	77
4.38	Síla F_w na nárožník typu F (diagonální vítr s námrazou)	78
4.39	Síla F_w na nárožník typu C (diagonální vítr s námrazou)	79
4.40	Síla F_w na horní diagonálu (diagonální vítr s námrazou)	79
4.41	Síla F_w na horizontální prut výpletu (diagonální vítr s námrazou)	80
4.42	Rozměry a hmotnost ledovky na nárožníku	81

4.43	<i>Rozměry a hmotnost ledovky na horní diagonále</i>	82
4.44	<i>Rozměry a hmotnost ledovky na horizontálním prutu výpletu</i>	82
4.45	<i>Výpočet ekvivalentní hmotnosti (vlastní tíha + ledovka)</i>	85
4.26	<i>Ověření použití ekvivalentní statické metody</i>	85
4.47	<i>Výpočet $c_s c_d$, a dynamických charakteristik</i>	86
4.48	<i>Síla F_w na nárožník (kolmý směr větru s ledovkou)</i>	86
4.49	<i>Síla F_w na horní diagonále (kolmý směr větru s ledovkou)</i>	87
4.50	<i>Síla F_w na horizontálním prutu výpletu (kolmý směr větru s ledovkou)</i>	88
4.51	<i>Síla F_w na nárožník 1,3(diagonální směr větru s ledovkou)</i>	88
4.52	<i>Síla F_w na nárožník 2,4(diagonální směr větru s ledovkou)</i>	89
4.53	<i>Síla F_w na horní diagonálu (diagonální směr větru s ledovkou)</i>	90
4.54	<i>Síla F_w na horizon. prutu výpletu (diagonální směr větru s ledovkou)</i>	91
4.55	<i>Přehled aerodynamických součinitelů (c_f, c_i)</i>	92
4.56	<i>Přehled dynamických charakteristik z modální analýzy</i>	93
4.57	<i>Dynamické charakteristiky podle normy [1]</i>	93
4.58	<i>Srovnání vlastního tvaru kmitání</i>	94
4.59	<i>Kritérium pro vznik odtrhávání vírů</i>	99
4.60	<i>Veličiny potřebné k výpočtu $F_w(s)$ stanoveny podle [1]</i>	99
4.61	<i>Iterace k nalezení L_j a $y_{F,max}$</i>	99
4.62	<i>Výpočet $F_w(s)$ na jednotku délky</i>	99
4.63	<i>Výpočet reakcí ve svislém směru od vlastní tíhy</i>	104
4.64	<i>Výpočet destabilizujícího momentu (nárožníky a diagonály)</i>	105
4.65	<i>Výpočet destabilizujícího momentu (výplet)</i>	106
4.66	<i>Výpočet celkového destabilizujícího momentu</i>	106
4.67	<i>Reakce z programu ANSYS a moment od dvojice sil</i>	107

SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1	<i>Zvýšení rychlosti větru způsobené orografií [1]</i>	12
2.2	<i>Příkladné znázornění střední a flukтуаční složky rychlosti větru [7]</i>	13
2.3	<i>Referenční výška z_e a odpovídající profil dynamického tlaku [1]</i>	14
2.4	<i>Stanovení referenční výšky z_s [1]</i>	16
2.5	<i>K definici sekce a panelu [4]</i>	18
2.6	<i>K vysvětlení úhlu θ</i>	19
2.7	<i>Definice součinitele plnosti [1]</i>	20
2.8	<i>Definice referenční plochy [1]</i>	20
2.9	<i>Typická variabilita velikosti námrazy s výškou H nad terénem [5]</i>	22
2.10	<i>Modely narůstání námrazy [5]</i>	24
2.11	<i>Model námrazy u velkých prvků [5]</i>	26
2.12	<i>Model ledovky [5]</i>	28
2.13	<i>Korelační délka L_j pro prvek uložený kloubově na obou koncích [1]</i>	30
4.1	<i>3D Solid model věže</i>	33
4.2	<i>Typ konečného prvku – BEAM 188</i>	36
4.3	<i>Vymeshovaná část věže (panel Z)</i>	37
4.4	<i>Rychlostní profil větru</i>	40
4.5	<i>Tlakový profil větru</i>	40
4.6	<i>K objasnění problému stanovení c_f pro nárožníky 1,3</i>	44
4.7	<i>Výstupy modální analýzy (vlastní tíha)</i>	45
4.8	<i>Vlastní tvar $\Phi_{1,x}$ při $f_x=1,048$ Hz – prostorový</i>	45
4.9	<i>Vlastní tvar $\Phi_{1,x}$ při $f_x=1,048$ Hz – z posunů UX</i>	46
4.10	<i>K vysvětlení spodní a horní diagonály</i>	48
4.11	<i>Zatížení větrem kolmo na stěnu věže</i>	60

4.12	<i>Přiřazení modelů námrazy nárožníkům</i>	65
4.13	<i>Vlastní tvar $\Phi_{1,x}$ při $f_x=0,664$ Hz – prostorový (kolmý směr větru)</i>	69
4.14	<i>Vlastní tvar $\Phi_{1,x}$ při $f_x=0,664$ Hz – z posunů UX (kolmý směr větru)</i>	70
4.15	<i>Vlastní tvar $\Phi_{1,x}$ při $f_x=0,642$ Hz – prostorový (diagonální směr větru)</i>	72
4.16	<i>Vlastní tvar $\Phi_{1,x}$ při $f_x=0,642$ Hz – z posunů UX (diagonální směr větru)</i>	73
4.17	<i>Vlastní tvar $\Phi_{1,x}$ při $f_x=1,021$ Hz – prostorový</i>	83
4.18	<i>Vlastní tvar $\Phi_{1,x}$ při $f_x=1,021$ Hz – z posunů UX</i>	84
4.19	<i>Horizontální prut části M</i>	95
4.20	<i>Vymeshovaný (NDIV=20) osamostatněný horizontální prut části M</i>	96
4.21	<i>Výstup z modální analýzy</i>	96
4.22	<i>Vlastní tvar Φ_y při frekvenci $f_y=5,512$ Hz (prostorový tvar)</i>	97
4.23	<i>Vlastní tvar Φ_y při frekvenci $f_y=5,512$ Hz (z posunů UY)</i>	98
4.24	<i>ZS1 – vlastní tíha</i>	100
4.25	<i>ZS2 – kolmý směr větru (ve směru x)</i>	101
4.22	<i>ZS3 – diagonální směr větru (ISO pohled)</i>	102
4.22	<i>ZS3 – diagonální směr větru (pohled shora)</i>	103

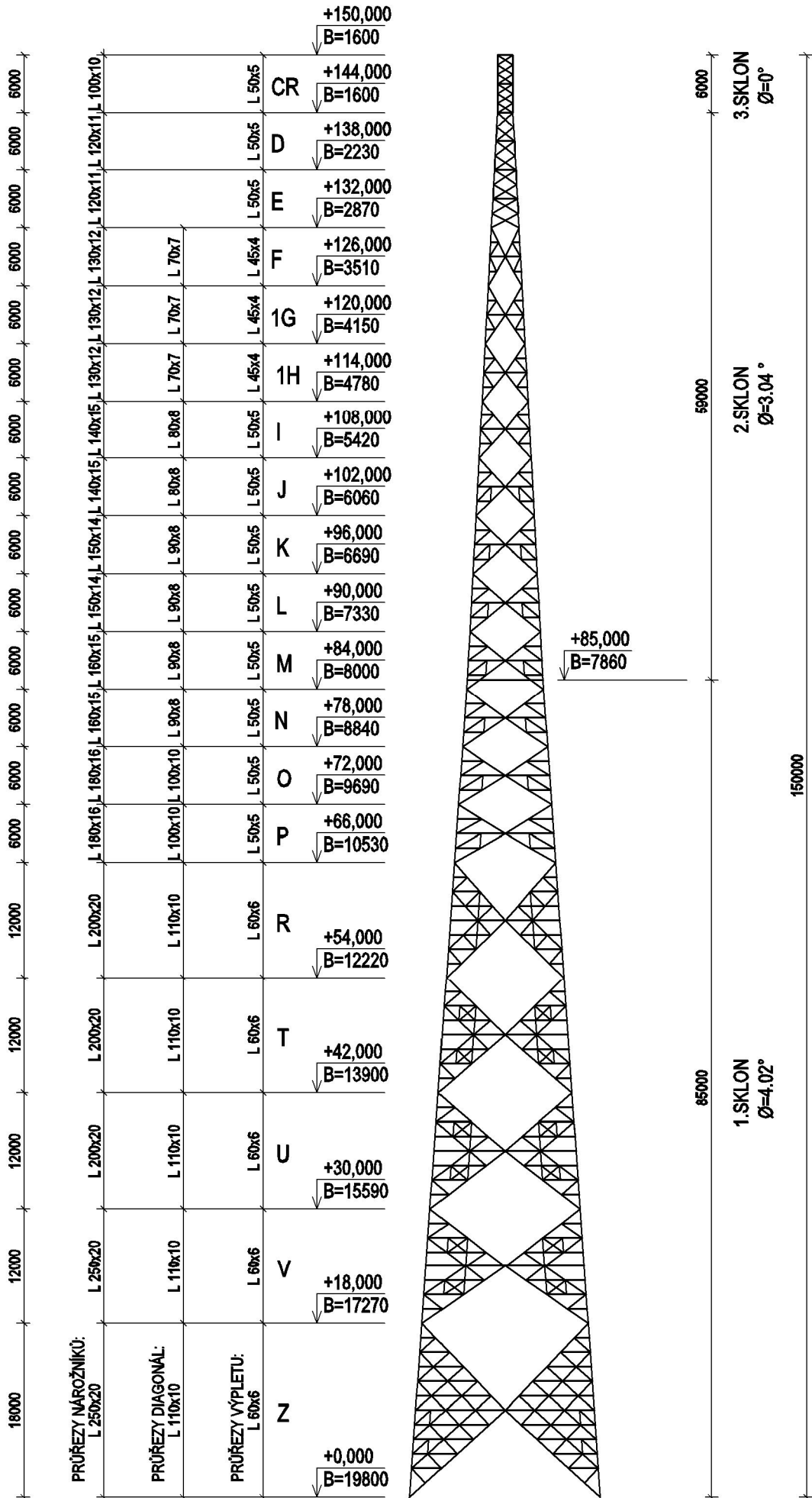
SEZNAM ZKRATEK

A	plocha
A_{ref}	referenční plocha
B^2	součinitel odezvy pozadí
F_j	budící síla při odtrhávání vírů
F_w	výsledná síla větru
H	výška topografického útvaru
I_v	Intenzita turbulence
K	součinitel tvaru kmitání
K_w	součinitel korelační délky
L	měřítka délky turbulence
L_d	skutečná délka závětrného svahu
L_e	efektivní délka návětrného svahu
L_j	korelační délka
L_u	skutečná délka návětrného svahu
R^2	rezonanční část odezvy
Sc	Scrutonovo číslo
S_L	výkonová spektrální hustota v bezrozměrném tvaru
St	Strouhalovo číslo
b	šířka konstrukce
c_{dir}	součinitel směru
c_e	součinitel expozice
c_f	součinitel síly
c_{lat}	součinitel aerodynamického buzení

C_r	součinitel drsnosti
C_o	součinitel orografie
C_{prob}	součinitel pravděpodobnosti
C_{season}	součinitel ročního období
f_L	frekvence v bezrozměrném tvaru
m_i	ekvivalentní hmotnost na jednotku délky
n_i	vlastní frekvence
$n_{1,x}$	vlastní frekvence kmitání ve směru větru
q_b	základní dynamický tlak
q_p	maximální hodnota dynamického tlaku
v_{crit}	kritická rychlost větru
v_m	střední rychlost větru
z_0	parametr drsnosti terénu
z	výška nad zemí
z_s	referenční výška pro stanovení součinitele c_{scd}
Φ	sklon návětrného svahu
$\Phi_{1,x}$	základní tvar kmitání ve směru větru,
v	očekávaná frekvence, kinematická viskozita
φ	součinitel plnosti
λ	efektivní štíhlost
θ	směr větru
ρ	měrná hmotnost vzduchu
σ_v	směrodatná odchylka turbulence
ζ	exponent tvaru kmitání

PŘÍLOHA 1 - SCHÉMA PŘÍHRADOVÉ VĚŽE

M1:600



POZNÁMKA:
Ø - SKLON VĚŽE (ÚHEL MEZI STĚNOU VĚŽE A SVISLICÍ)