



111 West 57th Street



*static
behavior*

*statické
pôsobenie*

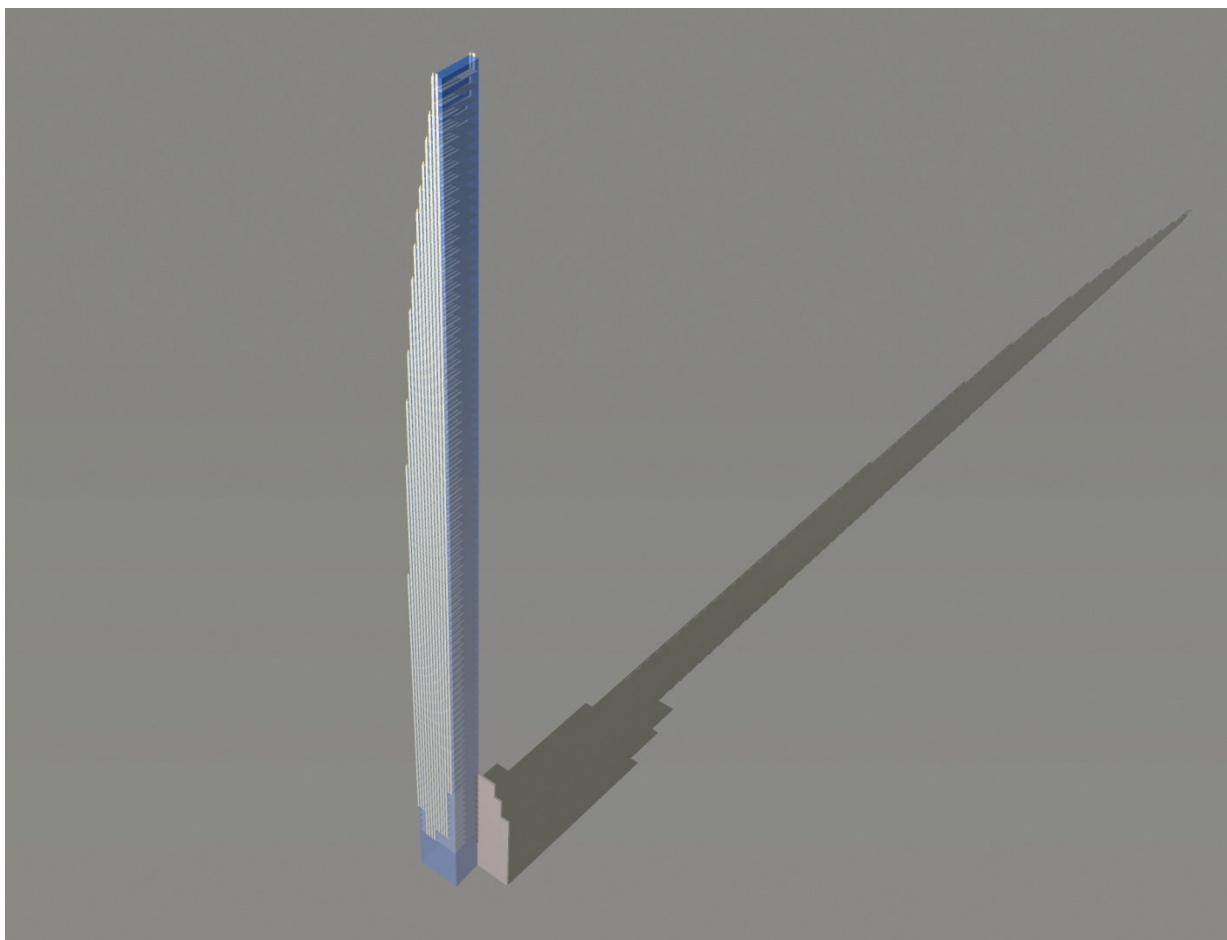
*theory,
analysis*

*Vladimír
Budinský
SSK*

Keywords: skyscraper, supertall, superslender, New York, 111 West 57th Street, Manhattan, computation, calculation, structural analysis, mrakodrap, statický výpočet, SSK

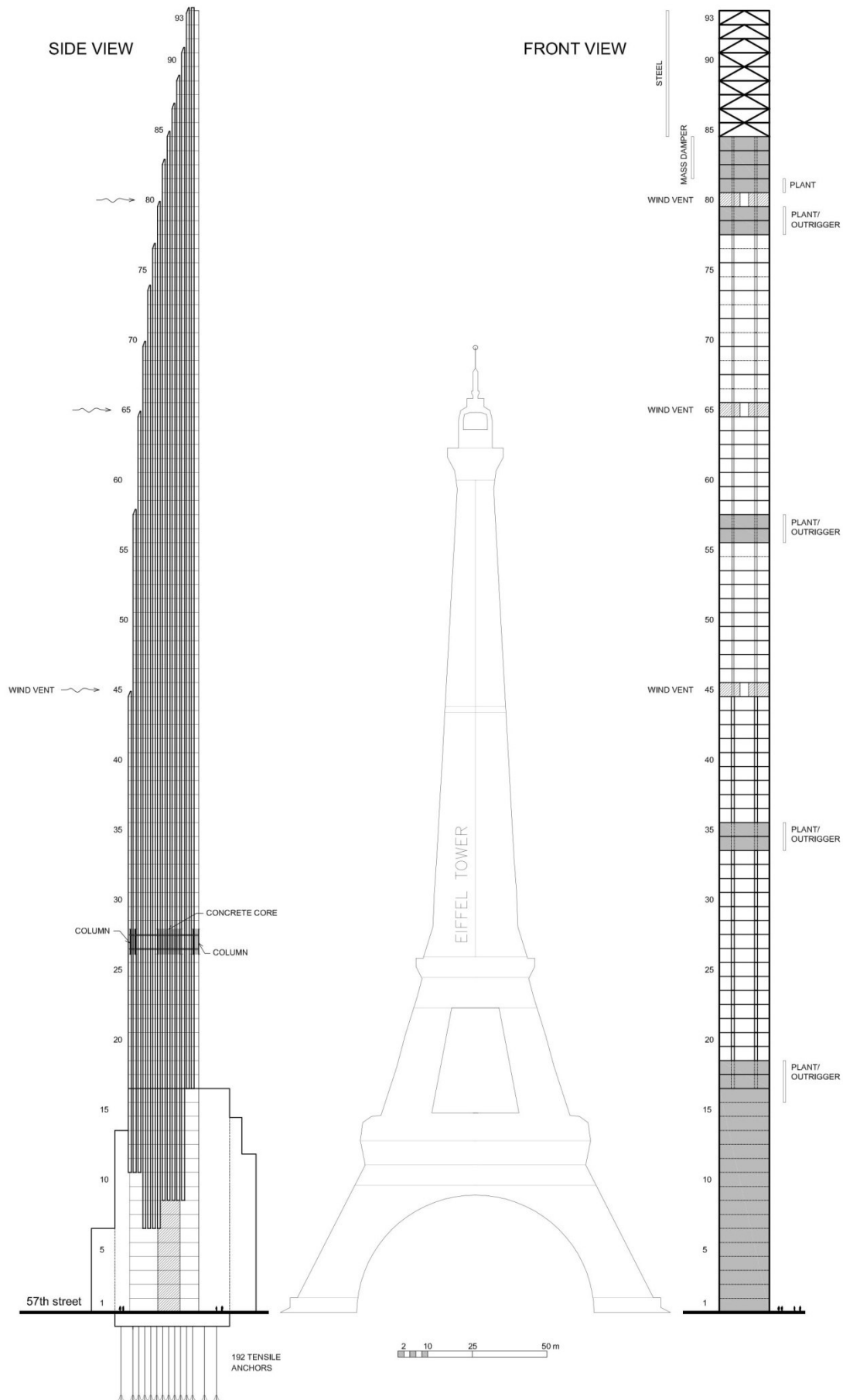
Úvod (Introduction)

111 West 57th Street tower predstavuje ďalší míľnik vo vývoji vysokých budov. Realizáciou budovy *432 Park Avenue* [5] v tej istej časti Manhattanu v roku 2015 by sa zdalo, že vývoj dosiahol svoj vrchol pri daných konštrukčných systémoch a udržateľných ekonomických podmienkach. Opak je však pravdou. Konštruktéri budovy dosiahli neuveriteľný štíhlostný pomer 1 : 24 pri zachovaní rezidenčného charakteru budovy (*432 Park Avenue* má 1 : 15). V nasledujúcom článku sa pokúsime pochopiť, ako sa im to podarilo.



Základné údaje

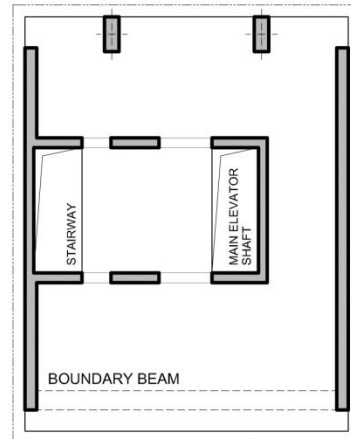
<i>Location</i>	New York, Manhattan
<i>Completion date</i>	4/2021
<i>Architect</i>	SHoP Architects
<i>Developer</i>	JDS Development Group
<i>Structural engineer</i>	WSP USA
<i>Geotechnical consultant</i>	Mueser Rutledge Consulting Engineers
<i>Wind engineering, damping</i>	RWDI
<i>Engineering Consultancy</i>	Buro Happold
<i>Height of building</i>	435 m
<i>Above-ground stories</i>	93 (theoretically)
<i>Under-ground stories</i>	1
<i>Cost</i>	2 000 000 000 \$



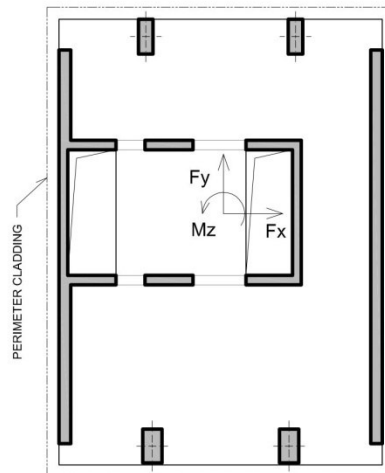
Priečny rez a pohľad

FLOOR PLANS

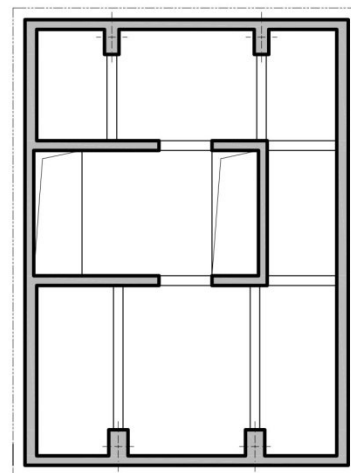
LEVEL 50



LEVEL 40



PLANT 34-35 / OUTRIGGER



Schémy pôdorysov

Spodná stavba

Počiatočná výzva pre architektov a konštruktérov bolo založenie budovy, ktoré vychádzalo z malého pozemku a existujúcej zástavby – budovy Steinway, ktorej základy bolo nutné obísť. Únosná skalná hornina vystupuje v týchto častiach Manhattanu až takmer na povrch, takže bolo možné založiť stavbu bez mimoriadnych nákladov na základovom rošte hrúbky od cca 1,5 m až po 4 m. Tlaková kapacita základovej pôdy Manhattanu sa pohybuje okolo 6500 kN/m². Ťahové sily od prevrátenia sú zachytené oceľovými skalnými kotvami v počte 192 ks, ktoré zasahujú do hĺbky 15 – 25 m.

Konštrukčné riešenie hornej stavby

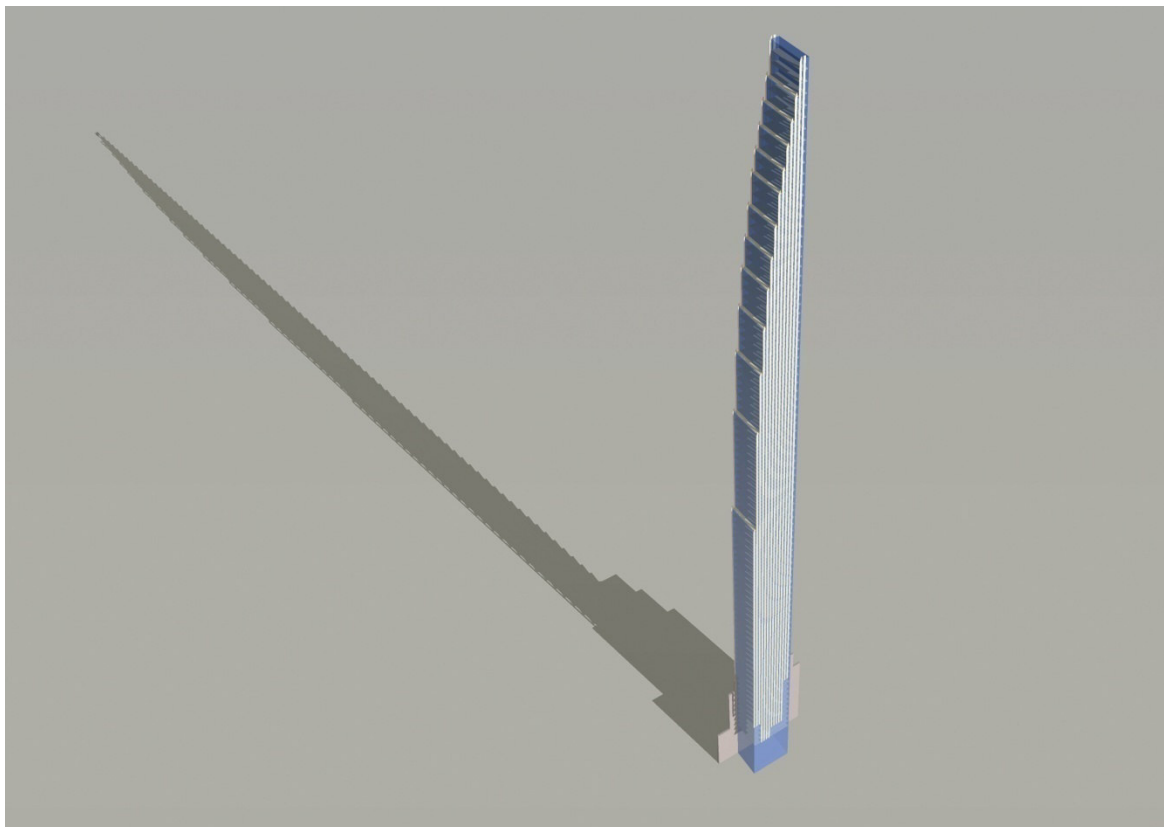
Jednoduchý, ale geniálny koncept nosného systému budovy tvoria dve krajné rovnobežné železobetónové steny (východná a západná), doplnené komunikačným jadrom, obsahujúcim schodište a 2 hlavné výt'ahy odspodu až nahor, ktoré sú niekde doplnené podružnými výt'ahmi. Severná a južná stena je celopresklená, každá doplnená dvojicou nosných stĺpov. V mieste, kde začína budova odskakovať (južná strana), sú stĺpy nahradené mohutným stropným prievlakom od steny k stene. Na 4 miestach po výške budovy sú umiestnené spravidla dvojpodlažné technologické úrovne, kde sú nosné železobetónové steny doplnené okolo celého obvodu. Tu je nosné komunikačné jadro prepojené s obvodovým nosným systémom šiestimi doplnkovými stenami (s otvormi pre dvere a inžinierske siete) na tzv. *outrigger* (výložníkový) systém. Priemerná konštrukčná výška podlažia je cca 4,7 m (na americký spôsob). Na 3 miestach po výške budovy sú situované tzv. vetrové prieduchy (na výšku celého podlažia), ktoré značne znižujú účinky vetra na budovu. Boli vyvinuté a dôsledne testované vo veternom tuneli. Taktiež bol odladený ich počet a tvar pri zachovaní akceptovateľných ekonomických dopadov na účel budovy.

Na vrchole železobetónovej časti budovy je umiestnený TMD, ladený hmotnostný tlmič. Jeho hmota sa skladá z dvoch nezávislých navzájom kolmých častí. V smere prevládajúcich vetrov má hmota 730 t a v kolmom smere 320 t.

Vysokopevnostné betóny boli dôležitým predpokladom vývoja projektu a predbežných úvah, receptúr a testov. Po výške stavby sú odstupňované odspodu nahor podľa dosahovaných pevností v tlaku

- základy, stĺpy, steny → 95,9 – 55,2 MPa
- dosky → 68,9 – 41,5 MPa

V najviac namáhaných častiach železobetónových stien a stĺpov bola použitá závitová oceľ S670/800 MPa až do ø63,5 mm, nastavovaná mechanickými spojkami, čo ušetrilo čas aj náklady.



Dôležitú časť výpočtov a kontrolných meraní na stavbe tvorili vplyvy tepelných zmien, ako aj dotvarovania a zmrašťovania v čase. Bola vytvorená stratégia kompenzácií posunov v priebehu výstavby a trvalý monitoring posunov.

Najvyššia časť budovy (45 m → 9 etáží) je zostavená ako oceľová konštrukcia. Tu sa nachádzajú rôzne technologické a osvetľovacie zariadenia, ako aj automatizovaný systém lávky na umývanie okien a fasády a ďalšie zariadenia údržby budovy.

Dispozičné riešenie

Spodné podlažia sú funkčne naviazané na existujúcu dispozíciu pôvodných budov (Steinway), zrenovované a dovybavované ďalšími funkciami. Sú tu obchodné a reštauračné priestory, konferenčné miestnosti, bazén a rôzne iné služby.

Vyššie sa nachádza celkom 68 podlaží, v ktorých je umiestnených 60 apartmánov, niektoré sú dvojpodlažné s vlastným schodiskom. Na bočných nosných stenách je po celej výške budovy zavesená unikátna fasáda, ktorej tvar a vlastnosti sú popísané v mnohých architektonických štúdiách. Zo statického hľadiska je užitočná tým, že rozbíja veterné víry. Na tejto fasáde je rozmiestnených niekoľko menších okenných otvorov, ktoré pomáhajú presvetľovať niektoré miestnosti bytového príslušenstva, ako napr. kúpeľne. Z hľadiska úbytku nosnosti na stenách majú tieto otvory zanedbateľný význam.

Výpočty

Za účelom pochopenia statického pôsobenia konštrukcie sme previedli niektoré veľmi zjednodušené prepočty budovy. Na území, na ktorom nie sú dominantné seizmické účinky, je rozhodujúca kombinácia pre celkovú stabilitu budovy a zvislé nosné prvky – zaťaženie vetrom a zvislou tiažou budovy a to hlavne dva prípady :

- maximálne účinky vetra a maximálne účinky zvislej tiaže
- maximálne účinky vetra a minimálne účinky zvislej tiaže

Hodnoty veterného zaťaženia sme stanovili z *ASCE 7-02 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures* [3].

Výsledky sme porovnali s údajmi z veterného tunela, ktorých časť sme mali k dispozícii [4], znázornili ich graficky, pričom údaje sa približne prekrývali. Seizmické zaťaženie v tejto lokalite dosahuje vzhľadom na stabilnú oblasť menšie hodnoty.

Zavedenie **návrhových kombinácií** do nášho zjednodušeného výpočtu v zmysle čl. 2.3.2 zdroja [3], kde D – *death load*, W – *wind load* :

1. $1.2D + 1.6W$
2. $0.9D + 1.6W$
3. $D + W$ *displacement*

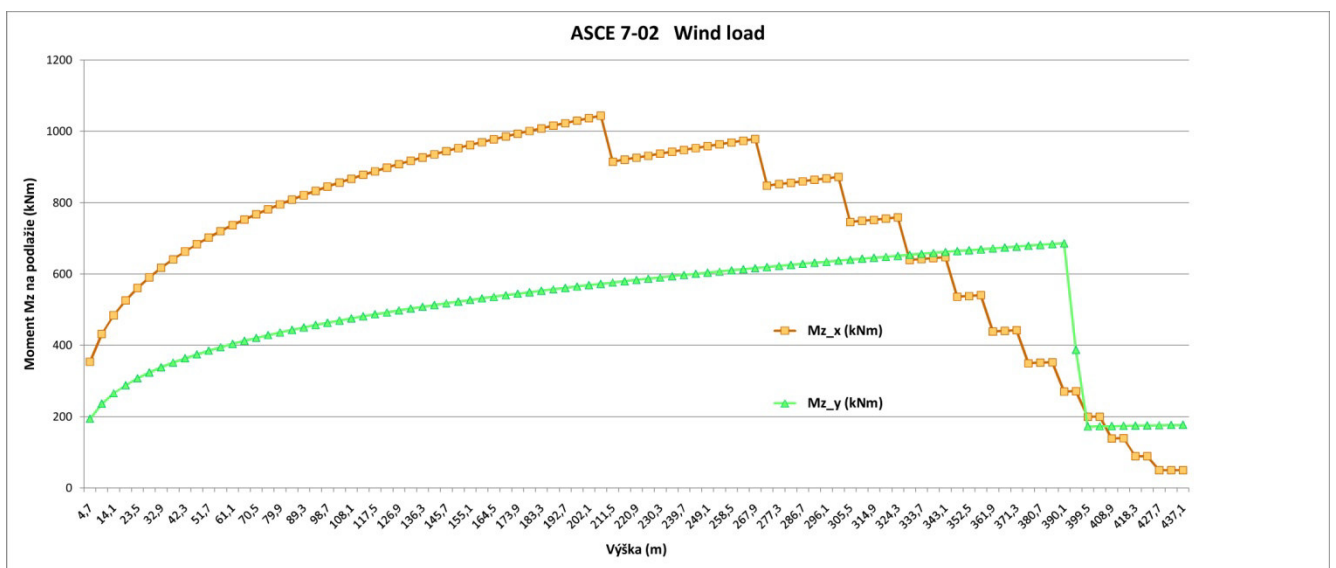
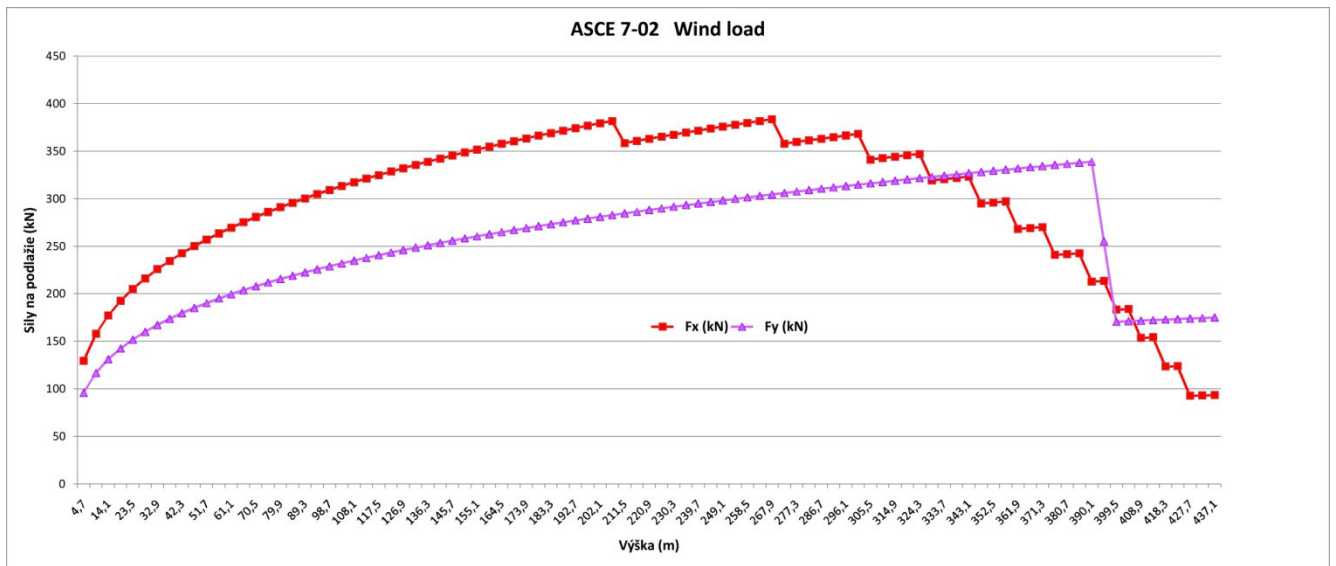
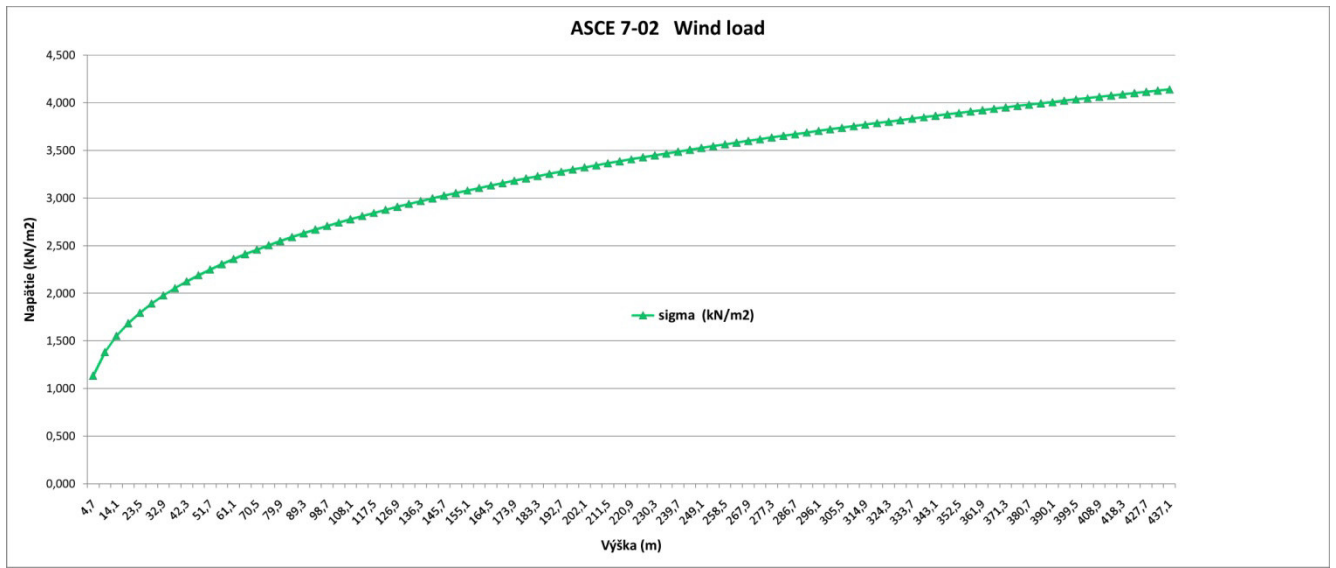
Účinky vetra zavedieme na budovu ako ekvivalentné sily pomocou vzorca 6.5.10 zdroja [3]:

$$F_{w_i}^k = 0.613 * K_z * K_t * K_d * V^2 * I * G_f * C_f * A_{ij} \quad SI [N] \quad \text{kde}$$

$K_z = 2.01 * (z_i/z_g)^{(2/\alpha)}$	je súčiniteľ výšky
z_g, α	konštanty z tabuľky 6-2 pre expozíciu B
K_t, K_d	súčinitele terénu a smeru = 1.0
V	základná rýchlosť vetra podľa mapy $V = 45 \text{ m/s}$
I	kategória dôležitosti budovy – III (nad 300 osôb) $I = 1.15$
G_f	<i>Gust effect factor</i> – interakcia turbulencií vetra v pozdĺžnom smere s podajnou konštrukciou budovy, vyšiel nám 0.807
C_f	koeficient tvaru, individuálne sme zohľadnili súčiniteľ λ pre voľné konce prúta
A_{ij}	plocha, na ktorú pôsobí sila $F_{w_i}^k$, index k značí charakteristické zaťaženie

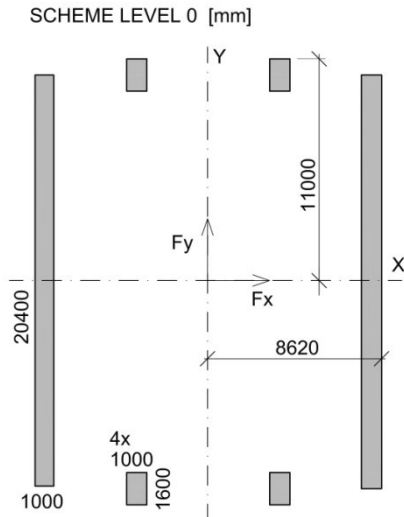
Kombinácie účinkov na budovu sa zavedú podľa *Figure 6-9* zdroja [3]

Výsledky výpočtov síl, momentov a napätí od vetra sú znázornené v nasledujúcich grafoch :



Kontrolný predvýpočet tvaru nosných prvkov a ich napätí

Výpočet urobíme na idealizovanom zjednodušenom pôdoryse, aby sme zistili, či vzniknuté napätia budú realizovateľné. Zaťaženia budú vietor a vlastná tiaž budovy. Zanedbávame pritom plochu jadra, ktoré bude v konečnom dôsledku pôsobiť v prospech namáhania.



Celkové kontrolné momenty od vetra k úrovni 0,00 :

$$M_y = \sum F_x * z_i = 5\,976\,044 \text{ kNm} \quad i = 0 \dots 93$$

$$M_x = \sum F_y * z_i = 5\,623\,648 \text{ kNm}$$

$$\text{Zvislé zaťaženie } N = \sum R_z = 1\,048\,584 \text{ kN}$$

Čísla hore predstavujú charakteristické hodnoty.

$$I_y = 1/12 * 20,4 * (17,24^3 - 15,24^3) = 2694 \text{ m}^4$$

stĺpy okolo osi Y zanedbávame

$$I_x = 1/6 * 20,4^3 * 1 + (20,4/2)^2 * 1\text{m} * 1,6\text{m} * 4\text{ks} = 2081 \text{ m}^4$$

$$A = 20,4 * 1 * 2 + 1,6 * 1 * 4 = 47,2 \text{ m}^2$$

Posúdenie v smere osi X :

$$\sigma_N = -1048584/47,2 = -22216 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_M = 5976044 * 8,62/2694 = \pm 19122 \text{ kN/m}^2$$

D – design value

$$\sigma_{\max(-)}^D = -22216 * 1,2 - 19122 * 1,6 = -57254 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{\max(+)}^D = -22216 * 0,9 + 19122 * 1,6 = 10601 \text{ kN/m}^2$$

Posúdenie v smere osi Y :

$$\sigma_N = -1048584/47,2 = -22216 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_M = 5623648 * 11/2081 = \pm 29726 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{\max(-)}^D = -22216 * 1,2 - 29726 * 1,6 = -74221 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{\max(+)}^D = -22216 * 0,9 + 29726 * 1,6 = 27457 \text{ kN/m}^2$$

$$N_{\max(+)}^{(+)} = 27457 * 1\text{m} * 1,6\text{m} = 43931 \text{ kN} \quad \text{ťahová sila na stĺp}$$

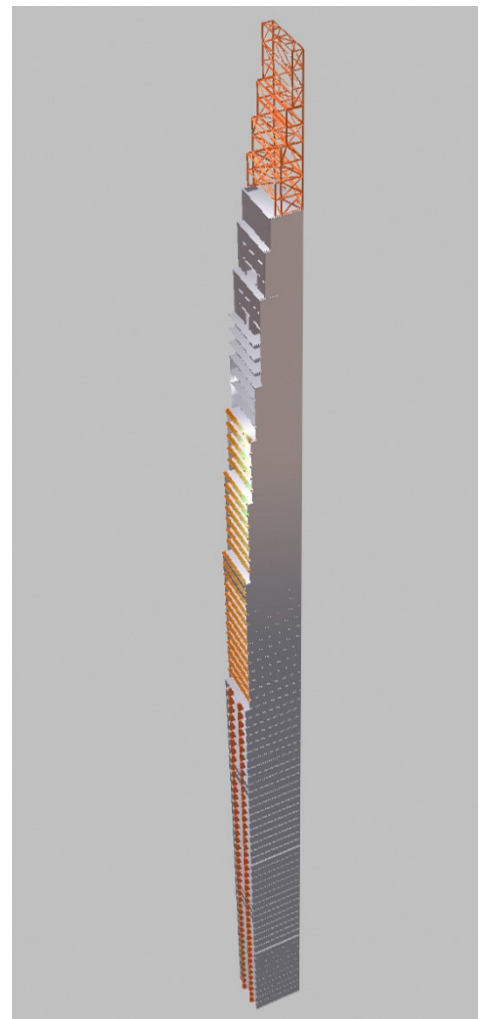
Výpočet potrebného percenta vystuženia :

$$\mu(\%) = N_{\max(+)}^{(+)} * \gamma_M * 100 / (f_{yk} * b * h)$$

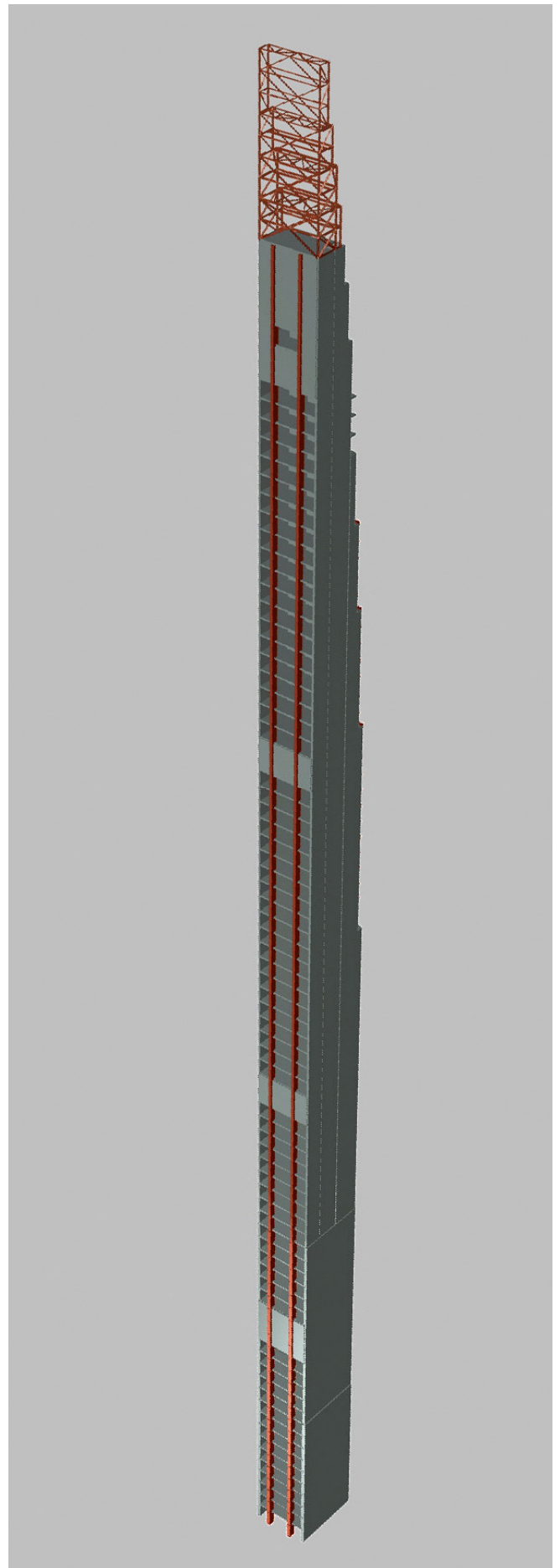
$$\mu(\%) = 43931 * 1,15 * 100 / (670000 * 1,6\text{m} * 1\text{m}) = 4,71\%$$

Na zníženie percenta vystuženia pod 4,0 treba zväčšiť stĺp na rozmer $b \times h = 1,8\text{m} \times 1,1\text{m}$ ($\mu = 3,81\%$).

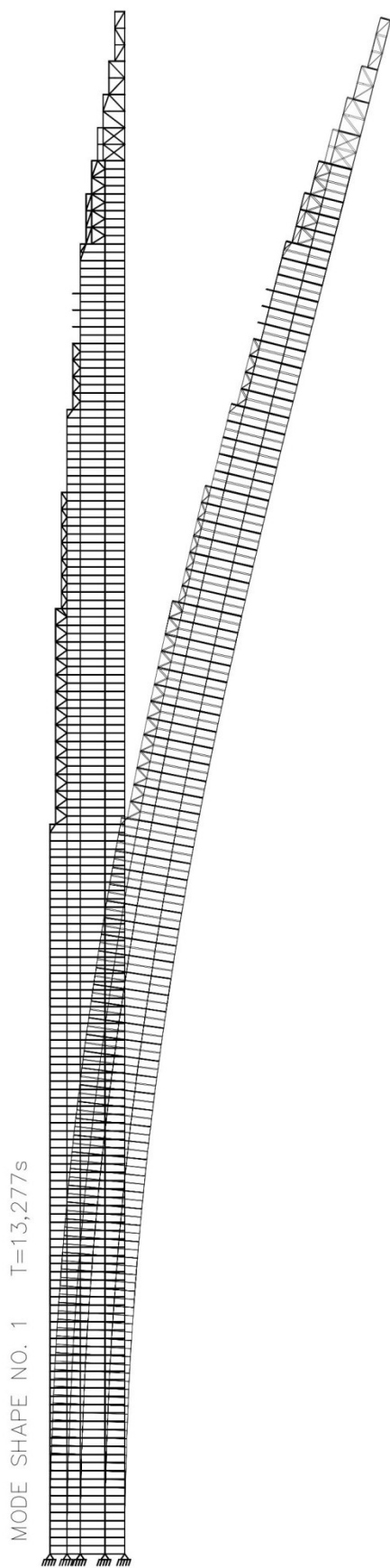
Výpočet preukázal realizovateľnosť prierezov pre vysokopevnostný betón a výstuž 670/800 MPa, je možné pokračovať v podrobnom výpočte. →



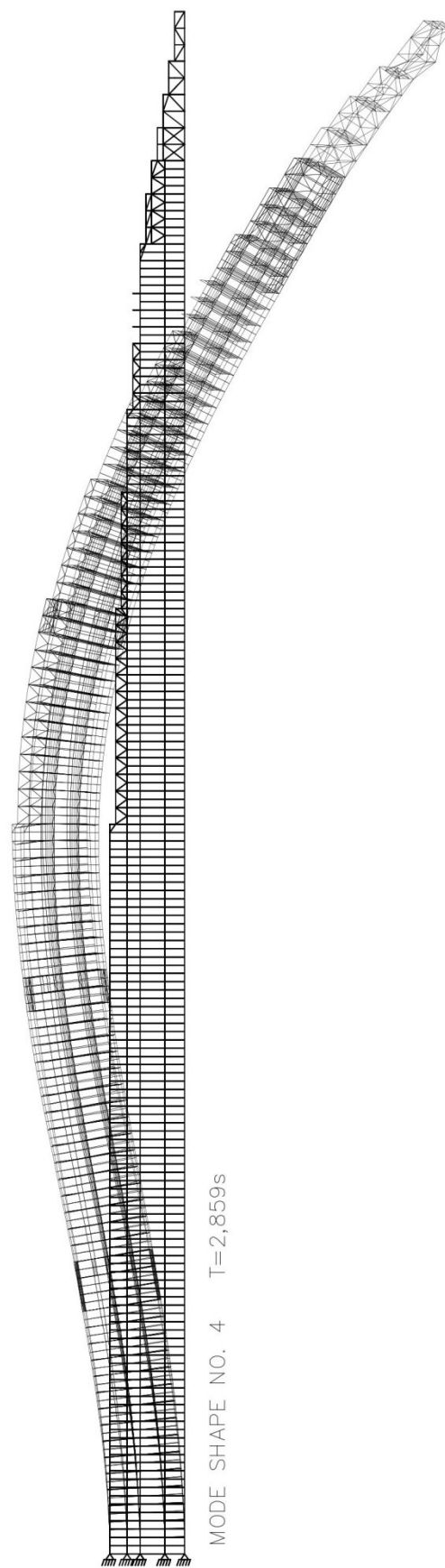
Výpočtový model konštrukcie v programe STRAP



Výpočtový model konštrukcie v programe STRAP



$f(1) = 0,075 \text{ Hz}$



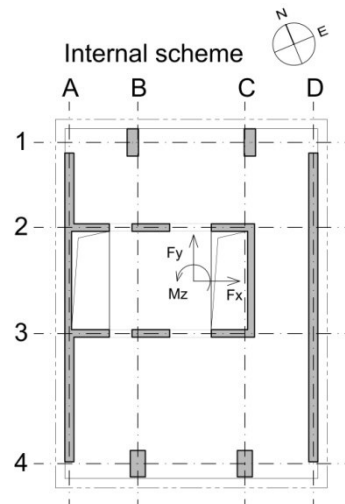
$f(4) = 0,349 \text{ Hz}$

Vybrané vlastné frekvencie a tvary

Dynamické charakteristiky konštrukcie:

Vlastné frekvencie

Mode No.	Natural Frequency [s ⁻¹]	Period [s]	Shape	Direction
1	0.0753	13.277	/	Y
2	0.0754	13.268	/	X
3	0.3020	3.31	O	
4	0.3500	2.859	S	Y
5	0.3725	2.68	O	
6	0.6567	1.520	SS	X
7	0.8629	1.160	SS	Y
8	0.9106	1.1	OS	



Vybrané výsledky v stĺpoch :

stĺp	výška (m)	N	Mx	My	Vx	Vy	T	kombinácia	Extrém	HxB [mm]	[kN, kNm]	číslo komb.
C4	0	-103164	3044	90	30	294	49	ULS (MSÚ)	E1	2000x1100		6
C4	0	-8172	364	1963	143	18	11	ULS (MSÚ)		2000x1100		5
B1	0	28340	2440	60	2	44	32	ULS (MSÚ)	E2	2000x1100		7
C4	112,8	-66608	1743	191	64	414	2	ULS (MSÚ)		1800x800		6
B1	112,8	15842	1512	248	118	191	1	ULS (MSÚ)		1800x800		7
B1	0	1300	1448	117	12	21	20	charakteristická	E1	2000x1100		2
B1	0	-38194	182	177	40	15	0	kvázistála	E1	2000x1100		8

Posúdenie vybraných stĺpov :

S E A N SECTIONAL ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE MEMBERS (C)SSK 2015
Eurocode No.2 EN 1992-1-1

I N P U T D A T A

Name of the combination : **Na_výšku**
Combination (cross section, reinforcement, load) : 1 1 1

CONCRETE CROSS SECTION

Point number	X (m)	Y (m)	Coordinates right half of polygon
1	0.000	0.100	
2	0.550	0.100	
3	0.550	2.100	
4	0.000	2.100	

Effective length Lo = 9.40 m

MATERIAL OF THE CROSS SECTION : concrete C90 fck = -90000 kN/m2
fcd = -60000 kN/m2

CONCRETE REINFORCEMENT

No	X(m)	Y(m)	(mm) diameter	(GPa) Es	(MPa) ftk(+)	(MPa) fyk (-)	name
1	-0.440	0.220	63	205	670	-670	steel S670/800
2	-0.320	0.220	63	205	670	-670	steel S670/800
21	-0.430	1.100	63	205	670	-670	steel S670/800
22	0.430	1.100	63	205	670	-670	steel S670/800

COEFFICIENTS

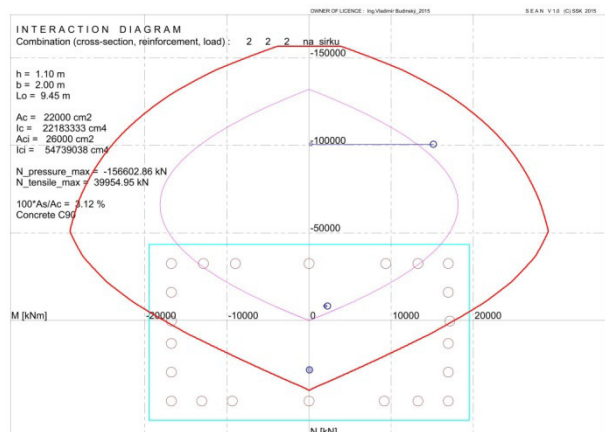
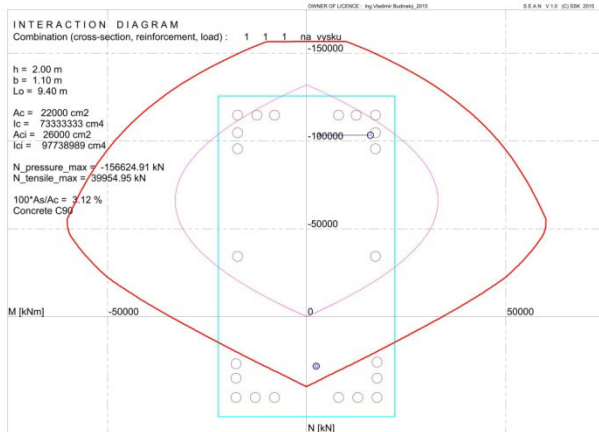
Partial factor gama concrete : 1.50
Partial factor gama steel : 1.15
Mquasi-permanent / Mu1s : 0.75
Creep factor (t,to) : 3.00
Ultimate strain - concrete : 0.0035
Ultimate strain - steel : 0.020

PERCENTAGE OF REINFORCEMENT

Top and bottom reinforcement : 3.12%
Top reinforcement : 1.42%
Bottom reinforcement : 1.42%
Radius of gyration is : 78.09 cm

LOADING CASES

N (kN)	M (kNm)	Mbuckl. (kNm)	Mr (kNm)	x_Mr (m)	result	name
28340.00	2441.00	2441.00	10267.13	0.05	O.K.	B1_comb7
-103200.00	3045.00	16035.17	46940.66	1.63	O.K.	comb6



S E A N SECTIONAL ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE MEMBERS (C) SSK 2015

Eurocode No.2 EN 1992-1-1

I N P U T D A T A

Name of the combination : **Na šírku**
Combination (cross section, reinforcement, load) : 2 2 2

CONCRETE CROSS SECTION

Point number	X (m)	Y (m)	Coordinates right half of polygon
1	0.000	0.100	
2	1.000	0.100	
3	1.000	1.200	
4	0.000	1.200	

Effective length $L_o = 9.45$ m

MATERIAL OF THE CROSS SECTION : concrete C90 $f_{ck} = -90000$ kN/m²
 $f_{cd} = -60000$ kN/m²

CONCRETE REINFORCEMENT

No	X(m)	Y(m)	diameter (mm)	E_s (GPa)	$f_{tk}(+)$ (MPa)	$f_{yk}(-)$ (MPa)	name
1	-0.860	0.220	63	205	670	-670	steel S670/800
2	-0.670	0.220	63	205	670	-670	steel S670/800
...							
21	-0.860	0.720	63	205	670	-670	steel S670/800
22	0.000	1.080	63	205	670	-670	steel S670/800

COEFFICIENTS

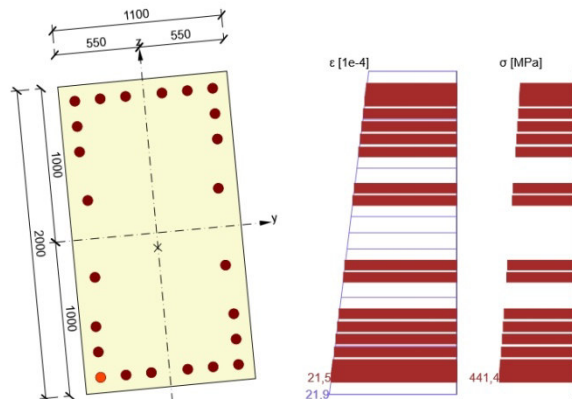
Partial factor $\gamma_{concrete}$: 1.50
Partial factor γ_{steel} : 1.15
Mquasi-permanent / M_{ult} : 0.75
Creep factor (t, t_0) : 3.00
Ultimate strain - concrete : 0.0035
Ultimate strain - steel : 0.020

PERCENTAGE OF REINFORCEMENT

Top and bottom reinforcement : 3.12%
Top reinforcement : 1.28%
Bottom reinforcement : 1.28%
Radius of gyration is : 36.04 cm

LOADING CASES

N (kN)	M (kNm)	Mbuckl. (kNm)	M_r (kNm)	x_{M_r} (m)	result	name
-100553.00	206.00	15148.90	23929.71	0.87	O.K.	B4_comb6
28340.00	60.00	60.00	5533.00	0.05	O.K.	B1_comb7
-8172.00	1963.00	2262.64	20615.55	0.25	O.K.	C4_comb5



Obmedzenie napätia, dvojsoý ohyb → extrém E2 – program Idea StatiCa

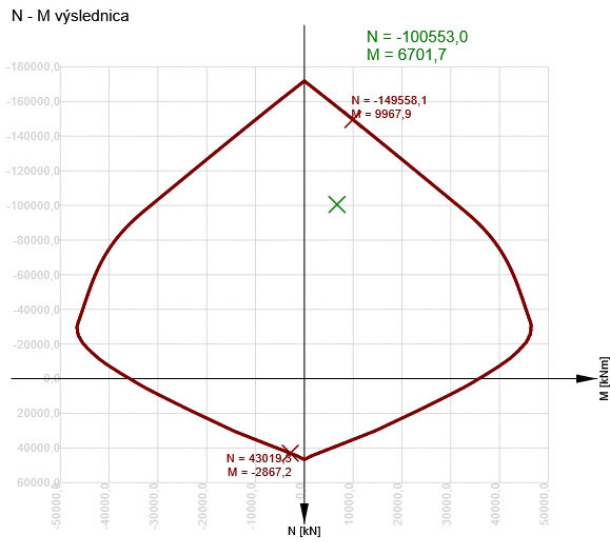
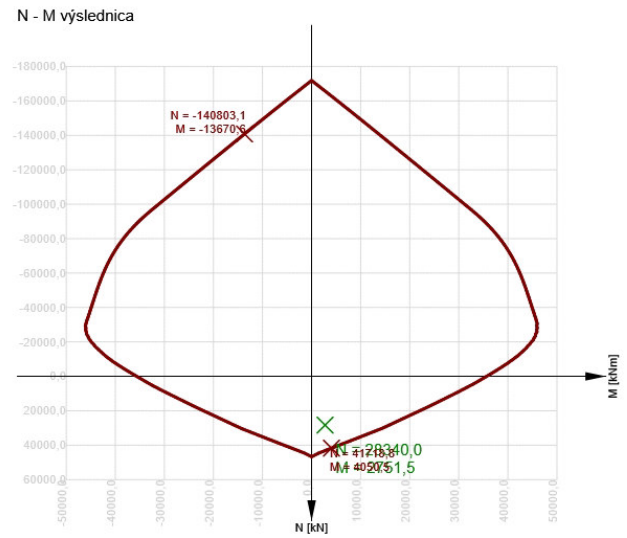
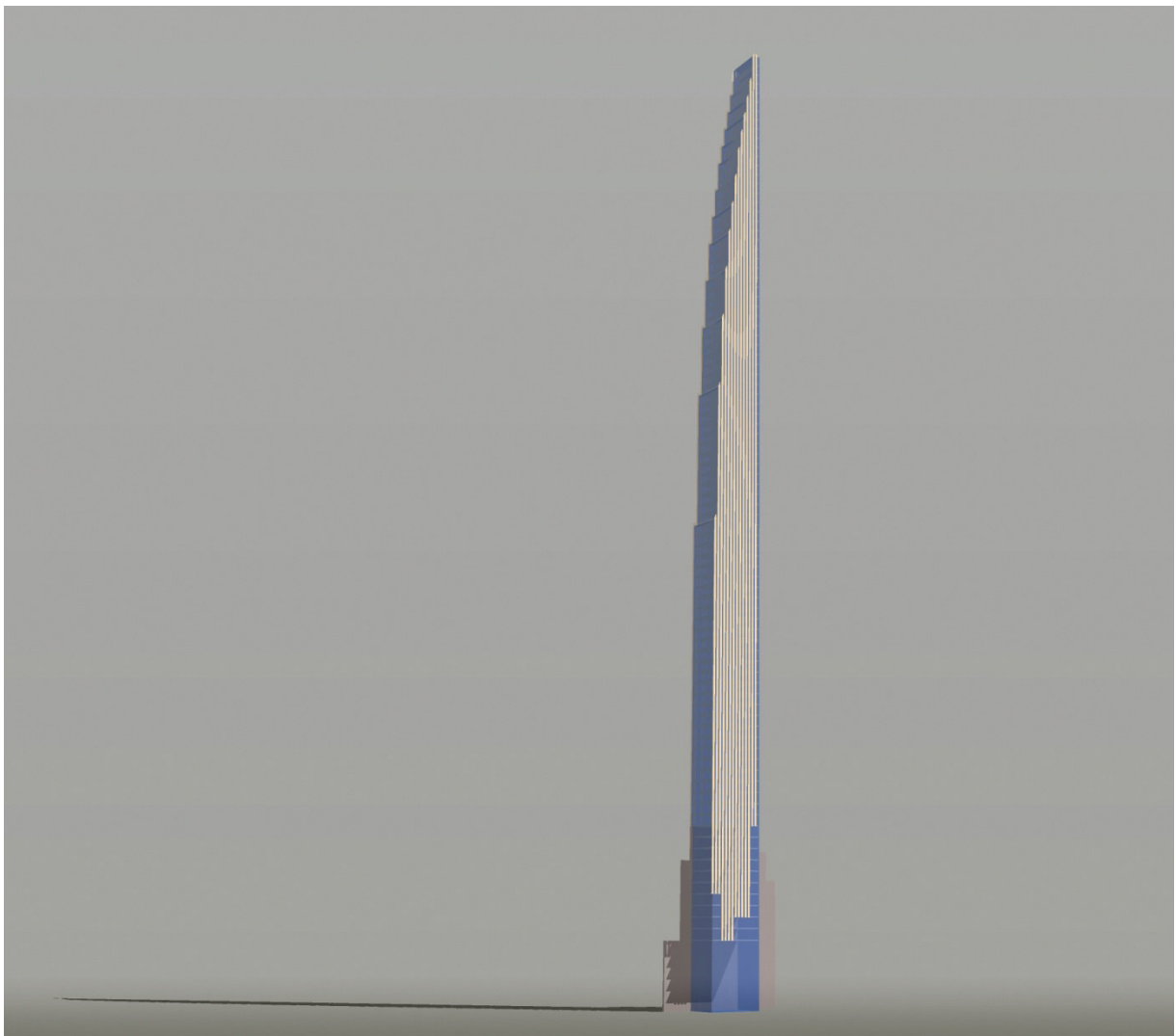


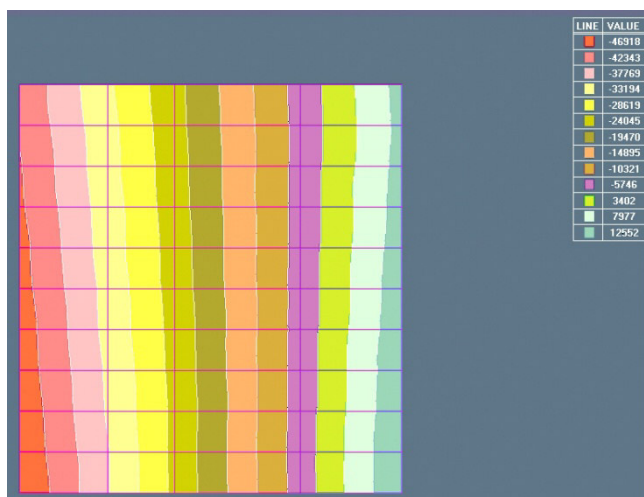
Diagram N-M MSÚ – extrém E1

program Idea StatiCa



– extrém E2





Priebeh zvislého napätia [kN/m²]
v stene D 1–4 vo výške 4,7–28,2 m
od kombinácie č. 6 – Vietor východo
západný (pohľad zvonku)

Záver

Na začiatku bola myšlienka využitia malého pozemku v excelentnej lokalite New Yorku. Bola tu otázka, čo so staršou nižšou zástavbou, ktorá mala historické väzby až do roku 1925. Kompromisom bolo renovovať staršie budovy a začleniť ich do nového konceptu. Bol vytvorený architektonický, konštrukčný a inžiniersko–technický tím, ktorý využil nazhromaždené získané vedomosti prostredníctvom predchádzajúcich skúseností, vylepšené o pokroky v konštrukčnej praxi posledných rokov. Tím musel použiť inovatívne postupy, veľkú dávku invencie a urobiť nespočetné dôkladné analýzy. Výsledná koncepcia superštíhlej supervysoké budovy (*superslender, supertall*, ako to miestni radi označujú) by nebola možná bez využitia najnovších vysokopevnostných materiálov a predovšetkým bez tvorivej spolupráce všetkých zúčastnených profesií.

Niektoré **zdroje**, použité pri tvorbe článku:

- [1] Engineering the supertall and superslender 111 West 57th, FATI H YALNIZ Author from WSP Global Inc., CONCRETO & Construções | Ed. 99 | Jul – Sept / 2020
Publisher: IBRACON: Instituto Brasileiro do Concreto
- [2] https://en.wikipedia.org/wiki/111_West_57th_Street
- [3] ASCE 7-02 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, U. S. Standard
- [4] Structural peer review statement, William J. Faschan, Leslie E. Robertson Associates, 9/2014, NY
- [5] 432 Park Avenue, Statické pôsobenie budovy, Vladimír Budinský, 2/2018, www.budinskyssk.sk

Všetky obrázky a prepočty v tomto príspevku sú pôvodné a nekopírované.
Pri zostavovaní článku boli použité nasledovné **počítačové programy** :

STRAP, Idea StatiCa, SEAN, SketchUp, AutoCad LT, Microsoft Word, Microsoft Excel, PDF Creator, Corel Draw

