

# 432 Park Avenue

*statické  
pôsobenie*

*static  
behavior*

*Vladimír Budinský SSK*

*theory, analysis*

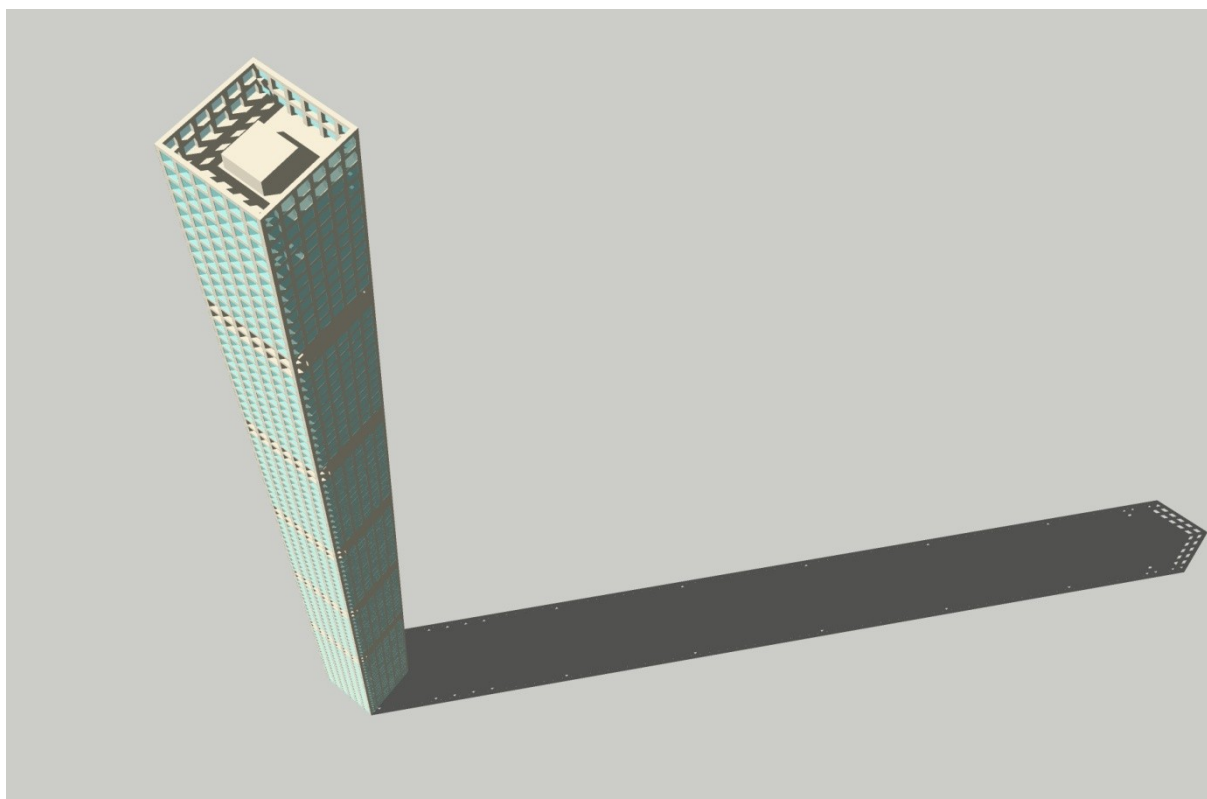
## Úvod

V New Yorku je veľa mrakodrapov. Aj po celom svete. Ale tento je prelomový. Je to určitý míľnik v stavbe budov a ich statickom pôsobení. Vyčnieva vysoko ponad ostatné budovy a ohromuje svojou štíhlosťou. Ako je to vôbec možné, že stojí? Na prizemí má rovnakú pôdorysnú plochu, ako na najvyššom podlaží. Žiadne hrubánske múry, žiadne mohutné oceľové íčka. Elegantná jednoduchosť. Je pravda, že dole sú stĺpy a steny trochu hrubšie ako hore, ale len trochu. V ďalšom texte sa pokúsime objasniť, ako môže takáto konštrukcia fungovať. Ako nástroj k tomu použijeme zjednodušené prepočty a komerčne dostupné statické programy. Na hlbšiu analýzu nemáme čas ani finančné prostriedky. Oveľa viac by vedeli napísať ľudia, ktorí boli priamo zainteresovaní na projekte a výstavbe, no z pochopiteľných príčin uvoľnia len toľko informácií, koľko to bude pre nich výhodné z obchodného hľadiska a na ktoré sa neviažu uzavreté zmluvné vzťahy. Všetky informácie, ktoré sme získali k našim prepočtom a zobrazeniam, sú z verejne dostupných zdrojov a sú bežne prístupné na webe.

Vysoká budova má ešte jednu dôležitú devízu: Je to žijúca, ekonomicky sebestačná stavba, žiadne štátne dotácie, ani nezmyselné prestížne preteky ropných šejkov.

K úspešnému výslednému dielu prispelo viacero faktorov:

- osvietenosť investora
- vysoká estetická hodnota návrhu a disciplína architekta
- vysoká odbornosť a kreativita konštrukčných inžinierov
- dokonalé využitie najnovších vedeckých poznatkov a úrovne normových predpisov, hlavne v oblasti nosných konštrukcií a veterného inžinierstva
- využitie vysokopevnostných materiálov, najmä betónu a betonárskej ocele
- dokonalá receptúra betónovej zmesi
- jednoduché a účinné riešenia, bez okázalosti a maniery



## Tímy a osoby zúčastnené na výstavbe (výber)

Vlastník :	56th and Park (NY) Owner, LLC
Developer :	CIM Group; Macklowe Properties (Harry Macklowe)
Architekt :	Rafael Viñoly
Statika :	WSP Cantor Seinuk Schlaich Bergermann und Partner
Vietor :	RWDI
Ladený hmotnostný tlmič (TMD) :	ITT Enidine
Betónové konštrukcie :	Roger & Sons, BASF, DOKA, PERI
Výstuž :	SAS Stressteel Inc.
Zakladanie :	Mayrich

## Základné parametre budovy

Výška :	425,5 m
Pôdorys :	28,5 x 28,5 m
Počet nadzemných podlaží :	90 (niektoré sú zdvojené alebo strojené)
Výška podlažia :	4,725 m
Štíhlosť :	1 : 15
Funkcia budovy :	obytná
Lokalita :	New York
Konštrukčný materiál :	železobetón
Začiatok výstavby :	2011
Koniec výstavby :	2015

## Nosná konštrukcia

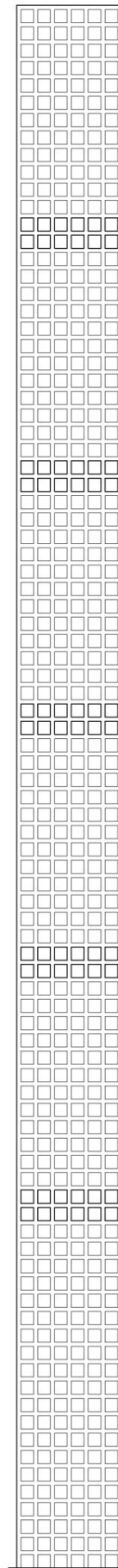
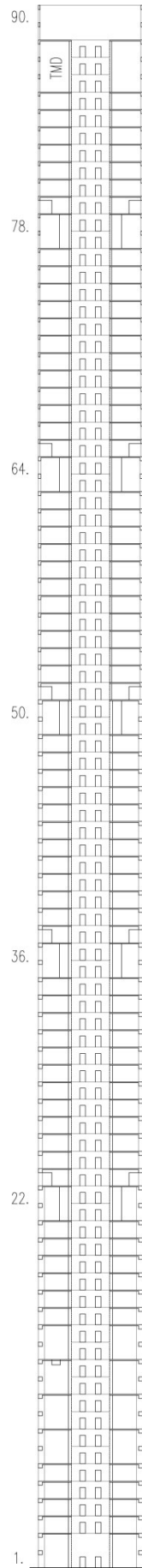
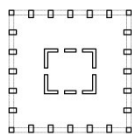
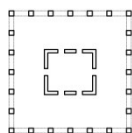
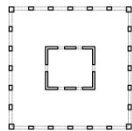
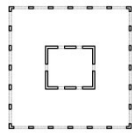
Základ nosnej konštrukcie tvoria dva prvky: Vnútorne betónové jadro s rozmermi 12 x 10,5 m a hrúbkou 760 mm (spodná časť) a vonkajšia betónová rámová konštrukcia zo stĺpov a prievlakov, zvonka ako pohľadový betón bez ďalšieho opláštenia. Pravidelné okenné otvory rozmerov  $b \times h$  cca 3,4 x 3,6 m (po 6 na jednom priečeli) sú v piatich dvojpodlažných úrovniach po výške budovy nezasklené, čím umožňujú voľný priechod vetru a výrazne znižujú zaťaženie vetrom. Jadro je v týchto miestach opláštené aerodynamickjším valcovým tvarom. Napr. v Eurokóde *Zaťaženie vetrom* je takýto prípad ošetrený súčiniteľom  $\lambda$  pre voľné konce prúta. Nad každým vetrovým priechodom (rovnako v piatich úrovniach cca po 66,15 m) je jadro spojené s vonkajším rámom zosilnenou tuhou konštrukciou tzv. *outrigger*. Spolupôsobenie jadra a plášťa cez *outrigger* tvorí výrazný stabilizujúci konštrukčný prvok sústavy, známy aj z iných (napr. aj hybridných) sústav.

Bežná hrúbka monolitických stropov je 254 mm, v niektorých miestach z rôznych dôvodov zosilnená až na 460 mm. Základný rozmer  $b \times h$  stĺpov a prievlakov je 1120 x 1120 mm, spodné stĺpy sú cca po prvý vetrový prieduch zväčšené na 1120 x 1630 mm. Rozmery vyšších prvkov sa postupne znižujú až na cca 500 mm, okrem vonkajších rozmerov držiacich jednotnú architektonickú líniu 1120 mm.

V 86. – 88. podlaží pri dvoch vynechaných stropoch sú umiestnené (ako to už v štíhlych nových mrakodrapoch býva zvykom) dva ladené hmotnostné kyvadlové tlmiče o celkovej hmotnosti 1300 t. Tieto tlmiče výrazne zvyšujú komfort bývania obmedzením nadmerných deformácií a zrýchlení, avšak konštrukcia musí podľa predpisov na medzný stav únosnosti fungovať aj bez nich.

Keďže únosná skalná hornina vystupuje v týchto miestach až takmer na povrch, budova je založená v treťom podzemnom podlaží na bežných železobetónových pásových základoch, ktoré sú navyše ukotvené ťahovými skalnými kotvami. (*Poznámka:* Tento článok sa nezaobrá výpočtom základov a podzemných podlaží)

Parametre základných materiálov: **Betón** v hrubom prepočte  $f_{ck} = 96$  MPa,  $E = 53$  GPa. Fa BASF začala pracovať na vývoji betónovej zmesi a prísad 8 mesiacov pred výstavbou, vrátane analýzy ekologických vplyvov a vplyvov na dopravu. Biely portlandský cement sa privážal až z Dánska pre jeho stále vlastnosti. Pod  $-4^{\circ}\text{C}$  sa už nebetónovalo. Rozdelenie pevnosti betónu po výške: do 40 podlaží  $f_{ck} = 96$  MPa, 40÷51 podlaží  $f_{ck} = 82$  MPa, nad 51 podlaží  $f_{ck} = 68$  MPa. Ako základná nosná **výstuž** na exponované prvky (stĺpy, jadro, prievlaky) bola použitá závitová vysokopevnostná oceľ S670/800 o priemere  $\varnothing = 63,5$  mm. Výhodou tejto drahšej ocele bolo nadpájanie prútov na závit. V celkovom ekonomickom prepočte (aj vzhľadom na prácnosť) vyšla potom táto oceľ lacnejšie, ako bežná rebierková betonárska oceľ.



## Zaťaženia

Vzhľadom k zásadnému zjednodušeniu výpočtu sa v ďalšom zaoberáme len zaťažienami a kombináciami, ktoré vedú k určení rozhodujúcich rozmerov konštrukcie, a tieto zaťaženia sú vietor a hmotnosť konštrukcie. Keďže nemáme k dispozícii výsledky z vetrového tunela, opierame sa o dôležitú normu, odporúčania ktorej by mali byť tiež dodržané. Je to *ASCE 7-02 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures* [1]. Seizmické zaťaženie v tejto lokalite dosahuje vzhľadom na stabilnú oblasť menšie hodnoty. Pri zavedení ekvivalentného zaťaženia zodpovedajúceho cca zrýchleniu  $0,66 \text{ m/s}^2$  podľa EC 7 nedosahovalo namáhanie prierezov ani 50 % namáhania od vetra. Ďalšie typy zaťažení, ktoré je nutné vziať minimálne do úvahy pri podrobnom výpočte sú: tepelné rozdiely jadro-fasáda, zmrašťovanie a dotvarovanie vo fázach výstavby a užívania, eliminácia výchyľok a zrýchlení od zaťaženie vetrom, priečne kmitanie budovy od fluktuácií vetra, zaťaženie pri požiari, pri náraze a iné. Zavedenie **návrhových kombinácií** do nášho zjednodušeného výpočtu v zmysle čl. 2.3.2 zdroja [1], 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 [1]:

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

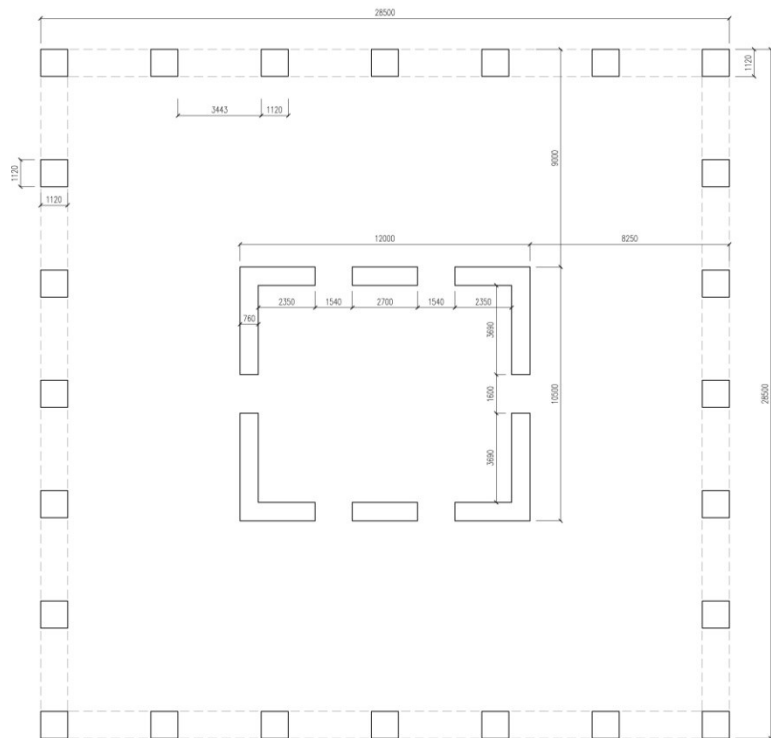
$K_z = 2.01 * (z_i/z_g)^{(2/\alpha)}$	je súčiniteľ výšky
$z_g, \alpha$	konštanty z tabuľky 6–2 pre expozíciu B
$K_t, K_d$	súčinitele terénu a smeru = 1.0
$V$	základná rýchlosť vetra podľa mapy $V = 54 \text{ m/s}$
$I$	kategória dôležitosti budovy – III (nad 300 osôb) $I = 1.15$
$G_f$	<i>Gust effect factor</i> – interakcia turbulencií vetra v pozdĺžnom smere s podajnou konštrukciou budovy, vyšla nám 0.805, preto zavádzame konzervatívnu hodnotu 0.85
$C_f$	koeficient tvaru, individuálne sme zohľadnili súčiniteľ $\lambda$ pre voľné konce prúta
$A_{ij}$	plocha, na ktorú pôsobí sila $F_{w_i}^k$ , index $k$ značí charakteristické zaťaženie

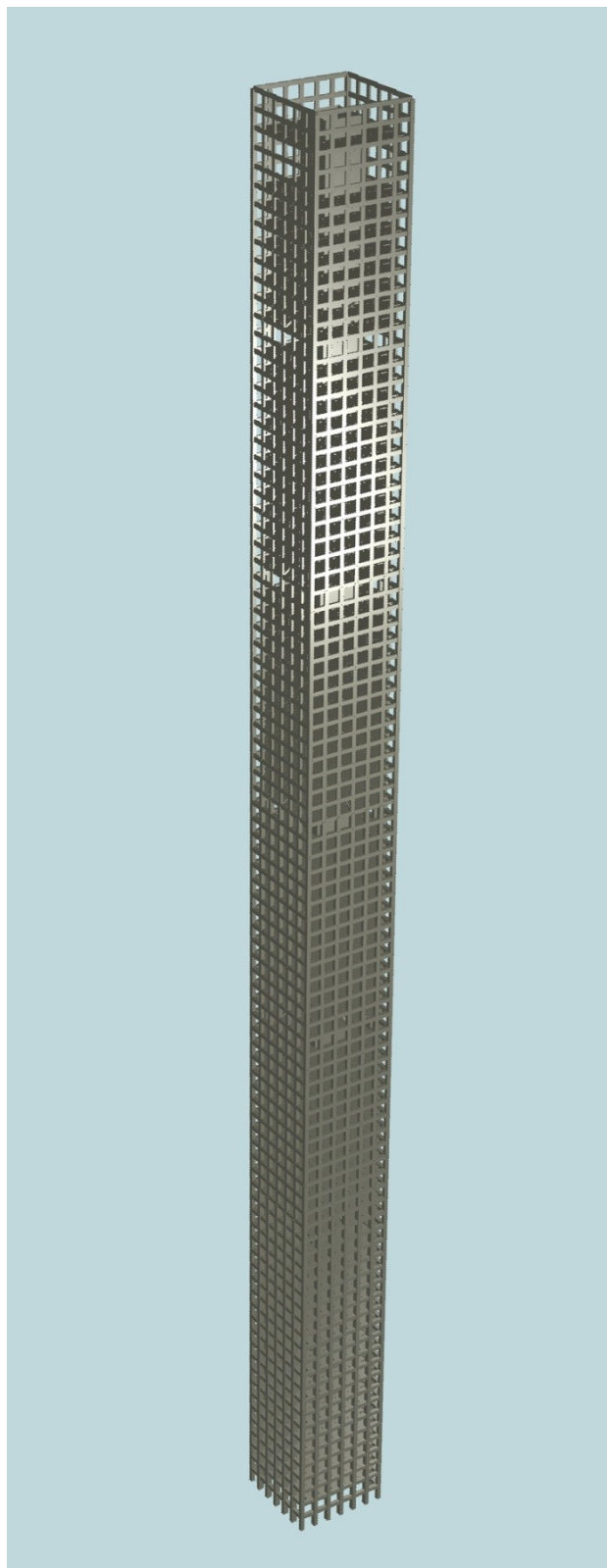
Výpočet sily pre výšku 425.25 m

$$F_{w_6}^k = 0.613 * 2.01 * (425.5/365.76)^{(2/7)} * 1.0 * 1.0 * 54^2 * 1.15 * 0.85 * 1.7 * A_i \quad [N]$$

$$F_{w_6}^k = 6230 * A_{6j} [m^2] \quad [N]$$

## Typické podlažie – nosná konštrukcia





Výpočtový model konštrukcie v programe STRAP

## Výsledky výpočtu

Maximálna výchylka vo vrchole budovy  $y = 2.6 \text{ m}$   $1/164 < 1/150$

Vybrané extrémne návrhové kombinácie vnútorných síl:

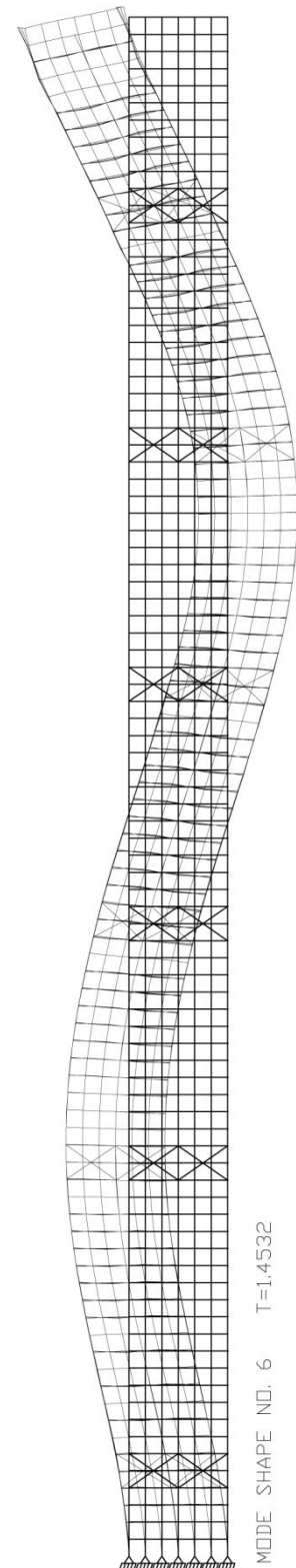
Stĺpy	$N^+_{\text{max}} = 32\,387 \text{ kN}$ $M = 6\,386 \text{ kNm}$	1. Podlažie $1120 \times 1680 \text{ mm}$ $L_o = 9.45 \text{ m}$
	$N^-_{\text{max}} = -142\,833 \text{ kN}$ $M = 6\,860 \text{ kNm}$	
Prievlaky	$M = 13\,150 \text{ kNm}$ $Q = 5\,800 \text{ kN}$	$1120 \times 1120 \text{ mm}$
Jadro	$N^-_{\text{min}} = -657\,035 \text{ kN}$ $M = 3\,821\,773 \text{ kNm}$	1. Podlažie $L_o = 4.725 \text{ m}$
	$N^-_{\text{max}} = -787\,296 \text{ kN}$ $M = 3\,821\,773 \text{ kNm}$	

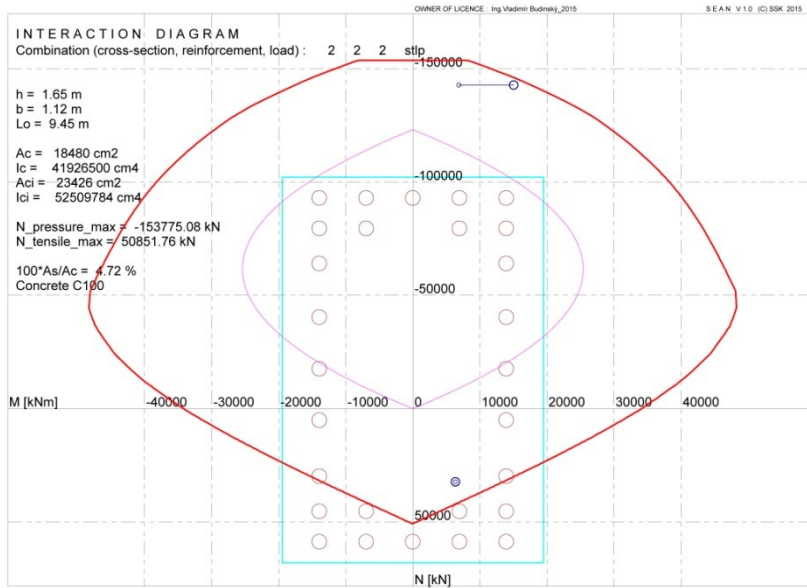
Dynamické charakteristiky konštrukcie:

### Vlastné frekvencie

Mode No.	Natural Frequency [ $s^{-1}$ ]	Period [s]	Shape
1	0.0789	12.53391	/
2	0.0816	12.25402	/
3	0.3113	3.21266	(
4	0.3132	3.19290	(
5	0.4200	2.38109	O
6	0.6881	1.45320	S
7	0.6915	1.44610	S
8	0.9915	1.00862	O
9	1.1181	0.89438	SS
10	1.1209	0.89210	SS

Na ďalších stranách nasleduje dimenzovanie niektorých rozhodujúcich prierezov v zmysle zásad eurokódov pre medzné stavy únosnosti. Výsledky slúžia len pre hrubé porovnanie, aby sme videli, v akých hladinách napätí sa pohybujeme a či sú prierezy vôbec dimenzovateľné. S posúdením vyplýva, že prierezy sú využité až na samú hranicu únosnosti a stupňa vystuženia. Na výsledky vplýva množstvo faktorov, ako napr. do akej expozície veterného prostredia je budova zaradená a pod. V tomto zmysle zohrávajú určite rozhodujúcu úlohu výsledky analýz z vetrového tunela. Konštruktéri statiky museli riešiť množstvo anomálií, ktoré im predkladali architekti a technologickí profesisti, ako napr. redukciu počtu stĺpov v jednej stene prízemí a ďalšie zálužnosti, ktorým sme sa my alibisticky vyhli.





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 : **STLP**  
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	0.560	0.100	
3	0.560	1.750	
4	0.000	1.750	

Effective length Lo = 9.45 m

MATERIAL OF THE CROSS SECTION : concrete C100 fck = -100000 kN/m<sup>2</sup>  
fcd = -66667 kN/m<sup>2</sup>

CONCRETE REINFORCEMENT

No	X (m)	Y (m)	(mm) diameter	(GPa) Es	(MPa) ftk(+)	(MPa) fyk (-)	name
1	0.000	0.190	63	200	670	-670	steel S670/800
2	0.200	0.190	63	200	670	-670	steel S670/800
.							
28	0.400	0.470	63	200	670	-670	steel S670/800

COEFFICIENTS

Partial factor gama concrete : 1.50  
Partial factor gama steel : 1.15  
Mquasi-permanent / Muls : 0.75  
Creep factor (t,t0) : 3.00  
Ultimate strain - concrete : 0.0035  
Ultimate strain - steel : 0.020

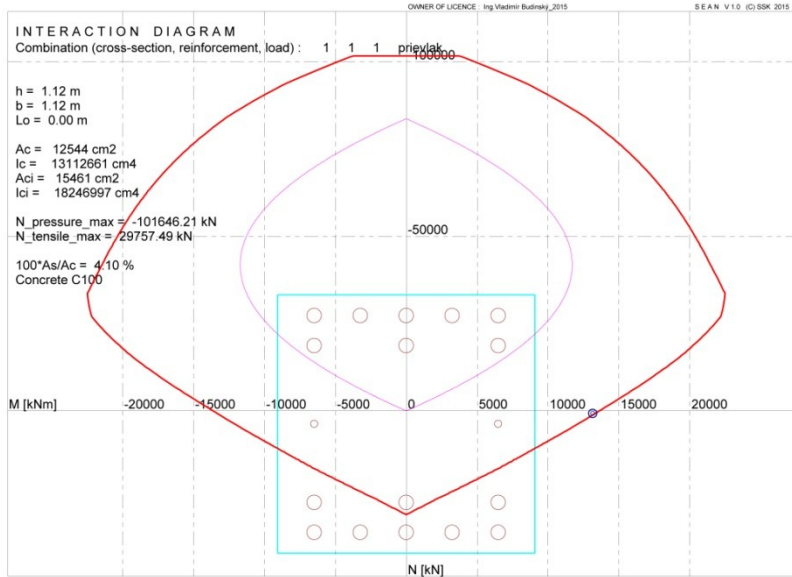
PERCENTAGE OF REINFORCEMENT

Top and bottom reinforcement : 4.72% CHECK !  
Top reinforcement : 1.86%  
Bottom reinforcement : 1.86%  
Radius of gyration is : 57.79 cm

LOADING CASES

N (kN)	M (kNm)	Mbuckl. (kNm)	Mr (kNm)	x_Mr (m)	result	name
-142833	6860.00	15047.85	17643.28	1.88	O.K.	
32387.0	6386.00	6386.00	13418.58	0.10	O.K.	





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 : **PRIEVLAK**  
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	0.560	0.100	
3	0.560	1.220	
4	0.000	1.220	

Effective length  $Lo = 0.00$  m

MATERIAL OF THE CROSS SECTION : concrete C100  $f_{ck} = -100000$  kN/m<sup>2</sup>  
 $f_{cd} = -66667$  kN/m<sup>2</sup>

CONCRETE REINFORCEMENT

No	X (m)	Y (m)	(mm) diameter	(GPa) Es	(MPa) ftk(+)	(MPa) fyk (-)	name
1	0.000	0.190	63	200	670	-670	steel S670/800
2	0.200	0.190	63	200	670	-670	steel S670/800
.							
16	0.400	1.000	63	200	670	-670	steel S670/800
17	-0.400	0.660	32	200	500	-500	steel B500B
18	0.400	0.660	32	200	500	-500	steel B500B

COEFFICIENTS

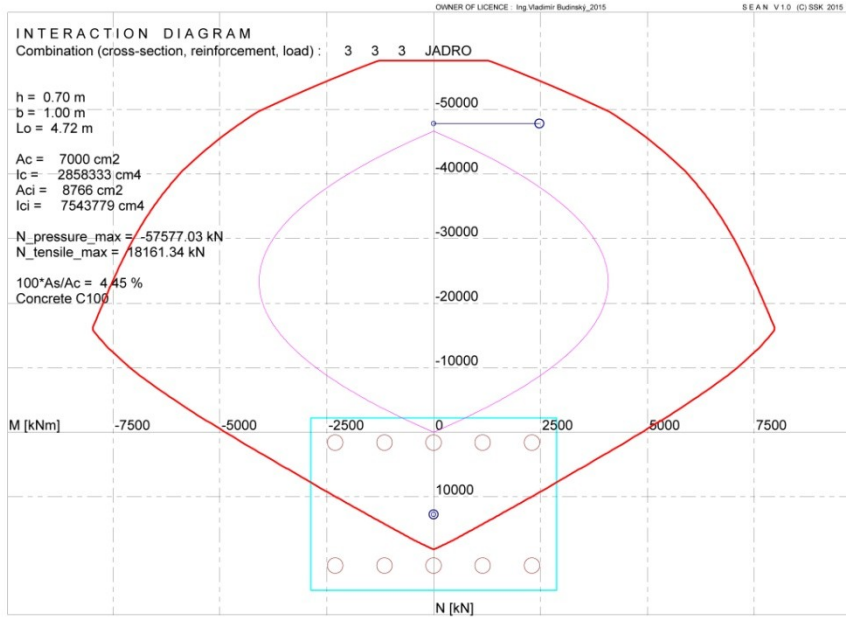
Partial factor  $\gamma$  concrete : 1.50  
Partial factor  $\gamma$  steel : 1.15  
Mquasi-permanent / Muls : 0.75  
Creep factor (t,t0) : 3.00  
Ultimate strain - concrete : 0.0035  
Ultimate strain - steel : 0.020

PERCENTAGE OF REINFORCEMENT

Top and bottom reinforcement : 4.10% CHECK !  
Top reinforcement : 1.99%  
Bottom reinforcement : 1.99%  
Radius of gyration is : 41.92 cm

LOADING CASES

N (kN)	M (kNm)	Mbuckl. (kNm)	Mr (kNm)	x_Mr (m)	result	name
750.0	13150.00	13150.00	13323.08	0.18	O.K.	



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 : **JADRO**  
Combination (cross section, reinforcement, load) : 3 3 3

CONCRETE CROSS SECTION

Point number	X (m)	Y (m)	Coordinates right half of polygon
1	0.000	0.100	
2	0.500	0.100	
3	0.500	0.800	
4	0.000	0.800	

Effective length Lo = 4.725 m

MATERIAL OF THE CROSS SECTION : concrete C100 fck = -100000 kN/m<sup>2</sup>  
fcd = -66667 kN/m<sup>2</sup>

CONCRETE REINFORCEMENT

No	X (m)	Y (m)	(mm) diameter	(GPa) Es	(MPa) ftk(+)	(MPa) fyk (-)	name
1	0.400	0.200	63	200	670	-670	steel S670/800
2	-0.400	0.200	63	200	670	-670	steel S670/800
.							
10	0.400	0.700	63	200	670	-670	steel S670/800

COEFFICIENTS

Partial factor gama concrete : 1.50  
Partial factor gama steel : 1.15  
Mquasi-permanent / Muls : 0.75  
Creep factor (t,t0) : 3.00  
Ultimate strain - concrete : 0.0035  
Ultimate strain - steel : 0.020

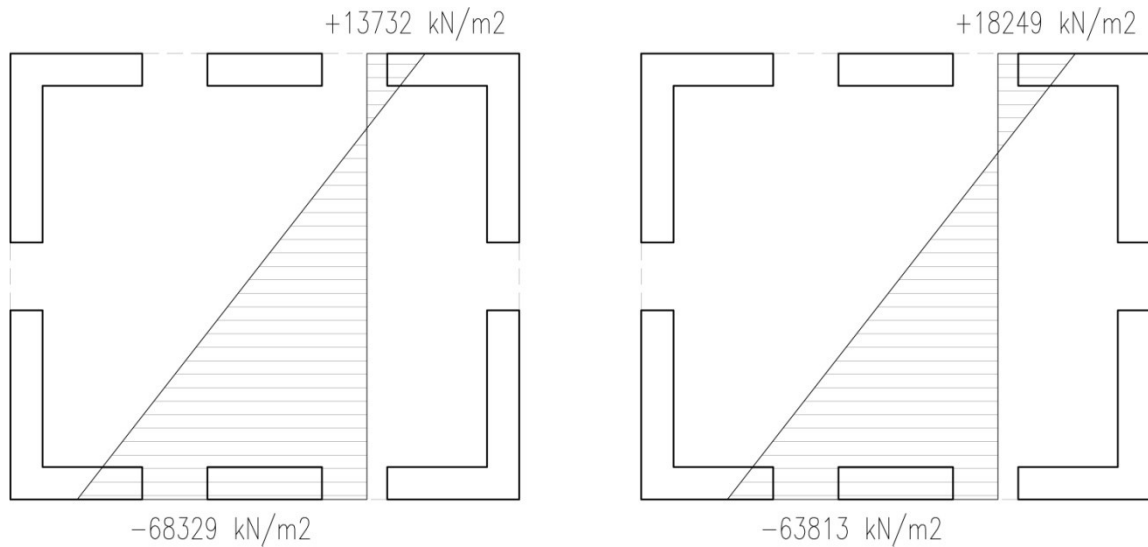
PERCENTAGE OF REINFORCEMENT

Top and bottom reinforcement : 4.45% CHECK !  
Top reinforcement : 2.23%  
Bottom reinforcement : 2.23%  
Radius of gyration is : 25.00 cm

LOADING CASES

N (kN)	M (kNm)	Mbuckl. (kNm)	Mr (kNm)	x_Mr (m)	result	name
-47830.00	0.00	2474.52	4525.77	0.70	O.K.	
12774.00	0.00	0.00	1551.66	0.05	O.K.	

Hraničné napätia v železobetónovom jadre – prízemie:



Posúdenie prievlaku na maximálnu priečnu silu v ráme  $V_{ed} = 5800$  kN, ktorá vychádza niekde v štvrtine výšky budovy. Navrhli by sme štvorstržižné strmene hrúbky 16 mm v rozteči 14 cm z ocele  $f_y = 500$  MPa.

STN EN 1992-1-1

Clauses : 6.2 Shear, 9.2.2, 9.3.2

©SSK II/2015

[www.budinskyssk.sk](http://www.budinskyssk.sk)

## Design of shear reinforcement

### Input data

Strength of concrete $f_{ck}$ [MPa]	≤ 60	60	(+)
Design shear force $V_{Ed}$ [kN]		5800,0	(+)
Minimum width $b_w$ [mm] (for 1000 is defined as slab)		1120	BEAM
Effective depth $d$ [mm]		1050	
Area of tension reinforcement $A_{st}$ [cm <sup>2</sup> ]		155,00	
Inclination of shear reinforcement to member axis $\alpha$ [°]		90	45°÷90°
Inclination of concrete struts $\theta$ [°]		22,0	21.8°÷45°
Stress $\sigma_{cp} = N_{Ed}/A_c$ [MPa] < $f_{ck}/\gamma_c$		0	(+) pressure
Diameter of stirrups $\phi_s$ [mm]		16	
Characteristic yield stress of reinforcement $f_{yk}$ [MPa]		500	(+)
Coefficient for lever arm of internal forces (e.g. $0.9 \cdot d$ )		0,90	
Number of legs of stirrup "n"		4	[ ] [ ]

### Text

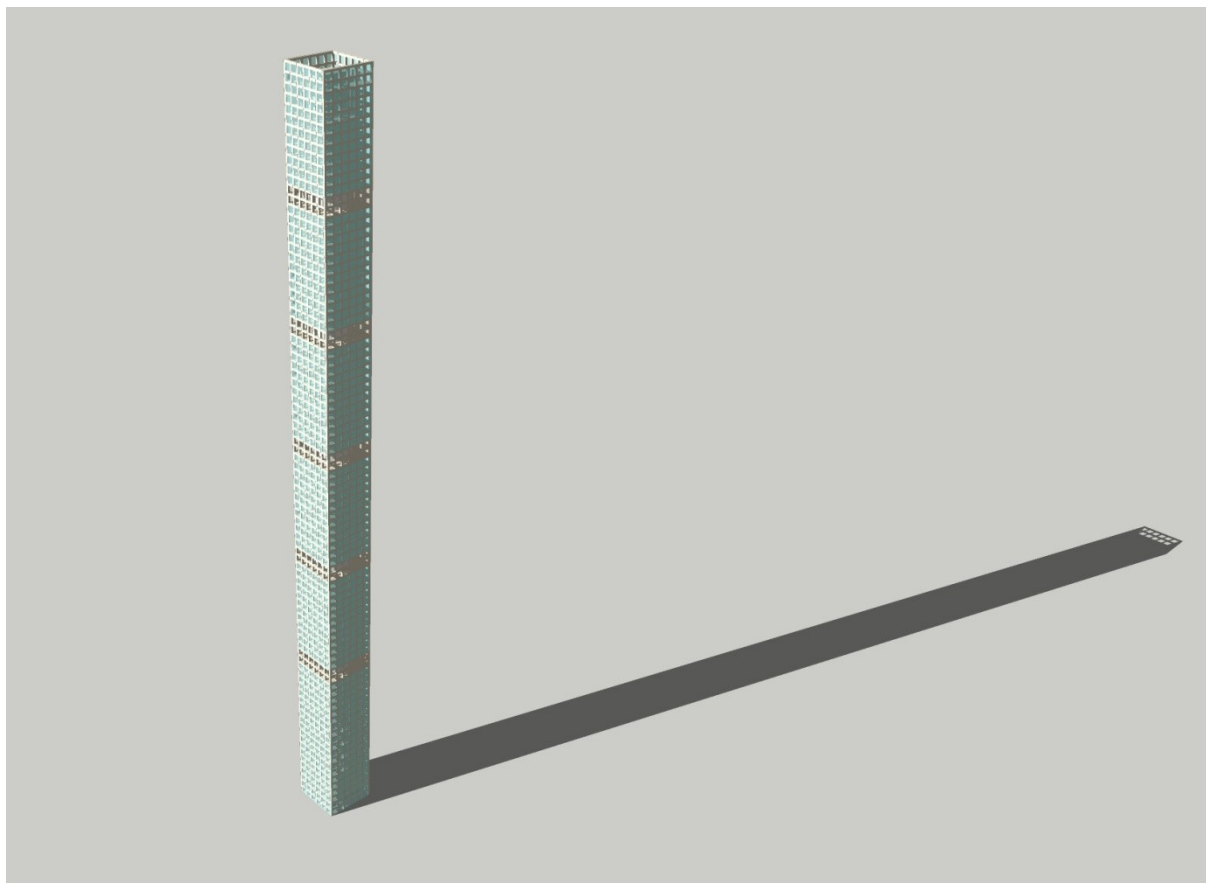
#### prievlak

### Intermediate data

k	1,436
$\rho_L$	0,01318
$V_{Rd,c}$	548,9 kN
$V_{shear\ max}$ without reinforcement :	
$V_{shear\ max}$	8151,1 kN
$\gamma_c = 1.5$	$\gamma_s = 1.15$
$v_1 = 0,456$	
z	945 mm
$\alpha_{cw}$	1,00000
$V_{Rd,max}$	6705,3 kN

$\rho_{w,min}$	0,00124	shear reinforcement ratio MIN
$\rho_w$	0,00509	shear reinforcement ratio calculated →
$A_{sw}/s$ MIN	13,88	cm <sup>2</sup> /m
$s_{L,max}$	400	mm
$s_{B,max}$	630	mm bent-up bars
$s_{T,max}$	600	mm transverse sp.
↑		
stirrups	$\phi$ [mm] →	6    8    10    12    14    16    20    25    28
	4 - legged s [cm]	-    -    6    8    11    14    22    34    -

For diameter of stirrups 16 mm and 4 - legged is the spacing "s" = 14,1 cm  
However, it should be taken into account  $s_{L,max}$  and  $s_{T,max}$  ! (see also table above)



Na záver niekoľko zaujímavostí. Vedeli ste, že

- 432 Park Avenue je toho času najvyššia obytná budova na západnej pologuli?
- najvyššie položený apartmán sa predal za 95 miliónov dolárov?
- priemerná cena bytu je cca 17 miliónov dolárov?
- na 13. podlaží je 22.5–metrový dvojdráhový plavecký bazén s výškou stropu cez 2 podlažia?
- na budovu sa použilo 10 000 t výstuže?
- celkové náklady na budovu dosiahli 1.25 miliardy dolárov?

Pri zostavovaní článku boli použité nasledovné počítačové programy:

STRAP, SketchUp, AutoCad LT 2004, SEAN, SHEAR, Microsoft Word, PDF Creator, Corel Draw