

# Eureka Tower

*static  
behavior*

*statické  
pôsobenie*

*theory, analysis  
Vladimír Budinský SSK*

**Keywords:** skyscraper, Melbourne, Eureka Tower, computation, calculation, structural analysis, mrakodrap, statický výpočet, SSK

## Úvod (Introduction)

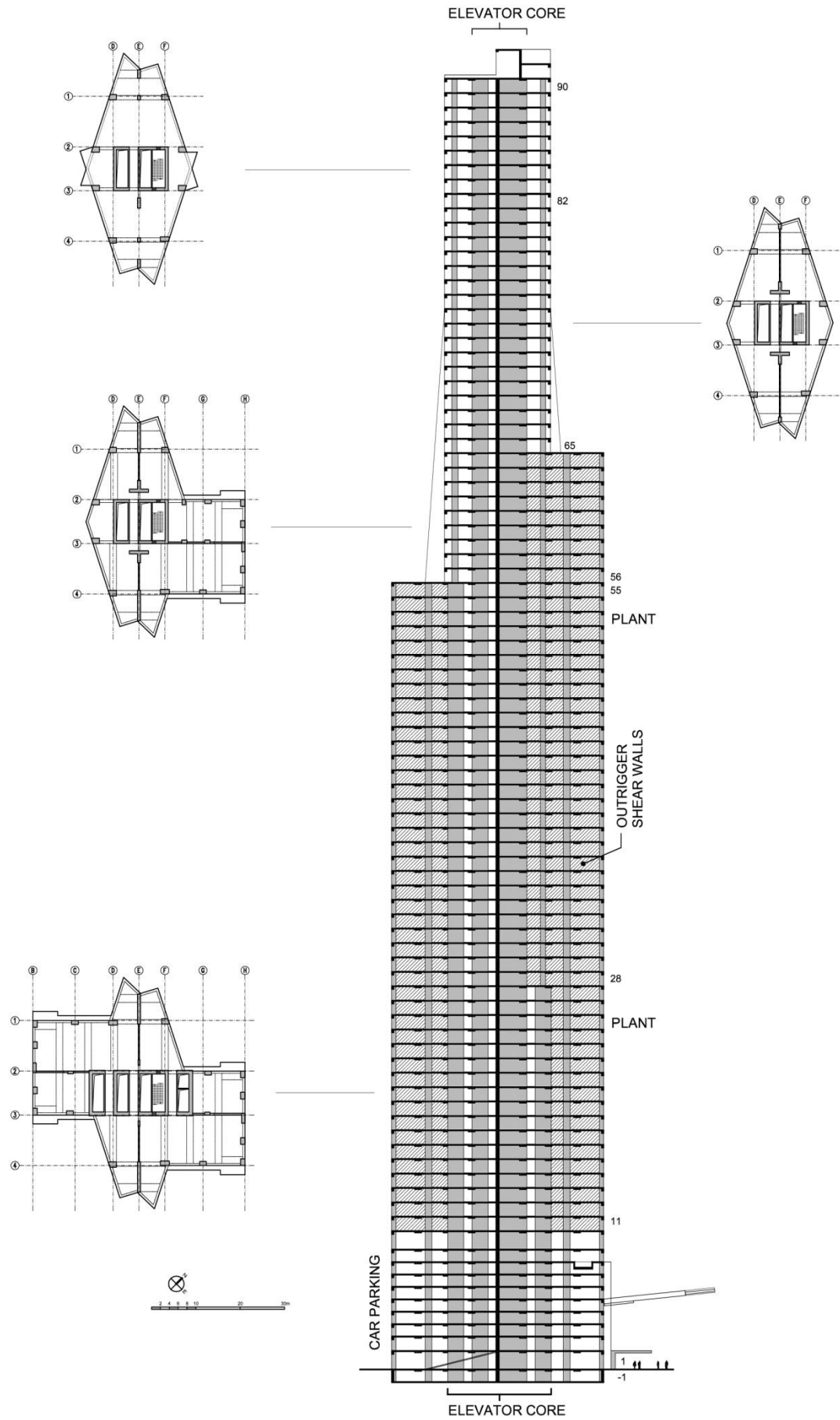
Eureka Tower v sebe spája jedinečný architektonický návrh s prepracovaným špecifickým konštrukčným systémom. 92-podlažný bytový objekt sa stal neoddeliteľnou súčasťou panorámy Melbourne. Svojho času jedna z najvyšších obytných budov sa stala pozitívnym precedensom pre ďalšie budovy podobného typu, pričom nastavila latku poriadne vysoko. Elegantný dizajn budovy odráža jej konštrukčnú integritu a tvorivú spoluprácu všetkých zainteresovaných organizácií.



## Základné údaje

<i>Location</i>	Melbourne, Australia
<i>Completion date</i>	10/2006
<i>Architect</i>	<b>Fender Katsalidis Architects</b> Pty Ltd
<i>Client</i>	Eureka Tower Pty Ltd
<i>Structural engineer</i>	<b>Connell Mott MacDonald</b> Pty Ltd
<i>Geotechnical consultant</i>	Golder Associates Inc
<i>Wind engineering</i>	MEL Consultants Pty Ltd
<i>Mechanical engineer</i>	Norman Disney & Young Pty Ltd
<i>Contractor</i>	Grocon Constructors Pty Ltd
<i>Developer</i>	Eureka Tower Pty Ltd
<i>Height of building</i>	<b>297,3 m</b>
<i>Above-ground stories</i>	92
<i>Under-ground stories</i>	1
<i>Cost</i>	500 mil. A\$

*Poznámky: Pty Ltd – typ súkromnej spoločnosti v Austrálii (s obmedzeným ručením), Inc – verejná obchodná spoločnosť v USA a Kanade*



Priečny rez a pôdorysy

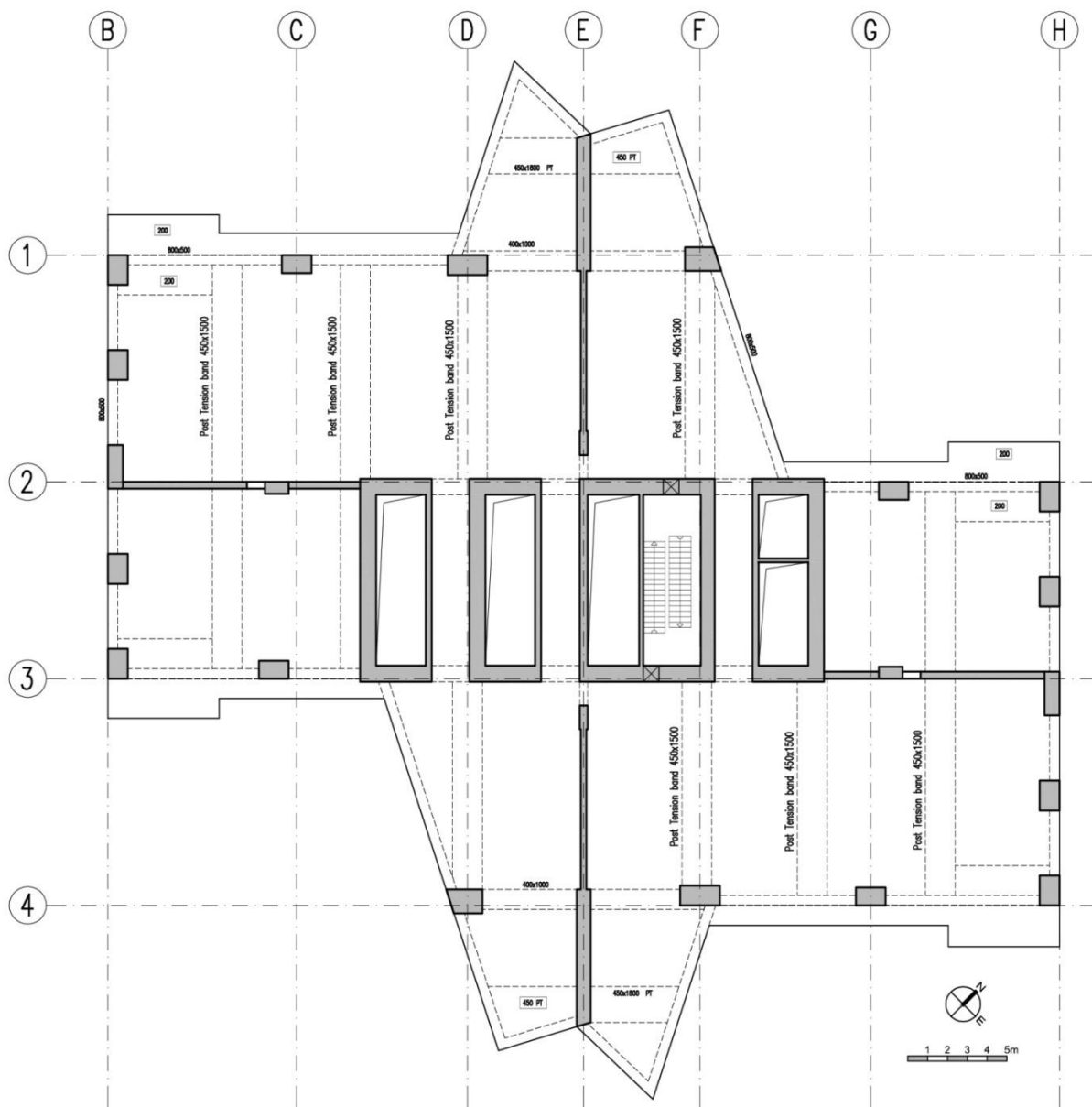
## Konstrukčné riešenie

Základ nosného systému Eureka tvorí výt'ahové jadro zo železobetónových stien (80 MPa) v centre pôdorysu, po obode budovy sú rozmiestnené železobetónové stĺpy, ktoré spolu s mäkkšími prievlakmi BxH = 500x800 mm vytvárajú polorámový systém. Tieto dva základné systémy sú od 11. do 64. podlažia spojené do kríža situovanými stužujúcimi železobetónovými stenami, tzv. *outrigger* (výložníkový) systém, ktorý sa stal skoro štandardom vo výškových budovách. *Outrigger* systém účinne vzdoruje bočnému zaťaženiu pri zachovaní čo najväčšieho priestoru pre obytné alebo kancelárske miestnosti.

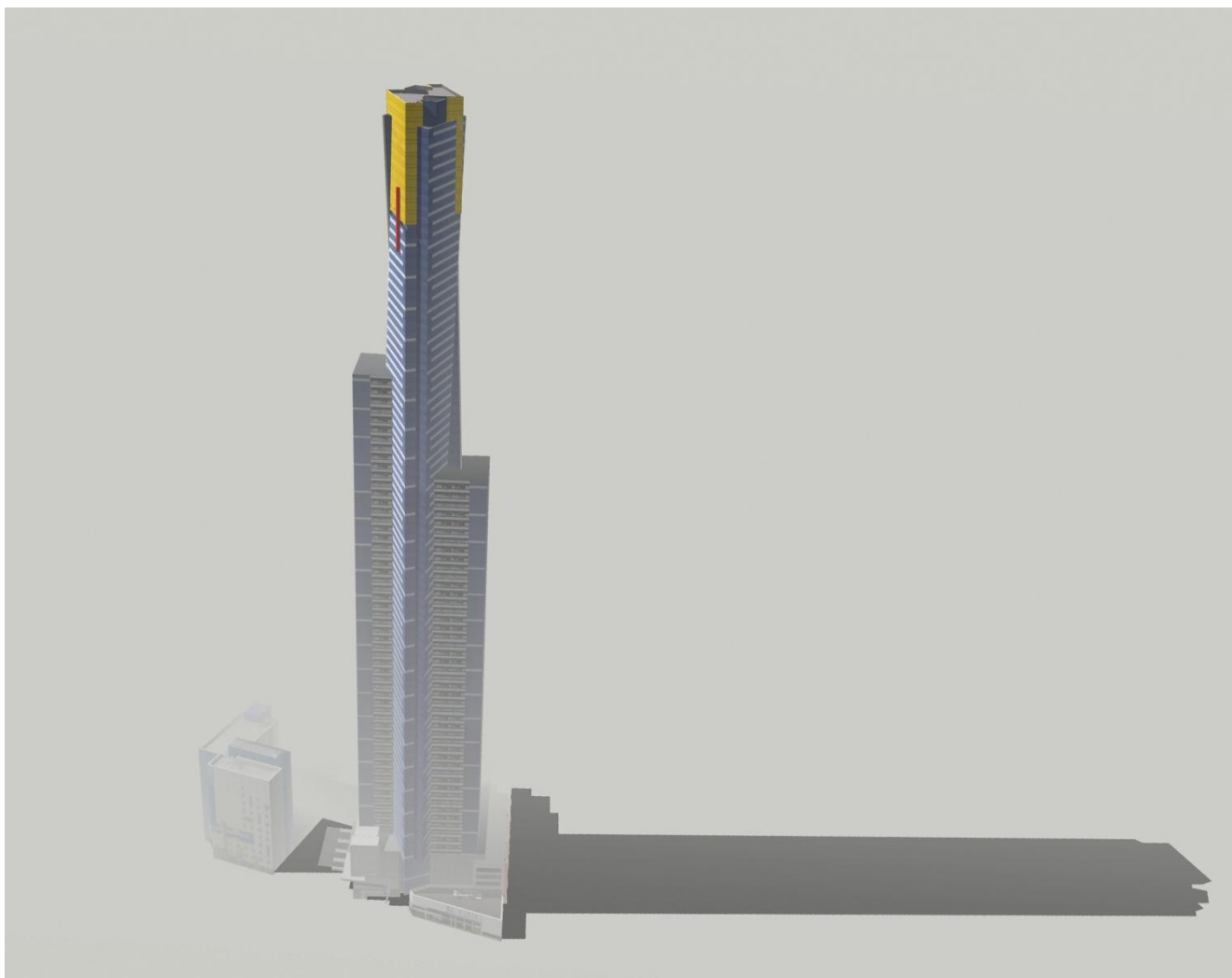
Integrita tenšej stropnej dosky je zabezpečená dodatočne predpäťtými nosníkmi BxH = 1500x450 mm v pravouhlej sieti každého stropu. Pevnosť betónu stĺpov je po výške budovy odstupňovaná odspodu od 100 do 40 MPa. Mäkká výstuž triedy 500 MPa v železobetónových konštrukciách má priemery od 12 do 32 mm.

Základný pôdorys je od 55. podlažia postupne skokmi odstupňovaný odoberaním pôdorysnej plochy (viď. Obr. na predošlej strane).

Na vrchole budovy sa nachádza ladený kvapalinový tlmič na obmedzenie vplyvu kmitania od silného vetra, ktorý má približne 2% hmotnosti budovy.



Základná schéma pôdorysného riešenia



## Spodná stavba

Pozemok pre 92 poschodový bytový objekt bol pôvodne priemyselná oblasť. Pre svoju polohu blízko centra Melbourne a pri rieke Yarra sa oblasť rýchle vyvinula na komerčné a obytné využitie. Na budúcom stavenisku boli v minulosti vykonané predbežné geotechnické prieskumy, ktoré však neumožňovali ekonomické riešenia pre základové konštrukcie viacpodlažných bytových domov kvôli náročným geologickým podmienkam.

Miestna stavebná firma Grocon navrhla na tomto pozemku 92 poschodovú budovu, ktorá predstavovala veľkú výzvu pre stavebných a geotechnických inžinierov vzhľadom na vysoké zaťaženie, ktoré vyplýva z takto vysokých budov. Stavebná spoločnosť Grocon, v spojení s konzultantmi stavebných inžinierov Connell Mott MacDonald a geotechnických konzultantov Golder Associates vypracovali dokumentáciu pre základy budovy obsahujúcu 72 ks vŕtaných pilót priemeru 1500 mm, votknutých do silného silúrskeho podlažia. Geotechnické práce boli spočiatku oceňované ako „vyhovujúce“ riešenia, využívajúce vrtné metódy, vybavenie a odborné znalosti, pri ktorých bola požiadavka preniknúť miestami až cez 8 metrovú hrúbku masívneho čadiča veľmi vysokej pevnosti, vrtmi s priemerom 1,5 m. Náklady na toto riešenie značne prekročili rozpočtové očakávania, čo sa týka objemu finančných prostriedkov na spodnú stavbu, ako aj časového harmonogramu, a projektu hrozilo zastavenie.

V dôsledku týchto skutočností bol prevedený ďalší rozsiahly geologický prieskum (2001) s cieľom definovať presnejšie rozmiestnenie a únosnosť jednotlivých vrstiev.

Konštrukcia základov objektu sa ukázala ako náročná úloha. Geologické podmienky na mieste boli zložité, veľmi premenlivé a predstavovali technické ťažkosti s dvoma vrstvami veľmi odolného čadiča v mäkkých až tvrdých súdržných zeminách a v rôzne uhlých pieskoch, nad vysoko pevnostným silúrsnym prachovcovým skalným podložím v hĺbke približne 35–37 m. Hladina podzemnej vody sa vyskytovala v hĺbke 2 m a horná a spodná čadičová vrstva nebola na danom mieste súvislá. Na zvýšenie náročnosti zakladania boli zaťaženia pôsobiace na základy z hornej stavby veľmi vysoké.

Spodný čadič poskytol vhodné základacie médium, ak bola k dispozícii jeho dostatočná hrúbka, aby sa zabezpečilo, že sadanie podložných vrstiev bude v prijateľných medziach. To bolo ťažké definovať kvôli diskontinuálnej povahe spodného čadiča a premenlivej hrúbky tejto vrstvy. Na obrázku geologického profilu je len veľmi zjednodušeným schematickým spôsobom znázornené zložité a premenlivé radenie jednotlivých vrstiev. Základným riešením, ktoré sa nakoniec ukázalo ako najefektívnejšie z hľadiska nákladov, bola kombinácia pilót typu CFA (continuous flight auger piles) priemeru 750 mm, založených na veľmi pevnom spodnom čadiči a vrtaných pilótach priemeru 1200 mm, zhotovených pod hladinou bentonitu, votknutých do veľmi pevného prachovca, všade tam, kde nebola dostatočná hrúbka spodného čadiča. Zaujímavosťou bolo, že kvôli nákladom na prevrtanie vrstvy čadiča vyšli pilóty  $\varnothing 1200$  mm v konečnom dôsledku lacnejšie ako pilóty  $\varnothing 1500$  mm. Na pilóty bol použitý vysokopevnostný betón 70 MPa. Konečným riešením bolo :

Typ pilóty	počet pilót	priemer	únosnosť ULS	pracovná únosnosť
CFA	243	750 mm	9250 kN	6800 kN
Vrtaná	28	1200 mm	32000 kN	25000 kN

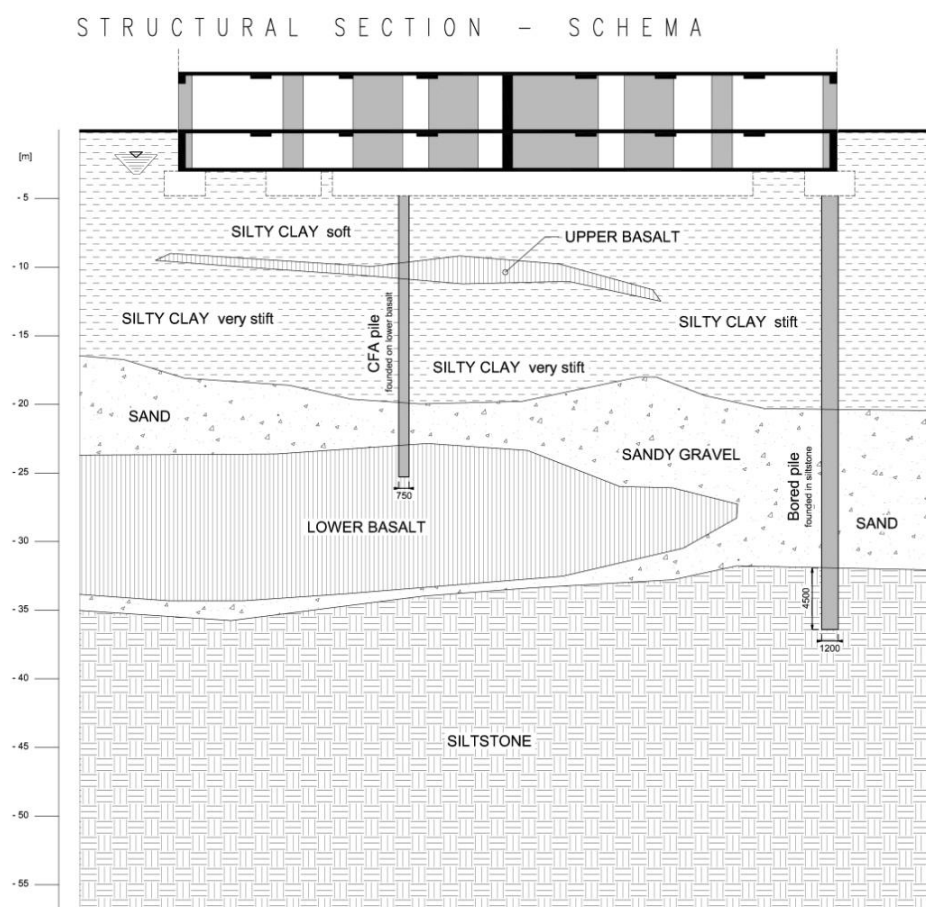
Po predvrtaní otvorov cez vrstvy čadiča pre pilóty CFA boli tieto vyplnené cementom stabilizovaným pieskom, aby sa mohla naplno využiť technológia CFA.

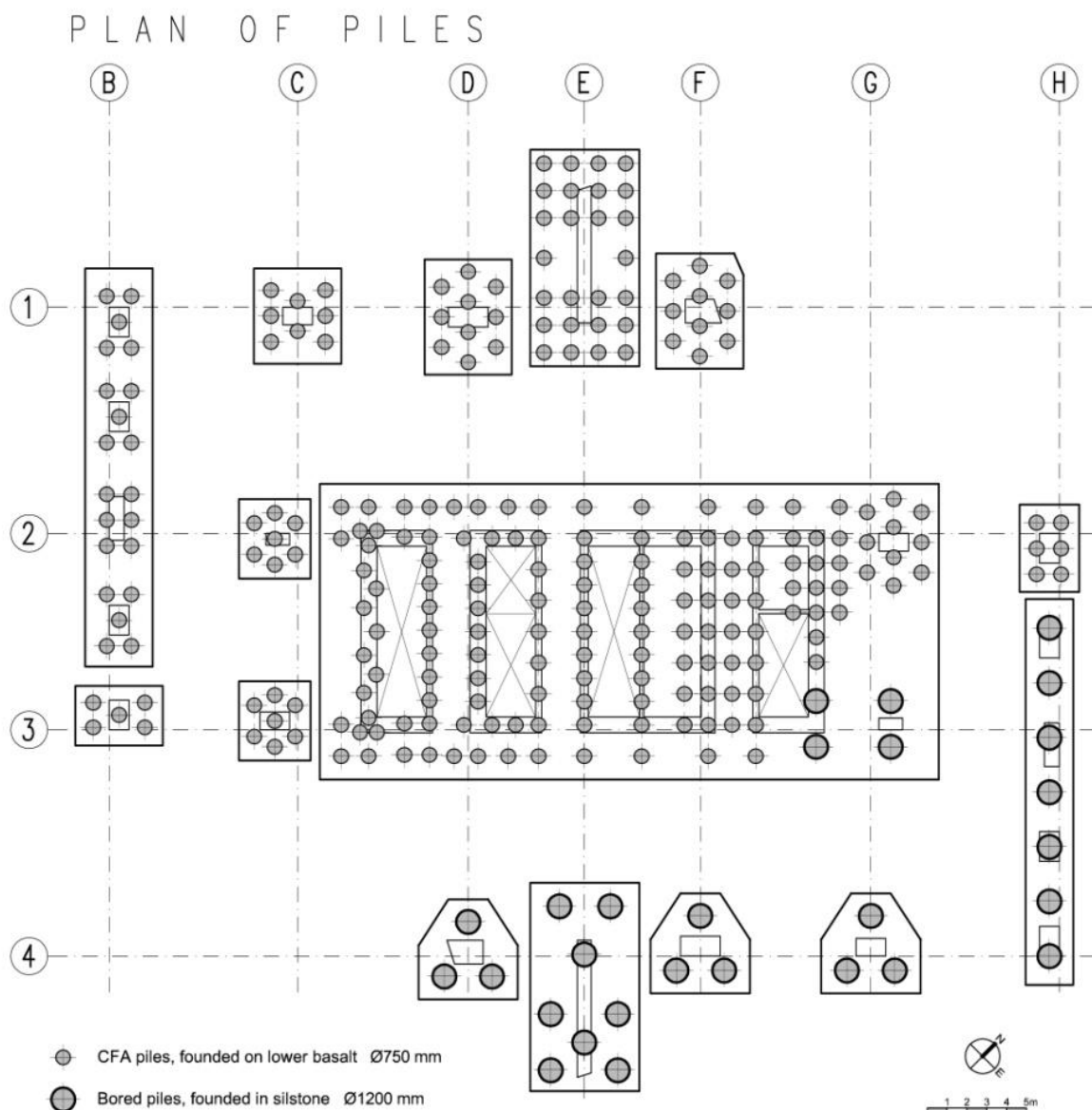
Vrtané pilóty  $\varnothing 1200$  mm boli kvôli vyrovnaniu sadania (6 mm) počítané špeciálnym geotechnickým programom ROCKET od University Monash v Melbourne. Ten určil tiež, že steny votknutia do prachovca o hĺbke cca 4500 mm budú musieť byť po vyvrtaní špeciálne rýhované. Naopak, diery vrtov v prípadných polohách čadiča nad prachovcom boli zase do hladka vybrúsené. Väčšina vrtákov pre vrtné práce bola špeciálne vyvinutá a vyrobená pre tento projekt. Rovnako pracovné postupy vrtania boli testované a odskúšané pre Eureka, aj kvôli napätému časovému harmonogramu výstavby a náročnej logistike skladovacieho priestoru na stavenisku.

Na stavenisku boli určené dve pilóty CFA na zaťažovacie skúšky, ktoré mali byť v konečnom dôsledku skúškami zničené. Avšak dostupnými zariadeniami napokon nebolo možné pilóty poškodiť. Robili sa statické aj dynamické skúšky (STAT-NAMIC = **static** and **dynamic**) s cieľom kalibrovať dynamické skúšky podľa statických, lebo len 5% riadnych pilót sa malo skúšať už len dynamicky. Dynamické skúšky sa robili s 20 tonovým príklepovým kladivom.

Toto riešenie s kombináciou pilót vrtaných do prachovca a pilót CFA na vrstve spodného čadiča prinieslo v konečnom dôsledku značné úspory oproti pôvodnému riešeniu (viac ako 30% na spodnú stavbu) a úspora času 3 mesiace.

Schématické zobrazenie  
základových pomerov v  
pričnom reze





Rozmiestnenie pilôt v pôdoryse

### Dispozičné riešenie

V prvých deviatich podlažiach sa nachádzajú parkovacie miesta pre automobily. Pre pohyb ľudí v budove slúži 12 vysokorýchlostných výtáhov (rýchlosť 9 m/s). K dispozícii je kino, telocvičňa, posilovňa, 25 m (nekonečný) bazén, kúpele, sauna, obchody, kaviarne a reštaurácie.

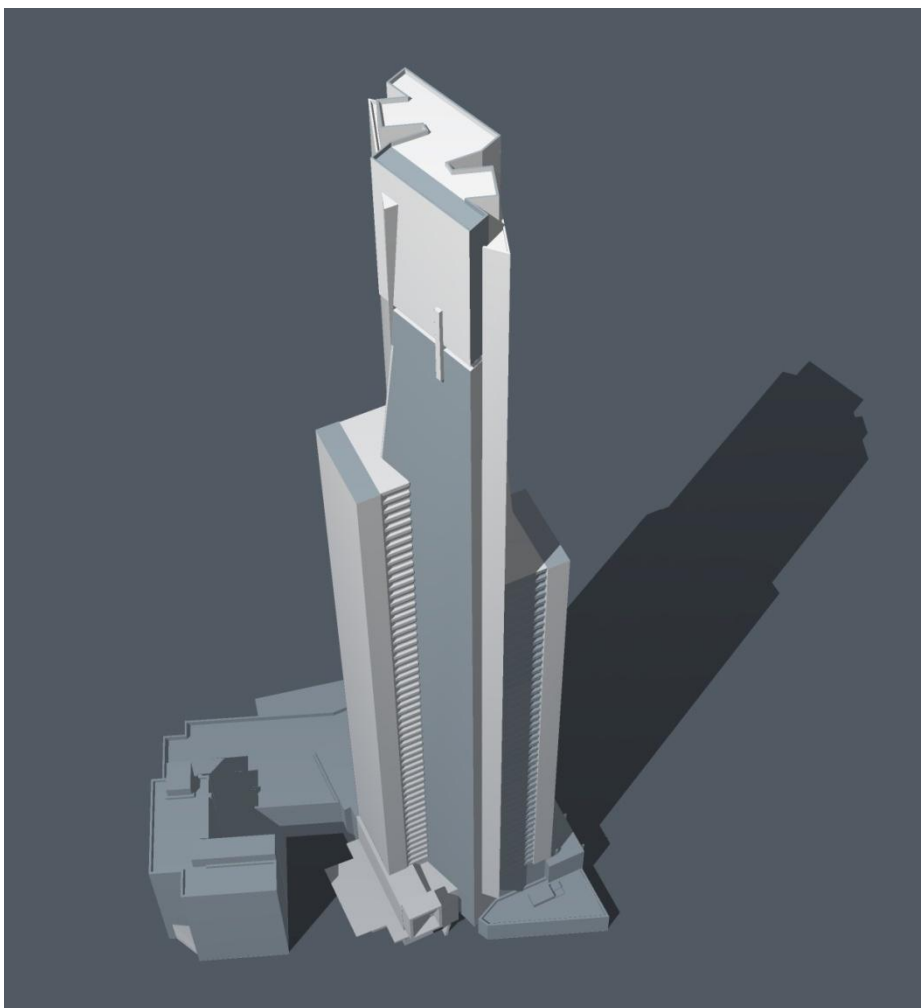
Na 88. podlaží vo výške 285 m je presklená aj otvorená (pletivo) vyhliadková plošina (skydeck) s adrenalinovým celoskleným vysúvacím kontajnerom. Je to turistická atrakcia s plným servisom.

Zlaté presklenie v najvyššej časti budovy je symbolicky spojené s históriou Melbourne. Sklené tabule sú pozlátené 24 – karátovým zlatom.

Na 90. a 91. podlaží je umiestnený kvapalinový tlmič vodorovných výchylek budovy v prípade extrémneho vetra. Voda v tlmiči má zároveň funkciu hasiaceho média v prípade požiaru.

25. a 53. podlažie sú technologické podlažia (plant level) pre TZB (technologické zariadenia budov).

Ostatné priestory sú vyhradené na bývanie, sú tam prevažne luxusné rezidenčné apartmány.



Hmotové členenie budovy

## 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 zat'azenie 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

Pokiaľ sa zvislé účinky vlastnej tiaže a náhodilého zvislého zat'azenia dajú pomerne presne vyhodnotiť, s vetrom je to zložitejšie, lebo každá sústava noriem pristupuje k vetru iným spôsobom.

V Austrálii je zásadná norma

AS/NZS 1170 Structural Design Actions (Standards Australia)

Part 0 : General principles

Part 1 : Permanent, imposed and other actions

Part 2 : Wind actions

Part 3 : Snow and ice actions

### Part 2 : Wind actions

Norma sa má používať pre v nej definované kritériá budovy. Môže sa používať pre všetky konštrukcie, ale môžu byť potrebné ďalšie informácie.

Táto norma predpisuje, že pri budovách > 200 m je nutné vyhodnotiť účinky vetra vo veternom tuneli. Keďže sme nemali výsledky z veterného tunela, zjednodušene sme interpolovali tabuľkové a vypočítané hodnoty na výšku 300 m. Na väčšinu koeficientov sme použili konzervatívne hodnoty.

Všeobecný postup určenia účinkov vetra podľa horeuvedenej normy :

- určenie rýchlosti vetra na danom mieste (site wind speed)



$$V_{\text{sit},\beta} = V_R M_d (M_{z,\text{cat}} M_s M_t) \text{ kde}$$

$V_R$  je trojskundová regionálna nárazová rýchlosť vetra pre ročnú pravdepodobnosť prekročenia  $1/R$ , kde  $R$  je priemerný interval opakovania pre MSÚ (ULS) a MSP (SLS)

$M_d$  koeficient smeru vetra, konzervatívne 1

$M_{z,\text{cat}}$  koeficient výšky budovy a kategórie terénu

$M_s$  koeficient clonenia, konzervatívne 1

$M_t$  koeficient topografie terénu, konzervatívne 1

- určenie návrhovej rýchlosti vetra  $V_{\text{des},\theta}$  z  $V_{\text{sit},\beta}$ , kde  $V_{\text{des},\theta}$  je interpolovaná  $V_{\text{sit},\beta}$  podľa smeru a v našom prípade by nemala byť menšia ako 30 m/s
- určenie návrhového tlaku vetra

$$p = 1/2 \rho (V_{\text{des},\theta})^2 C_{\text{fig}} C_{\text{dyn}} \text{ kde}$$

$$\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$$

$C_{\text{fig}}$  je súčiniteľ tvaru

$C_{\text{dyn}}$  je dynamický súčiniteľ podľa kapitoly č. 6 pre  $Hz < 1$

Pre budovy  $> 70$  m sa použije pre torzné účinky na budovu výstrednosť výslednice účinkov vetra  $0,2*b$  vzhľadom na stred geometrie budovy, kde  $b$  je šírka budovy.

Budovu sme rozdelili na 5 výškových zón. Hrubý odhad sme použili hlavne na súčiniteľ tvaru.

V nasledujúcej tabuľke sme vypočítali návrhový tlak vetra (ULS) na budovu ako celok, teda náveternú aj záveternú stranu, v maximálnom priemete.

zóna III. R=1000 rokov

	[m/s]	Tab. 4.1(A)				[m/s]			[kN/m <sup>2</sup> ]
z [m]	$V_R$ (ULS)	$M_{z,\text{cat}}$	$M_d$	$M_s$	$M_t$	$V_{\text{des},0}$	$C_{\text{FIG}}$	$C_{\text{DYN}}$	$p$ (ULS)
54	46	1,18	1	1	1	54,28	~1,5	1,081	2,866
119	46	1,22	1	1	1	56,12	~1,5	1,081	3,064
180,75	46	1,23	1	1	1	56,58	~1,5	1,081	3,115
245,75	46	~1,3	1	1	1	59,8	~1,75	1,081	4,059
297,75	46	~1,4	1	1	1	64,4	~1,75	1,081	4,707

Z časti „Part 0 : General principles“ sme uplatnili tieto kombinácie zat'azenia :

Medzný stav únosnosti (ultimate limit state)

$$Ed = 1,2*G + W_u + \psi_c*Q$$

$$Ed = 0,9*G + W_u$$

Výpočet podľa normy AS sme sa snažili porovnať s výpočtom podľa EN 1991-1-4 *Zat'azenie vetrom*.

Pre EN nám vyšli záverečné hodnoty výpočtového tlaku vetra až priemerne o 60% vyššie (podľa ASCE-7 2013 ešte o niečo vyššie). Príčiny môžu byť nasledovné : Vyššie koeficienty bezpečnosti pre EN, diametrálne iný štatistický zber základných dát lokálnych rýchlostí vetra, mierne iné výpočtové postupy, rozdielna zemepisná poloha na vplyv rýchlostí vetra a iné. Niektoré zásadné odlišnosti výpočtového prístupu :

– Základná rýchlosť vetra podľa AS vychádza z 3-sekundovej priemernej rýchlosti vetra vo výške 10 m nad terénom s ročnou pravdepodobnosťou prekročenia pre daný priemerný interval opakovania. Podľa EN to je 10-minútová stredná rýchlosť vetra s rizikom ročného prekročenia 0,02 vo výške 10 m nad terénom.

– Podľa AS sa návrhová výpočtová hodnota (ULS) určí už v základnej tabuľke rýchlostí vetra a s touto hodnotou sa počíta ďalej podľa predpísaných vzorcov. Vo výslednej kombinácii zat'azenia je už potom vietor bez ďalšieho kombináčného súčiniteľa označený buď ako návrhový  $W_u$  alebo určený pre SLS ako  $W_s$ . Podľa EN sa počíta od začiatku s charakteristickou hodnotou základnej rýchlosti a až vo výslednej kombinácii zat'azenia je vetru priradený návrhový súčiniteľ (obvyčajne 1,5 pre ULS a 1,0 pre SLS).

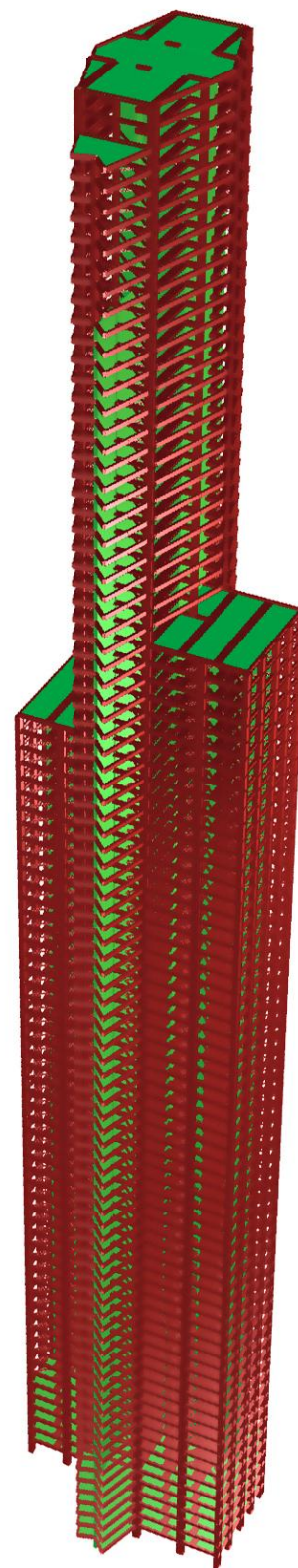
– Podľa oboch noriem sa tlak na plochy principiálne vypočíta podľa zjednodušenej Bernoulliho rovnice

$$p = 1/2 \rho v^2$$

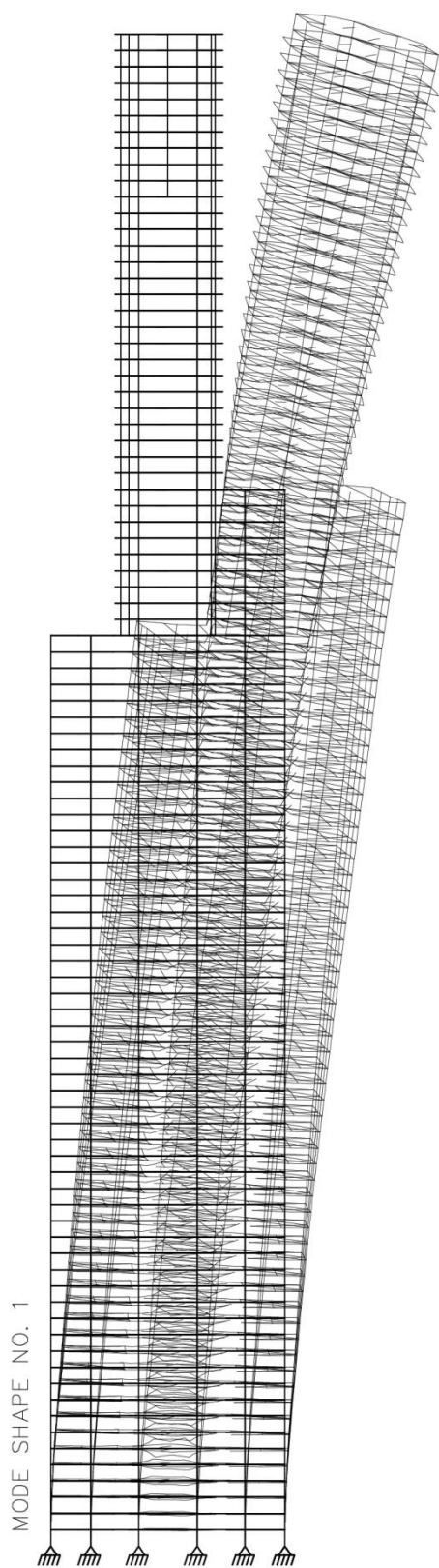
Avšak v EN je pred rovnicu navyše priradený člen so sedemnásobkom *Intenzity turbulencie vetra*  $I_z(z)$ , ktorý zvýši tlak na takmer dvojnásobok :

$$p = [1+7* I_v(z)]^{1/2} \rho v^2$$

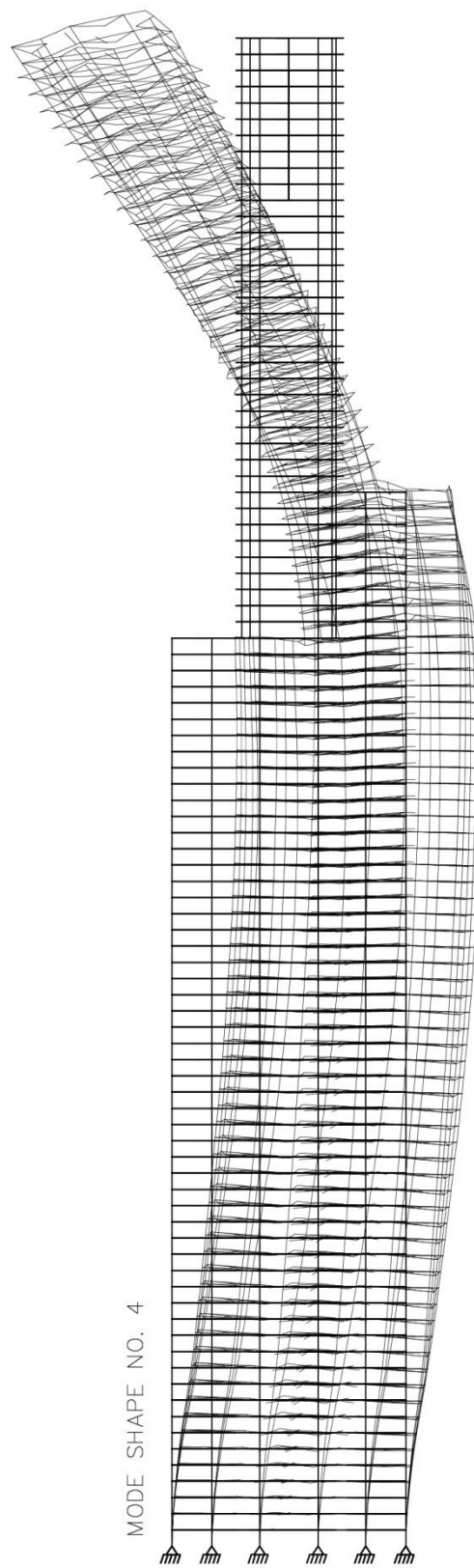
Pri výpočte podľa EN sme aplikovali základnú rýchlosť vetra z Tab. 4.1(A) AS pre SLS  $\rightarrow v_b = 31$  m/s a návrhovú hodnotu sme dostali pre násobenie výsledného tlaku vetra  $\gamma_Q = 1,5$ .



Výpočtový model konštrukcie v programe STRAP



$f(1) = 0,17 \text{ Hz}$

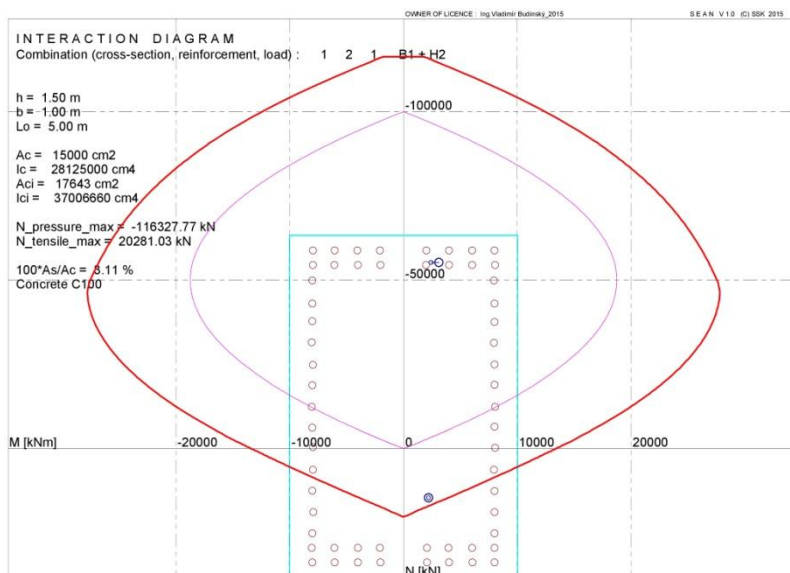


$f(4) = 0,45 \text{ Hz}$

Vybrané vlastné frekvencie a tvary

Vybrané výsledky v krajných stĺpoch 1000x1500 mm na najnižšom podlaží :

stĺp	N	My	Mz	Vy	Vz	T	kombinácia	[kN, kNm]	extrém
2H	14609	2208	598	496	156	127	ULS 0,9G+W <sub>u</sub>		E2
1B	-55217	2430	433	369	0	127	ULS 1,2G+W <sub>u</sub> +Q		E1
2H	-24276	256	295	49	138	16	charakteristická		E2
1B	-25914	262	230	92	102	0	charakteristická		E1



SECTIONAL ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE MEMBERS (C) SSK 2015

Eurocode No.2 EN 1992-1-1

INPUT DATA

Name of the combination : **B1 + H2 ULS**  
Combination (cross section, reinforcement, load) : 1 2 1

CONCRETE CROSS SECTION

Point number	X (m)	Y (m)	Coordinates right half of polygon
1	0.000	0.000	
2	0.500	0.000	
3	0.500	1.500	
4	0.000	1.500	

Effective length  $L_0 = 5.00$  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)	diameter (mm)	Es (GPa)	ftk(+) (MPa)	fyk (-) (MPa)	name
1	-0.399	0.066	32	200	500	-500	steel B500B
2	-0.301	0.066	32	200	500	-500	steel B500B
...							
57	-0.399	1.201	32	200	500	-500	steel B500B
58	0.399	1.201	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

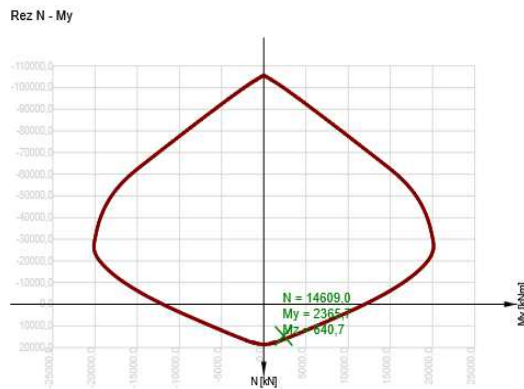
Top and bottom reinforcement : 3.11%  
Top reinforcement : 1.29%  
Bottom reinforcement : 1.29%  
Radius of gyration is : 53.70 cm

LOADING CASES

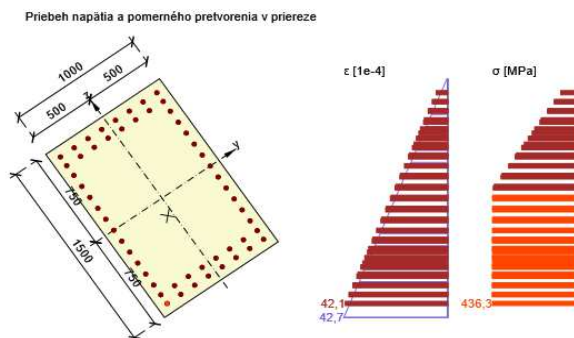
N (kN)	M (kNm)	Mbuckl. (kNm)	Mr (kNm)	x_Mr (m)	result	name
-55217.00	2430.00	3120.21	26831.56	0.96	O.K.	B1
14609.00	2208.00	2208.00	3884.20	0.04	O.K.	H2

Program **Idea StatiCa**, posúdenia : Stĺp H2, Extrém E2

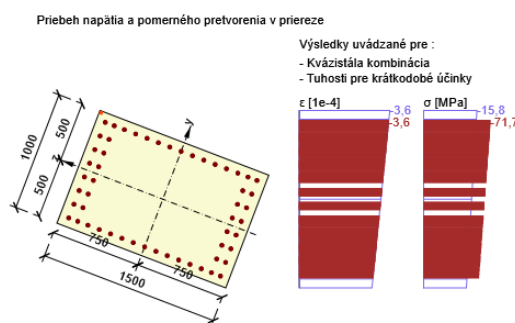
Typ zat'azenia	Typ kombinácie	N [kN]	V <sub>y</sub> [kN]	V <sub>z</sub> [kN]	T [kNm]	M <sub>y</sub> [kNm]	M <sub>z</sub> [kNm]
Celkom	Základný MSÚ	14609,0	156,0	496,0	127,0	2208,0	598,0
Celkom	Charakteristická	-24276,0	0,0	0,0	0,0	256,0	295,0
Celkom	kvázistála	-24276,0	0,0	0,0	0,0	256,0	295,0



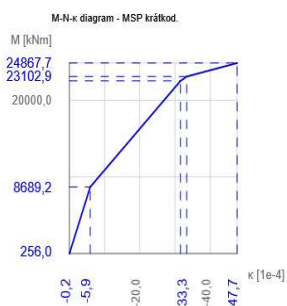
MSÚ



Interakcia MSÚ



Obmedzenie napätia



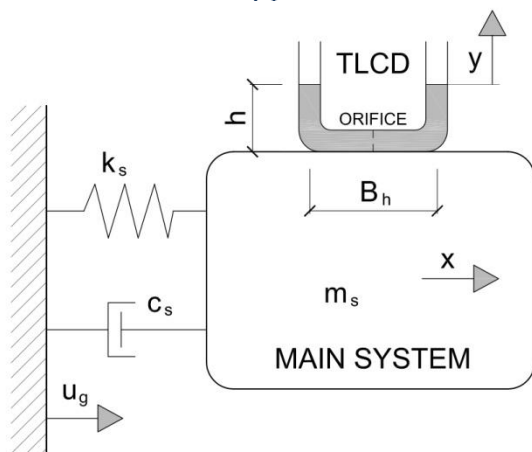
**MN-k diagram** je spočítaný pre ohybový moment  $M_y$ . Vnútrné sily, ktoré pôsobia v reze, obsahujú tiež ohybový moment  $M_z$ , ktorý nie je zohľadnený.

## Ladený kvapalinový tlmíč

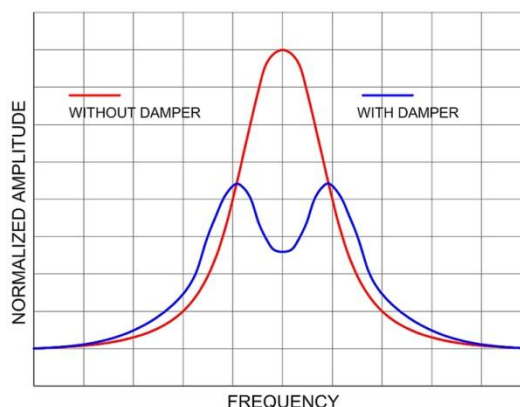
Najpoužívanejšia metóda na zvyšovanie tlmenia vysokej budovy je inštalácia niektorého druhu hmotnostného tlmíča v hornej časti budovy, ktorý by sa mal dať podľa možnosti ďalej vyladiť. Niektoré z najbežnejšie používaných druhov tlmíčov sú :

- TMD (Tuned mass damper) Hmotnostný ladený tlmíč. Na ladenie sa používajú bežne hydraulické piesty medzi hmotou a konštrukciou budovy. Pasívna hmota môže byť nádrž s vodou, pieskom, oceľové pláty a pod. Hmota môže byť zavesená alebo na kĺzavej podložke
- TLD (Tuned liquid damper) Ladený kvapalinový tlmíč, ktorý možno deliť na tlmíč s voľnou hladinou s regulačnými prietokovými prepážkami alebo na tlmíč s uzavretou hladinou tzv. plávajúcou kĺbovou strechou (floating roof) s radiacimi hydraulickými piestami
- TLCD (Tuned liquid column damper) Kvapalinový tlmíč s dvomi alebo viacerými zvislými stĺpcami vody, ktoré sú naspodku vodorovne prepojené, s ladiacou klapkou v prepojení (*orifice*)
- TLCGD (Tuned Liquid Column Gas Damper) Ladený kvapalinovo–plynový stĺpcový tlmíč je najnovší modulovo radený tlmíč pôvodne vyvinutý v NASA na tlmenie vibrácií pri štarte rakiet. Základný modul tvorí kovová trubica, v ktorej je kvapalinový a plynový stĺpec, stĺpce sú navzájom oddelené pohyblivou utesnenou prepážkou. Riadenie prebieha reguláciou tlaku v plynovom stĺpci. V budovách sú trubice umiestnené vodorovne, radené v rôzne natočených blokoch. Každý blok sa skladá z niekoľkých trubíc. Bloky je možné umiestniť na podlahu, na strop alebo na stenu. Výhodou je jednoduchá montáž a vysoká presnosť vyladenia

Tlmíč umiestnený v Eureka je najbližšie typu TLCD. Je umiestnený v dvoch najvyšších podlažiach. Médium je voda, ktorá je využitá ako požiarne zásoba a aj ako tlaková vodovodná nádrž. Regulačné zasúvacie dosky slúžia na zapojenie potrebného množstva aktívnej vody do tlmenia a na vyladenie frekvencie tlmíča. Tlmíč súži prednostne na elimináciu výchyľok od silného vetra, ktorý priemerne raz až dvakrát za rok zasiahne oblasť Melbourne.



Zjednodušený model nelineárnej konštrukcie s TLCD



Predpokladaná účinnosť tlmenia

kde  $c_s$  je tlmenie hlavného systému (budovy),  $k_s$  je tuhosť tohto systému,  $m_s$  je hmotnosť budovy,  $B_h$  je vodorovná dĺžka tlmiacej trubice,  $h$  je výška kvapalinového stĺpca,  $\delta^2 u_g / \delta t^2$  je zrýchlenie podlažia (pri namáhaní vetrom bude zrejme  $u_g = 0$ ),  $y$  je posun kvapaliny v stĺpci a  $x$  je vodorovný posun konštrukcie budovy.

Nelineárna pohybová rovnica zobrazeného stĺpcového kvapalinového tlmíča je štatisticky linearizovaná cez koeficient tlmenia  $c_p$  na rovnicu

$$\rho A L_c (\delta^2 y / \delta t^2) + (1/2) \rho A c_p (\delta y / \delta t) + 2 \rho g A y = - \rho A B_h [(\delta^2 x / \delta t^2) + (\delta^2 u_g / \delta t^2)]$$

kde

$\rho$	je hustota kvapaliny
$A$	je plocha prierečného rezu rúry
$L_c$	$= 2h + B_h$ je celková dĺžka kvapalinového stĺpca
$g$	je gravitačná konštanta
$c_p$	ekvivalentné lineárne tlmenie

Normalizovaný tvar rovnice vzhľadom na hmotu kvapaliny je potom

$$(\delta^2 y / \delta t^2) + (2c_p / L_e) (\delta y / \delta t) + (2g / L_e) y + px = -p u_g$$

kde  $p = B_h / L_e$  je koeficient dĺžky.

Okrem toho, frekvencia kvapaliny je  $\omega_1 = (2g / L_e)^{1/2}$ , frekvencia konštrukcie  $\omega_s = 2\pi / T_s$  a konštanta ladenia  $\gamma = \omega_1 / \omega_s$ .

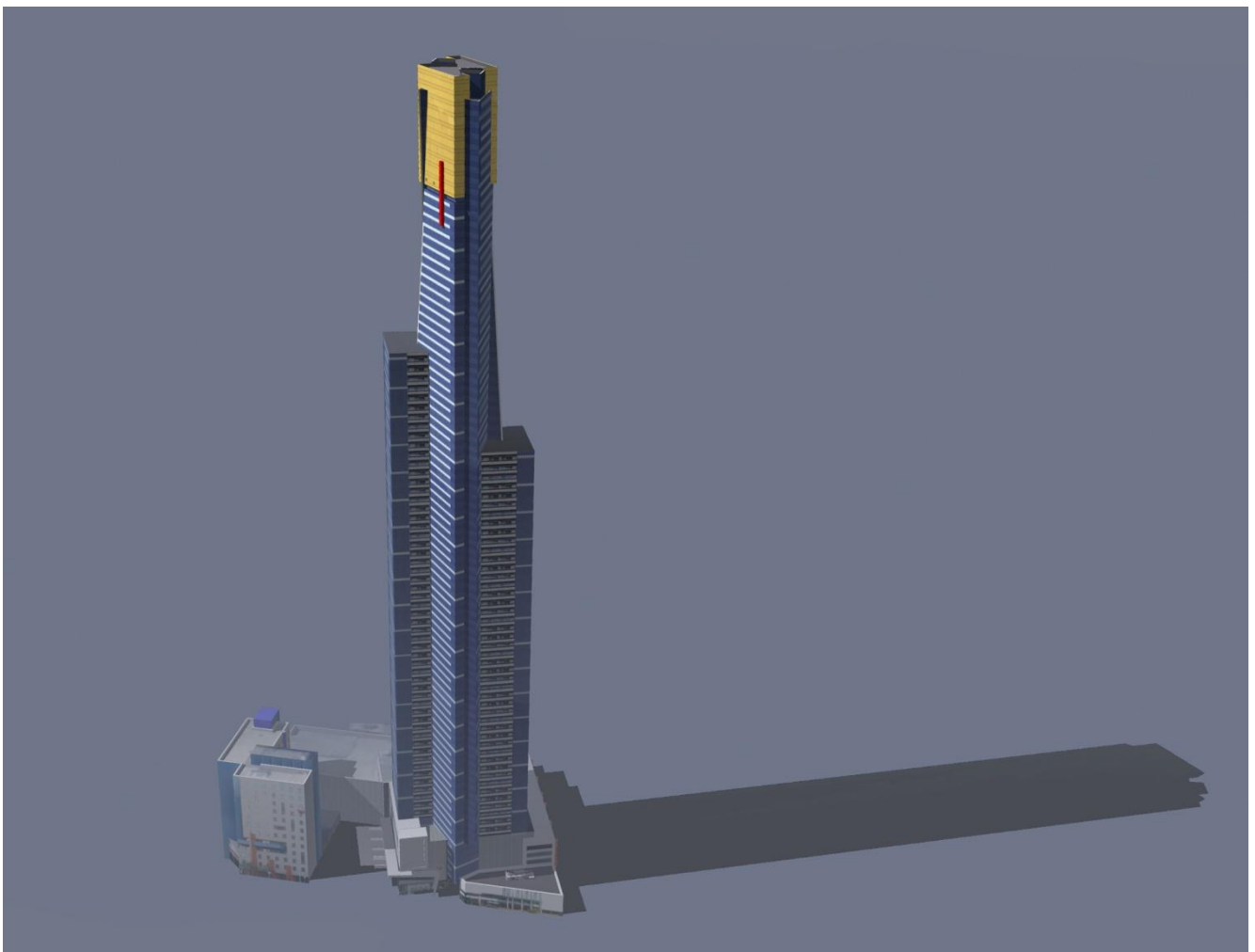
Pohybová rovnica hlavného nelineárneho systému s pripojeným TLCD je nasledovná

$$(m_s + \rho A B_h + 2\rho h A) (\delta^2 x / \delta t^2) + c_s (\delta x / \delta t) + \alpha_s k_s x + (1 - \alpha_s) z F_y =$$

$$= - (m_s + \rho A B_h + 2\rho h A) (\delta^2 u_g / \delta t^2) - \rho A B_h (\delta^2 y / \delta t^2)$$

kde  $F_y$  je sila na medzi klzu  
 $\alpha_s$  je pomer medzi dodatočnou tuhosťou  $k_p$  a počiatočnou pružnou tuhosťou  $k_0$   
 $z$  je bezrozmerná hysterézná premenná z Bouc – Wen modelu

Ako vidno, teoretické, ako aj praktické riešenie problému tlmenia je značne náročné.



## Záver

Pri Eureka Tower bola vyvinutá stavba, ktorá s extrémnou výškou a pomerom  $H/B = 6 : 1$  dosahuje limity uskutočniteľnosti. Komplexný systém si vyžadoval veľmi starostlivé preskúmanie konštrukčného správania, definíciu geometrie, základov a výber materiálu všetkých komponentov. Vďaka vzájomnej spolupráci všetkých zúčastnených strán sa mohla zrealizovať budova, ktorá ukazuje možnosti výstavby podobných rezidenčných budov.

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

- [1] Advances in the Structural Design of High-Rise Residential Buildings in Australia, Author: Owen Martin, Connell Mott MacDonald, CTBUH 2005 7th World Congress, New York
- [2] Design and construction aspects of piled foundations for Eureka Tower Project, Author: Jim Slatter & Slav Tchepak, Vibropile (Aust) Pty Ltd, Melbourne, Australia
- [3] AS/NZS 1170.2 : 2011 (2002) Structural Design Actions (Standards Australia)
- [4] STN EN 1991-1-4 Zat'azenie vetrom
- [5] [https://en.wikipedia.org/wiki/Eureka\\_Tower](https://en.wikipedia.org/wiki/Eureka_Tower)
- [6] Tom Delany, SketchUp model © 2008, 3D Warehouse
- [7] Analysis of a tuned liquid column damper in non-linear structures subjected to seismic excitations, Authors: Gilda Espinoza, Carlos Carrillo, Alvaro Suazo, Latin American Journal of Solid and Structures, 1/2018

Pri zostavovaní článku boli použité nasledovné **počítačové programy** :

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

© Ing. Vladimír Budinský SSK, Banská Bystrica, III/2021