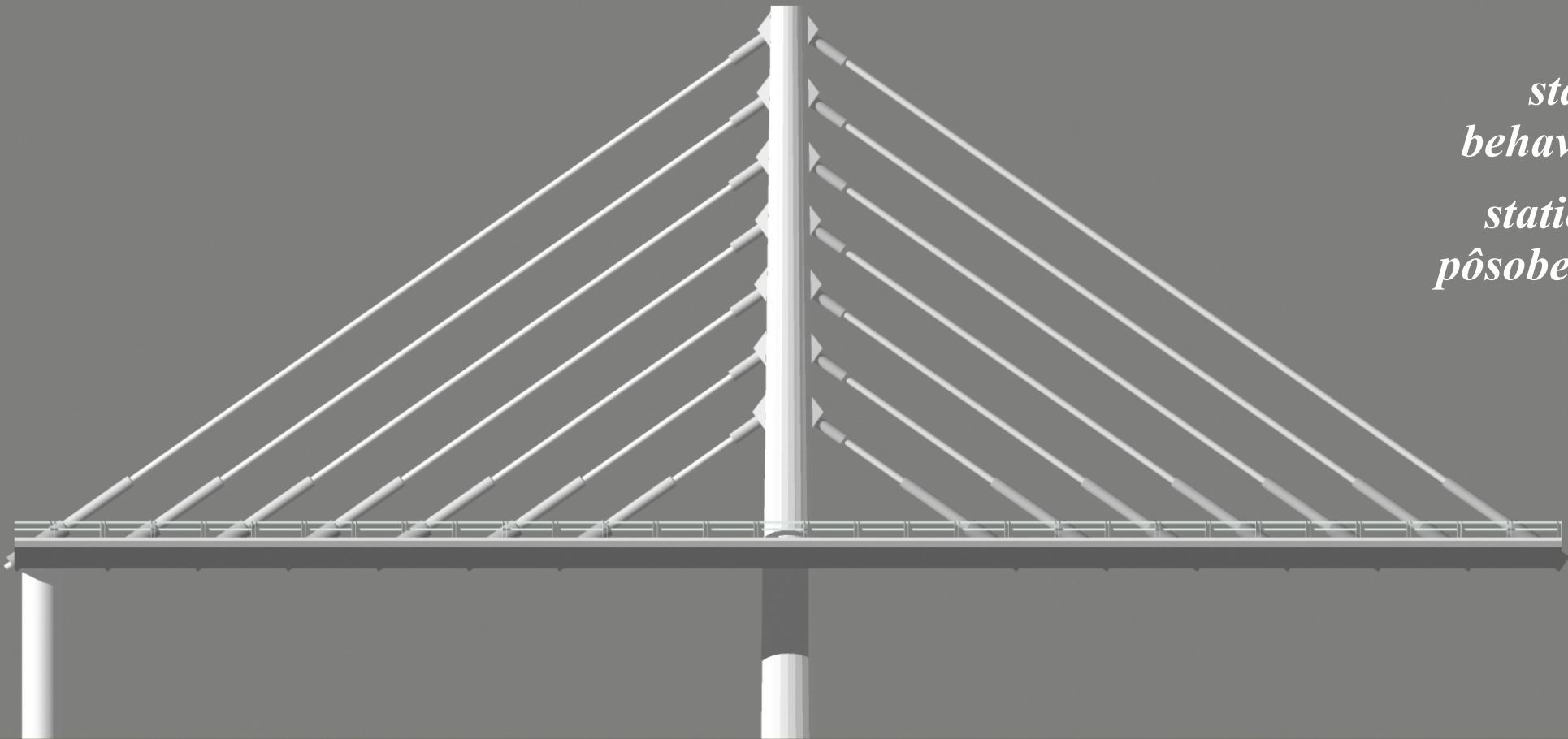


BUS RAMP

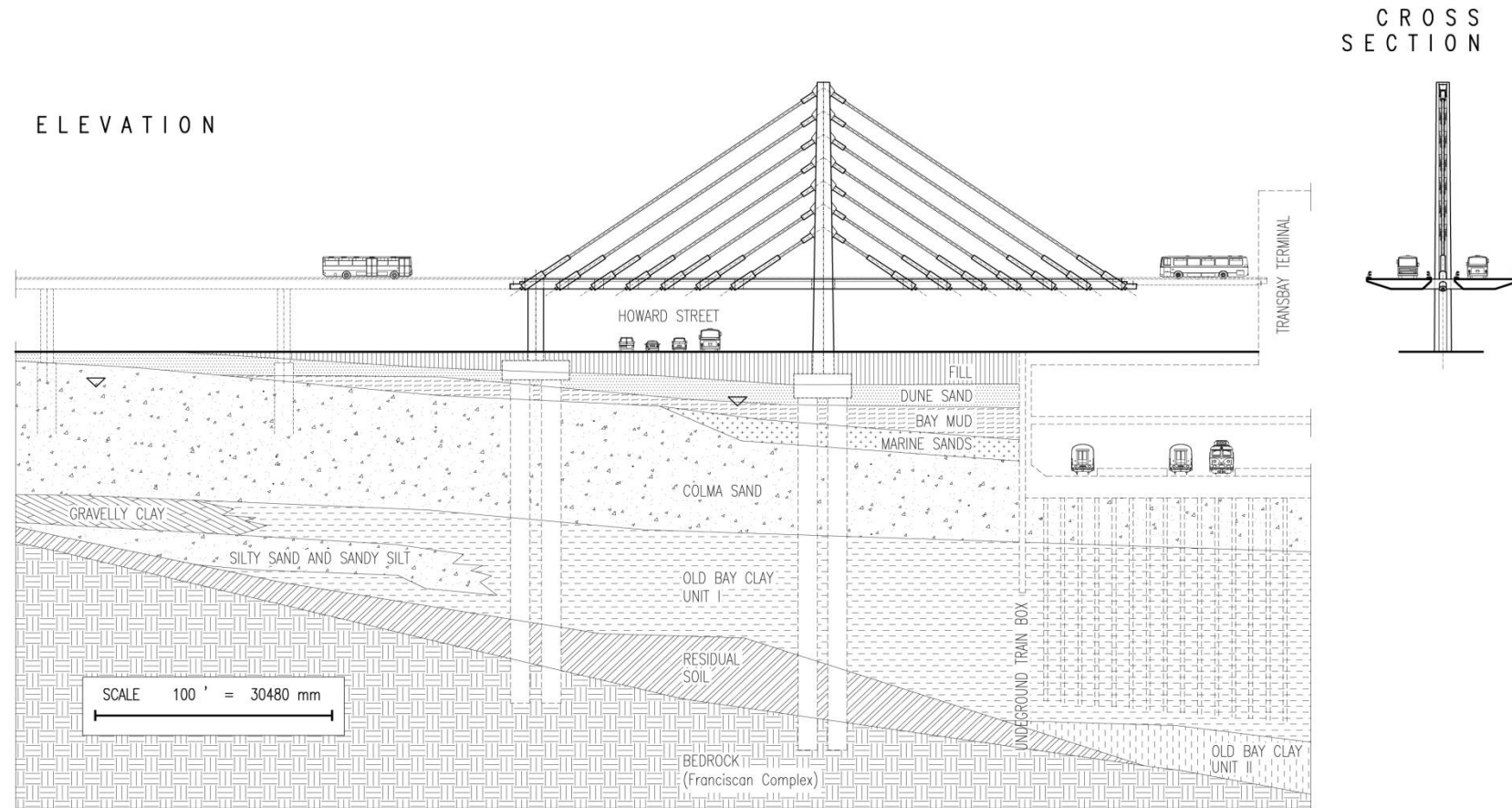
*Transbay Terminal
San Francisco*

*static
behavior
statické
pôsobenie*



*theory, analysis
Vladimír Budinský SSK*

Keywords: Bus Ramp Viaduct, Transbay Terminal, San Francisco, cable-stayed bridge, computation, calculation, structural analysis, zavesený most, statický výpočet, SSK



Úvod

Zavesený dvojpoľový most je poslednou časťou sústavy prístupových rámp pre autobusovú dopravu, ktorá vedie do nového dopravného terminálu (*Transbay Terminal*) v centre mesta San Francisco. Hlavnou funkciou štvorpodlažného terminálu je vytvorenie prestupovej stanice medzi autobusovou dopravou, železničnou dopravou Caltrain a vysokorýchlostnou železničnou dráhou z južnej Kalifornie. Moderne riešený terminál nabaľuje na seba aj ďalšie funkcie obchodného a relaxačného biznis-centra. Terminál je aj priamo napojený na dopravnú tepnu Oakland–San Francisco Bay bridge. Hlavný projektant mosta je koncern *Arup*, vlastníkom je *Transbay Joint Powers Authority* (TJPA). Kontrakt na výstavbu rámp vyhrala v súťaži

piatich pripustených firiem (zo 7 prihlásených) firma *Shimmick Construction* za najnižšiu cenu 58,2 miliónov dolárov a najkratší ponúknutý čas výstavby. Na druhom mieste sa umiestnila firma *Skanska*. Autobusy začali jazdiť po moste v auguste 2018.



Konštrukcia mosta

Prvé pole zaveseného mosta prekleňuje jednosmernú cestnú tepnu *Howard Street*, druhé pole tvorí konzolu ponad časť podzemnej železničnej dráhy, čo je dosť ojedinelé riešenie pre zavesený most. Závesy 2 x 7 ks sú harfovito (rovnobežne) usporiadané a prostredníctvom betónových priečnikov držia dve duté jednokrabicové betónové mostovky. Jediný pylón je tiež betónový s oválnym priečnym rezom. Hoci je závesný systém takmer v rovine, mostovky sú pôdorysne vedené v miernom „esíčku“, na obrázkoch to nie je znázornené. Na smer *Bay bridge* pokračuje viadukt ako viacpoľový betónový most s už spojenými mostovkami. Priamo na káble sú zavesené železobetónové plnostenné priečniky, ktoré sú potom vklínené do oboch mostoviek po stranách. S terminálom je *cable-stayed bridge* prepojený odľahčeným oceľovým roštom.

So spodnou stavbou sa museli tvorcovia mosta a celého terminálu poriadne popasovať, kým dosiahli únosné skalné podložie, tzv. *Franciscian Complex*. Podarilo sa im to pomocou vrtaných betónových pilót s oceľovou výpažnicou priemeru 2,5 m a dĺžkou cez 45 m. Spodnú stavbu mosta realizovala v subdodávke firma *Case Pacific*.

Na každej mostovke je len jeden dopravný pruh pre autobusy, ale s dostatočným priestorom pre ďalší obslužný, resp. pohotovostný pruh.

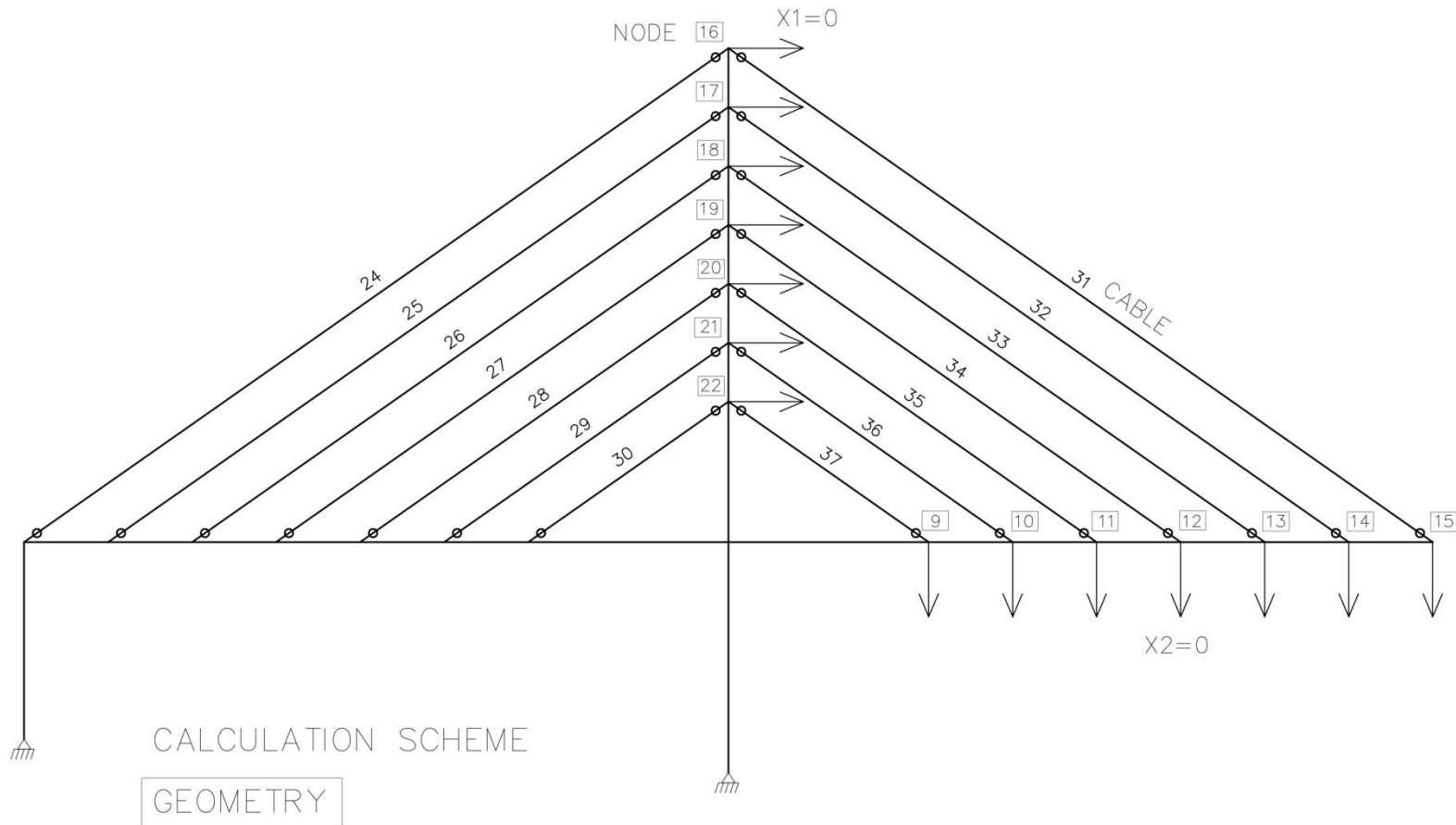
Cieľom takéhoto oddelenia autobusovej dopravy od ostatných automobilov je urýchlenie dopravy a minimalizácia dopravných zápch.

Výpočty

Za účelom pochopenia statického pôsobenia konštrukcie boli prevedené niektoré veľmi zjednodušené prepočty vybraných problémov. Hlavné zjednodušenia spočívali vo vynechaní niektorých zat'azovacích stavov, hlavne dynamickej analýzy, teplotného zat'azenia, reologických javov v betóne (dotvarovanie a zmršťovanie), ako aj seizmickej analýzy. Zo skúsenosti poznáme, že tieto javy v spojení do zat'azovacích kombinácií pomocou kombinačných súčiniteľov môžu, ale aj nemusia mať rozhodujúci vplyv na konečné dimenzovanie. V prepočte sme sa zamerali hlavne na rozdelenie predpínacích síl v káblach, ktoré sa zvyknú určovať zo stáleho dlhodobého zat'azenia (*dead load*). Pri pohľade na skutočne realizované káble na moste pozornému oku neunikne, že káble najbližšie pri pylóne sú o dosť hrubšie, ako ostatné. Toto by sa mohlo zdať dosť nelogické, lebo pri bežnom lineárnom prvovýpočte tu vyjdú najmenšie sily. Avšak po prerozdelení káblových síl pri daných tuhostiach mostovky a pylóna tu skutočne vyjdú najväčšie osovité sily, takmer dvojnásobné, ako na krajoch. *Poznámka*: Pri našich vizualizáciách to nie je vidno, lebo z estetických dôvodov sme dali všade rovnaké hrúbky. Treba si zájsť do *Frissa*, lacnejšie však vyjde preštudovanie reálnych fotografií mosta ☺.



Podobne ako pri *Oresund bridge* sme výrazne nelineárny problém nahradili riešením sústavy lineárnych rovníc. Pri harfovitom usporiadaní káblov dostaneme viac podmienujúcich rovníc (nulové posuny), ako neznámych parametrov (počet lán). Preto je nutné vhodne zvoliť nulové posuny, aby sme dostali kompatibilné riešiteľné matice. Voľba nulových posunov je zrejماً zo schémy na obrázku.

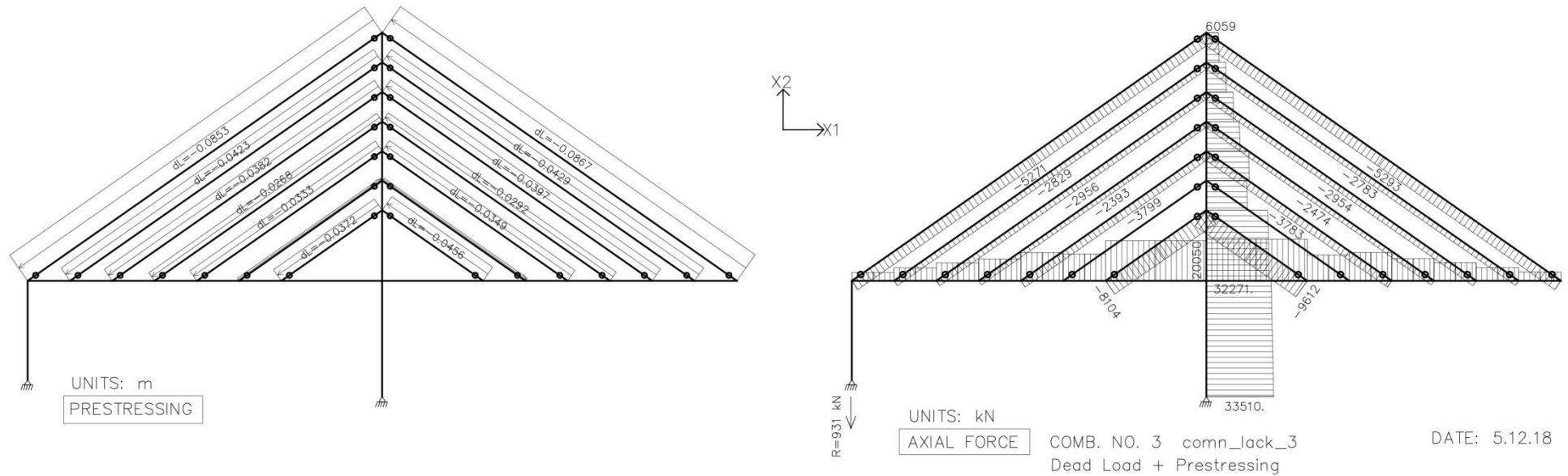


Riešenie neznámych koeficientov násobkov jednotkových káblových síl \mathbf{T} potom bude vo forme $\mathbf{T} = \delta^{-1} * [\mathbf{A} - \mathbf{I}]$, kde \mathbf{A} je nulová matica $\mathbf{A} = [0, 0, \dots, 0]^T$, \mathbf{I} je transponovaná matica posunov od stáleho zaťaženia *dead load* a δ je vplyvová matica od jednotkových káblových síl.

δ	prút															E=A-I		
	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	I	A	0	
19	-0,02441	-0,02622	-0,02445	-0,02037	-0,01384	-0,00761	-0,00319	-0,00795	-0,00332	0,00093	0,00373	0,00347	0,00211	0,00092	0,045	A	0	
21	-0,00846	-0,01252	-0,01322	-0,01247	-0,01126	-0,00938	-0,00570	-0,00748	-0,00498	-0,00232	0,00054	0,00323	0,00476	0,00358	0,027		0	
22	-0,00406	-0,00821	-0,00914	-0,00861	-0,00777	-0,00703	-0,00583	-0,00529	-0,00408	-0,00268	-0,00096	0,00106	0,00300	0,00389	0,019		0	
9	0,01131	0,01109	0,00959	0,00767	0,00577	0,00400	0,00235	0,00532	0,00607	0,00686	0,00773	0,00856	0,00890	0,00766	-0,040		0	
10	0,01959	0,01809	0,01509	0,01175	0,00858	0,00571	0,00318	0,01034	0,01155	0,01275	0,01383	0,01429	0,01291	0,00842	-0,063		0	
11	0,03031	0,02649	0,02116	0,01575	0,01088	0,00675	0,00346	0,01876	0,01972	0,02051	0,02058	0,01868	0,01345	0,00738	-0,088		0	
12	0,04334	0,03609	0,02754	0,01939	0,01247	0,00707	0,00324	0,03177	0,03083	0,02933	0,02596	0,01932	0,01187	0,00570	-0,116		0	
13	0,05825	0,04657	0,03398	0,02258	0,01343	0,00683	0,00267	0,05022	0,04439	0,03733	0,02762	0,01767	0,00948	0,00388	-0,146		0	
14	0,07440	0,05755	0,04035	0,02540	0,01396	0,00626	0,00190	0,07404	0,05876	0,04232	0,02715	0,01513	0,00686	0,00211	-0,178		0	
15	0,09108	0,06872	0,04667	0,02806	0,01431	0,00556	0,00106	0,10152	0,07172	0,04589	0,02600	0,01235	0,00422	0,00037	-0,211		0	
16	-0,07498	-0,05417	-0,03423	-0,01861	-0,00821	-0,00241	0,00005	0,01285	0,00417	-0,00194	-0,00481	-0,00506	-0,00380	-0,00213	0,076		0	
17	-0,05487	-0,04563	-0,03254	-0,01996	-0,01028	-0,00409	-0,00093	0,00300	0,00260	0,00061	-0,00122	-0,00207	-0,00193	-0,00124	0,065		0	
18	-0,03766	-0,03567	-0,02981	-0,02090	-0,01228	-0,00583	-0,00198	-0,00420	-0,00050	0,00211	0,00196	0,00089	0,00004	-0,00026	0,055		0	
20	-0,01494	-0,01843	-0,01847	-0,01686	-0,01399	-0,00910	-0,00453	-0,00871	-0,00485	-0,00098	0,00256	0,00474	0,00399	0,00230	0,036		0	

Inverzná matica																prút	
δ ⁻¹	31,44	0,75	-0,35	3,19	-8,71	23,82	-74,49	300,87	-446,05	201,69	-215,26	441,74	-258,34	-4,89	T		
	-321,28	-0,68	-1,40	-10,56	34,92	-116,45	454,92	-1097,65	1171,74	-438,84	437,81	-1137,95	981,23	35,73	0,5561	24	
	1012,86	21,96	2,53	26,32	-107,42	461,17	-1184,50	1603,31	-1086,87	292,19	-261,16	992,29	-1465,31	-309,46	0,3131	25	
	-1460,90	-297,41	23,60	-84,93	441,78	-1165,66	1606,99	-1160,28	409,75	-54,73	26,12	-313,76	1021,03	991,33	0,3267	26	
	1012,03	987,56	-286,41	374,61	-1145,66	1611,20	-1175,27	457,59	-124,33	30,95	-24,84	77,92	-337,88	-1450,35	0,2719	27	
	-322,06	-1390,04	767,37	-821,85	1490,50	-1162,17	464,36	-123,34	87,77	-46,11	48,85	-73,68	50,49	999,62	0,4146	28	
	38,13	771,82	-739,17	721,90	-831,12	392,05	-109,91	72,00	-195,80	121,81	-132,56	193,78	-26,57	-296,38	-0,0375	29	
	1,77	0,35	0,27	3,99	-7,79	17,18	-62,78	289,54	-435,80	200,70	7,01	-2,01	-0,65	-1,61	0,8540	30	
	-3,13	2,74	-3,04	-10,98	29,42	-95,29	422,90	-1073,36	1169,55	-439,59	2,81	2,07	1,85	1,14	0,5651	31	
	2,13	-8,99	5,74	25,42	-98,98	436,80	-1152,12	1579,18	-1066,25	285,18	1,66	-0,67	3,46	4,67	0,3178	32	
	3,50	9,12	-4,88	-83,65	437,51	-1154,57	1594,16	-1155,70	423,97	-62,92	6,28	-13,99	12,18	-6,05	0,3395	33	
	4,85	-2,19	0,66	373,85	-1140,70	1597,76	-1154,09	431,80	-82,44	9,78	-1,00	7,27	-10,75	12,02	0,2968	34	
	0,54	11,12	0,57	-819,55	1478,18	-1136,53	428,82	-83,18	29,44	-12,32	15,08	-23,06	1,70	0,62	0,4344	35	
	-2,63	1,33	18,14	720,76	-819,44	368,73	-75,28	12,65	-18,66	10,39	-12,66	20,61	2,90	-0,29	-0,0884	36	
															1,0457	37	

Na obrázkoch vidno nutné predĺženia pri predpínaní a výsledné osové sily po zavedení výsledkov riešenia sústavy rovníc. Pre reálne hodnoty predpínania je ešte nutné prehnat' model cez tzv. spätnú analýzu postupu výstavby (*backward analysis*).



Záver

Mohlo by sa zdať, že som mal prístup k výkresovej dokumentácii, alebo že som bol účastníkom niektorej fázy výstavby. Nič také sa v skutočnosti nedialo. Všetky informácie som čerpal z dostupných zdrojov na webe. Sú tam výsledné dokumenty verejných prezentácií, ekonomické analýzy, firemné briefingy a množstvo fotografií z rôznych fáz výstavby a ešte všeličo iné. Aplikoval som krížové analýzy, neraz aj fotogrametriu. A kam človek nedovídí, pošle tam matematiku. Ani Einstein nikdy nebol pri čiernej diere...

Ako výsledok obrovskej práce projektantov a zhotoviteľov, ako aj nezanedbateľné nakopenie finančných zdrojov, vzniklo v strede veľkomesta, spolu s centrálnou budovou terminálu, vydarené technické dielo so zakomponovaním zelene a oddychových zón.

Pri zostavovaní článku boli použité nasledovné počítačové programy :
STRAP, SketchUp, AutoCad LT, Microsoft Word, Microsoft Excel, PDF Creator, Corel Draw

