

# Oakland Bay Bridge

*static  
behavior*

*statické  
pôsobenie*



*theory, analysis*

*Vladimír Budinský SSK*

**Keywords:** Oakland Bay Bridge, self-anchored suspension bridge, computation, calculation, structural analysis, samokotvený visutý most, statický výpočet, SSK, budinsky, san francisco

## Úvod

Niekedy nastane čas, keď starý most doslúži a treba ho nahradiť novým. Môžu byť aj ďalšie dôvody, napr. údržba starého mosta presiahne únosné náklady, ale aj veľmi špecifické dôvody – seizmická bezpečnosť celej oblasti. Všetky tieto okolnosti viedli k výstavbe moderného supermosta na úrovni najnovších technických poznatkov.



Naše vedomosti o moste sa zakladajú na dostupných verejných zdrojoch, skromnej literatúre a na pár odborných článkoch. A sú to aj úmorné týždne hľadania relevantných informácií z internetu. Z tejto neúplnej skladačky sme vyskladali celkom slušnú výkresovú dokumentáciu na veľmi zjednodušené prepočty, aby sme pochopili princípy statického pôsobenia.

A ako to už býva, zistili sme, že skutoční tvorcovia a konštruktéri mosta museli vynaložiť pri prácach oveľa väčšie úsilie, ako sme si čo i len dokázali predstaviť.

Tento krátky článok nemá za účel vyčerpávajúci popis riešenia, konštrukcie a prínosov novej dopravnej trasy. Je to len malý uhol pohľadu na vydarené technické dielo, trochu zo statického a trochu z estetického pôsobenia. Všetky obrázky a prepočty v tomto príspevku sú pôvodné a nekopírované.

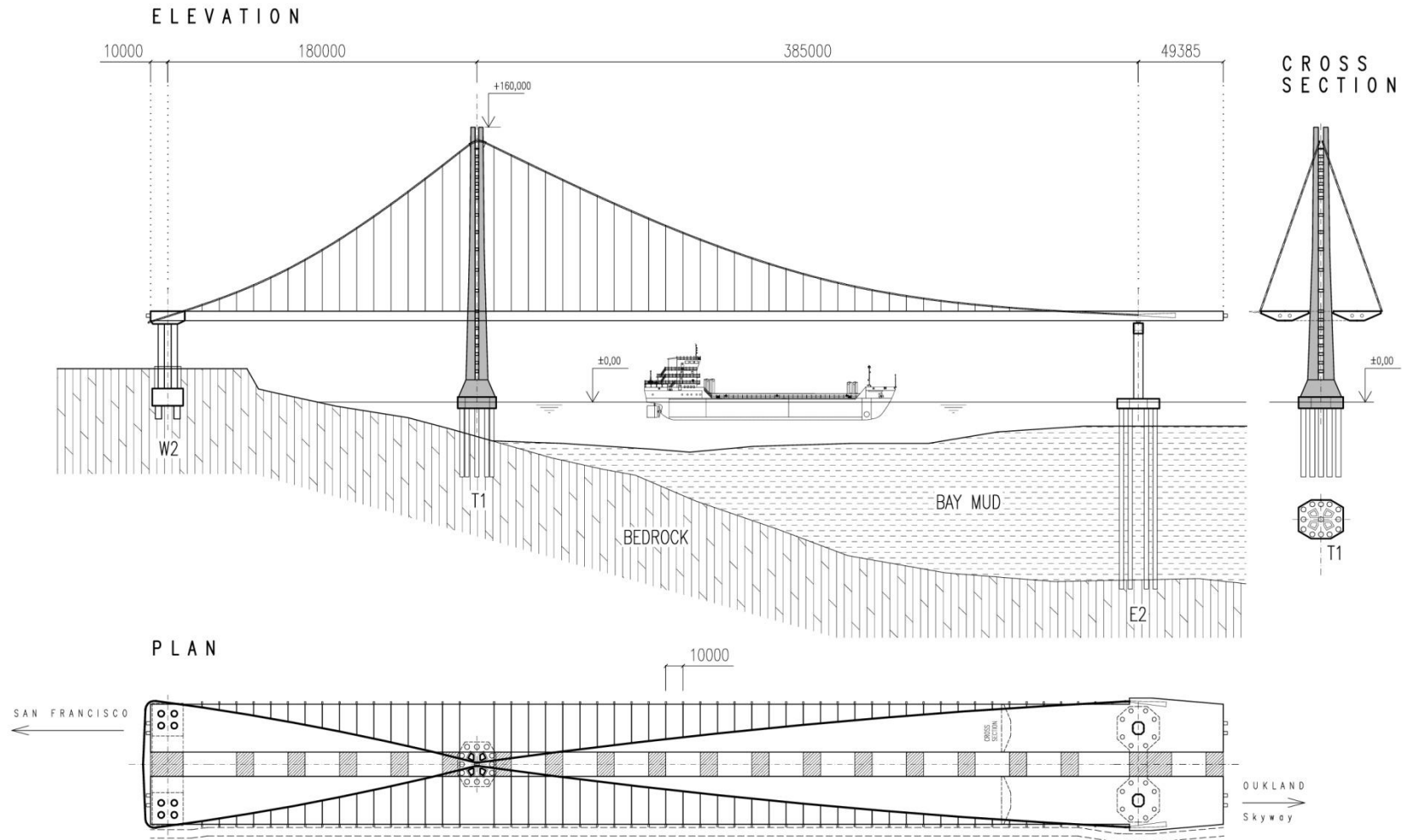
## Základné údaje o moste

Sústava premostení spája Oakland a San Francisco. Delí sa na východnú časť: *Oakland – ostrov Yerba Buena* a na západnú časť: *ostrov Yerba Buena – San Francisco*. Tento článok sa zaoberá len východnou časťou a to konkrétne hlavným mostom tzv. *Main span* a čiastočne diaľničnou estakádou tzv. *Skyway Viaduct*.

Cestná doprava :	10-prúdová diaľnica (2x5) + chodci + cyklisti
Správca mosta :	California Department of Transportation (Caltrans)
Oficiálny názov :	žiadny, ľudovo nazývaný jednoducho <i>Bay bridge</i>
Projekt :	T.Y. Lin International Group, Moffatt & Nichol
Hlavný dizajnér mosta :	Marwan Nader
Začiatok a koniec výstavby :	2002–2013
Rozpon ( <i>main span</i> ) :	180 + 385 m
Výška :	160 m ( <i>tower</i> )
Typ konštrukcie :	dvojpoľový samokotvený visutý most s nerovnakou dĺžkou polí
Materiál :	lanová konštrukcia s oceľovou mostovkou
Základy :	betónové pilóty s oceľovou výpažnicou, žb stĺpy, pätky a priečle
Rozpon ( <i>skyway</i> ) :	n x 160 m, železobetónový predpätý spojitý nosník z prefabrikovaných segmentov s nábehmi nad podporou

#### Náklady (s podtitulom : z 250 miliónov na 6,5 miliardy)

O vývoji ceny za most by sa dala napísať kniha. Aj keď táto oblasť nie je predmetom článku, zmienime sa o nej aspoň okrajovo. Problematika sa týka celkovo veľkých verejných zákaziek na celom svete. Stáva sa veľkým problémom odhadnúť vývoj nákladov v priebehu výstavby, najmä ak trvá niekoľko rokov. Vplýva na ne množstvo faktorov politických, sociálnych, ekonomických, environmentálnych aj technických. V roku 1995 seriózna ekonomická analýza odhadla cenu na novú východnú časť na 250 miliónov dolárov, s odôvodnením, že takáto cena síce o niečo presiahne náklady na inováciu starého mosta, ale vzhľadom na lepšie parametre nového mosta sa to vyplatí. Takto bola cena odsúhlasená aj úradmi. V roku 1996 po preštudovaní relevantných podkladov trasy a detailnej inžinierskej štúdie vzrástla cena zo dňa na deň na jednu miliardu dolárov, čo bolo pre verejnosť celkom šok. Odôvodňovalo sa to hlavne zlými geologickými podmienkami a nutnosťou hlbšieho založenia. V roku 1997 predložila spoločnosť Caltrans ďalšie odhady nákladov vzhľadom na rôzne technické úpravy. Štátna legislatíva nakoniec určila konečnú sumu 1,285 miliardy dolárov. Takto na desatiny určená suma sa javila verejnosti ako vierohodná a seriózne odborne spracovaná. Celý tento vývoj cien bol verejnosťou pozorne sledovaný, uverejňovaný na prvých stranách predných denníkov a následne aj komentovaný a kritizovaný. Jeden vtípálek vtedy trefne poznamenal, že by bolo žiadúce, aby každý obyvateľ *Friska* predložil svoj vlastný technický a cenový návrh. V apríli 2001 sa cena zdvojnásobila na 2,6 miliardy dolárov. Bolo to odôvodnené hlavne nepriaznivým vývojom svetových cien ocele a ďalších materiálov. Riaditeľ spoločnosti Caltrans uviedol, že s týmito číslami sú veľmi spokojní. Jeden senátor vyhlásil, že suma nás chráni od toho, čoho sa v budúcnosti najviac obávame – prekročeniu nákladov... Napriek nepriaznivému cenovému vývoju sa rozhodli zodpovedné orgány začať s výstavbou v roku 2002, s predpokladaným ukončením v roku 2007. Šok prišiel s cenovou ponukou na výstavbu pylóna vo výške 1,4 miliardy dolárov namiesto predpokladaných 780 miliónov. Ponuku do súťaže prihlásila len jedna firma. Napriek pôvodnému predsavzatiu, že výstavby sa zúčastnia len americké firmy, museli zodpovedné orgány vzhľadom na svetový cenový vývoj povoliť aj firmy z iných krajín. Tak sa stalo, že podperné sedlá káblov sa vyrábali v Anglicku, odliatky v Japonsku a komponenty hlavného mosta v Číne. Ukázalo sa však, že výrobky z Číny mali množstvo chýb vo zvaroch, ohrozujúcich až bezpečnosť mosta, a ich oprava stála viac ako pôvodný cenový rozdiel. V roku 2005 cena dosiahla 5,5 miliardy dolárov a napokon sa „ustálila“ na 6,5 miliardách dolárov. Experti však upozorňujú, že táto suma nezohľadňuje napr. úroky a iné finančné transakcie a v budúcnosti sa môže až zdvojnásobiť...



## Niektoré prvenstvá mosta

- najdlhšie rozpätie 385 m pri samokotvenom moste
- najdlhší zavesený obtočený kábel 1365 m
- prvé použitie proti-seizmických šmykových nosníkov v pylóne absorbujúcich energiu
- prvý visutý most bez spojenia pylóna a mostovky
- najťažšie prefabrikované segmenty v *skyway*, až 750 t

## Konštrukcia mosta

Parametre mosta a jeho genéza sú známe a mnohokrát dokumentované. Preto uvediem len stručný popis.

### Hlavný most (*main span*)

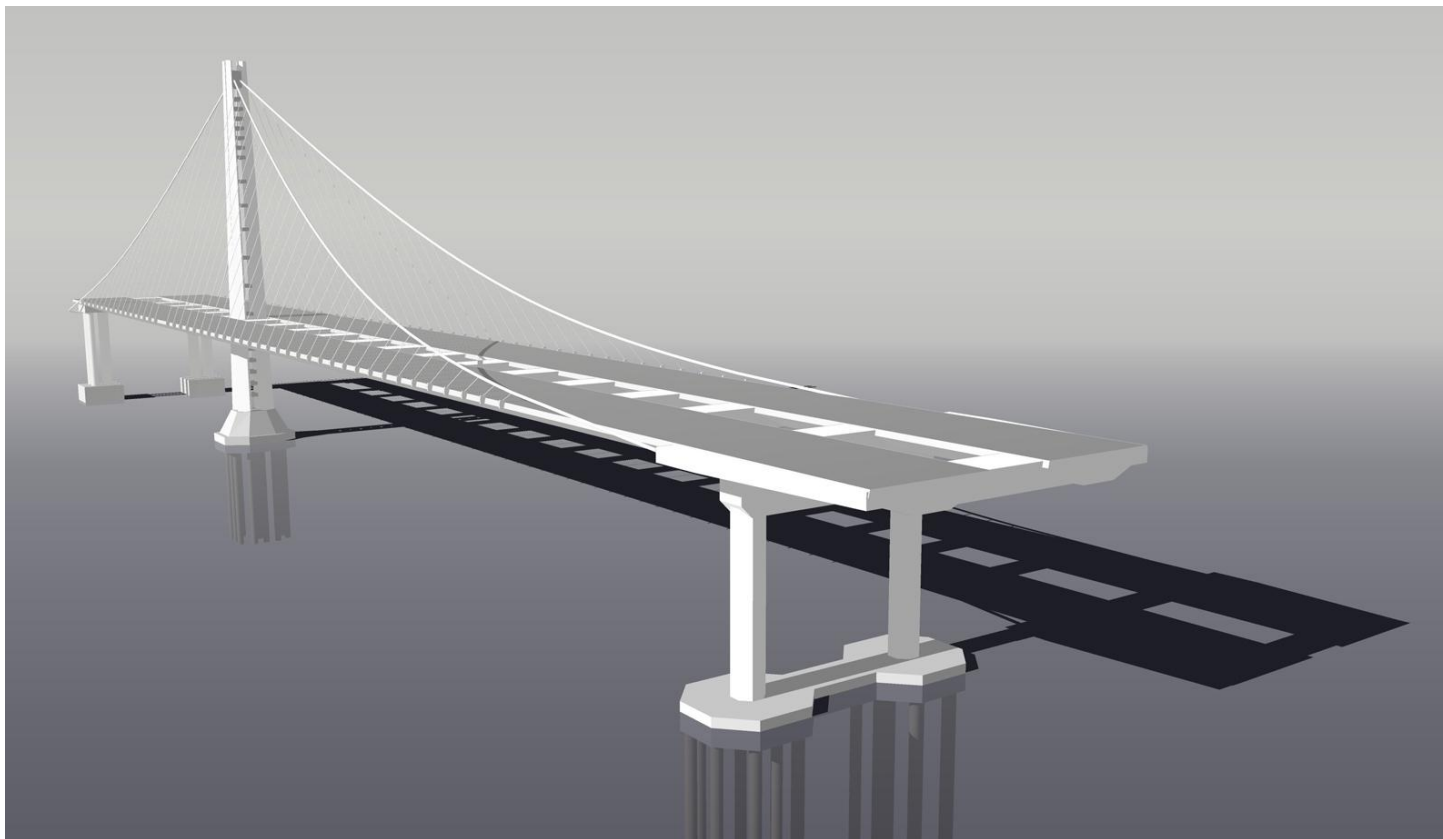
Konštrukcia označovaná ako samokotvený visutý most (*self-anchored suspension span*) sa vyznačuje tým, že hlavné nosné lano nie je kotvené do mohutných základových kotevných blokov, ale veľké vodorovné tlakové sily sú vedené do mostovky ako reakcie. Táto je potom namáhaná tlakom po celej svojej dĺžke. Hlavné rozpory a rozmery mosta sú zrejmé z výkresu.



*Hlavný nosný kábel* je zložený zo 137 lán, každé lano má 127 päťmilimetrových drôtov (*minimum tensile strenght 1550 MPa*). Priemer kábla je 780 mm. Hlavný kábel bol navíjaný po jednotlivých lanách ako jeden kus so slučkou (*loop*) nad západným pilierom *W2* a kotvený do dvoch rozpletov nad *E2*. *Závěsy* vo vzdialenostiach 10 m sa skladajú zo štvorice káblov o šiestich spletených lanách ( $\varnothing 63$  mm) s centrálnym stredným prvkom. Každé lano sa skladá z 37 drôtov. Stratégia napínania: Najskôr sa pomocnou lanovou konštrukciou ohol pylón smerom na kratšie pole, aby vyrovnal budúci posun od nerovnakého rozpätia polí. Celá konštrukcia bola zostavená na pevnej skruži. Most bol odskružený v dvojfázovom napínaní závesov. Tým sa zároveň zaviedlo napätie do mostovky, čím sa most skrátil a posunul cez ložiská nad *E2*. V ďalšom postupe sa dopol hlavný kábel pomocou osobitného hydraulického zariadenia nad podporou *W2* a výsledný stav sa zafixoval dobetónovaním. Nakoniec sa uvoľnilo ohnutie piliera zo zvislého smeru a odstránila sa pomocná lanová konštrukcia. Po všetkých týchto napínaníach sa dostali závesy s hlavným káblom do jednej roviny.

*Mostovka* je zvarená z oceľových segmentov (oceľ *ASTM Grade 50*) rôznej dĺžky, zostavená do dvoch diaľničných prúdov vedľa seba. Plechové steny sú stužené navrchu U-profilmi a naspodu T-profilmi. Priečne stuženie je po piatich

metroch. Dve mostovky sú spolu s priečnikmi 5,5x10 m v rozteči 30 m zostavené do vodorovného vierendelovho nosníka, pričom nie sú spojené s pylónom s cieľom znížiť seizmickú záťaž. Mostovka je na oboch stranách spojená s estakádami špeciálnymi rúrovými piestami priemeru 1,9 m, ktoré zabezpečujú momentový a šmykový prenos vnútorných síl, pričom je možný kontrolovaný pozdĺžny posun. Všetky tieto priečne šmykové spojenia a väzby sú unikátnym riešením mosta.



*Pylón* sa skladá zo štyroch oceľových (oceľ ASTM A709) krabicových kónických päťuholníkov, spojených navzájom nepravidelne po výške šmykovými nosníkmi, absorbujúcimi seizmickú energiu. Tieto nosníky boli laboratórne testované v mierke 1:1 na rôznej stupeň seizmicity. Výstuhy päťuholníkov sú po troch metroch, hrúbka stien 40÷100 mm. Pylón je založený v skalnej hornine na trinástich oceľových pilótach dĺžky cca 20 m, vyplnených betónom, priemeru 2,5 m, spojených hore mohutnou hlavicou.

*Podperu W2* tvoria dve štvorce stĺpov so sústavou lanových tiahel. *Podperu E2* tvoria dva mohutné železobetónové stĺpy s priečlou. Na priečli sú uložené klbové + posuvné ložiská s tromi priečnymi zarážkami. *E2* je založená na 2x8 zvislých pilótach dĺžky vyše 100 m. Všetky pilóty v *E2* sú spojené žb hlavicou.

Obe podpery, *W2* aj *E2*, sú založené v skalnej hornine.

*Vozovka* pozostáva z 50 mm vrstvy epoxy-AC. *Chodník* pre chodcov a cyklistov je vyložený na oceľových konzolách na južnej strane mostovky a jeho povrch tvorí 13 mm Polyester-Concrete. *Vozovka* na *skyway* je tiež z 20 mm vrstvy Polyester-Concrete.

### Diaľničná estakáda (skyway viaduct)

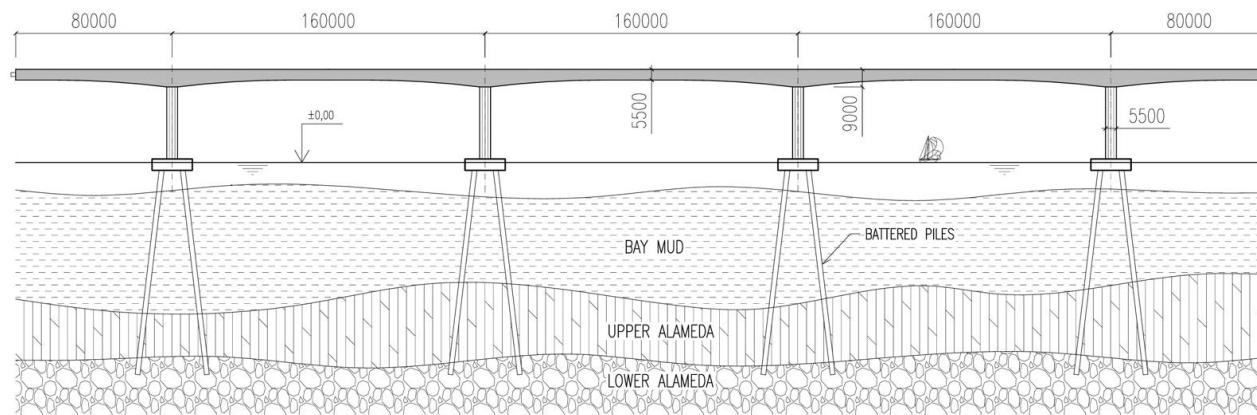
sa skladá z troch dilatačných úsekov po 4x 160 m. Spojenie medzi dilatačnými úsekmí tvoria špeciálne rúrové piesty popísané vyššie. Spôsob výstavby sa označuje ako *letmá montáž*. Mostovka estakády pozostáva zo 452 prefabrikovaných betónových segmentov, ktoré boli vyrobené v Stocktone v blízkosti San Francisca a prevážané loďou na miesto stavby. Jedná sa o najväčšie segmenty svojho druhu, ktoré boli vôbec vyrobené. Zdvíhali sa na určené miesto z lode pomocou navijakov, ktoré boli na tento účel vyrobené na mieru. Navijaky boli ukotvené na už zhotovené segmenty. V moste sú aplikované tri druhy pozdĺžneho súdržného predpätia: montážne predpätie konzoly, priame predpätie hornej a dolnej dosky a zdvíhané káble spojivosti v stenách prefabrikátu. Segmenty majú aj ploché priečne a tyčové šmykové predpätie. Keďže skalný podklad (*Franciscan Bedrock*) sa tu nachádza pomerne hlboko, bola zvolená progresívna metóda pre skupiny šikmo zarážaných pilót (*battered piles*) dosahujúcich do formácie *Spodná Alameda*, čo je zmes tuhého ílu, siltu, uľahnutých pieskov a štrkov. Zarážané pilóty tu odolávajú gravitačným a seizmickým zaťaženiam v podstate trením plášťa. Pri zarážaní dlhých mohutných pilót boli rázy také silné, že kvôli ochrane morskej fauny museli byť práce vedené v ochrannej bublinovej vzduchovej clone na tlmenie účinkov. Na obr. je znázornený jeden dilatačný úsek.

### Seizmicita a vietor

Veľký dôraz pri návrhových požiadavkách bol kladený na odolnosť mosta voči zemetraseniu, čo je vzhľadom na oblasť prirodzené. Most by mal slúžiť ako strategická komunikácia v dobe nožnej prírodnej katastrofy a aj po nej. Caltrans definoval a uzavrel v roku 2002 presné návrhové požiadavky (*Design Criteria*) pre východnú časť spojenia pre všetky parametre diela, vrátane seizmického namáhania. Boli vytýčené dve hlavné návrhové požiadavky, a to odolnosť voči seizmickým vplyvom pri návratnosti 450 rokov, tzv. FEE (*function evaluation earthquake*) pri pripustení elastických deformácií a funkčnom vyhodnotení

konštrukcie, a pri návratnosti 1500 rokov, tzv. SEE (*safety evaluation earthquake*) pri možných plastických pretvoreniach a bezpečnostnom vyhodnotení konštrukcie. Okrem predpokladu dodržania normových spektier pružnej odozvy boli zadané aj konkrétne typické akcelerogramy pre danú oblasť. Všetky prvky a detaily konštrukcie boli neobyčajne podrobne overované a aj laboratórne testované. Návrhové požiadavky určili aj hodnoty vetrového zaťaženia, medzi nimi základnú rýchlosť vetra (*basic design wind speed*) na 31 m/s, interakcia pozdĺžnych turbulencií vetra (*Gust response factor*) 1.9, súčinitele tvaru pre pylón 1.6 a pre mostovku 1.2. Bola upresnená tabuľka rýchlostí vetra [m/s] pre priemerné sekundové úseky a rôzne návratnosti [rok] s vyznačenou odporúčanou hodnotou :

návratnosť	60 sekúnd	600 sekúnd	3600 sekúnd
100	48	44	<b>42</b>
10000	68	63	60

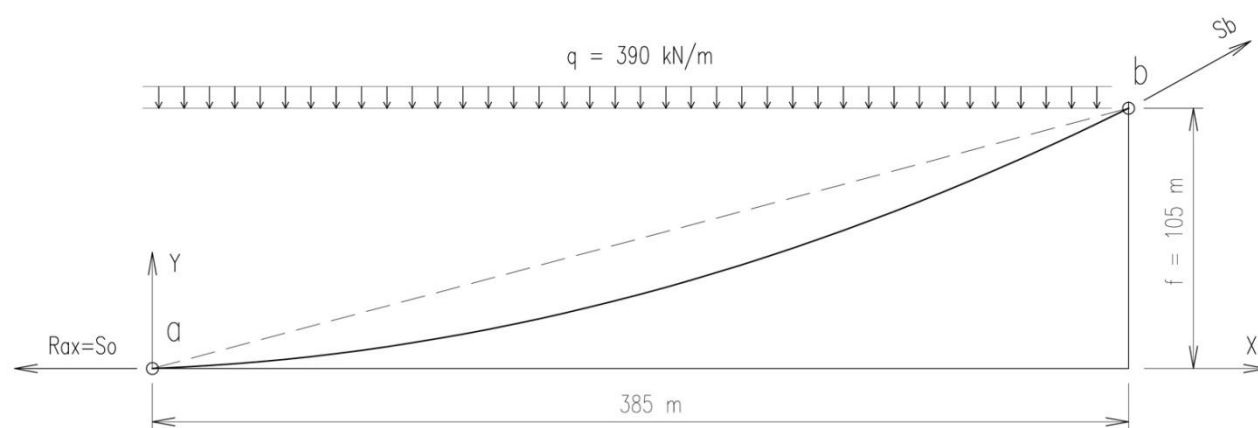


## Výpočty

Za účelom pochopenia statického pôsobenia konštrukcie sme previedli niektoré veľmi zjednodušené prepočty vybraných problémov. Základný schematický výpočet (tzv. *počiatočná stavová analýza*) zaveseného mosta je pomerne jednoduchý, svedčí o tom aj množstvo realizovaných mostov už v 19. storočí. Vlastná výstavba je už oveľa ťažšia, lebo tu sa naplno prejaví geometrická a materiálová nelinearita sústavy. Staviteľia mostov pred počítačovou érou sa museli spoliehať na intuíciu a experimentálne doplnenie sústavy priamo na stavbe. Základný výpočet možno teda rozdeliť na dve etapy : 1. Analýzu konečného stavu a 2. Analýzu fáz výstavby.

Na konečný stav konštrukcie možno potom aplikovať základný statický a dynamický výpočet dodatočných síl, ako napr. doprava, vietor, seizmicita a pod.

Pokiaľ chceme hospodárne zabezpečiť výstavbu (jej rýchlosť, kvalitu a cenu), je žiadúce previesť analýzu fáz výstavby podľa materiálovej a geometrickej nelinearity – v prípade lanových konštrukcií tzv. teóriou III. rádu nazývanú tiež teóriou veľkých deformácií. Toto sa výhodne realizuje tzv. spätnou analýzou (*backward analysis*).



Overenie základných rozmerov:

$$S_o = 1/f * q(2*L)^2 = q*L^2/(2*f) = 390*385^2/(2*105) = 275275 \text{ kN}$$

$$\sigma_a = S_o/A = 275275/0,4\text{m}^2 = 688188 \text{ kPa} \approx 0,37 f_u$$

kde  $f_u = 1860 \text{ MPa}$  a plocha kábla  $A \approx 0,4\text{m}^2$

$$S_b = \sqrt{(q*L)^2 + S_o^2} = \sqrt{(390*385)^2 + 275275^2} = 313562 \text{ kN}$$

$$\sigma_b = S_b/A = 313562/0,4\text{m}^2 = 784000 \text{ kPa} \approx 0,42 f_u$$

Sklon lana od vodorovnej pri bode **b**

$$\arctan(\beta) = 8*f*x/(2*L)^2 = 8*105*385/(385*2)^2 = 28,6^\circ$$

V prílohe je uvedené podrobné grafické riešenie celého mosta s dvomi nerovnakými poľami za podmienky nulového posunu pylóna. Úloha s nekonečným počtom riešení je voľbou jedného parametra jednoznačne riešiteľná. Ako parameter bol zvolený sklon prvého vlákna polygónu.

Pre ďalšie výpočty hlavného mosta bol zostavený podrobný priestorový prúťový FEM model a niektoré čiastkové, väčšinou plošné pomocné modely.

Pri diaľničnej estakáde sme sa zamerali na pozdĺžne predpätie. Jeho usporiadanie vyplýva hlavne zo spôsobu výstavby letnou montážou. Pri symetrickom rozširovaní *zárodku* nad stĺpom sa jedná o staticky určitú konštrukciu. Každým pridaním segmentu sa predoplo a ukotvilo 6 káblov, pri celkom desiatich cykloch to robí spolu 60 káblov nad každým stĺpom. Káble mali rôznu početnosť lán, najviac do 37, boli umiestňované do hornej dosky a kotvené vždy po dvoch nad stojinou a po jednom na krajoch.

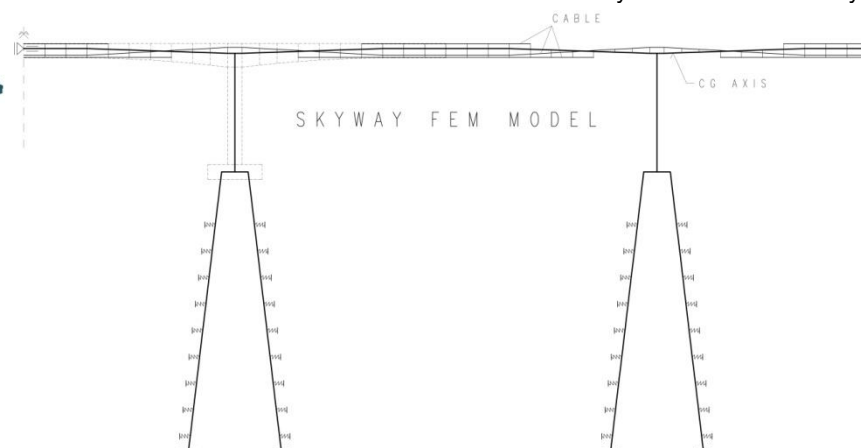


Po spojení dvoch protíahlých konzol sa situácia diametrálne mení. Nastupujú staticky neurčité momenty od predpínaných káblov a výraznejšie pnutia od zmršťovania a dotvarovania. Konštrukcia začne prenášať zaťaženia od dodatočných stálych zaťažení, od dopravy, vetra, teploty a je pripravená na seizmické vplyvy. Ako staticky neurčitý systém je citlivejší na prípadné poklesy podpôr.

Prúťový FEM model hlavného mosta



Rovinný FEM model estakády



V strede rozpätia sa nachádza dvanásť 19-lanových káblov v hornej doske a šesťnásť káblov v spodnej doske, ktoré sú postupne kotvené do kotevných blokov, tzv. blístrov. Jedno lano má priemer 15,2 mm. Zdvíhané káble vo funkcii káblov spojitosti sú zložené z 25 lán priemeru 15,2 mm a sú umiestnené v stojinách. V prílohe sú dokumentované výsledky v prierezoch v líci stĺpa – montážny stav a v priereze v strede rozpätia na začiatku a konci životnosti.

## Záver

Týmto krátkym článkom som chcel poukázať na zlomok problémov a riešení, s ktorými sa v priebehu návrhu a výstavby potýkali návrhári, konštruktéri a zhotovitelia tohto mimoriadneho diela, ktoré tvorí posun v chápaní a riešení seizmických účinkov na mostné konštrukcie.

*Niektoré zdroje, použité pri tvorbe článku:*

Caltrans : Self-anchored suspensin bridge DESIGN CRITERIA, Prepared by TYLI/M&NE Joint Venture, 2002

Tom Ho(TYLI) : THE DESIGN AND CONSTRUCTION OF THE NEW SAN FRANCISCO OAKLAND BAY BRIDGE (SFOBB) EAST SPAN, 2007

Marwan Nader, Brian Maroney: THE DESIGN AND CONSTRUCTION OF THE NEW SAN FRANCISCOOAKLAND BAY BRIDGE (SFOBB) EAST SPAN, STRUCTURE magazine, X/2007

Abolhassan Astaneh-Asl, Xin Qian: PUSHOVER ANALYSIS OF THE NEW SELF-ANCHORED SUSPENSION BAY BRIDGE TOWER, INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH AND INNOVATION | WINTER 2016

[https://en.wikipedia.org/wiki/Eastern\\_span\\_replacement\\_of\\_the\\_San\\_Francisco-Oakland\\_Bay\\_Bridge](https://en.wikipedia.org/wiki/Eastern_span_replacement_of_the_San_Francisco-Oakland_Bay_Bridge)

Pri zostavovaní článku boli použité nasledovné počítačové programy :

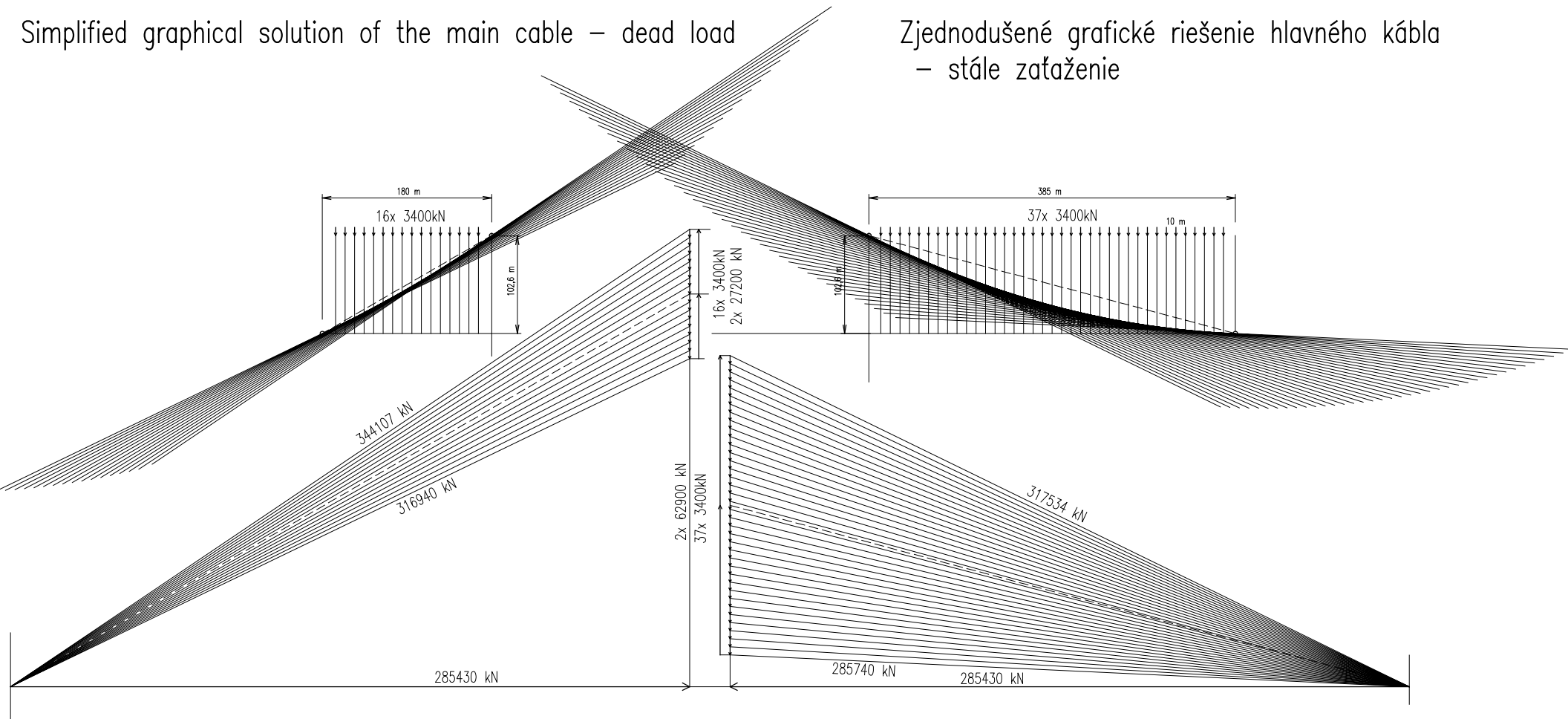
STRAP, SketchUp, AutoCad LT 2004, PRECON, Microsoft Word, PDF Creator, Corel Draw

# PRÍLOHY

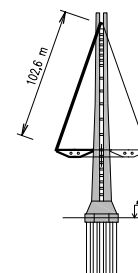
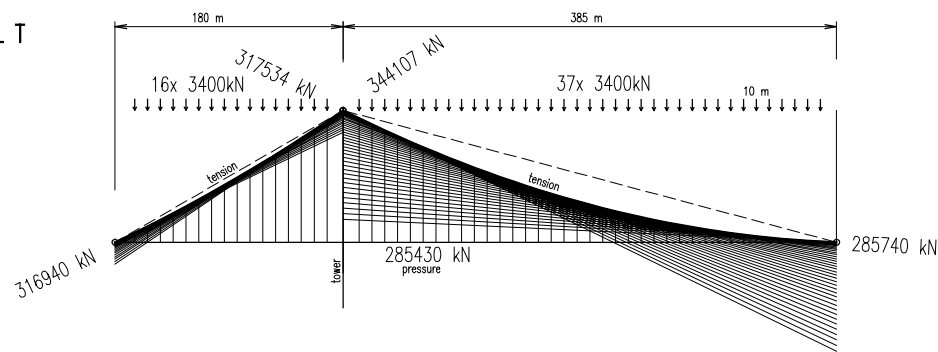
O B S A H	strana
Grafické riešenie hlavného kábla	10
Nelineárne výpočty hlavného kábla	11
<i>Skyway</i>	
Konzola – napätia	12
Konzola – kontrola polohy predpínacej sily	13
Stred rozpätia – napätia	14
Stred rozpätia – kontrola polohy predpínacej sily	15

Simplified graphical solution of the main cable – dead load

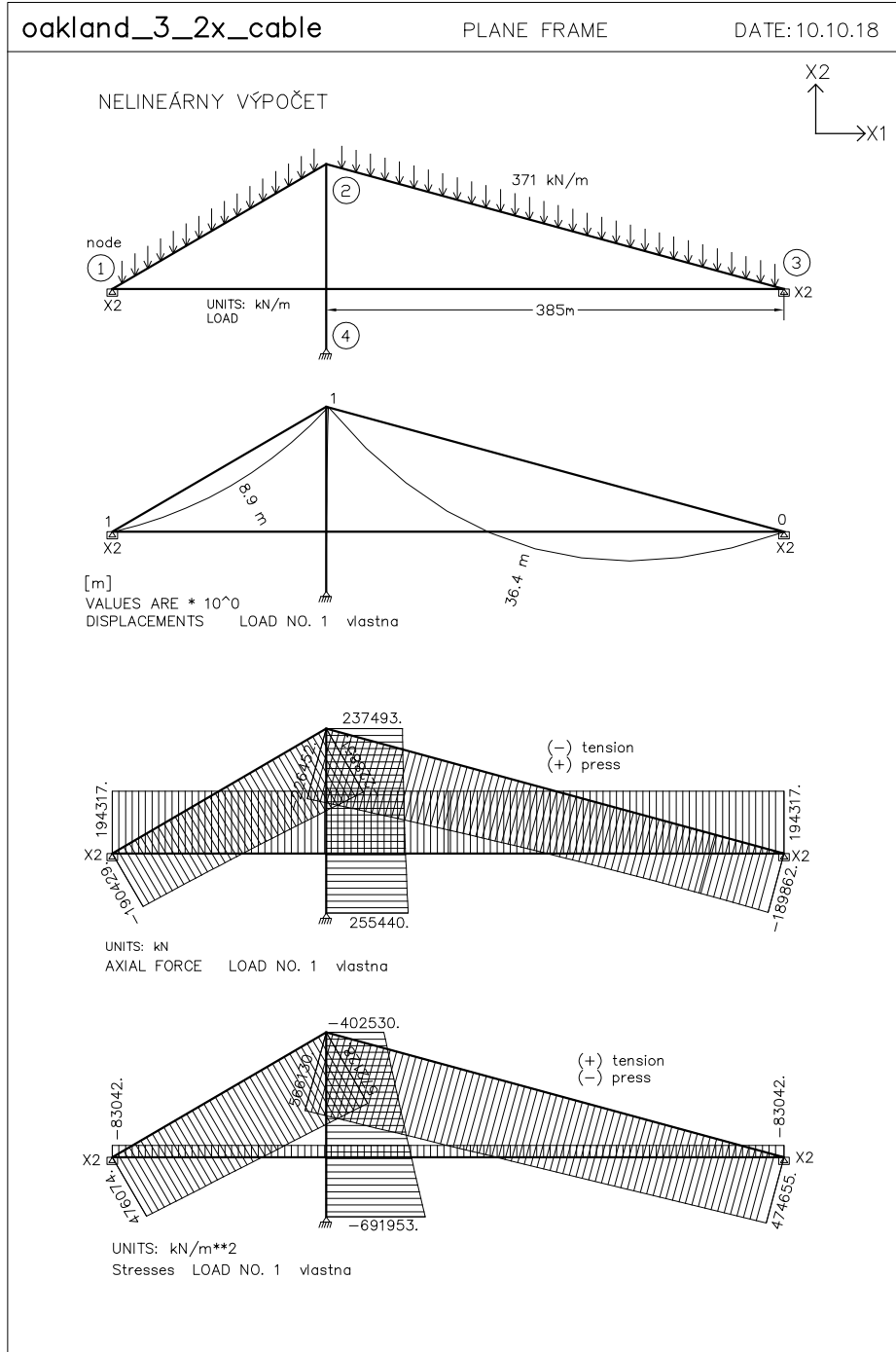
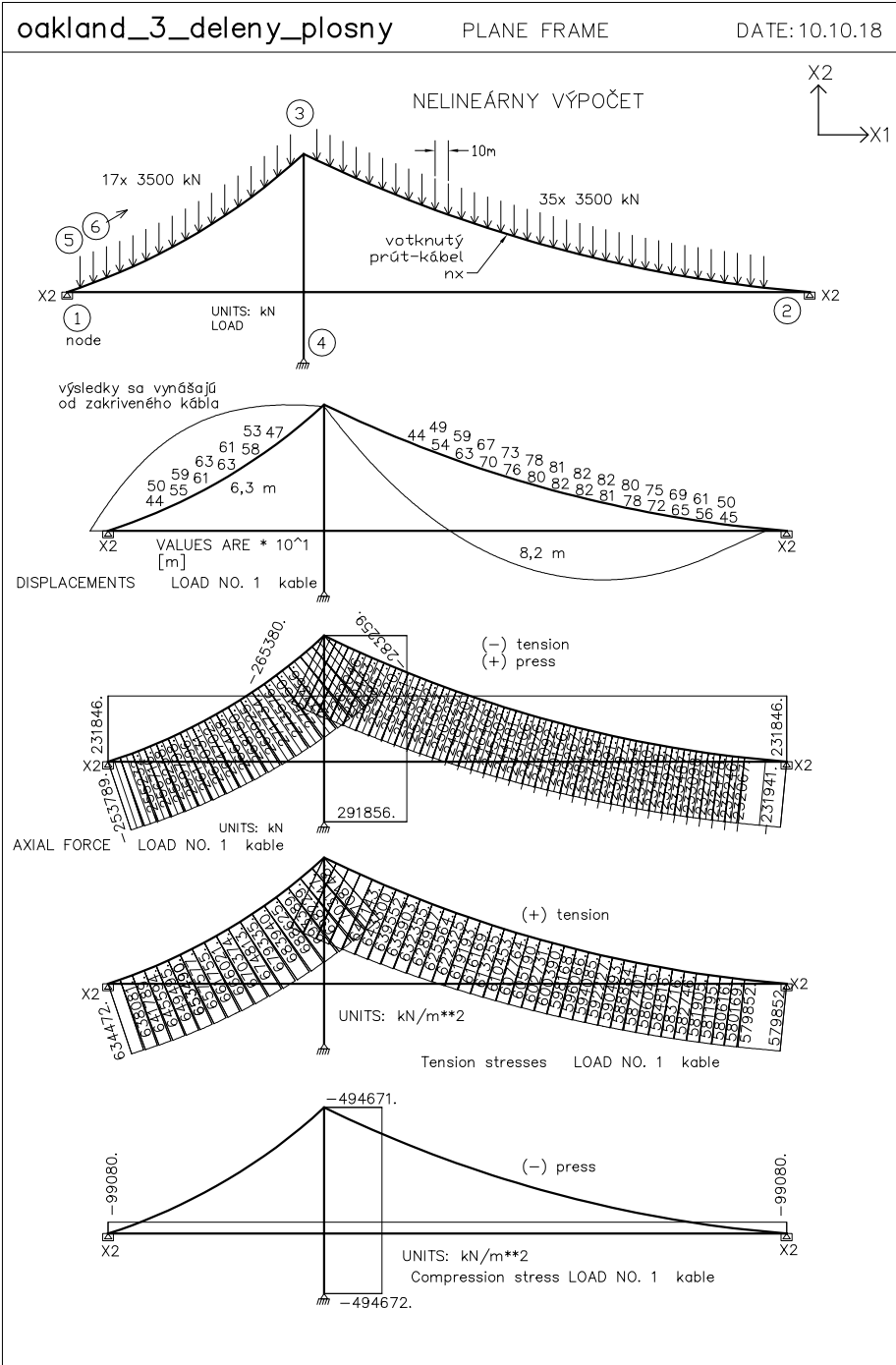
Zjednodušené grafické riešenie hlavného kábla – stále zaťaženie

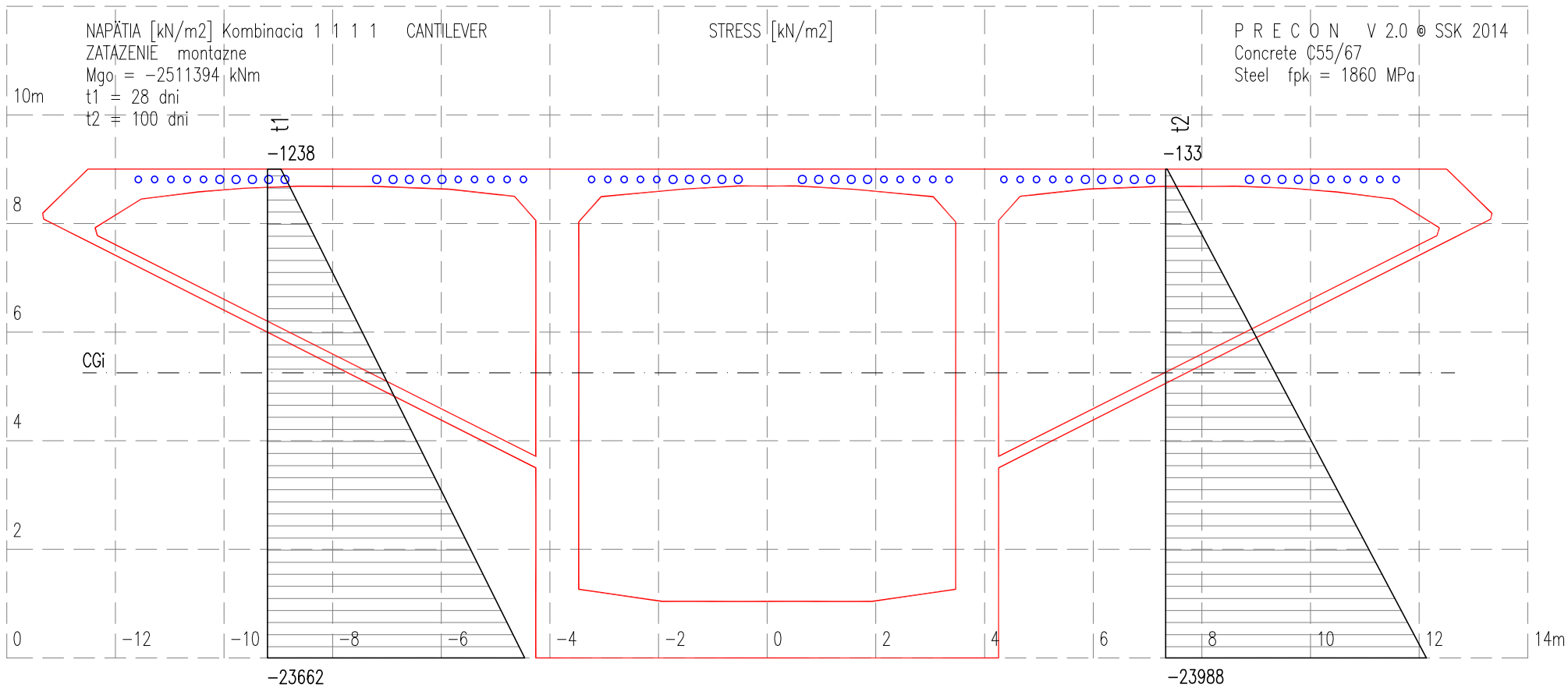


RESULT



# Dva odlišné prístupy k riešeniu hlavného kábla (main cable)

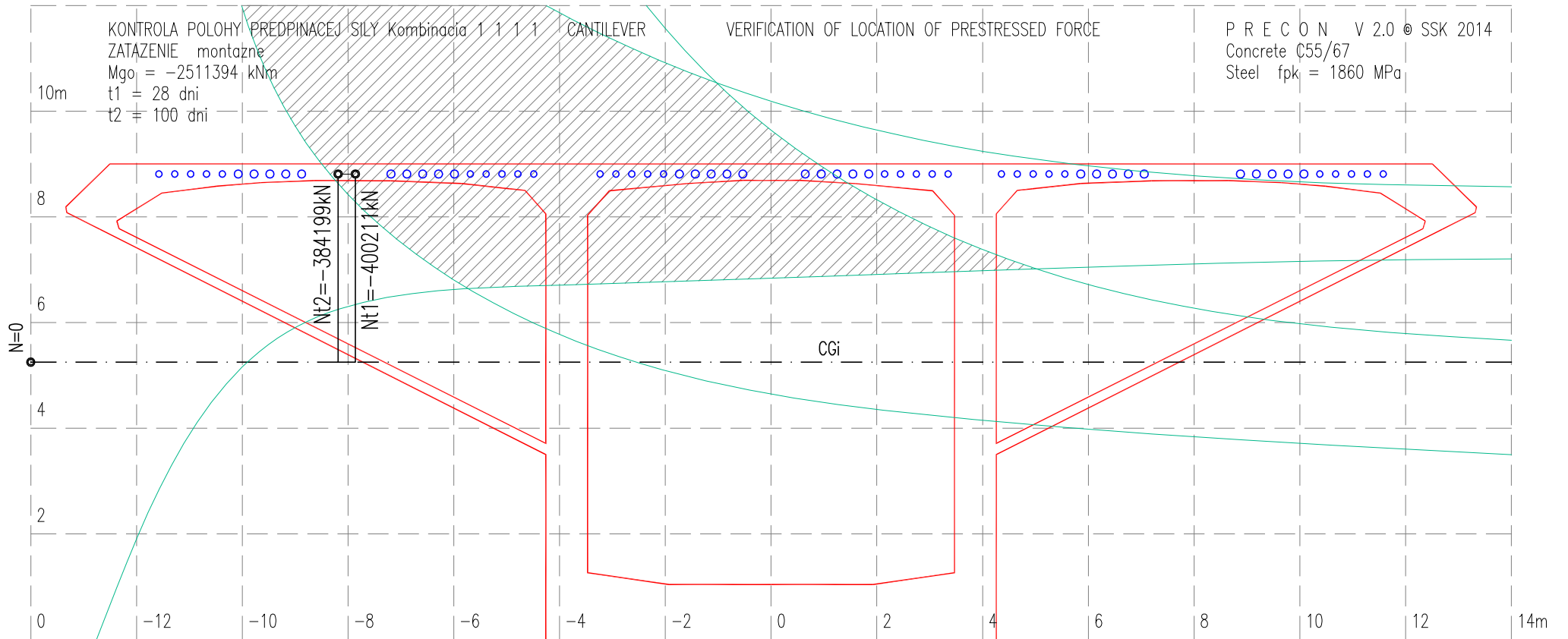




KONTROLA POLOHY PREDPINACEJ SILY Kombinacia 1 1 1 1 CANTILEVER  
ZATAZENIE montazne  
Mgo = -2511394 kNm  
t1 = 28 dni  
t2 = 100 dni

VERIFICATION OF LOCATION OF PRESTRESSED FORCE

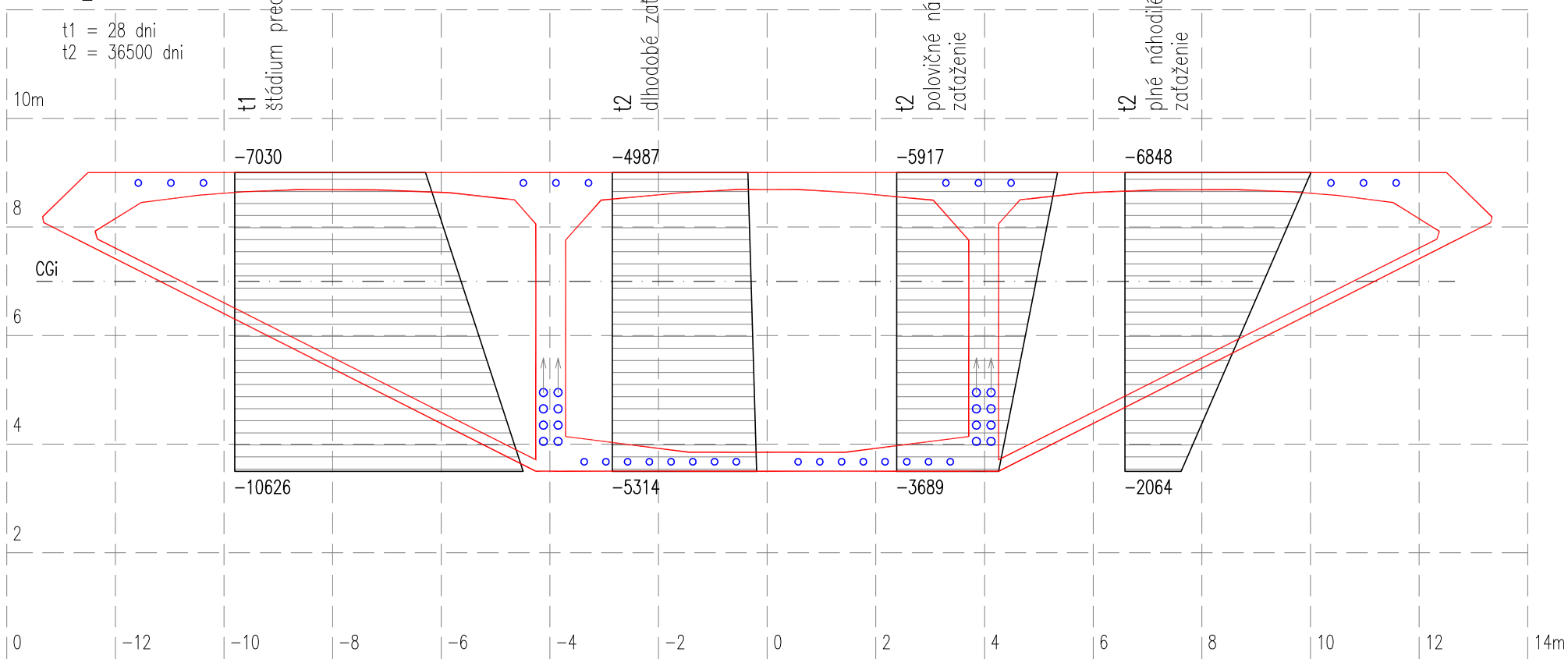
P R E C O N V 2.0 © SSK 2014  
Concrete C55/67  
Steel fpk = 1860 MPa



NAPÄTIA [kN/m<sup>2</sup>] Kombinacia 2 1 2 2 M I D D L E  
 ZATAZENIE po spojení (after connection)  
 M<sub>go</sub> = 0 kNm  
 M<sub>g</sub> = 34422 kNm  
 M<sub>nah</sub> = 96898 kNm  
 M<sub>n\_t1</sub> = -63377 kNm  
 M<sub>n\_t2</sub> = -40630 kNm

STRESS [kN/m<sup>2</sup>]  
 Characteristic Combination

P R E C O N V 2.0 © SSK 2014  
 Concrete C55/67  
 Steel f<sub>pk</sub> = 1860 MPa



KONTROLA POLOHY PREDPINACEJ SILY Kombinacia 2 1 2 2 M I D D L E

ZATAZENIE po spojení (after connection)

$M_{go} = 0$  kNm

$M_g = 34422$  kNm

$M_{nh} = 96898$  kNm

$M_{n\_t1} = -63377$  kNm

$M_{n\_t2} = -40630$  kNm

VERIFICATION OF LOCATION OF PRESTRESSED FORCE

Characteristic Combination

P R E C O N V 2.0 @ SSK 2014

Concrete C55/67

Steel  $f_{pk} = 1860$  MPa

