

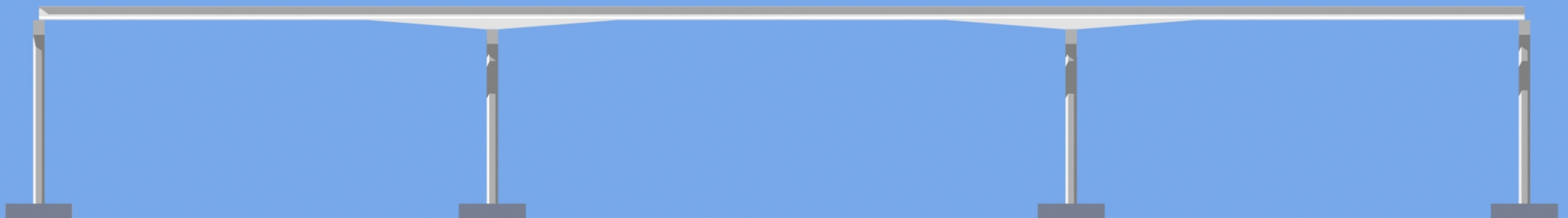
# Highland View Bridge

## FLORIDA

*static  
behavior*

*statické  
pôsobenie*

*theory, analysis  
Vladimír Budinský SSK*



**Keywords:** bridge, spliced precast girders, bulb-tee girders, Highland View Bridge, computation, calculation, structural analysis, most, statický výpočet, spájané prefabrikované nosníky, nosné konštrukcie, SSK

## Úvod (Introduction)

Koncom dvadsiateho storočia sa prevažne v južných oblastiach Spojených štátov presadil spôsob stavania predpätých prefabrikovaných mostov dlhšieho rozpätia.

Už viac ako 70 rokov sa prefabrikované predpäté betónové nosníky efektívne používajú v rôznych štátoch po celom svete, a to z dôvodu ich odolnosti, nízkych nákladov na životný cyklus, rýchlosti výstavby a aj ich modularity, okrem iných výhod. Tieto prefabrikáty sa najčastejšie používajú pre mosty jednoducho podopreté, s jedným nosníkom na celú dĺžku. V sektore dopravy však narastá potreba budovať dlhšie rozpätia s ľahko dostupnými, štandardnými prefabrikovanými tvarmi nosníkov. Metódy, používané v rôznych oblastiach na zvýšenie rozpätí, s postupujúcim vývojom v materiáloch a konvenčnými postupmi navrhovania často vedú k relatívne malým nárastom rozpätia pre prefabrikované predpäté betónové nosníky. Rozpätia sú obmedzené na približne 45 m kvôli obmedzeniam hmotnosti a dĺžky pri preprave prefabrikovaného nosníka z výrobného závodu na miesto výstavby mosta.

V mieste, kde ústí vodný kanál *Gulf County Canal* do zálivu *Saint Joseph Bay*, medzi mestečkami *Port Saint Joe* a *Highland View*, vznikla na prelome osemdesiatych a deväťdesiatych rokov minulého storočia potreba premostiť túto floridskú vodnú cestu. Vzdialenosť medzi brehmi bola približne 60 m. To znamenalo jeden až dva piliere mosta vo vode v dosahu nárazu lode. Rozpočtári vypočítali, že keby sa rozpon zvýšil na cca 75 m, ušetrili by sa všetky náklady na zabezpečenie pilierov voči nárazu lode a výstavbu vo vode, ktoré by boli značne vyššie ako zvýšenie rozponu. Ak by sa to podarilo, piliere by stáli na brehu a tým pádom by boli prirodzene chránené pred nárazom.

Pod taktovkou FDOT (*Florida Department of Transportation*) sa začali realizovať štúdie a výpočty na budúcu podobu mosta. Visuté, zavesené, oblúkové, ako aj monolitické varianty sa ukazovali príliš drahé. Do úvahy prichádzali skôr prefabrikované riešenia, oceľové alebo betónové. Ako bolo spomenuté vyššie, betónové prefabrikáty mali zatiaľ obmedzenia v rozpone, avšak v FDOT sa nevzdávali myšlienky ich ostatných výhod, hlavne bezúdržbovosť a trvácnosť. Chceli tiež využiť existujúce priemyselné typy a prierezy, aby bolo možné zlacniť výrobu, aj s výhľadom na plánované ďalšie mosty.

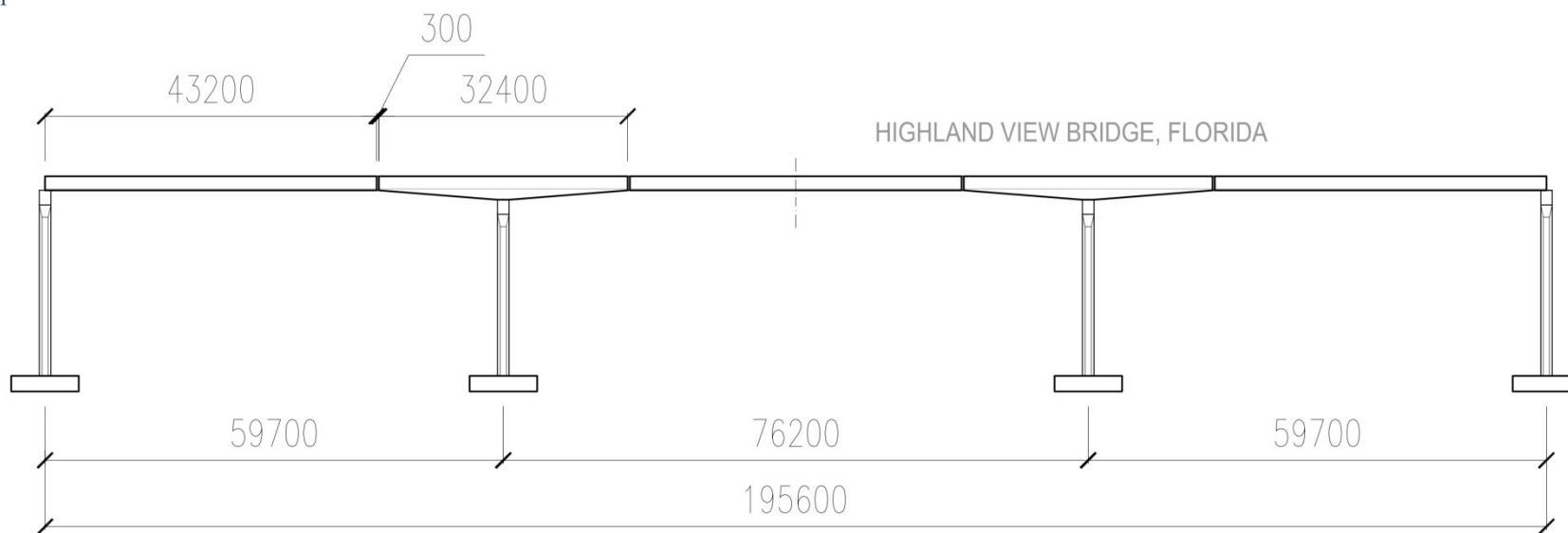


Výsledkom tohto snaženia vznikol most, ktorý sa stal vzorom a kladným precedensom pre ďalší vývoj a výstavbu v jednotlivých štátoch USA, okrem Floridy najmä v Texase, Colorade, Delaware, Mississippi a iných. Rozhodujúce nástroje a predpoklady na zvýšenie rozponu boli tieto :

- zaistenie spojitosti konštrukcie
- spriahnutie systémom nosník–doska (betón–betón)
- vývoj detailu vzájomného pozdĺžneho spoja prefabrikátov, zmonolitnenie
- viacnásobné predpínanie (väčšinou vopred a dodatočné predpínanie, *pre- and post-tensioning*)

Most s názvom *Highland View Bridge* (miestny názov *George G. Tapper Bridge*) bol dokončený v roku 1994 a toho času sa stal most s najväčším rozpätím s použitím štandardných prefabrikovaných betónových prvkov v USA – 76.2 m. Prefabrikáty majú prierez tvaru „I“, v Spojených štátoch sa udomácnil výstižnejší výraz *bulb-tee girder*.

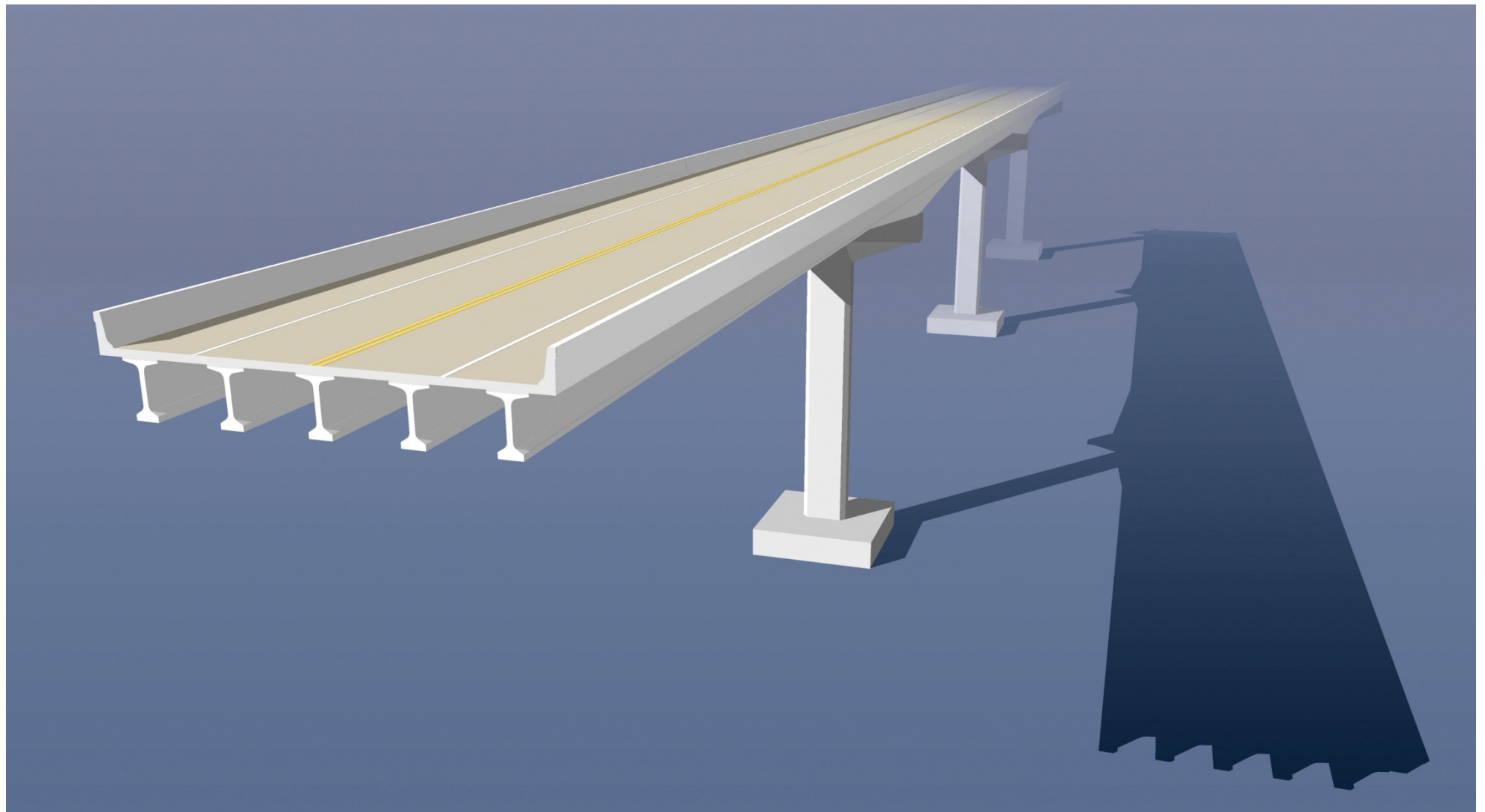
Celý most pozostáva z južného prístupu s 11 rozpätiami 27.1 m, centrálnej časti 59.7 + 76.2 + 59.7 = 195.6 m a severného prístupu tiež s 11 x 27.1 m. Prístupové mosty sú vyskladané konvenčnými nosníkmi *AASHTO Typ IV 1* ako prosté nosníky. Tento článok sa bude zaoberať len stredovým trojpoľovým úsekom celkovej dĺžky 195.6 m a to len konštrukciou nosníkov so spriahnutou doskou.



Princíp nosnej konštrukcie

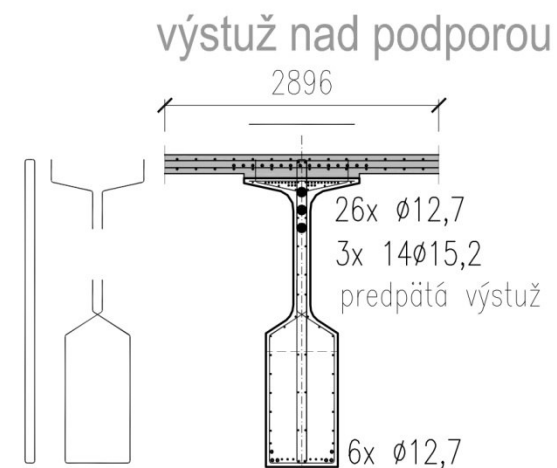
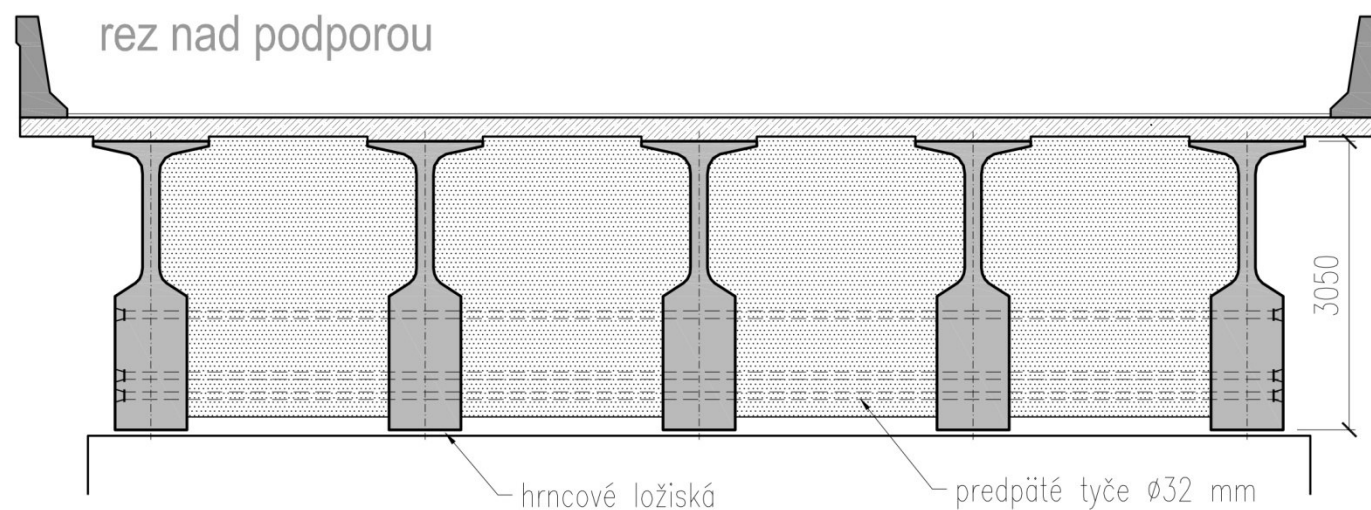
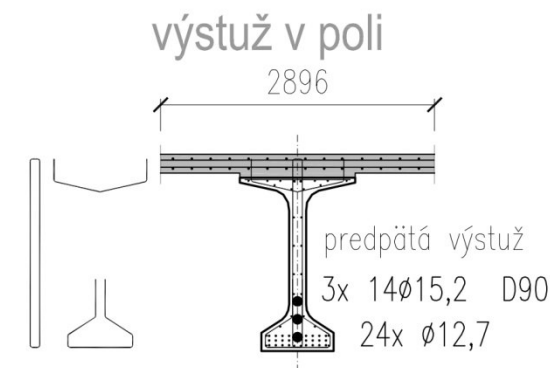
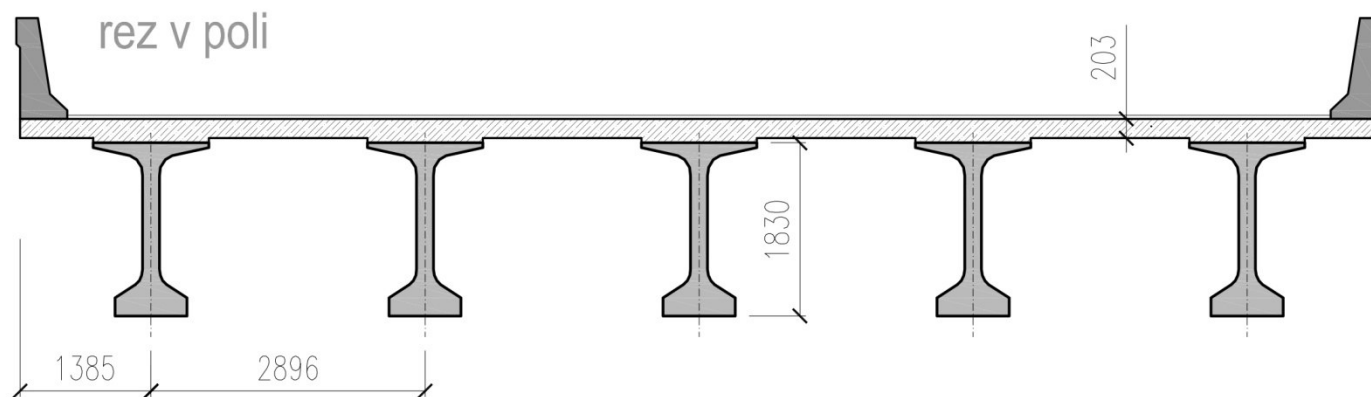
#### Účastníci výstavby :

Vlastník:	Ministerstvo dopravy na Floride (FDOT), obvod 3, Chipley , Florida.
Návrhový konzultant:	Janssen & Spaans Engineering, Inc., Indianapolis, Indiana.
Generálny dodávateľ:	L&A Contracting, Inc., Port Saint Joe, Gulf County, Florida.
Výrobca prefabrikovaného betónu:	Gulf Coast Pre-Stress Inc., Pass Christian, Mississippi.



## Popis konštrukcie

Stredový trojpoľový systém mosta vyžaduje (až na malé úpravy dráhy káblov) v podstate len dva druhy prefabrikátov. Je to priamy prefabrikát dĺžky 43.2 m, ktorý je umiestnený v krajných a v strednom poli, a nadpodporový trapézový (polygonálny, lichobežníkový) prefabrikát (tzv. *haunched girder*) dĺžky 32.4 m, ktorý má rovnaký prierez, ale spodnú časť má v strede vychýlenú smerom nadol o 1220 mm. Rozmery priečneho rezu, prefabrikátov a vystuženie predpínacou výstužou sú zrejmé z obrázka. Výstuž  $\phi 12.7$  je predom predpätá,  $\phi 15.2$  je dodatočne predpätá cez dĺžku 195.6 m.



Vo výrobe sú jednotlivé prefabrikáty predpäté strunobetónom za účelom montážnej a dopravnej manipulácie. Vnútri prierezu majú vedenú trojicu prázdnych káblových kanálikov na dodatočné predpínanie po uložení nosníka na určené miesto v moste. Kanáliky medzi nosníkmi je treba precízne spojiť pred zaliievkou, ktorá sa betónuje spoločne s priečnikmi. Priečniky sú umiestnené v miestach spojov prefabrikátov a nad podporou, kde sú navyše predpäté predpínacími tyčami. Spoj medzi prefabrikátmi (medzera je presne 1 stopa  $\approx 30,5$  cm) sa pred betonážou fixuje pomocnou oceľovou konštrukciou, ktorá by mala zabezpečiť určitý stupeň zmonolitnenia konštrukcie. Tento detail je veľmi náročný na dizajn aj prevedenie a je predmetom ďalšieho výskumu a zlepšovania.

Prefabrikáty sú uložené prostredníctvom hrncových ložísk na „kladivovité“ stĺpy s osemuholníkovým driekom. Pätky sú štvorcové, podporované kvôli nižšej únosnosti zeminy kruhovými pilótami.

## Materiál

Betón – pevnosť v tlaku 6500 psi  $\rightarrow$  C45/55

Betonárska oceľ – Grade 60  $\rightarrow$  B420B

Predpínacia výstuž ASTM A 416

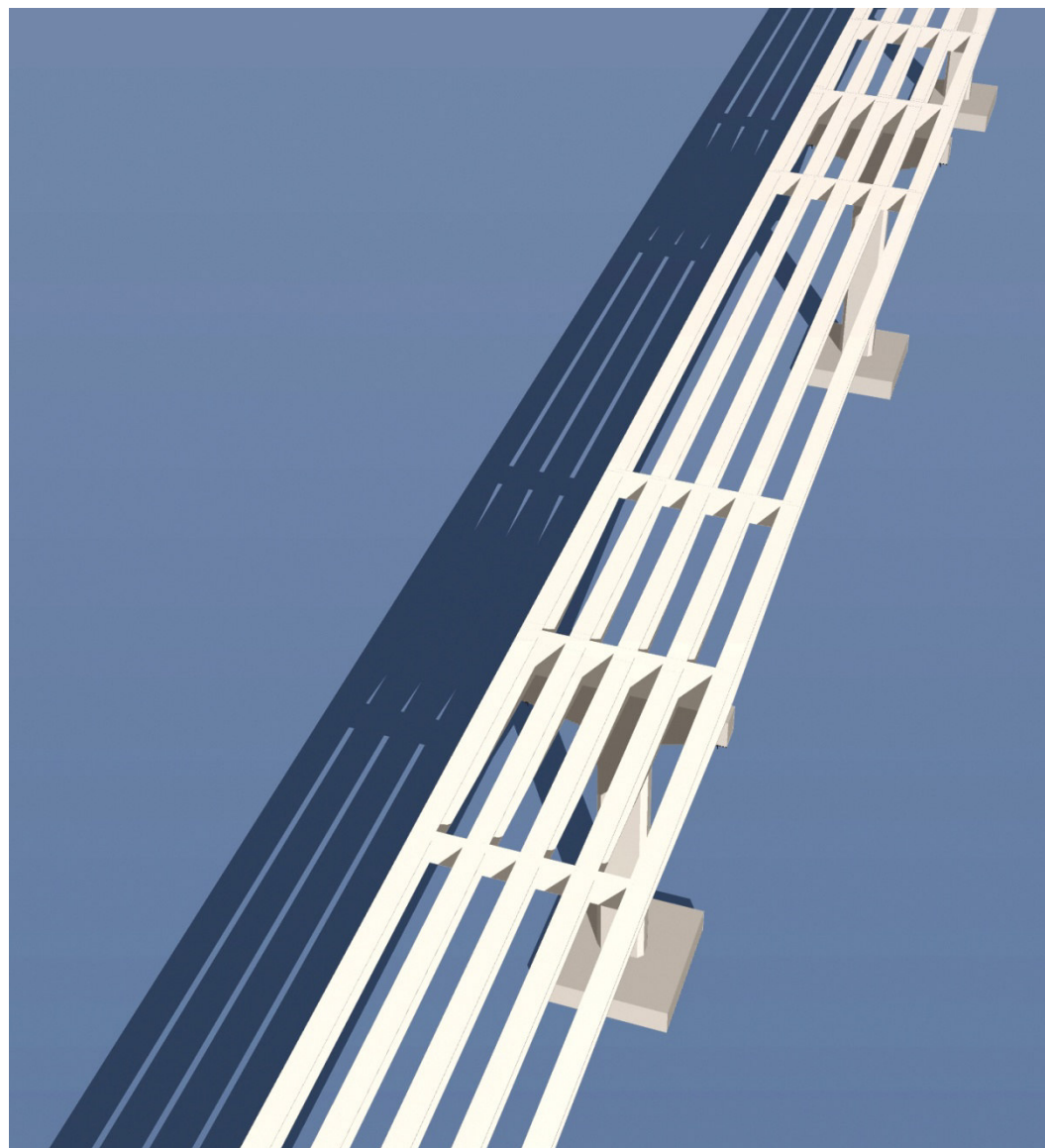
laná  $\varnothing 15,2$  1860 MPa  $A = 140$  mm<sup>2</sup>

laná  $\varnothing 12,7$  1860 MPa  $A = 98$  mm<sup>2</sup>

## Postup výstavby

Postup výstavby je schematicky znázornený na obrázku na ďalšej strane. Postup výstavby je kľúčový, musí byť presne navrhnutý, dodržaný a prísne kontrolovaný. Niektoré poznámky k spôsobu výstavby :

Dva trapézové nosníky sú postavené na trvalých stĺpoch takým spôsobom, že stred nosníka je na stĺpe a krajný vonkajší koniec je podoprený dočasným oceľovým priehradovým stĺpom s nainštalovaným dočasným uchytením. V ďalšom kroku sú umiestnené priame nosníky v koncových rozpätiach. Tieto nosníky sú tiež podopreté na pomocný stĺp a dočasne uchytené. Po pripnutí koncových nosníkov na podpery a inštalácii dočasných priečných kovových stužidiel medzi nos-



níkmi, sú umiestnené priame dlhé stredové nosníky hlavného rozpätia. Tieto nosníky sú podopreté o trapezové prefabrikáty presahujúce piliere hlavného rozpätia, čím sa úplne eliminuje práca a skruže vo vode.

Je dôležité si uvedomiť, že zdvíhanie 25 prefabrikovaných betónových prvkov, ktoré tvoria stred mosta, sa realizuje v jednej nepretržitej operácii. Ťažké a drahé zdvíhanie je preto potrebné zabezpečiť len na krátku dobu.

Každý nosník je navrhnutý s tromi 196 m dlhými káblami, ktoré prechádzajú cez nosníky z jedného konca konštrukcie na druhý. Každý kábel má 14 lán s priemerom o 0.6 palca (15.2 mm) a je napnutý na silu 2664 kN. Predpínanie a injektáž lán, betónáž dosky a odstránenie dočasných opôr sa predpisuje v tejto zadanej sekvencii :

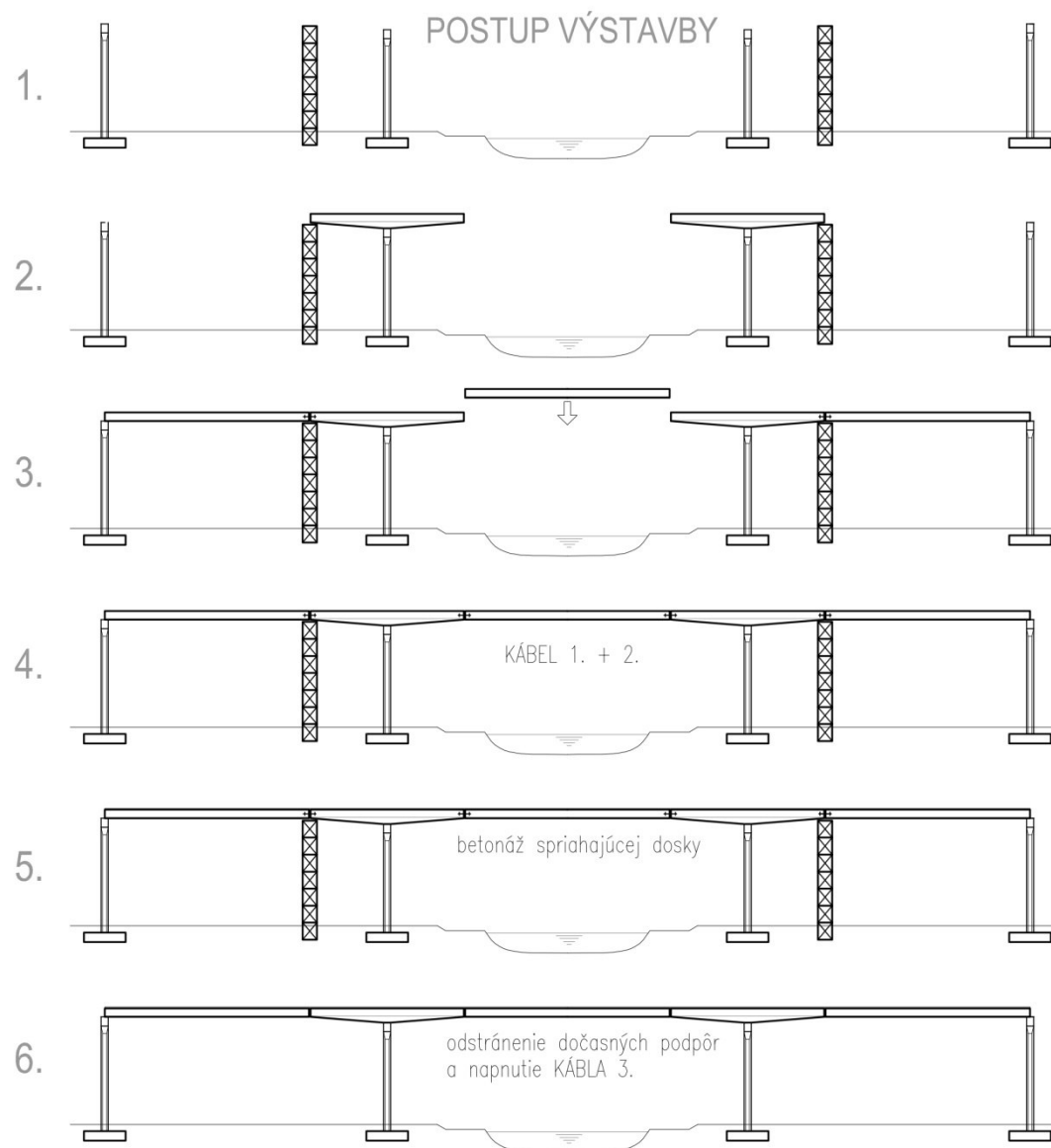
- po vytvrdnutí betónu spoja na 41 MPa sa predopne kábel 1 v každom nosníku
- ďalej sa predopne kábel 2 v každom nosníku a zainjektujú sa všetky káble, ktoré boli doteraz predopnuté
- po vytvrdnutí injektážnej zálievky sa vybetónuje doska
- po vytvrdnutí dosky (požadovaná pevnosť v tlaku 17 MPa) sa odstráni dočasné priečne vystuženie medzi nosníkmi a dočasné podpory
- po vytvrdnutí dosky na 34 MPa sa predopne a zainjektuje kábel 3

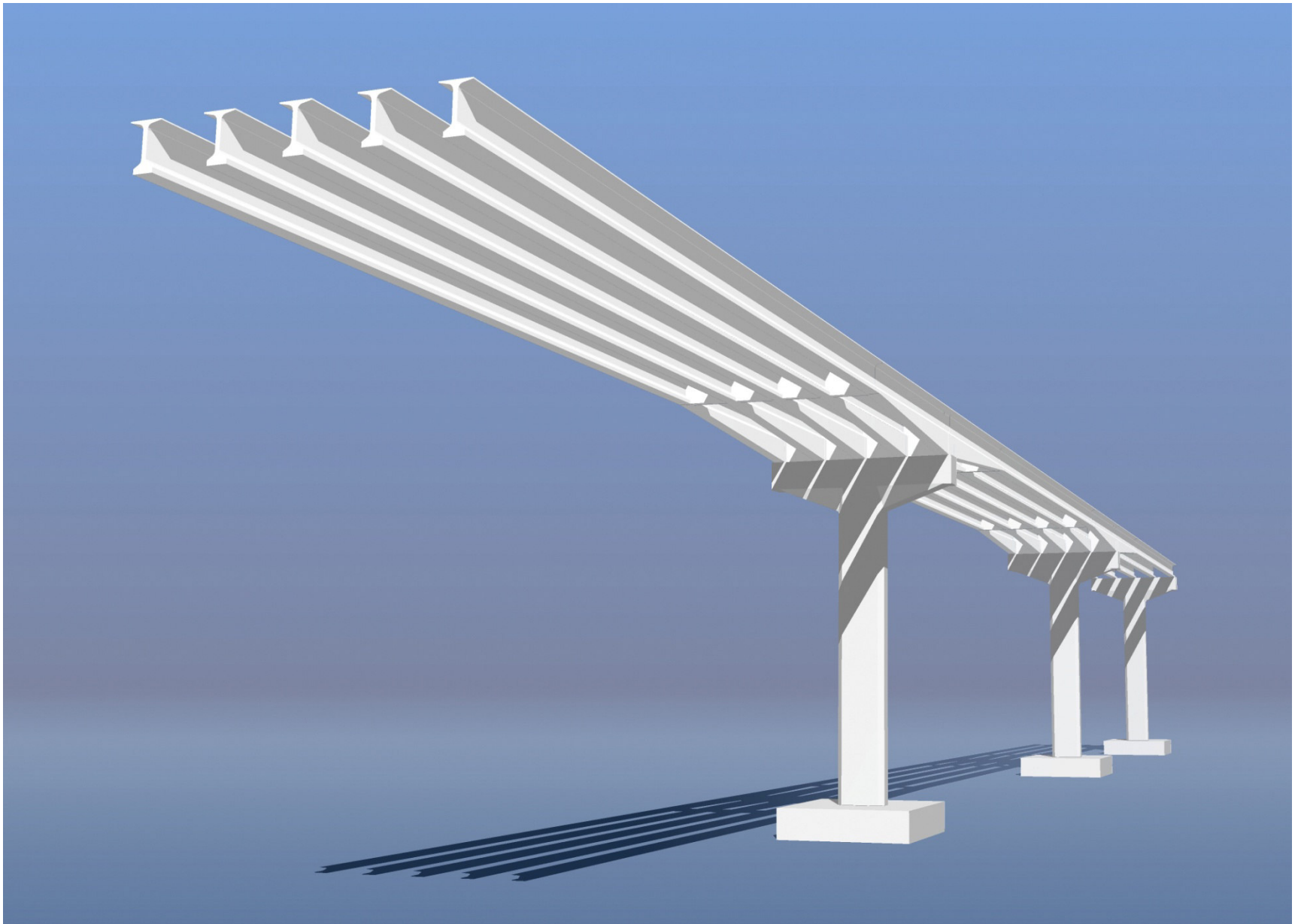
### Poznámky k zobrazovanej konštrukcii

Na všetkých obrázkoch je zanedbaný pozdĺžny a strechovitý priečny sklon mosta. Betonárska výstuž je zobrazená len schematicky.

### Výpočty

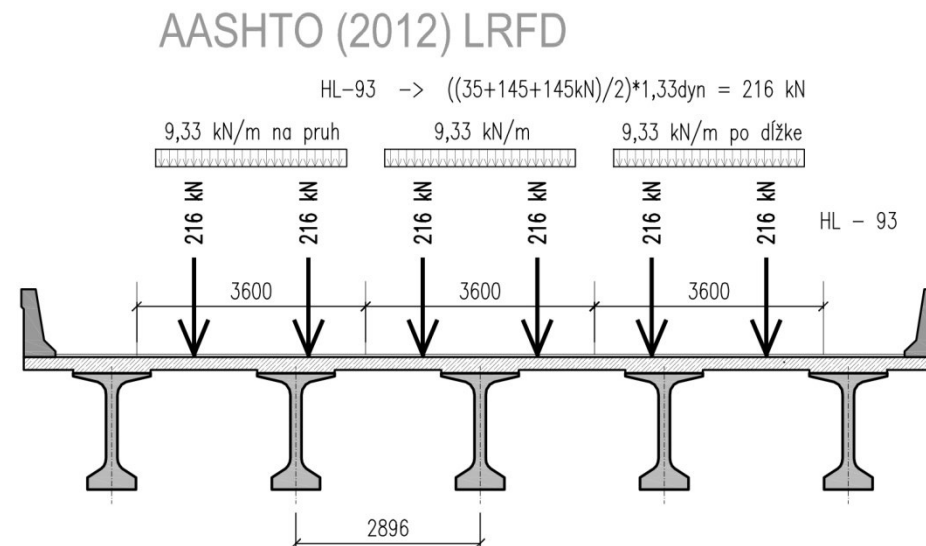
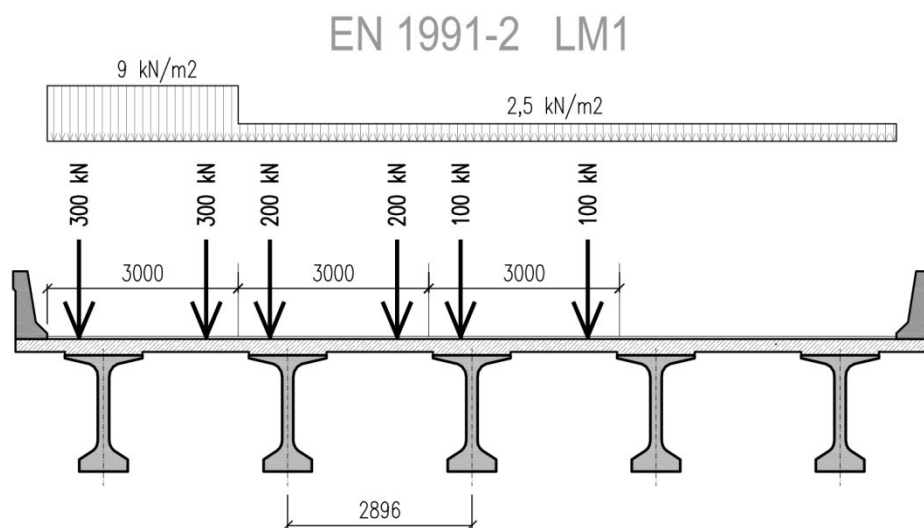
V tomto článku sú uvedené výsledky zjednodušeného výpočtu mostovky nosnej konštrukcie v dvoch rozhodujúcich rezoch **A** a **B** so zameraním na medzný stav použiteľnosti a to konkrétne obmedzenie napätí. Rez **A** sa nachádza v mieste maximálneho kladného momentu krajného poľa a rez **B** je nad stredovou podperou.





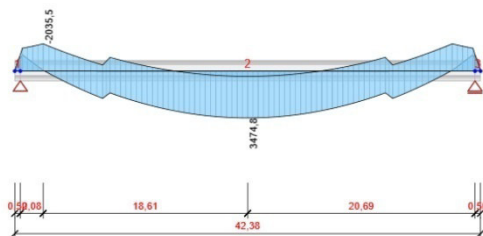


Pôvodným zámerom bol výpočet v zmysle európskych noriem – Eurokódov, ako by vyzerali napätia v rozhodujúcich bodoch po aplikácii zaťažovacích modelov z normy STN EN 1991–2. Avšak napätia v reze „A“ značne prekročili predpísané hodnoty. Preto som prišiel aj k výpočtu podľa miestnej normy AASHTO (2012) LRFD, kde je zaťaženie dopravou trochu menšie. Podľa EN je kritérium pre častú kombináciu MSP (SLS) dekompresia, podľa AASHTO je v SLS definované dovolené namáhanie betónu v ťahu a v tlaku a kombinačný súčiniteľ 0.8 pre dopravu (a navyše redukcia 0.85 pre tri jazdné pruhy). Treba tiež zohľadniť, že most bol projektovaný niekedy medzi rokmi 1988-1992. Viď. tiež na konci článku odporúčania a závery parametrických štúdií výpočtárskych kolektívov, zadaných ministerstvami dopravy jednotlivých štátov okolo rokov 2012 pre tieto typy mostov.



Na začiatku boli spočítané jednotlivé prefabrikáty (priamy a trapézový) osobitne ako predom predpäté prosté nosníky so zaťažením pre manipuláciu a dopravu. Prierezy boli oslabené tromi otvormi pre káblové kanáliky. V ďalšom bol vytvorený priestorový model na vyšetrenie účinkov priečného roznosu zaťaženia na jednotlivé nosníky. Nakoniec bol vyšetrovaný spojitý nosník na jednotlivé fázy zaťaženia a predpínania (*stages*) s vplyvom zmršťovania a dotvarovania, od teplotných vplyvov a od neurčitých momentov predpätých káblov.

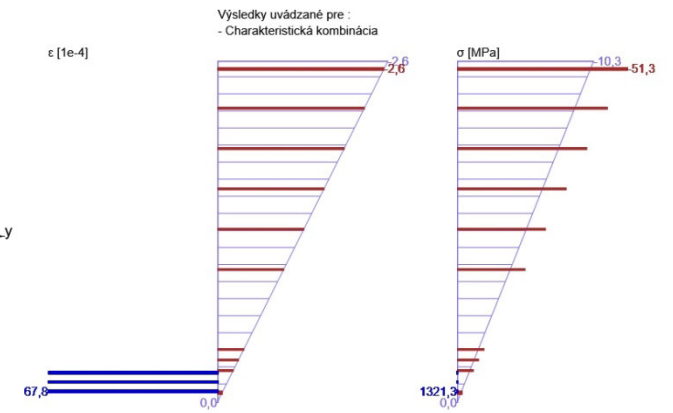
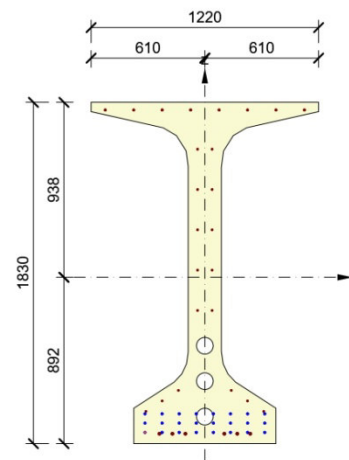
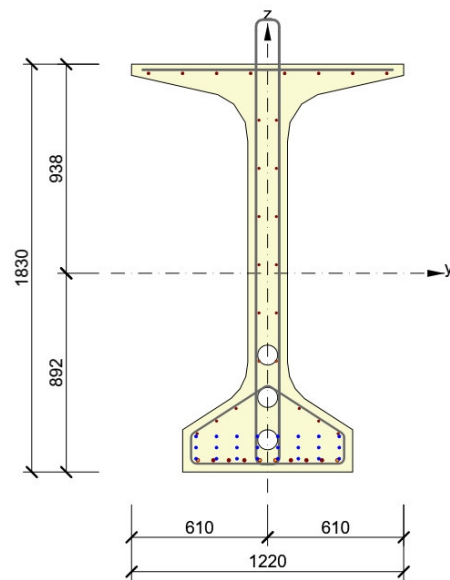
Nasledujú vybrané výsledky výpočtu priameho krajného prefabrikátu programom IdeaStatiCa.



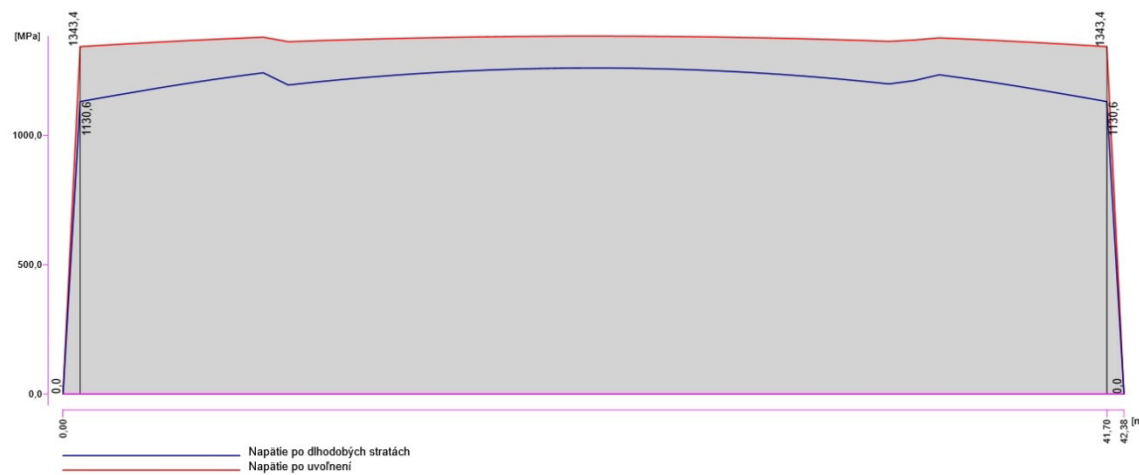
← Obálka M [kNm] všetkých kombinácií s vplyvom separácie káblov

Prefabrikáty na skládke →

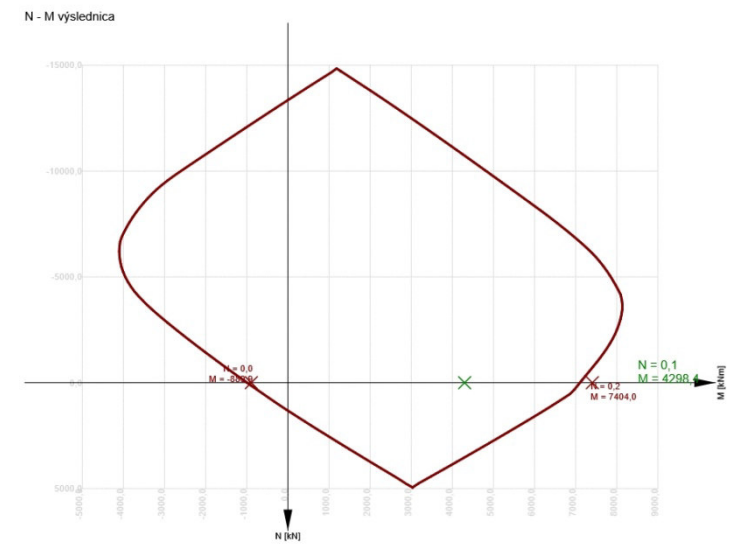




Napätie a pretvorenie pre fázu „uloženie na konečné montážne podpery“

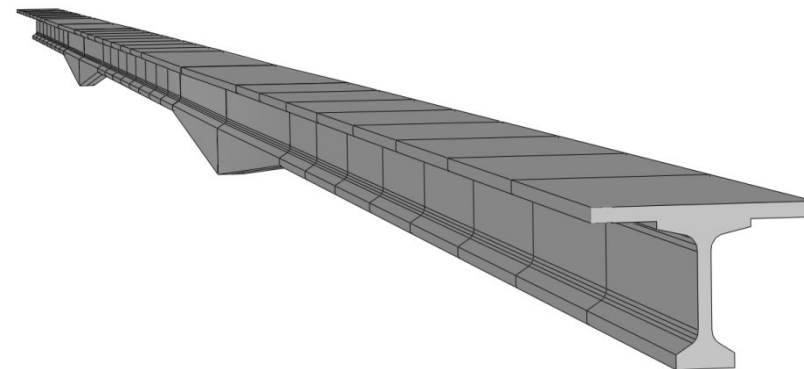
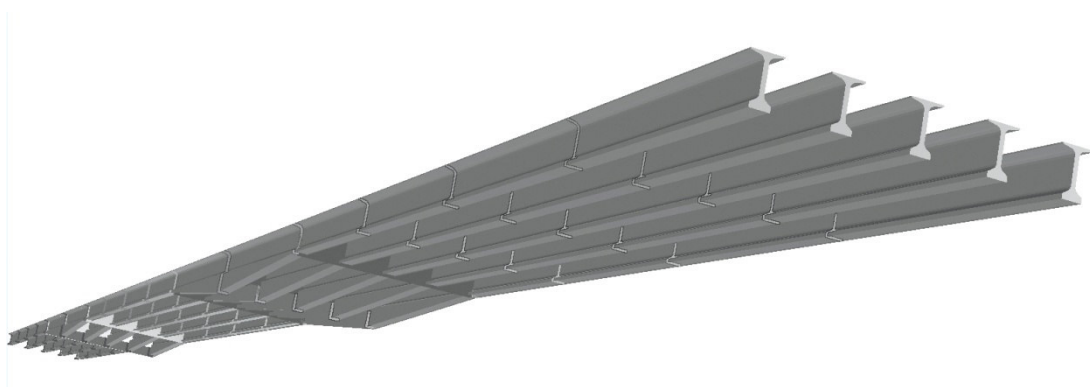


Straty predpätia pre laná bez separácie



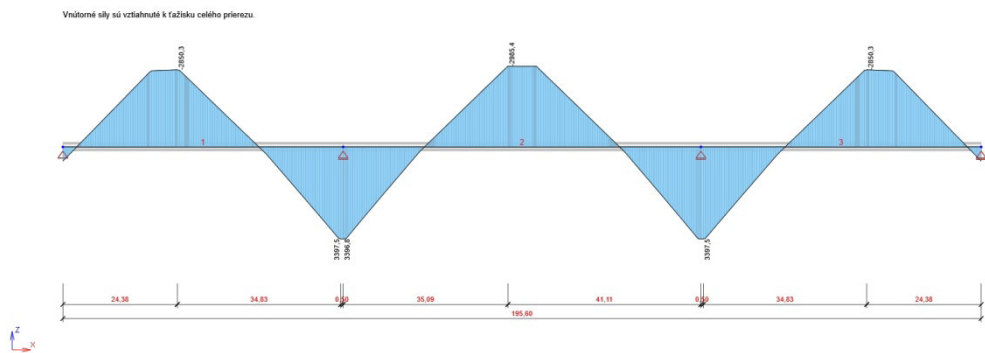
MSÚ – montážny stav

Niektoré vybrané výsledky, ktoré sú vyšetované na celý spojitý nosník :

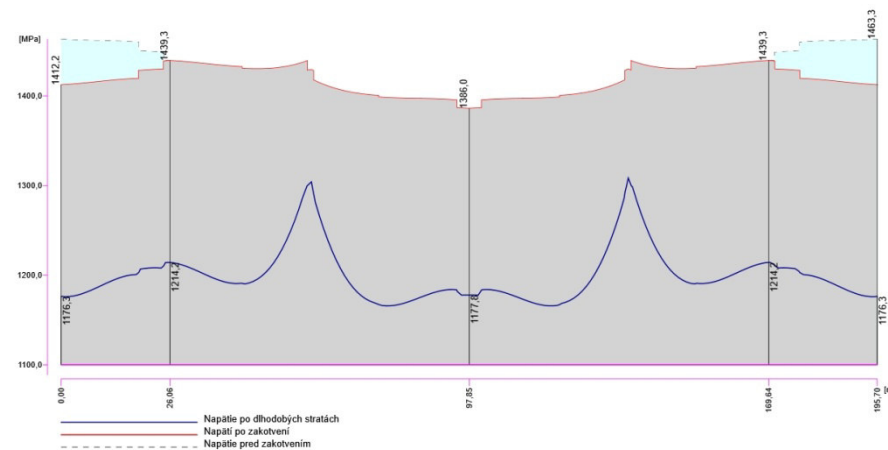


Priestorový model mosta v programe STRAP

Spojité nosník v programe STRAP – vyšetovanie fáz výstavby

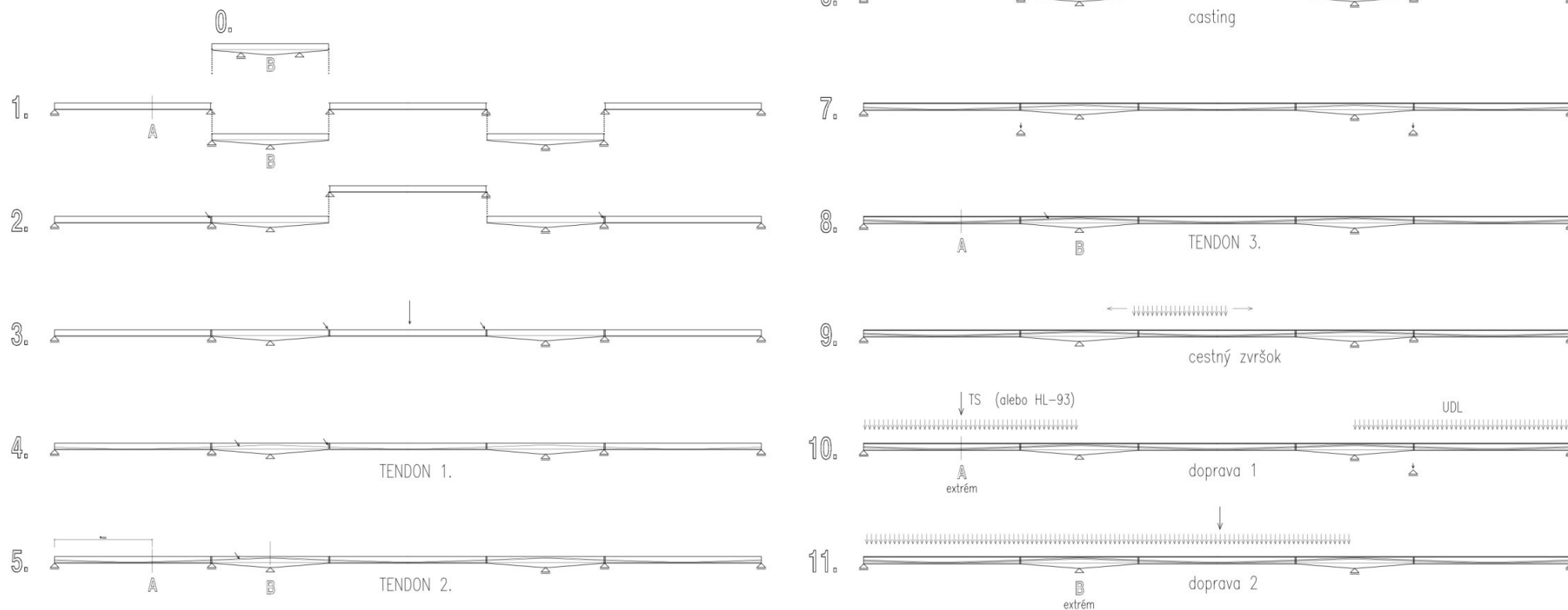


Momentové účinky dvojice káblov vrátane sekundárnych momentov [kNm] *Idea StatiCa*



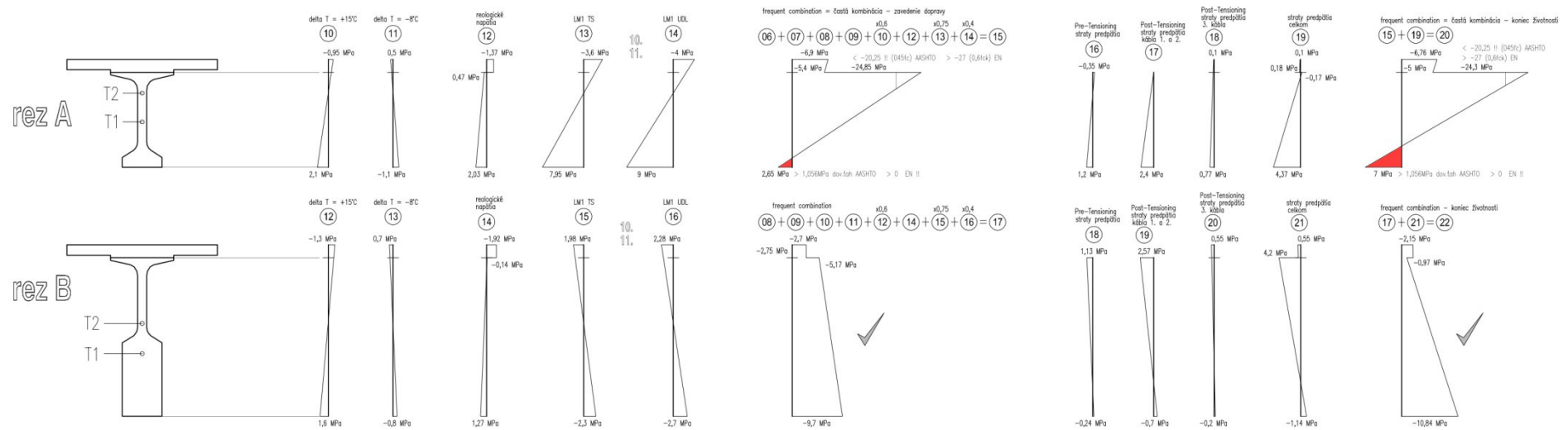
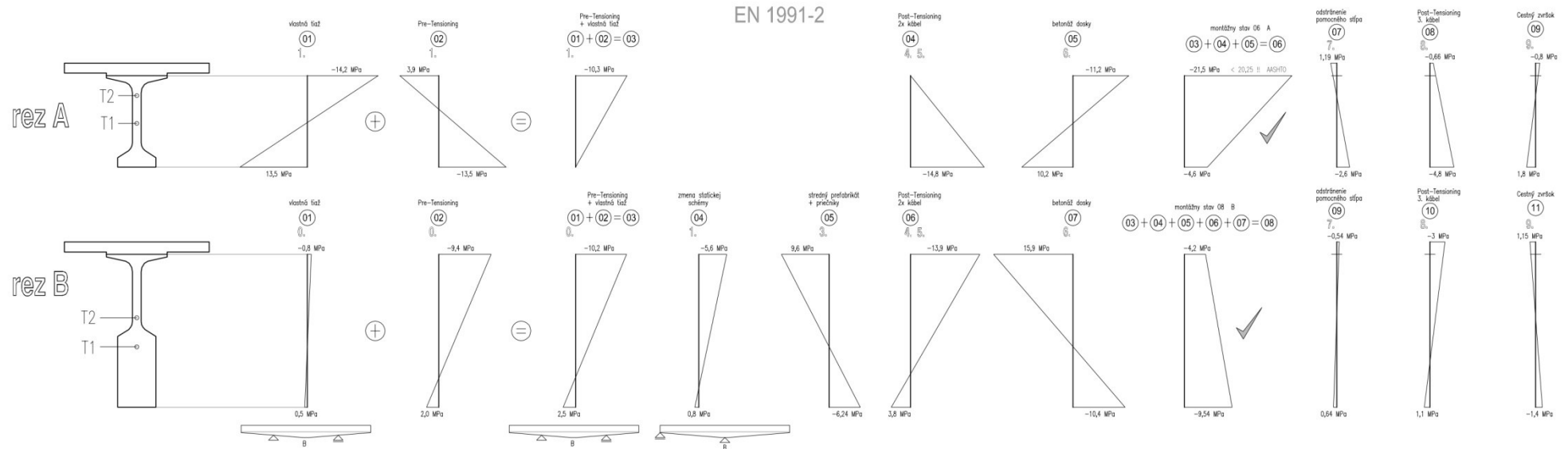
Straty predpätia kontinuálneho kábla, napínaného z oboch strán *Idea StatiCa*

## VÝPOČTOVÉ FÁZY VÝSTAVBY - STAGES

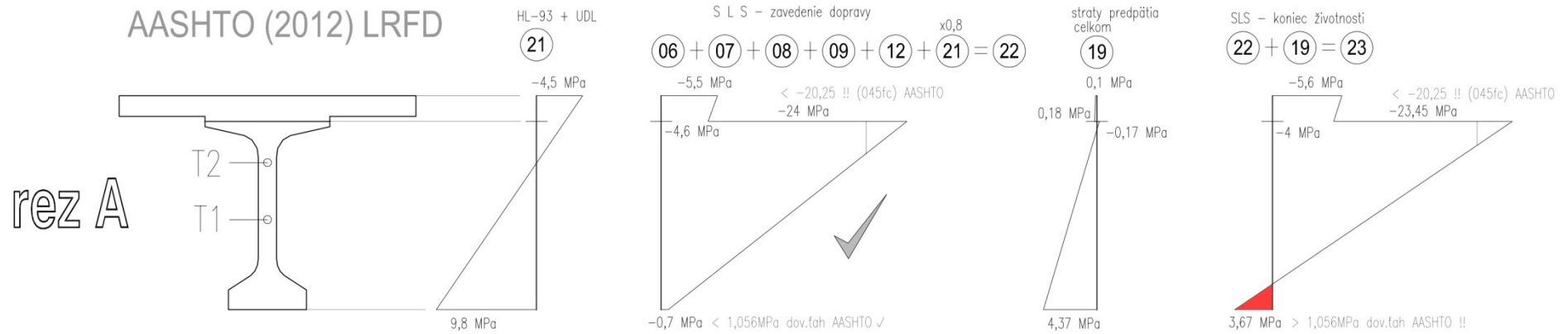


Ako vidieť na výsledných priebehoch napätí na nasledujúcich stranách, napätia boli prekročené v reze **A** pre kritériá, definované v súčasných Eurokódoch. Výpočet dopravného zaťaženia podľa AASHTO to trochu vylepšil, avšak pre koniec životnosti boli napätia predsa o niečo prekročené. Tomu sa dá zabrániť menšími konštrukčnými úpravami alebo pripustiť, že na konci životnosti by betón fungoval ako čiastočne predpätý. Možno presnejším a dôslednejším výpočtom by sa dalo dokázať, že normové kritériá by boli splnené.

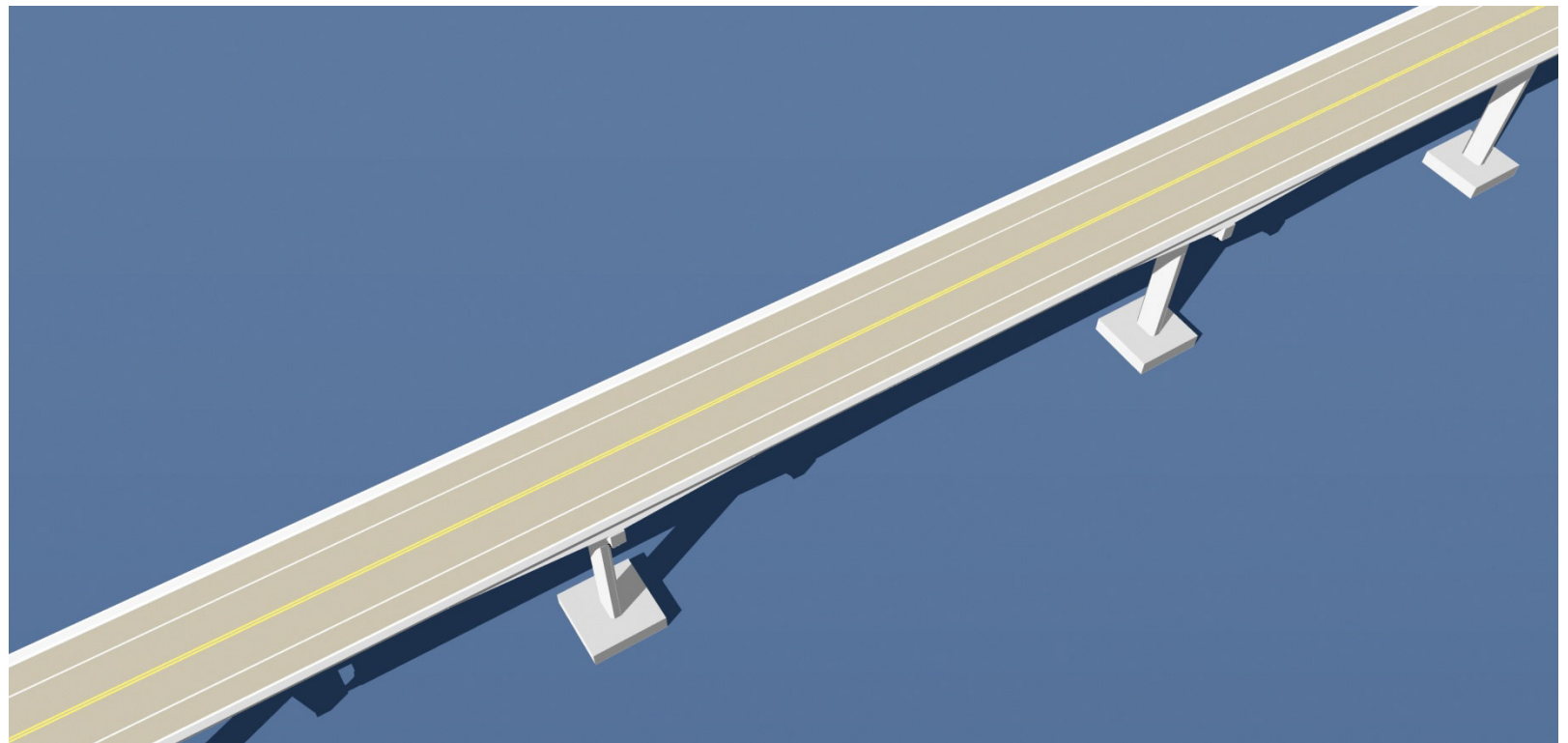
Prekročeniu napätí na hornej hrane prefabrikátu v zloženom priereze sa netreba obávať, lebo tu sa hranové napätie redistribúciou v čase prerozdelí do hornej dosky. Efekt prerozdelenia momentov je taký, že tlakové napätia v hornej časti vlákna nosníkov sa prenesú do hornej dosky mostovky ako proces dotvarovania v procese vývoja nosníka. To znamená, že počas životnosti mosta bude zložený prierez zaťažený stálym aj pohyblivým zaťažením.



Výsledné napätia v SLS pre kombináciu „časť“ v zmysle Eurokódov v rezoch A a B



Výsledné napätia podľa AASHTO. Nadviazanie na predošlú stranu pre rez A



## Ďalší vývoj

Po niektorých pionierskych mostoch, medzi ktoré patrí aj *Highland View Bridge*, sa začali v Spojených štátoch (a zrejme aj inde vo svete) investori a dodávatelia bližšie zaujímať o takýto typ konštrukcie hlavne pre jeho priaznivú cenu a vysokú pridanú hodnotu. Spôsob výstavby dokázal konkurovať oceľo-betónovým spriahnutým mostom. Zároveň začalo vznikať množstvo teoretických a konštrukčných štúdií, ako aj parametrických výpočtov. Na ich základe sa rozpory mostov ešte zväčšili.

Technológia spájania uľahčuje konštrukciu dlhších rozpätí pomocou štandardných segmentov nosníkov. Systém spájaných nosníkov môže poskytnúť množstvo konštrukčných možností návrhu zmenou parametrov, ako je dĺžka rozpätia a segmentov, výška spriahnutého systému, počet a umiestnenie pilierov. Štandardné časti prefabrikovaného betónového nosníka v tvare I a bulb-T, navrhnuté a vyrobené v dĺžkach do 48.8 m, tvoria približne jednu tretinu mostov postavených v Spojených štátoch. Použitie prefabrikovaných nosníkov z predpätého betónu uľahčilo použitie segmentov nosníkov s dlhým rozpätím, ktoré možno efektívne dopravovať a konštruovať, a predstavuje nákladovo efektívne riešenie s dobrou použiteľnosťou a minimálnou údržbou. Koncom 90-tych rokov dosiahli rozpätia spájaných nosníkov rekordných 320 stôp (97.5m). V priebehu rokov vývoj materiálov, vlastností sekcií a výrobných technológií spolu so zlepšenými metódami dopravy a montáže pomohli zvýšiť rozpätie jednotlivých nosníkov siahajúcich po celom rozpätí až na 48.8 m. Tam, kde bolo potrebné eliminovať medziľahlé podpery, boli použité špeciálne techniky na rozšírenie rozpätí až do 91.4 m. Metóda s dodatočným predpätím je jednou z bežne používaných metód pre mostné konštrukcie s dlhými rozpätiami a nezvyčajným usporiadaním.

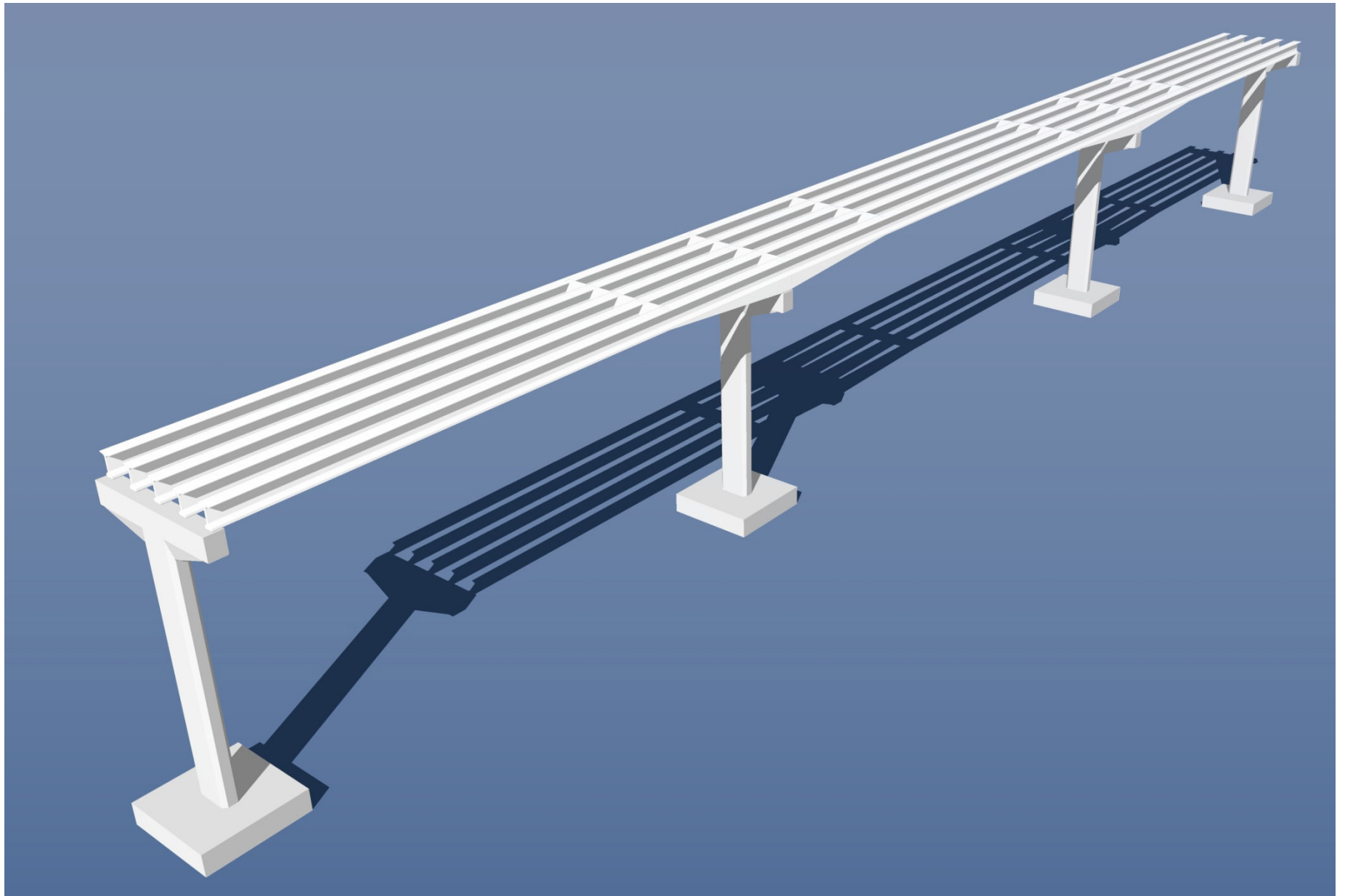
Preskúmanie rôznych metodológií na zabezpečenie kontinuity s použitím štandardných prefabrikovaných predpätých betónových nosníkov je potrebné na výstavbu ekonomického a konštrukčne efektívneho mostného systému. Kombinácia dodatočného predpínania so spájaním nosníkov predstavuje atribúty vysokého výkonu a realizovateľnej konštrukcie. Implementácia technológie spájania má potenciál predĺžiť prosté rozpätia približne o 50 percent a zároveň predstavuje jednoduché a nákladovo efektívne riešenie. Navrhovaný výskum pomôže pri zdieľaní poznatkov o súčasnom stave techniky a praktík pre použitie prefabrikovaných predpätých nosníkov, vyrobených ako spojité. Rôzne štúdie pomôžu upozorniť na výhody, ale aj nedostatky pripojovacích detailov, ktoré je možné použiť na dosiahnutie kontinuity. Príkladom takých štúdií sú zdroje [5] a [6] pod patronátom TxDOT (Ministerstvo dopravy v Texase).

Výskumný tím vypracoval predbežné návrhy na vykonanie počítačného hodnotenia detailov návrhu s ohľadom na konštrukciu a realizáciu spojitého prefabrikovaného predpätého nosníka. Hlavným účelom predbežnej projektovej štúdie bolo preskúmať limity maximálneho rozpätia pre spojité mosty pri použití štandardných tvarov prefabrikátov, ktoré TxDOT bežne používa pre mostné konštrukcie z predpätého betónu. Maximálna dĺžka rozpätia bola stanovená na základe dopravných obmedzení. Táto štúdia bola zameraná na predpäté trémové mosty s prefabrikátmi Tx70 a U54 (*poznámka*: Tento článok sa nezaobrá typom U54 – prefabrikát tvaru „U“). Ďalej sa uvažovalo s tzv. *modifikovaným* Tx70 (*poznámka*: „Tx“ znamená označenie pre štát Texas pre prierez bulb-tee). Konštrukčné parametre, ako napr. typ nosníka, veľkosti káblov, rozstup nosníkov, vlastností materiálu atď. boli zvolené tak, aby reprezentovali typické mosty. Pevnosti betónu boli obmedzené na hodnoty bežne dostupné pri prefabrikátoch. Boli vyhodnotené rôzne metodológie návrhu, založené na predpokladoch, aby sa určil ich vplyv na konečné návrhové zat'azenia a tepelné účinky.

Štúdie sa zamerali aj na možnosť použitia nadpodporového prefabrikátu s priamym prierezom, bez trapézového zalomenia. Ukázalo sa, že takéto konštrukčné riešenie je možné, pri zohľadnení úprav predpätia, kvality materiálu a postupu výstavby.

Oproti mostu *Highland View Bridge* boli uvažované nasledovné konštrukčné detaily a zmeny (sú to vlastne také úpravy, ktoré by umožnili odstrániť červené oblasti v posúdení napätia aj pre požiadavky Eurokódov):

- zväčšenie hrúbky stojiny zo 178 mm na 230 mm (umožnenie hrubších káblových kanálikov pre silnejšie káble)
- tri káble 14x 0.6“ boli zamenené za štyri káble s možnosťou až 19x 0.6“ lán
- štvrtý kábel bol použitý buď na podporu montážneho stavu na dĺžku prefabrikátu alebo ako spojité na celú dĺžku spájaného mosta
- šírka hornej príruby sa zmenšila z 1220 na 1118 mm
- výška dlhého prefabrikátu sa zmenšila z 1830 na 1780 mm (asi to súvisí so štandardom formy Tx70)





## Diskusia

Prvá vlastná frekvencia mosta vychádza okolo 0.8 Hz, čo je pomerne nízka hodnota. Nikde som nenašiel, ani nenatrafil na nejaký odborný článok, štúdiu alebo výskum in situ, ktorý by sa zaoberal týmto problémom pri dlhých *spliced precast girders*.

Osobne má trápi malá hrúbka spriahajúcej dosky, ktorá je v amerických štandardoch zadrôtovaná na 8" → 203 mm bez ohľadu na vzájomnú vzdialenosť prefabrikátov. Je to síce minimálne možná hodnota, ale každý projektant a dodávateľ ju využije. Vyhoví to na posúdenie LM2 ?

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

- [1] H. Hubert Janssen, P.E., Leo Spaans, P.E. : RECORD SPAN SPLICED BULB-TEE GIRDERS USED IN HIGHLAND VIEW BRIDGE, PCI Journal I–II/1994
- [2] STN EN 1990 Zásady navrhovania konštrukcií
- [3] STN EN 1990/A1 Zásady navrhovania konštrukcií,  
príloha A2 – Použitie pre mosty
- [4] STN EN 1991–2 Zat'azenie mostov dopravou
- [5] Mary Beth D. Hueste, John B. Mander, and Anagha S. Parkar : CONTINUOUS PRESTRESSED CONCRETE GIRDER BRIDGES VOLUME 1,  
Texas Transportation Institute, 2011
- [6] Mary Beth D. Hueste, John B. Mander, and Anagha S. Parkar, Reza Baie, Akshay Parchure, Jennifer Michelle Prouty, and Tristan Sarremejane :  
CONTINUOUS PRESTRESSED CONCRETE GIRDER BRIDGES VOLUME 2, Texas A&M Transportation Institute, 2016
- [7] AASHTO LRFD Bridge Design Specification, 6<sup>th</sup> Edition, 2012

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

STRAP, SketchUp, PRECON, IDEA StatiCa Concrete & Prestressing, AutoCad LT, Microsoft Word, PDF Creator, Corel Draw