

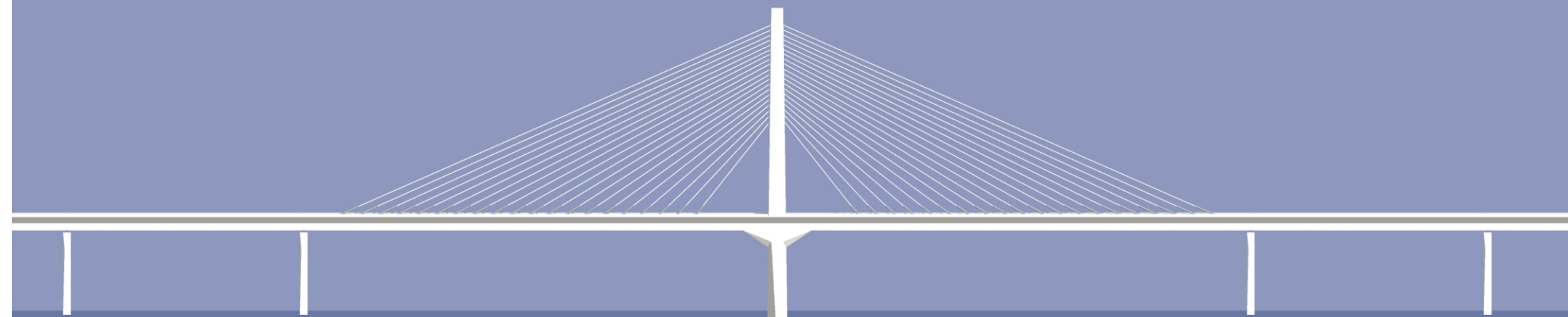
Storstrøm bridge

DENMARK

*static
behavior*

*statické
pôsobenie*

*theory, analysis
Vladimír Budinský SSK*



Keywords: bridge, cable-stayed bridge, computation, calculation, structural analysis, Storstrøm, most, zavesený most, statický výpočet, SSK

Úvod (Introduction)

Storstrømmen je morská úžina medzi dánskymi ostrovmi Falster a Zealand. Prvý most cez úžinu bol dokončený v roku 1937. Je to oceľový most s dvojprúdovou cestou a jednokoľajovou neelektrifikovanou železnicou. Až do dokončenia diaľničného mostu *Fam* v roku 1985 bol starý most s rovnakým názvom *Storstrøm bridge* jediným cestným spojením medzi spomínanými ostrovmi a až doposiaľ jediným železničným prepojením.

Pretože starý most už pomaly dosluhuje (jeho životnosť bola predikovaná do roku 2027), v roku 2018 sa začala výstavba nového mosta, ktorý je umiestnený neďaleko starého a má tvar mierneho oblúku. Hlavným dôvodom výstavby je modernizácia železničného spojenia v podobe rýchlolaku s rýchlosťou 200 km/hod. Popri tom sa „zvezie“ aj dvojprúdová cesta (80 km/hod) plus obojsmerná cyklotrasa. Most bude spájať ostrovy Falster a Masnedø, čo je malý ostrovček tesne pri Zealande, na ktorý bude trasa pokračovať ďalším malým mostíkom.

Architekti :	Dissing +Weitling v spolupráci s COWI a Hasløv & Kjærsgaard
Technická príprava projektu :	COWI (2013-2017) – fáza návrhu
Dodávateľ :	Spoločný taliansky podnik (združenie firiem) SBJV (Itinera, Grandi Lavori Fincosit a iné)
Investor :	Vejdirektoratet (Danish Road Directorate)
Miesto výstavby :	Morská úžina Storstrømmen , Dánsko
Realizačný projekt :	v réžii SBJV, Ramboll a iné

Plánované dokončenie výstavby malo byť v roku 2022 (cesta) a 2023 (železnica). Avšak z rôznych dôvodov sa dokončenie výstavby odkladá na rok 2025 (cesta) a 2027 (železnica) – zatiaľ.

Základné údaje o konštrukcii mosta

Rozpony :	22 x 80 m + 160 +160 + 22 x 80 m + monolitické nábehy
Celková dĺžka :	vyše 4 km
Konštrukčná šírka :	24,15 m
Výška pylóna :	102,15 m
Plavebný gabarit :	26,85 m

Pozdĺž mosta sa striedajú 3 základné konštrukčné systémy : monolitické nábehy budované na pevnej skruži na koncoch mosta, prefabrikáty prekleňujúce rozpony 2x 22 x 80 m na dvoch prístupových mostoch (*approach bridges*) a zavesený most na centrálnom pilieri s vejárovitým usporiadaním nosných lán.

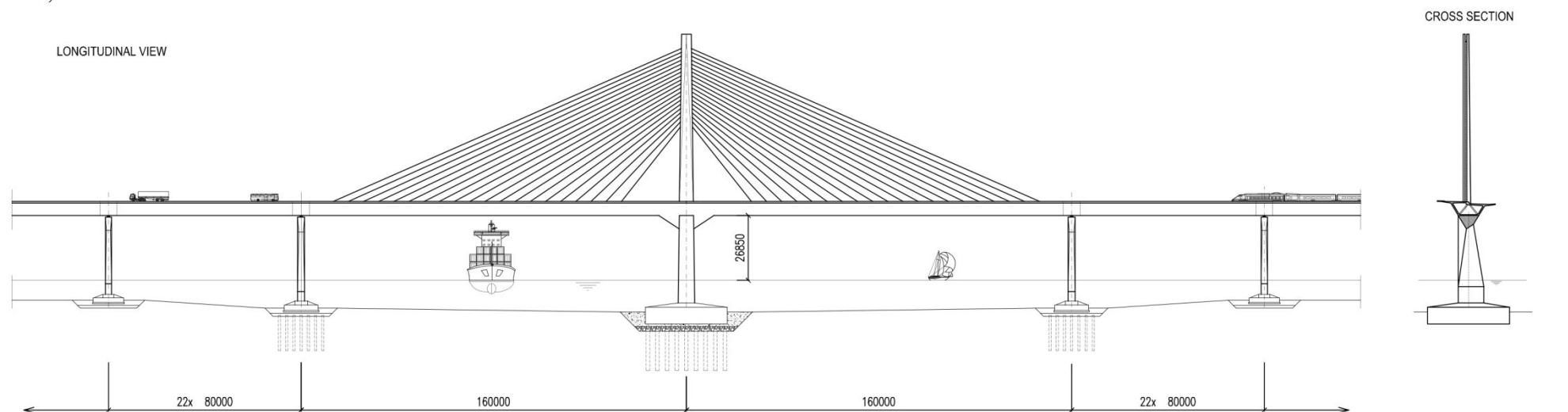
Veľký dôraz bol kladený na architektonické stvárnenie mosta v duchu tradície Øresundského mosta s význačnými rysmi severskej farebnej striedmosti a tvarovej jednoduchosti. Výslednému tvarovému riešeniu predchádzala dôkladná funkčná analýza, hlavne podľa požiadaviek lodnej a železničnej dopravy.



Situácia



Rozhodujúcim faktorom pri tak významnom a rozsiahlom diele bol spôsob výstavby, ktorý muselo akceptovať aj architektonické riešenie. Výsledkom takéhoto prístupu bolo napríklad riešenie stĺpov, ktoré sa vnárajú priamo do mora bez náznaku akejkoľvek pätky stĺpa, ako aj elegancia tvaru hornej časti pylóna s vejárovitým usporiadaním závesných lán. Pôvodný zámer dvojmosta s dvomi radmi stĺpov sa tvarovo zjednodušil na nosnú jednokomorovú konštrukciu s jedným radom stĺpov. Boli tu však aj požiadavky zo strany investora a architekta, ktoré poriadne zamotali hlavy statikom a konštruktérom. Napríklad požiadavka nerušeného výhľadu užívateľov mosta na obe strany úžiny, ktorá vyústila do výsledného výrazne nesymetrického tvaru prefabrikovaného nosníka. Požiadavka jedného mosta namiesto dvoch vedľa seba vyústila do združeného mosta (železničná a cestná doprava spolu). Centrálny pylón na spodku svojej hornej časti zasahuje do cestného profilu, čo je vyriešené zložitou úpravou vonkajších polomerov mosta a stredov kružníc oblúka (namiesto jedného stredu).



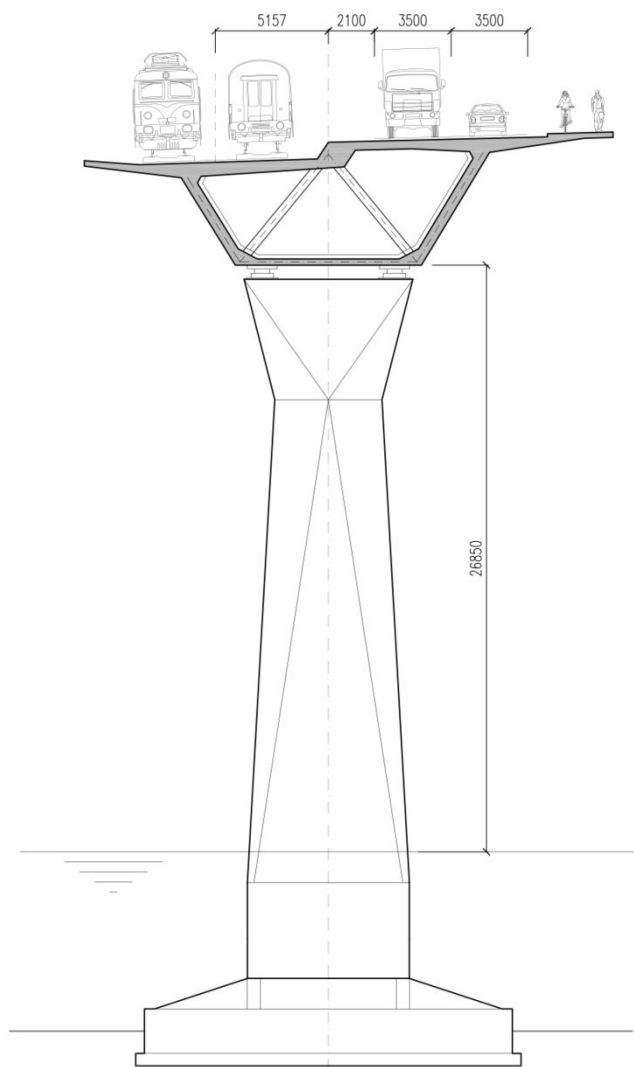
Celkový pozdĺžny a priečny rez

Popis mosta

Vzhľadom na veľkosť a význam stavby prebiehala príprava stavby zložitým procesom. Dôkladnej predprojektovej analýze boli podrobené : Výber polohy mosta, enviromentálne štúdie, vhodné konštrukčné systémy, dostupnosť surovín a zdrojov, dopravná infraštruktúra, vplyvy výstavby na prostredie, geotechnické štúdie podložia a iné. Po tejto fáze boli investorom, architektmi a hlavne inžiniersko-konzultačnou firmou *Convi* skoncipované súhrnné požiadavky pre potenciálneho dodávateľa stavby vo forme *Technického popisu pre technický dialóg na most Storstrom bridge*. V ňom boli uvedené okrem iného aj tieto body :

- architektonické predpoklady
- geometrické predpoklady
- enviromentálne predpoklady
- požiadavky na základy
- konštrukčný systém
- časové harmonogramy výstavby

CROSS SECTION



Priečny rez

Pri jednotlivých bodoch si do určitej miery mohol dodávateľ určiť vlastný spôsob a postup výstavby, najmä podľa možností svojej materiálovej základne a strojového vybavenia. Najväčšia voľnosť bola pri voľbe konštrukčného systému pre prístupové mosty. Do úvahy prichádzali napr. priečne prefabrikované segmenty postupne budované, dlhé prefabrikované diely zdvíhané na stĺpy alebo vysúvaná mostovka. Po výbere dodávateľa a úvodných rokovaniach sa dohodlo na systéme popísanom ďalej. Predĺženie termínov výstavby bolo hlavne kvôli vyprojektovaniu a výstavbe fabriky na výrobu nadrozmerých prefabrikátov na ostrove Masnedø.

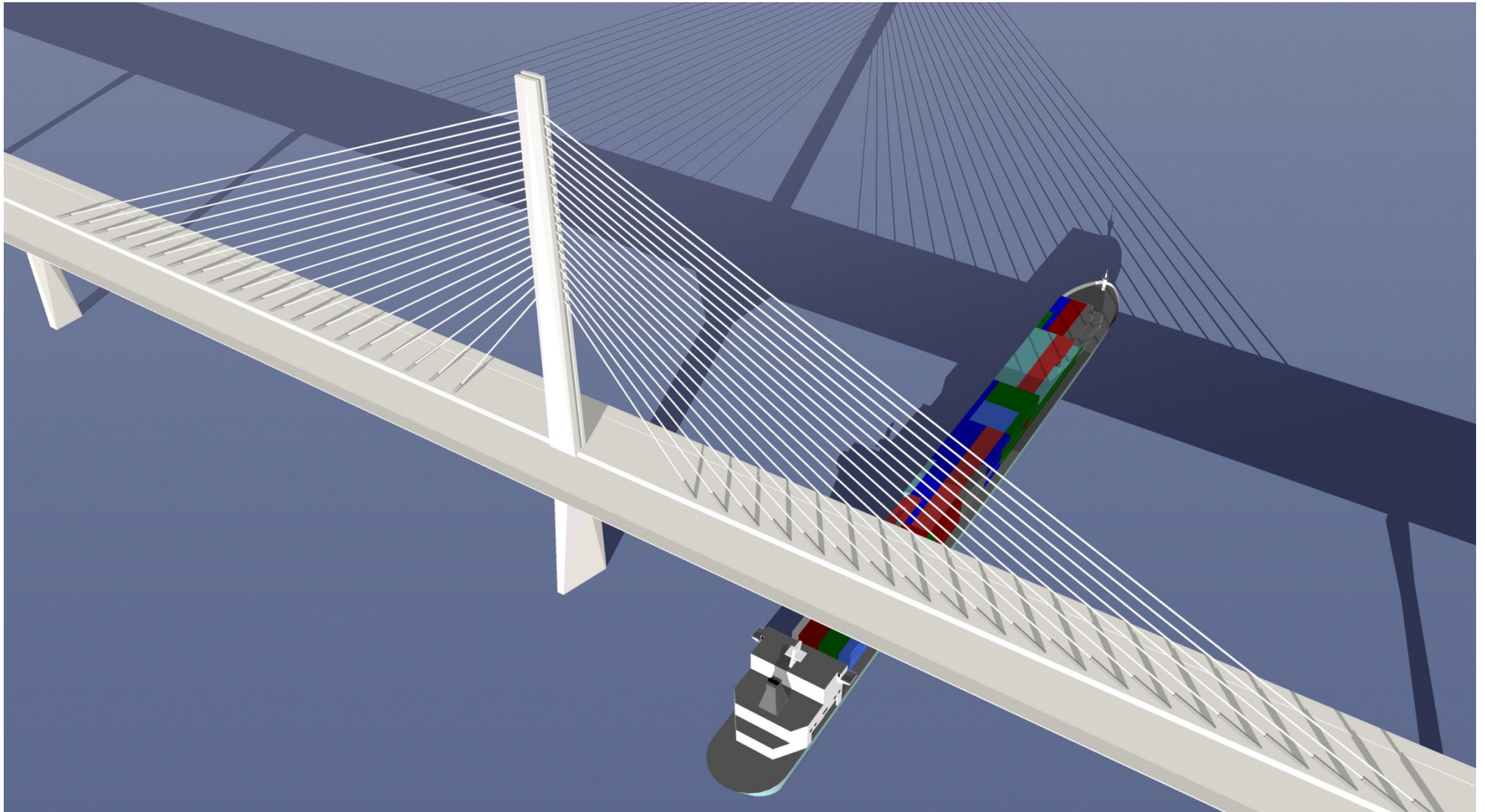
POSTUP VÝSTAVBY

Pre účely výpočtu a výroby je najdôležitejší postup výstavby. Najskôr sa vyrobí kompletné základové pätky vo výrobní. Tie sa potom zavážajú súlodím na určené miesto a postupne sa zatápajú na pripravené štrkové lôžko. Na pätky sa potom postupne kladú ďalšie duté prefabrikáty (v prípade prístupových mostov majú výšku 3,2 m do modulu 4 m) a tie sa zmonolitnia v medzere 0,8 m. Hrúbka stien stĺpových prefabrikátov bude jednotne 500 mm. Na vrch prefabrikátov sa už na ložiská umiestni krátky zárodočný prefabrikát nosnej konštrukcie, prispôbený na osadenie atypického zdvíhacieho mechanizmu. Potom sa súlodím zavážajú hlavné prefabrikáty nosnej konštrukcie dĺžky 73 m a tiaže cca 4000 t, vyrobené vo výrobných halách. Tie sa zdvihnú zdvíhacími mechanizmami na stĺpoch z lode do konečnej polohy a zmonolitnia sa so zárodkami.

Jedna z najväčších a najzložitejších operácií bolo zavezenie základovej pätky (cca 12000 t) pod pylón, zhotovenej v suchom doku a jej zatopenie. Celý pylón sa potom zhotoví monoliticky. Hlavné rozpory 160 m sú naplánované trochu atypicky pre zavesený most. Rozpon sa vybudovaním pomocného oceľového stĺpa skrúti na 80 m a podobne sa osadia celé prefabrikáty, ako na prístupových mostoch. Následne sa namontujú laná a dopnú sa na požadovanú úroveň. Potom sa odstránia oceľové stĺpy.

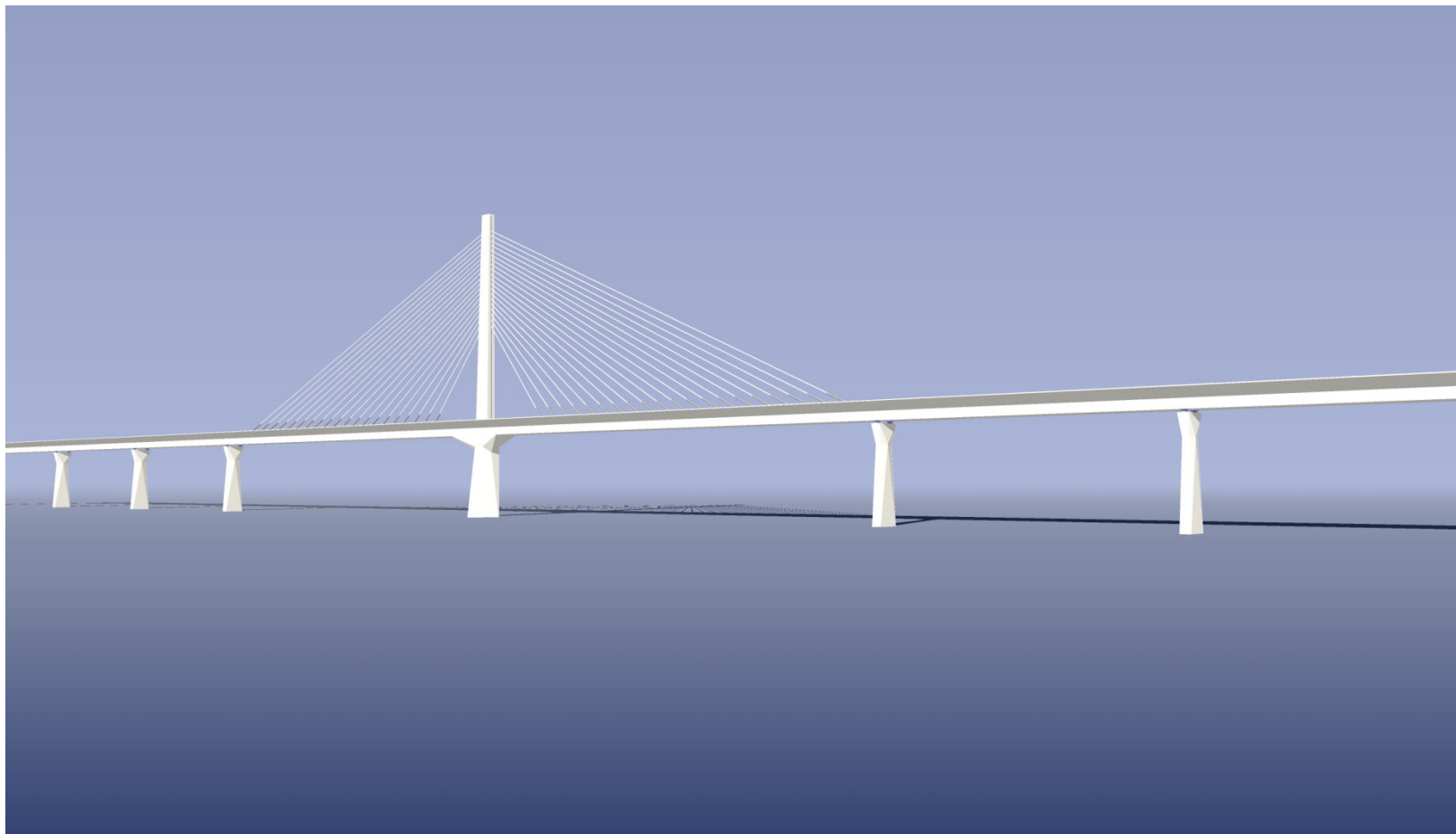
ZAKLADANIE

Morské dno našťastie nie je v týchto miestach hlboké, hĺbka sa pohybuje od cca 5 m do 15 m. Geologická skladba dna je v priemere nasledovná. Pár metrov pod dnom sa nachádzajú striedavé vrstvy rašelinového bahna (tzv. gyttja), piesku a piesku s organickým obsahom. Pod touto vrstvou nasleduje 10 – 15 m hrubá vrstva ľadovcovej morénovej hliny. V hĺbke cca 20 – 400 m je už vrstva kriedy – bieleho mäkkého vápenca. Založenie stĺpov má nasledovnú schému: Pod železobetónovou pätkou je 0,4 m voľne uloženého štrku a ďalej 0,8 m zhutneného štrku. V tejto zhutnenej štrkovej vrstve sú zakončené pilóty, siahajúce do vápencového skalného podložia. Tieto pilóty nie sú pevne zakotvené do pätky. Takáto skladba sa osvedčila vo viacerých morských mostoch, napr. v gréckom *Rion–Antirion bridge*. Vyznačuje sa dobrou odolnosťou na seizmické účinky, ako aj pri nárazoch lodí. Pilóty môžu byť pri niektorých stĺpoch celkom vynechané, pokiaľ sa skúškou preukáže dobré vlastnosti morénovej hliny.



NOSNÁ KONŠTRUKCIA

Ako nosná konštrukcia (vodorovná časť mosta) sa presadila prefabrikovaná verzia s dlhými prefabrikátmi (na celé pole). Vzhľadom na svoju mimoriadnu veľkosť a hmotnosť to je veľmi náročný stavebný prvok na technológiu výstavby, ako aj dopravu na miesto určenia, a montážnej manipulácie. Hlavne aj kvôli plynulej výrobe týchto prefabrikátov boli na ostrove Masnedø postavené veľké výrobné haly. V dobe písania tohto článku bol práve vyrobený prvý prefabrikát a je pripravený pred halou na predpínanie. Výrobná hala má tri pracovné stanice. V prvej je osadená oceľová výstuž pre spodnú pásnicu jednokomorového skriňového nosníka a boky nosníka, v druhej sú boky a spodná pásnica zaliate betónom a v poslednej stanici je vystužená a odliata horná mostovka. Pracovná zmena v hale momentálne pracuje na všetkých troch staniach, takže budú hotové ďalšie tri prefabrikáty.



Základný prefabrikát má dĺžku 73 m a šírku 24,15 m. V prvej fáze výstavby musí prenieť zaťaženie z vlastnej tiaže a všetky montážne zaťaženia. V tejto fáze pôsobí ako prostý nosník s rozponom < 73 m, na rozdiel od konečnej polohy v moste, kde pôsobí ako spojený nosník s rozponom 80 m. Pozdĺžne predpätie v prvej fáze pozostáva zo 6 zdvíhaných káblov a ďalších priamych odstupňovaných káblov v spodnej pásnici, kotvených do blistrov. V hornej pásnici je zabudované aj priečne predpätie, predpokladáme ploché káble. Pozdĺžne aj priečne predpätia tvoria dodatočne predpäté káble so súdržnosťou. V zabudovanej fáze sa predpokladajú odstupňované priame káble v hornej pásnici kotvené do blistrov. Nie je nám známe, či budú použité aj voľné káble vo vnútri komory na vykrytie pohyblivého zaťaženia, prípadne sa predprípravia prázdne deviátory s tvarovanými trubicami (*diabolus*) na možné budúce zosilnenie a úpravy mosta. Nosná konštrukcia je uložená na dvojici hrncových ložísk nad každým stĺpom, okrem miesta dilatácie, kde sú 4 ložiská. Celý most je rozdelený na tri dilatáčnne úseky, z toho vyplýva, že každá dilatáčnna škára musí umožniť pozdĺžny pohyb cca ± 500 mm.



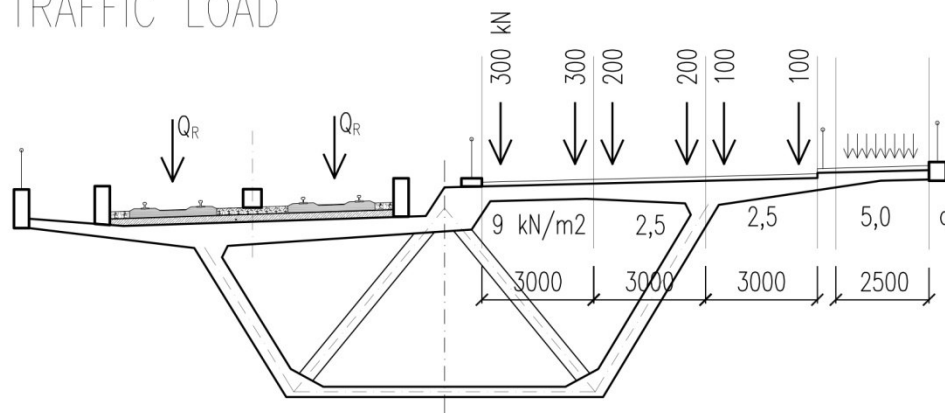
Výpočty

Úvodnú analýzu k projektu spracovala pre investora firma COWI v priebehu rokov 2013–2017. V tejto náročnej multidisciplinárnej práci spomenieme aspoň jedno meno mladého odborníka z tejto nadnárodnej firmy, ktorý výrazným spôsobom prispel k formulovaniu požiadaviek a v konečnom dôsledku aj konkrétnych analýz k danej problematike – je to Henrik Bredahl Kock z indickej pobočky tejto spoločnosti. Henrik vyvinul numerický model, ktorý zahŕňal nelineárne modelovanie lode, základov a mostných ložísk pomocou konečných prvkov. Tento model svojou vysokou vernosťou vytvoril nový pohľad na odozvu mosta počas nárazu lode. Navyše, nelineárne správanie mosta bolo spojené s analýzou prevádzkyschopnosti vlaku prostredníctvom Henrikom vyvinutého modulu rozhrania.

Výsledky komplexných analýz nárazu lode boli odovzdané investorovi v písomnej forme vo vytvorenom konštrukčnom základe, ktorý bol neskôr odovzdaný spoločnosti uchádzačov. Ďalší významný vklad Henrika boli plodné a konštruktívne jednania s tímom odborníkov, s investorom, a ďalšími zainteresovanými organizáciami, z ktorých vzišli jasné a zrozumiteľné závery, potrebné k úspešnému zhotoveniu diela. Z týchto jednaní vyplynuli aj niektoré požiadavky na zmeny a výnimky zaužívaných Eurokódov, ktoré sa vyskytli pri riešení problémov tak rozsiahleho diela, akým nesporne bude nový most.

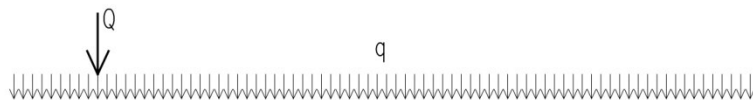
V ďalšom texte tohto článku sme urobili niekoľko veľmi zjednodušených výpočtov nosnej konštrukcie prístupových mostov, z ktorých je vynechaný celý rad účinkov, ako napr. vietor, dynamické účinky rýchlovlaku, náraz lode, seizmické posúdenie, teplotné zmeny. Zahnuté sú však podstatné zaťaženia, a to vlastná tiaž konštrukcie a účinky dopravy. Ostatné spomenuté vplyvy pri zavedení kombinačných súčiniteľov môžu, ale nemusia mať vplyv na výsledné vystuženie konštrukcie, ktoré je naznačené v minimálnej zostave.

ZAŤAŽENIE DOPRAVOU TRAFFIC LOAD



ZAŤAŽENIE CESTNOU DOPRAVOU

pozdlžne zaťaženie (zjednodušené vzhľadom na rozpätie)

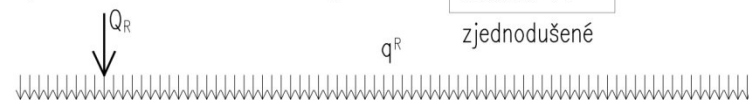


$$Q_k = (300+200+100) \cdot 2 \cdot 1,0 = 1200 \text{ kN} \quad Q_d = 1200 \cdot 1,35 = 1620 \text{ kN}$$

$$q_k = 9 \cdot 3 \cdot 1,0 + 2,5 \cdot 1 \cdot 6 + 5,0 \cdot 2,5 = 54,5 \text{ kN/m} \quad q_d = 54,5 \cdot 1,35 = 73,6 \text{ kN/m}$$

ZAŤAŽENIE ŽELEZNIČNOU DOPRAVOU

pozdlžne zaťaženie na 1 koľaj



upravené zo
zaťažovacieho
modelu 71

zjednodušené

$$Q_k^R = (4 \cdot 250 \text{ kN} - 6,4 \text{ m} \cdot 80) \cdot 1,33 = 650 \text{ kN} \quad Q_d^R = 650 \cdot 1,45 = 943 \text{ kN}$$

$$q_k^R = 80 \cdot 1,33 = 106 \text{ kN/m} \quad q_d^R = 106 \cdot 1,45 = 154 \text{ kN/m}$$

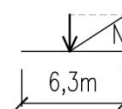
— súčiniteľ "alfa"

dynamický súčiniteľ

$$F_{i,2} = 1,44 / (\text{odm}(L_{f1}) - 0,2) + 0,82 = 0,98 < 1 \rightarrow F_{i,2} = 1$$

kde $L_{f1} = 80 \text{ m}$

Predbežný návrh prierezu závesného lana



$$N_k = ((514+86+212+55) \cdot 6,3 + 1200 + 1300) / \sin 26^\circ = 18163 \text{ kN}$$

— pracovné napätie

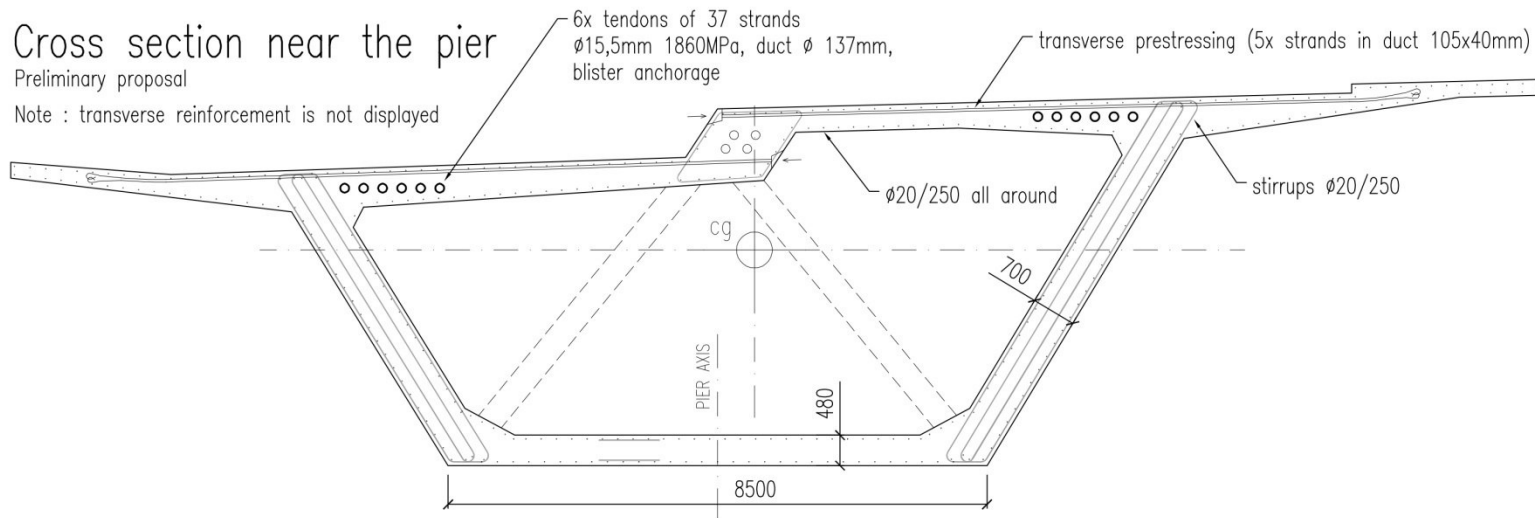
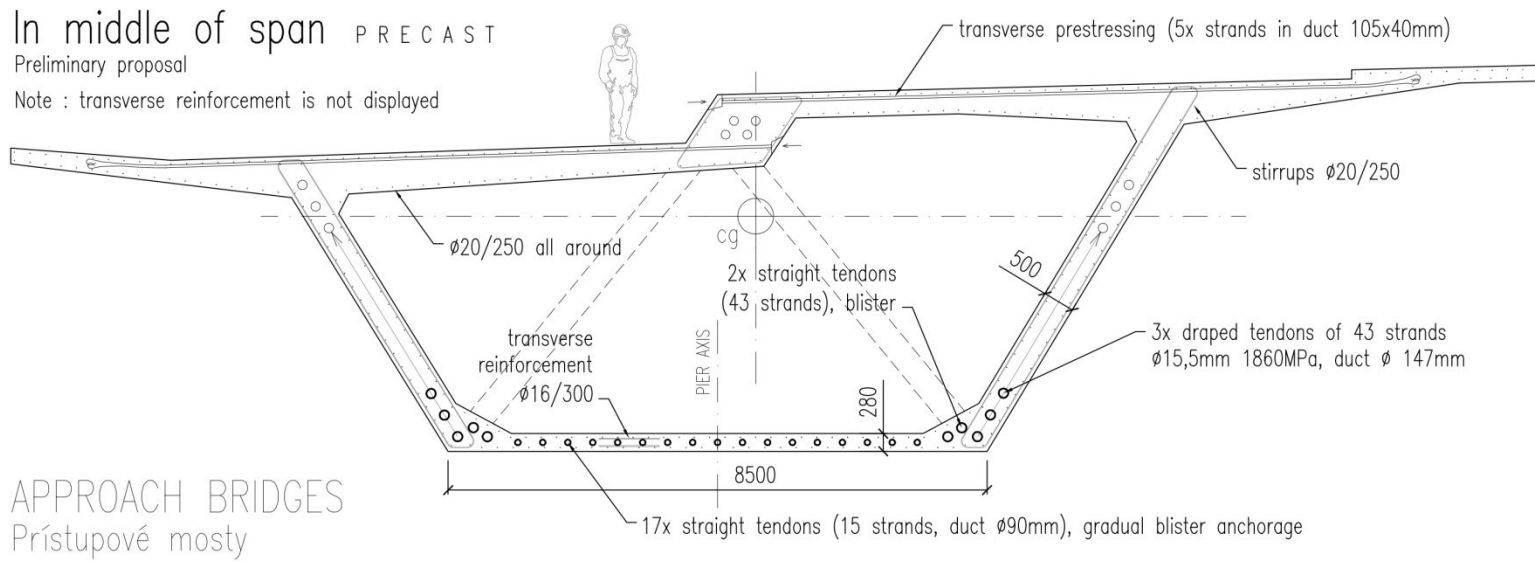
$$A_{\text{potr}} = 18163 / (1860000 \cdot 0,45) = 0,0217 \text{ m}^2 = 21700 \text{ mm}^2$$

$$d = (4 \cdot A / \pi)^{0,5}$$

$$d1 = (4 \cdot 21700 / \pi)^{0,5} = 166 \text{ mm}$$

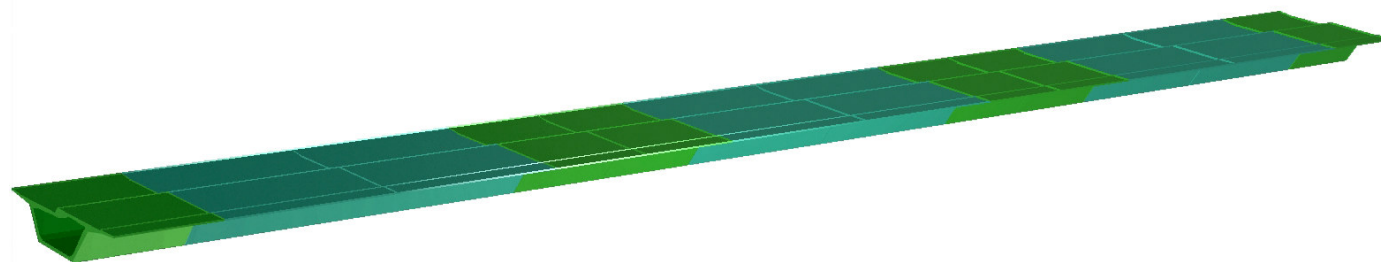
$$\text{počet lán } (\varnothing 15,7 \text{ mm}) = 21700 / 150 \text{ mm}^2 = 144 \text{ ks min}$$

napríklad TENSACCIAl 169 lán \varnothing HDPE = 400 mm



Model FEM – spojitý nosník (program STRAP) →

V článku sú prezentované niektoré výsledky výpočtov v programe STRAP ako prúťového a doskosenového priestorového modelu. Priestorový model bol zameraný na nesymetrické zat'azenia dopravou, či nevznikajú záporné zvislé reakcie na ložiskách a krútenie nosníka. Taktiež bol modelovaný prefa nosník v programe Idea StatiCa, ako aj niektoré časové závislosti na spojitom nosníku.



Na posudzovanie prierezov bol použitý program PRECON, pre ktorý boli prierezy konvertované na osovo symetrické. Na započítanie vplyvu nesymetrie prierezu na napätosť bol použitý program Idea StatiCa.

MATERIÁLY v nosnej konštrukcii

Betón C50/60

Betonárska oceľ B500B

Predpínacia oceľ – laná 15,7mm

$$\sigma_{fpk} = 1860 \text{ MPa}$$

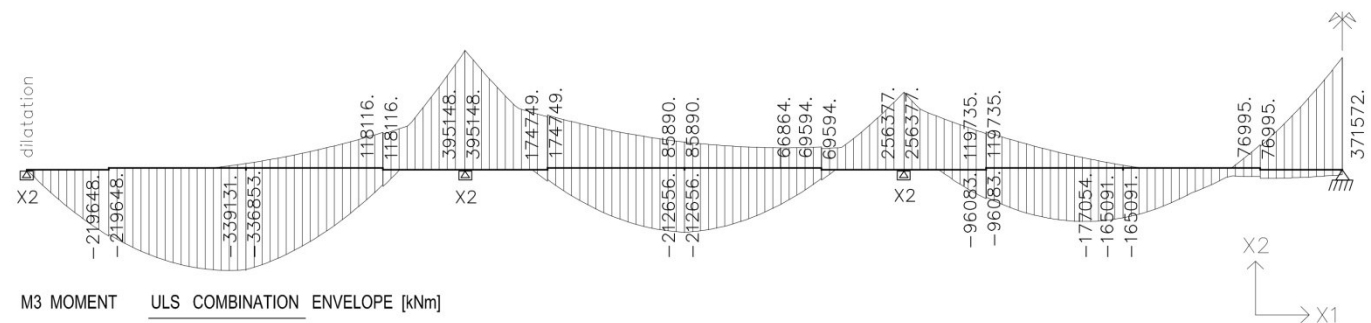
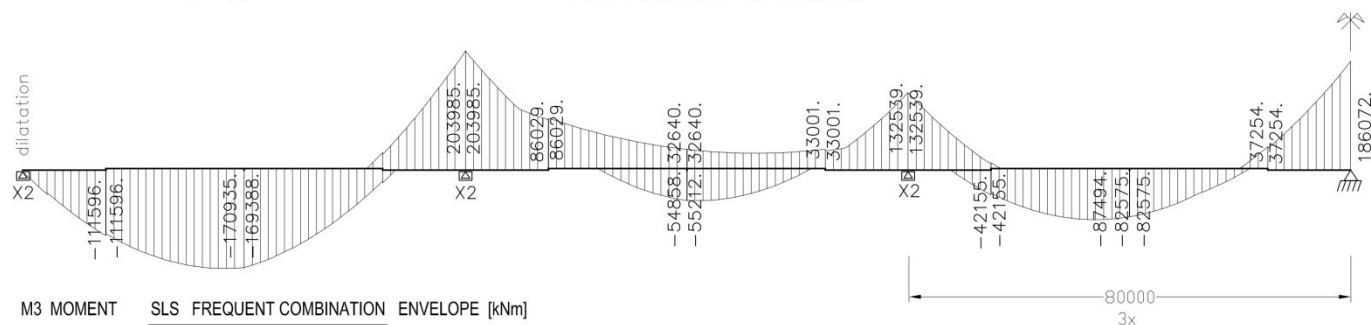
Prostredie XS1, XF1

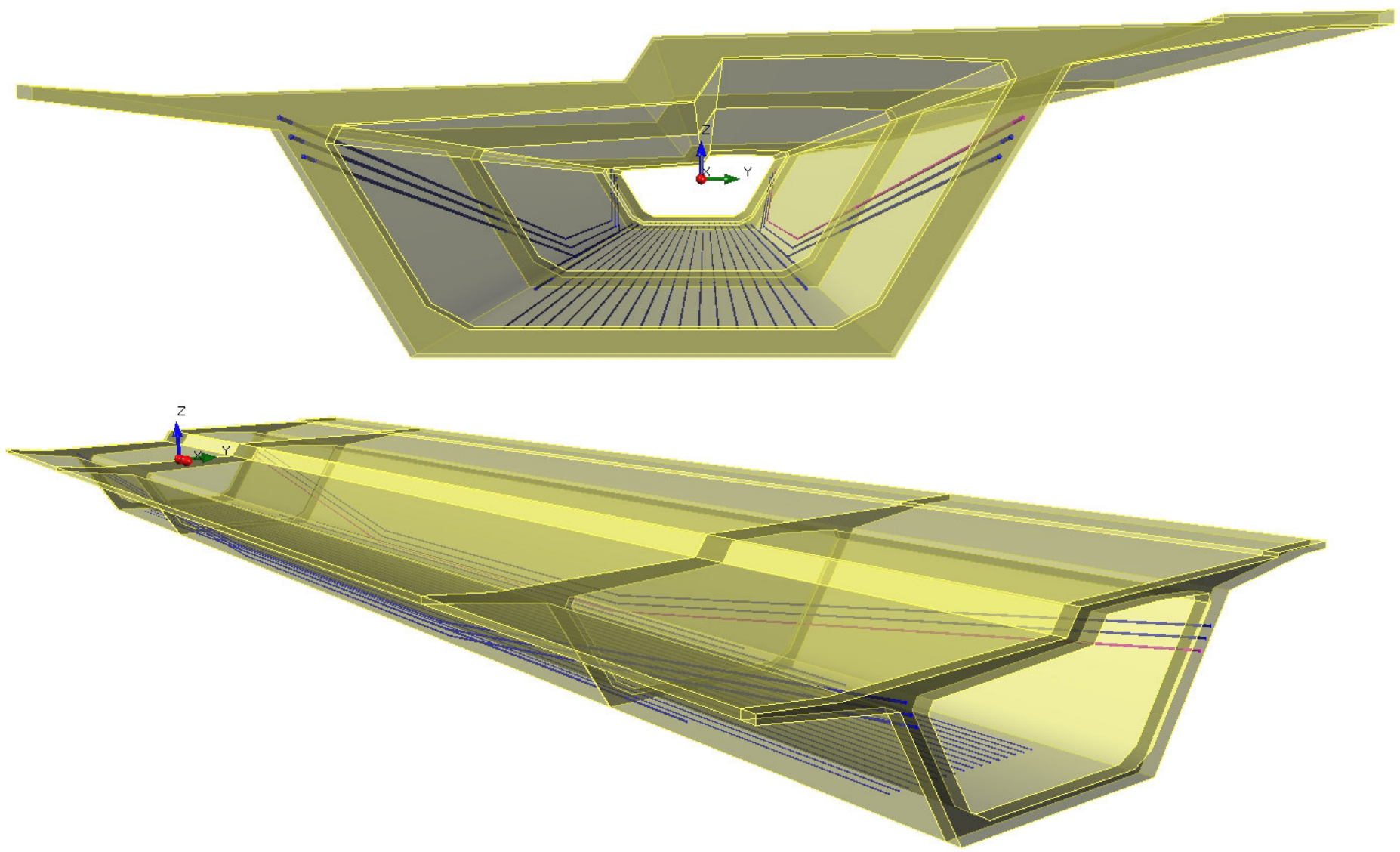
Krytie betonárskej výstuže 50 mm

Krytie káblov – min. \varnothing kanálika

TRAFFIC LOAD (only)

APPROACH BRIDGES





Tvar prefabrikátu v programe IDEA StatiCa

KONTROLA POLOHY PREDPINACEJ SILY Kombinacia 1 1 1 5 MSP – PREFA část
ZATAZENIE

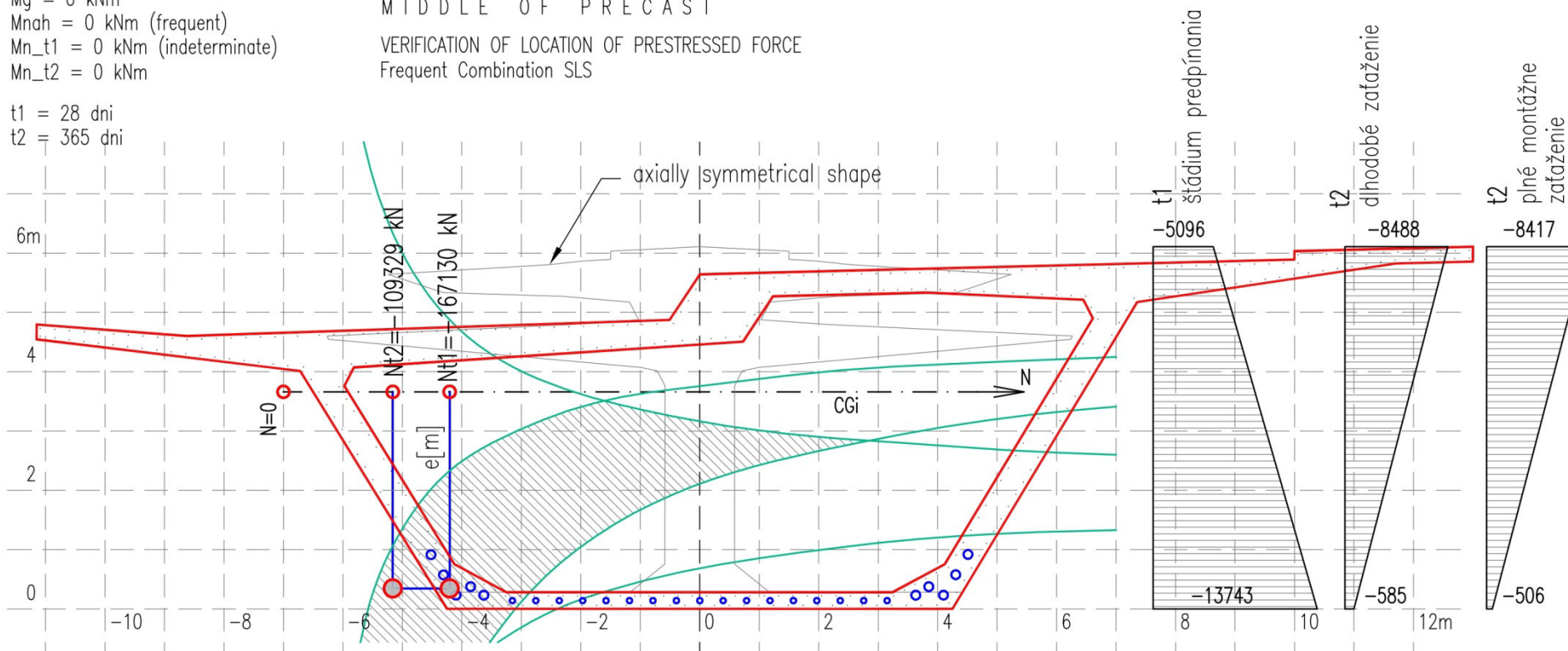
$M_{go} = 466187 \text{ kNm}$
 $M_g = 0 \text{ kNm}$
 $M_{nah} = 0 \text{ kNm}$ (frequent)
 $M_{n_t1} = 0 \text{ kNm}$ (indeterminate)
 $M_{n_t2} = 0 \text{ kNm}$

$t_1 = 28 \text{ dni}$
 $t_2 = 365 \text{ dni}$

MIDDLE OF PRECAST
VERIFICATION OF LOCATION OF PRESTRESSED FORCE
Frequent Combination SLS

PRECON V 2.0 © SSK 2014
Concrete C50/60
Steel $f_{pk} = 1860 \text{ MPa}$

STRESS [kN/m²]
Frequent Combination SLS



MEDZA PORUŠENIA PRIEREZU - Interakčný diagram
Kombinacia 1 1 1 6 MSÚ - PREFA (ULS)

ZAŤAŽENIE

Mgo = 629352 kNm

Mg = 0 kNm

Mnah = 77760 kNm (montážne)

Mp_t2 = -400188,07 kNm

t1 = 28 dní

t2 = 365 dní

Np_t2 = -121476,72 kN

Md = 306923,93 kNm

Mu = 410055,08 kNm

$100(As+Ap)/Ab = 0,92\%$

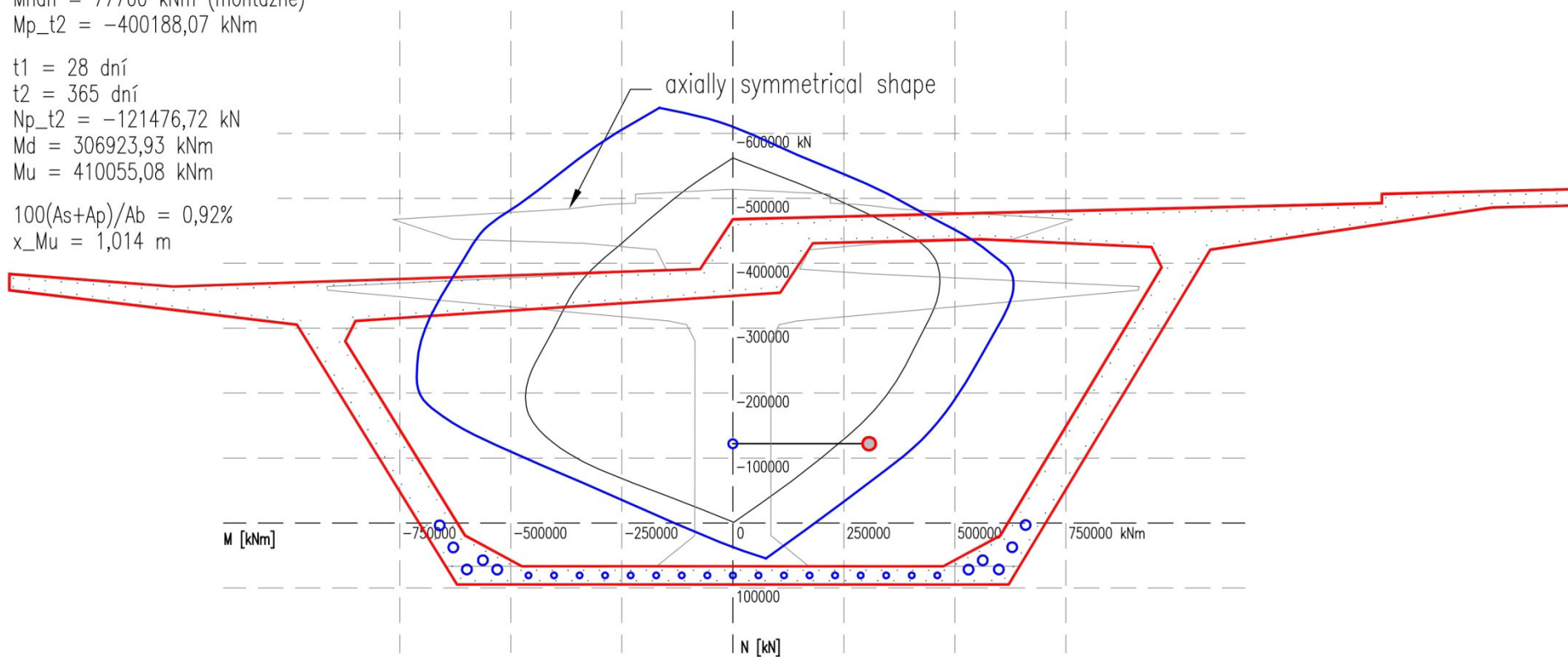
$x_{Mu} = 1,014$ m

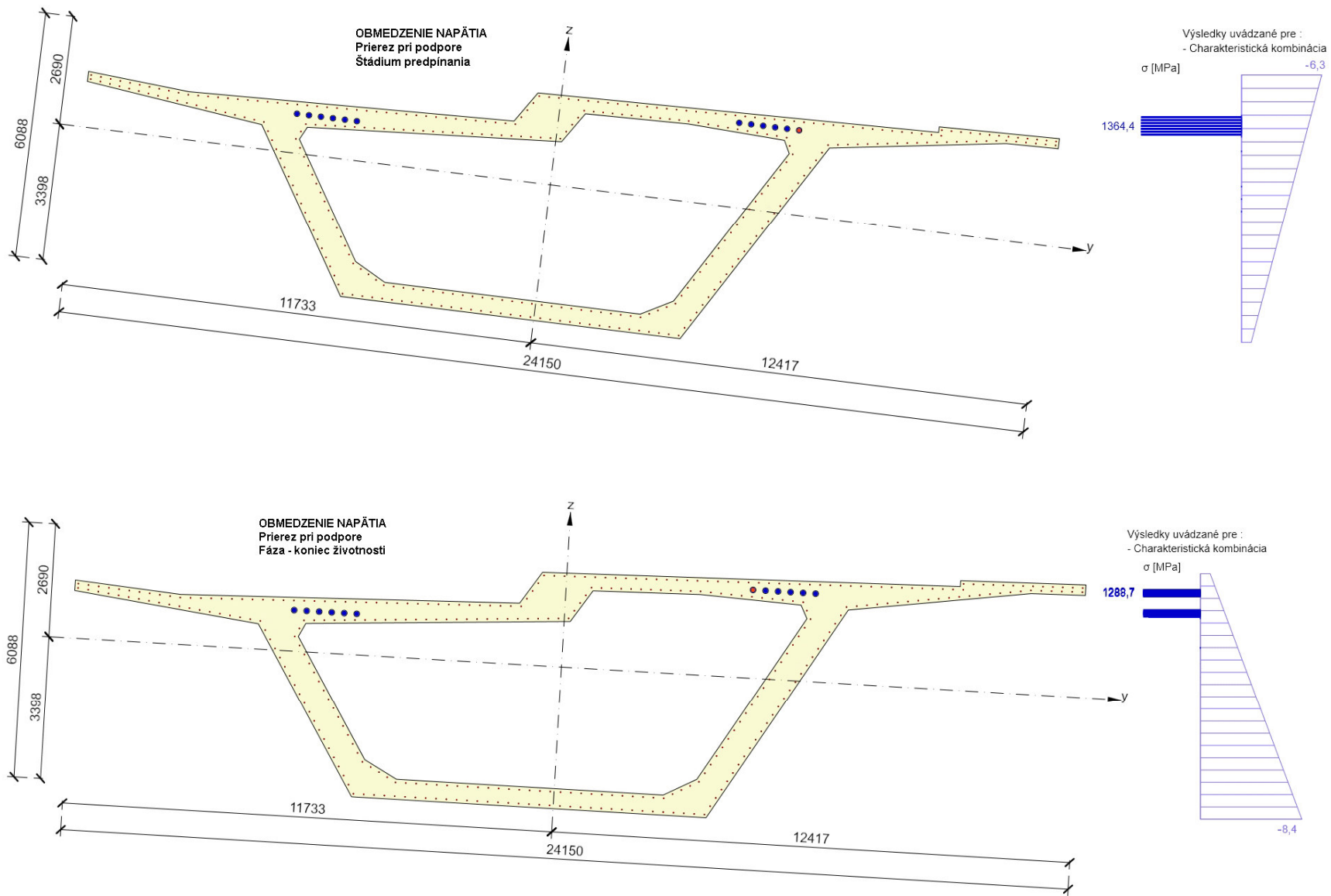
PREC ON V 2.0 © SSK 2014

Concrete C50/60

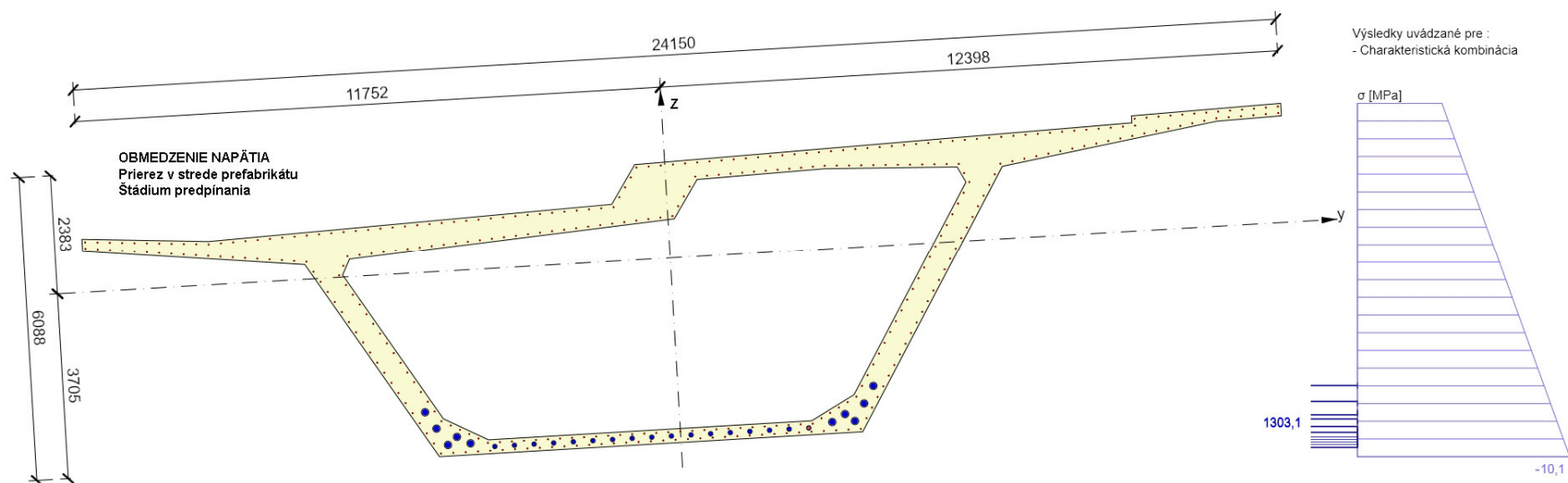
Steel fpk = 1860 MPa

MIDDLE OF PRECAST





Prierez pri podpore, napätia v štádiu predpinania a pri konci životnosti – program IDEA StatiCa



Prefabrikát – prierez v strede, napätia v štádiu predpinania – program IDEA StatiCa

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

- [1] Technical description for the technical dialogue for the Storstrøm bridge project, 9/2014, Revision 1, Vejdirektoratet
- [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 Zaťaženie mostov dopravou
- [5] New Storstrøm bridge, Dansk Betontag, 9/2019, Vejdirektoratet
- [6] Storstrøm bridge, Geotechnical offshore investigations and consulting, 9/2013, Vejdirektoratet
- [7] <https://sk.mapy.cz>

Všetky obrázky a prepočty v tomto príspevku sú pôvodné a nekopírované.

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

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

