

Mühlhausen bridge

GERMANY

*static
behavior*

*statické
pôsobenie*

*theory, analysis
Vladimír Budinský SSK*



KEYWORDS : segment bridge, bridge, computation, integral bridge, calculation, structural analysis, most, statický výpočet, SSK

ÚVOD (Introduction)

V roku 2016 sa realizoval v nemeckom Bavorsku, južne od mesta *Neumarkt in der Oberpfalz*, prvý pilotný projekt „*Most Greißelbach*“. Tento projekt, ako aj ďalšie podobné mosty, sa vyvíjali pod záštitou Ministerstva dopravy a digitálnej infraštruktúry (BMVI) a Bavorským ministerstvom pre bývanie, výstavbu a dopravu. V projekte *Greißelbach* sa implementoval nový koncept výstavby mostov. Hlavným znakom konštrukčného princípu bolo rozdelenie nosnej konštrukcie na pozdĺžny a priečny nosný systém. Priečny systém tvoria navzájom nasucho spojené betónové segmenty bez asfaltu a hydroizolácie. Segmenty sú klzne uložené na hlavnom pozdĺžnom nosnom systéme z dvoch spriahnutých nosníkov ocel–betón. Na vývoji a výstavbe sa podieľala výrobná spoločnosť *Max Bögl* v spolupráci s projektovou skupinou *SSF Ingenieure AG*.

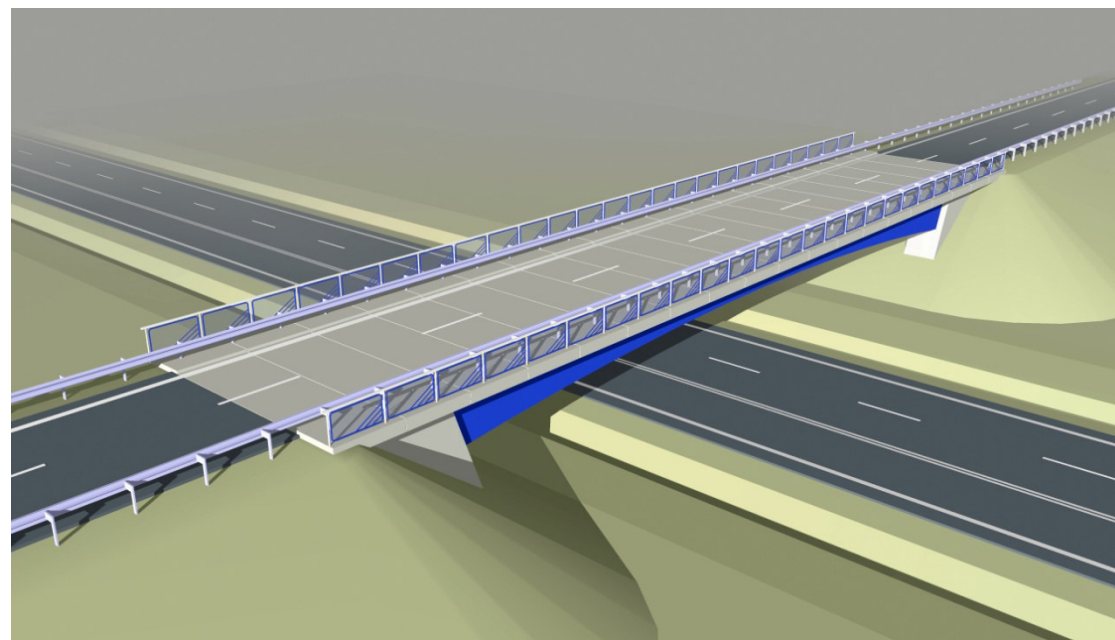
V roku 2018 bol daný do prevádzky segmentový most 2. generácie – MÜHLHAUSEN, tiež nad novovybudovaným úsekom cesty B 299, len pár kilometrov južnejšie od Greißelbachu. Konštrukcia mosta 2. generácie prináša vylepšenia v geometrii, detailoch a postupoch výstavby. Na výstavbe a vývoji sa podieľali rovnaké spoločnosti. Bavorská inžinierska komora ocenila priekopnícky pilotný most Mühlhausen prvým miestom v Bavorskej inžinierskej cene, ktorá bola udelená 18. januára 2019 v Mníchove.

ÚČASTNÍCI VÝSTAVBY

Investor :	Staatliches Bauamt Regensburg
Návrh a vývoj :	SSF Ingenieure AG , Beratende Ingenieure im Bauwesen v spolupráci s Firmengruppe Max Bögl
Dodávateľ, výroba :	Firmengruppe Max Bögl
Koniec výstavby :	2018

POPIS KONŠTRUKCIE

Počet pólí :	1
Rozpon :	38 m
Šírka mostovky :	10,6 m
Výška nad terénom :	~ 4,8 m
Šírka medzi zvodidlami :	7,5 m
Typ konštrukcie :	kombinovaná



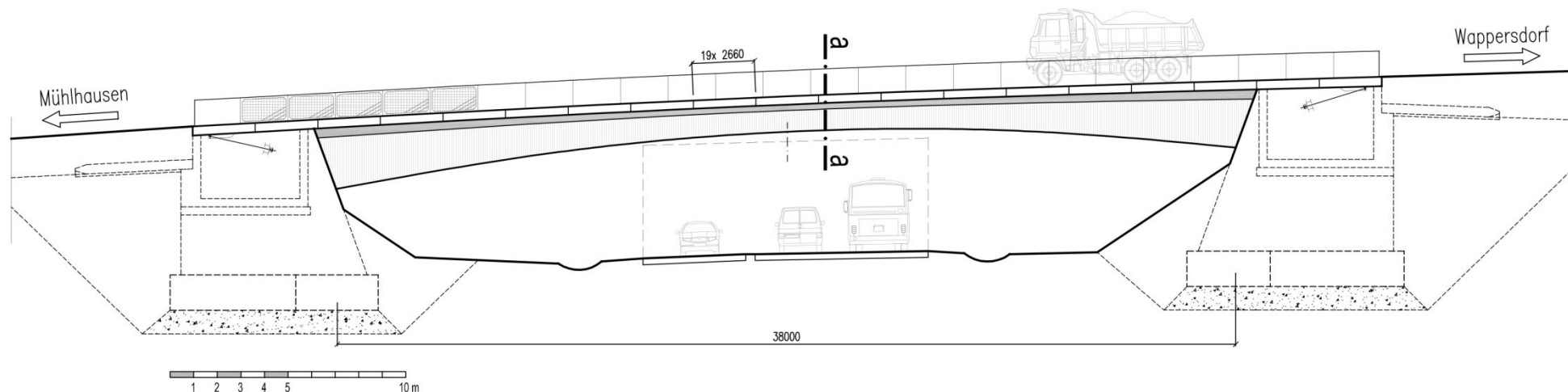
Most je spojením viacerých konštrukčných princípov. Hlavným znakom, ako už bolo spomenuté, je rozdelenie nosnej konštrukcie na pozdĺžny a priečny nosný systém. Tieto dva systémy dilatujú nezávisle, spojené sú iba pomocou klzného uloženia. Účelom takéhoto usporiadania je zrýchlenie výstavby pomocou vopred pripravených prefabrikovaných dielov, ktoré

sa vyrabia vo výrobní vysokou kvalitou spracovania, ako aj výmena opotrebovaných častí konštrukcie v procese údržby bez mokrých a technologicky zdĺhavých procesov.

Pozdĺžny nosný systém mosta tvoria dva spriahnuté nosníky ocel'-betón, ktoré sú vyrobené kompletne ako hotový nosník vo výrobní, tzv. *VFT-Träger* (Verbundfertigteilträger). Konce nosníka sú votknuté do železobetónových opôr a spolu tvoria INTEGROVANÝ most (bez ložísk a záverov). Ocel'ová časť spriahnutého nosníka je vzduchotesne uzavretý skriňový profil

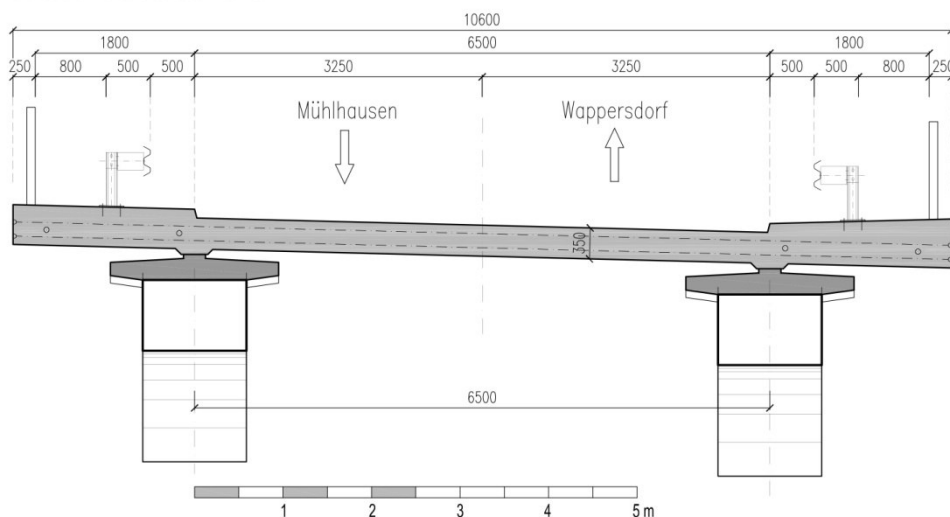


kvality S355 J2+N. Spodná hrana nosníka je tvarovaná do oblúka tak, aby vystihovala statické namáhanie dielca. Vo vnútri sú priečne prepážky hrúbky 12 mm vo vzdialenostiach 4 m. Na hornej hrane sú navarené dve spriahujúce lišty v tvare klotoidy. Betónová pásnica nosníka je kvality C60/75 s hrúbkou v osi nosníka 250 mm v strede mosta a 350 mm na krajoch.



← ↑ Pozdĺžny a priečny rez

cross section a-a

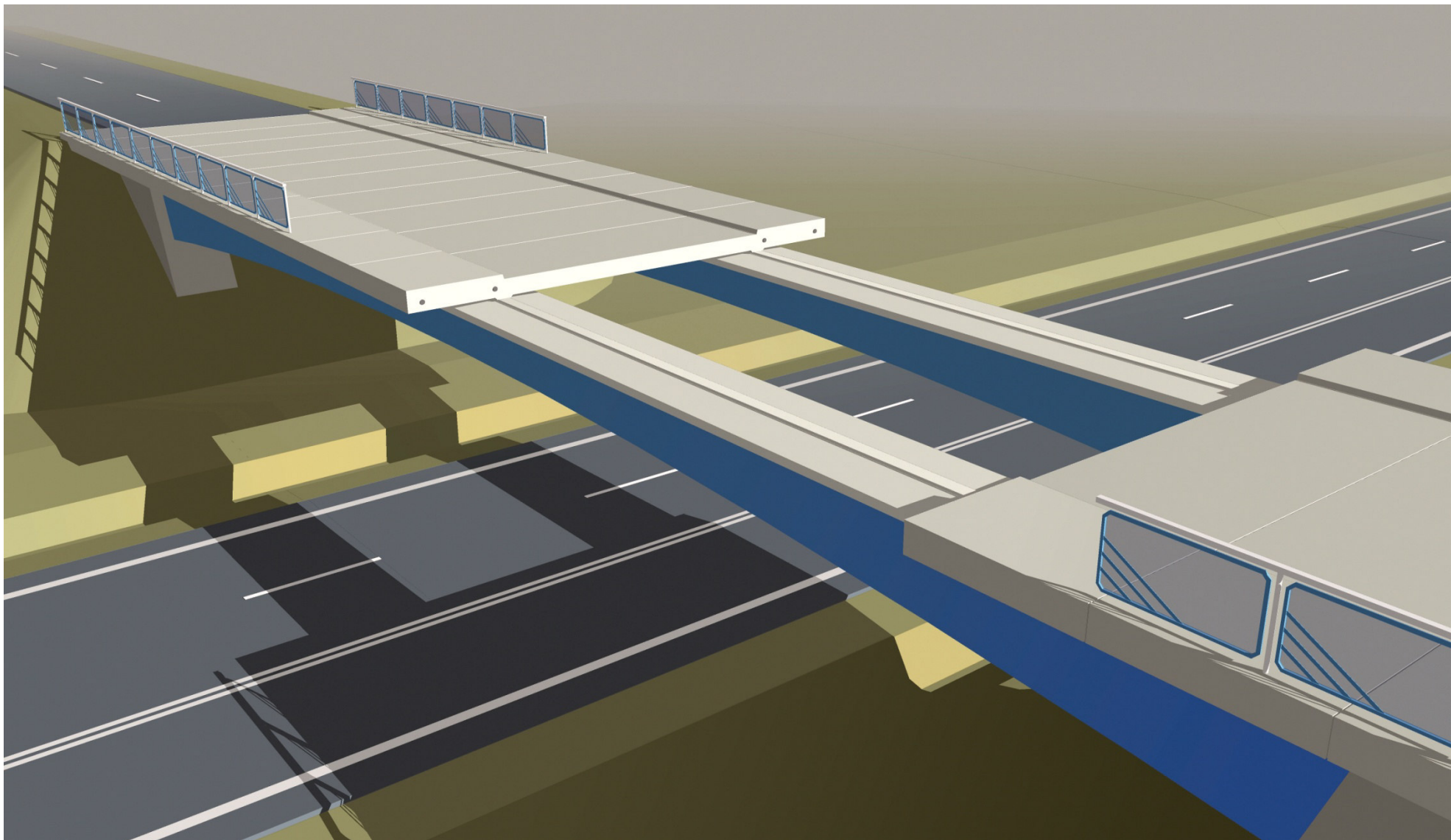


Priečny nosný systém pozostáva z betónových priamopojazdných prefabrikátov, tzv. *segmentov*, šírky 2660 mm a dĺžky 10600 mm. Rozpätie prostého nosníka s previslými koncami je 6500 mm. Hrúbka medzi podporami je 350 mm. Tvar, uloženie, funkcia a výroba týchto segmentov tvoria výnimočnosť tohto mosta. Vyrobené sú z betónu C60/75 a sú priečne aj pozdĺžne predpäté. Keďže sú uložené svojím tvarom kolmo na nosníky VFT, v ďalšom budeme používať výrazy *priečne* a *pozdĺžne* predpätie vzhľadom na *os* mosta, aby sa to nepletlo. Teda priečne predpätie (kolmo na os mosta) je plné, vopred predpäté. Pozdĺžne predpätie (v smere osi mosta) vlastne ani nie je plnohodnotné predpätie, je to skôr *zopnutie* segmentov takou silou, aby držali tvar a boli schopné prenášať priečne sily na vzájomnom spoji. Toto predpätie je dodatočné nesúdržné predpätie, a to aj vzhľadom na to, aby sa dalo jednoducho a rýchlo rozobrať pri prípadnej výmene poškodeného jedného alebo viacerých segmentov v rámci údržby.

KONŠTRUKČNÉ PODROBNOSTI

OPORY V rámci princípov integrovanej konštrukcie je pod betónovými základmi tvaru

„U“ štrkopieskové lôžko hrúbky 1 m. S týmito základmi (C30/37) sú monoliticky spojené dve krídlové steny (C35/45), do ktorých sú votknuté VFT nosníky. Pretože v mieste votknutia je najväčší záporný moment a betónová pásnica nosníka by mala problém preniesť veľkú ťahovú silu, tak je na hornú oceľovú pásnicu skriňového prierezu navarená konzola, na ktorú sa



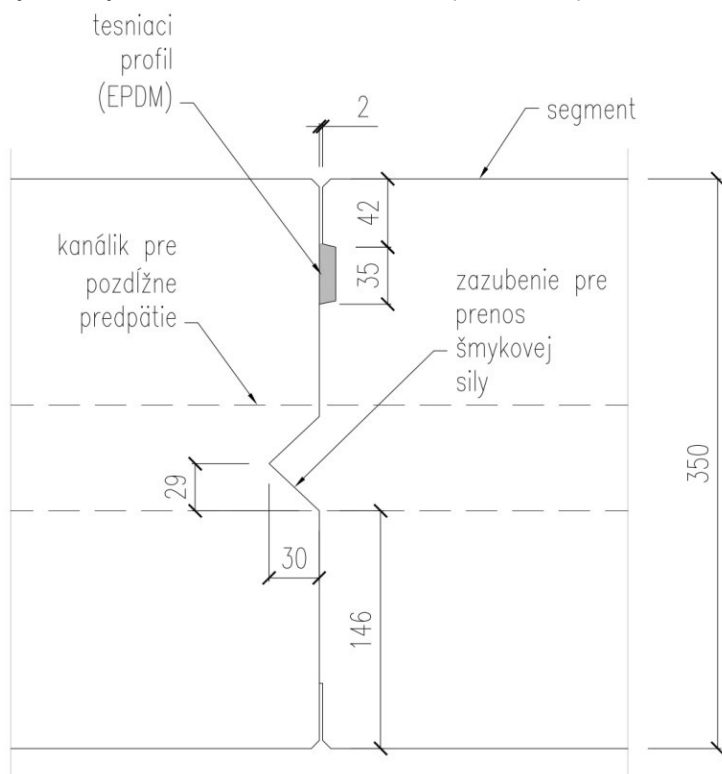
naskrutkuje 8 predpínacích tyčí $\varnothing 47$ mm St950/1050, vedených až na koniec krídla, odkiaľ sa predopnú a zakotvia. Tlaková sila na spodku skriňového nosníka sa preniesie štandardne oceľovou platňou s navarenými tržmi.

SEGMENTY Priečne predpätie segmentov pozostáva z priamych lán $\varnothing 12,5$ mm kvality St1660/1860. Sú usporiadané v dvoch radoch symetricky vzdialených od krajov 95 mm (merané v strede rozpätia) vo vzájomnej vzdialenosti priemerne 80 mm. Vopred predpäté laná sú ukončené 35 mm od povrchu čela prefabrikátu v kuželovitom vyhlbení, ktoré sa zaleje zálievkou. Čelná plocha segmentu a tým aj predpínacie pramene budú prekryté sklenenou tkaninou zaliatou v epoxidovej živici a tým chránené voči vonkajším vplyvom. Okrem predpínacích lán je v segmente zabudovaná aj betonárska výstuž $A_{s,min}$ kvôli zachovaniu robustnosti prvku.

Na pozdĺžne predpätie sú v segmente zabudované 4 kanáliky, každý pre 4 laná s prierezom po 150 mm^2 kvality St1660/1860 bez súdržnosti. Laná vedú od jedného konca mosta po druhý cez všetky segmenty.

Vzájomné spojenie 19 segmentov je znázornené na obrázku. Tesniaci profil z EPDM sa predpätím stlačí zo 16 na 10 mm. Horná škára šírky 2 mm pôsobí proti zamŕzaniu kapilárnej vody. Navyše je takýto detail vodotesný a je dlhoročne odskúšaný v tunelovej výstavbe. Povrchovej úprave sa venuje vo výrobnom závode mimoriadna pozornosť. Prefabrikáty sa vyrábajú na hornej a bočných hranách o 5 mm hrubšie a potom sa špeciálne brúsia a leštia. Horný pojazdný povrch sa navyše zdrsní ako na betónových diaľniciach (metličková protišmyková úprava).

Všetky segmenty sú len položené cez zabudovaný ozub na spodnej hrane na tvarovaný nerezový plech, upevnený na hornej pásnici VFT. Spodná hrana segmentu je ešte natretá grafitovou farbou a táto kombinácia umožňuje hladké kĺzanie. Takýmto spôsobom segmenty neprenášajú priečne sily do hlavných nosníkov. Na mieste je otázka, ako zabezpečiť, aby sa celá vozňová doska neskĺzla z mosta a bezpečne prenášala priečne sily na moste (napr. vietor, seizmické sily a pod.), ako aj pozdĺžne brzdné sily. K tomu slúžia dva systémy. Jednak sú to kovové zarážky, umiestnené na vnútornej strane krídel a na spodnej hrane krajných segmentov. Tie umožňujú len pohyb v pozdĺžnom smere pomocou voľne priskrutkovaných spojov s pozdĺžnymi dierami. Druhý systém je trochu odkukaný z veterných turbín. Pozdĺžne pnutie dosky zachytávajú dve predpínacie tyče $\varnothing 42$ mm, umiestnené v komore opory na každej strane mosta. Tie sú na jednej strane uchytené o kotevný plech, zabudovaný na spodnom povrchu koncových segmentov. Na druhej strane sú tyče uchytené do priečného nosníka, zakotveného v stenách železobetónových krídel, cez systém tanierových pružín, ktorý elasticky vykryva pozdĺžne pohyby segmentovej dosky. Teoretický bod bez pohybu cestnej dosky je v strede mosta.

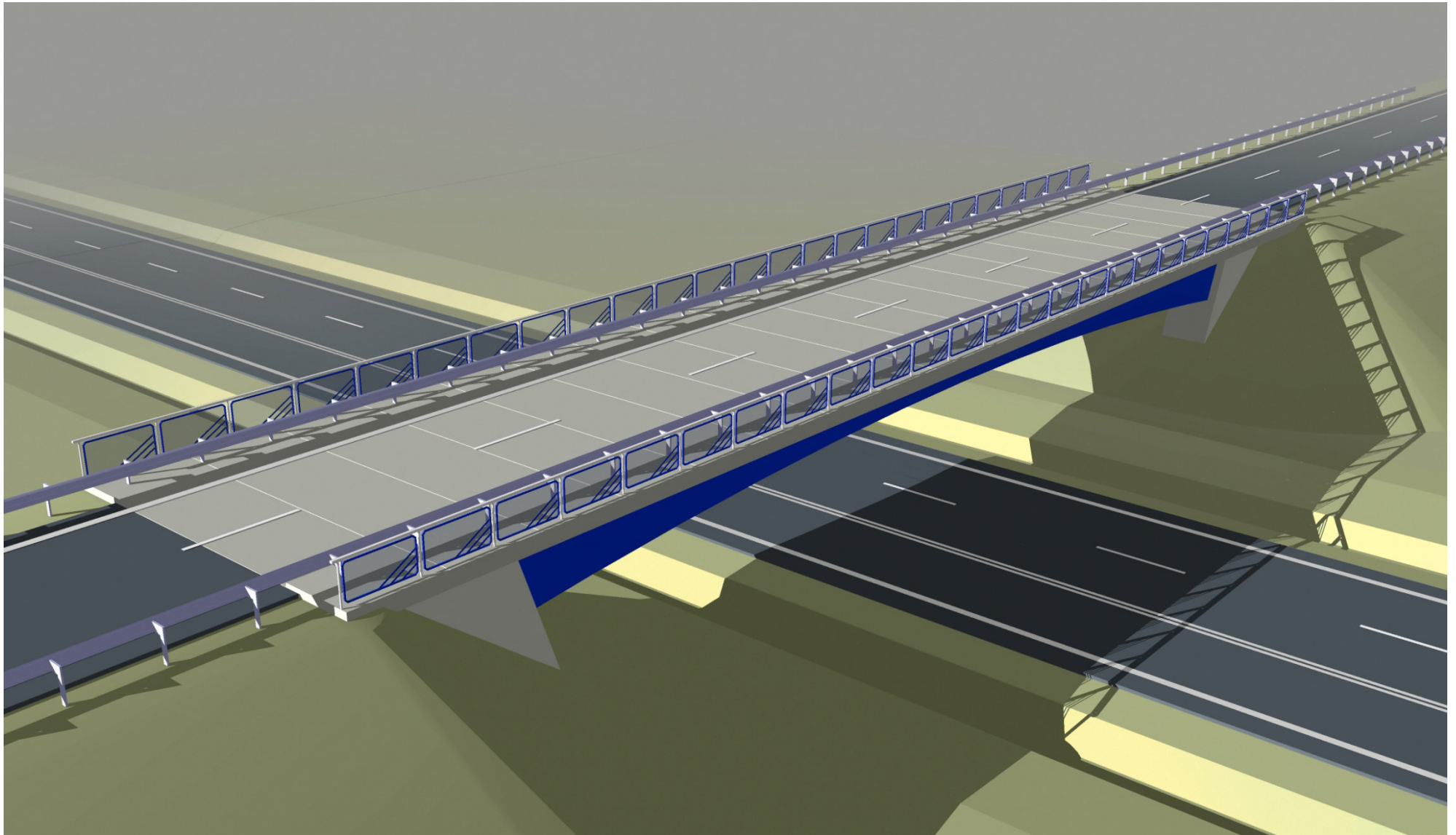


Vzájomné spojenie segmentov

POZNÁMKY K VÝSTAVBE

Jeden z hlavných dôvodov vývoja takéhoto typu mosta je skrátenie času výluk prekleňovaného priestoru pod mostom (diaľnica, železnica, vodný tok a pod.) To sa dosiahne jednoduchým uložením hotových dielov medzi opory s vylúčením mokrých procesov.

Najprv sa štandardným spôsobom realizujú výkopy, základy a monolitické opory. Výluky sú potom vyžadované len na uloženie VFT nosníkov a na uloženie segmentov pomocou výkonných žeriavov. K uloženiu segmentov potom patrí aj ich pozdĺžne predpätie a zafixovanie v priečnom smere. V segmentoch sú už zabudované aj kotevné prvky pre zvodidlá a zábradlia.



VYHODNOTENIE

Ekonomické a technické výhody riešenia :

- vysoký štandard kvality vďaka rozsiahlej prefabrikácii mostných prvkov v továrni
- plne predinštalované prvky v prefabrikátoch
- odstránením mostných tesnení a asfaltového povrchu vozovky nie sú práce na stavenisku závislé od počasia
- vysoká úroveň bezpečnosti vďaka betónovému povrchu vozovky (dlhodobé vysoké hodnoty príľnavosti a svetlý povrch cesty)
- odstránenie mostných ložísk a mostných záverov pomocou integrálnej konštrukcie a tým nižšie náklady na údržbu
- žiadne vyjazdené koľaje
- žiadne podpery pri výstavbe nosnej konštrukcie, preto významne menšie obmedzenie dopravy vo fáze výstavby
- rýchla a jednoduchá výmena prvkov (úplná aj čiastočná)
- nižšie náklady na údržbu, pretože obnova hydroizolácie, chodníkov a asfaltového povrchu sú vynechané
- veľké skrátenie času výstavby v porovnaní s konvenčnými stavebnými metódami
- nižšie náklady životného cyklu (LCC) v porovnaní s konvenčnými mostnými konštrukciami
- most je možné jednoducho demontovať vďaka modulárnemu princípu



Možné nevýhody : ● vysoká technická náročnosť zhotovenia dielcov a nároky na kvalitu výroby ● preprava dielcov ● vysoká kvalifikovanosť pracovníkov

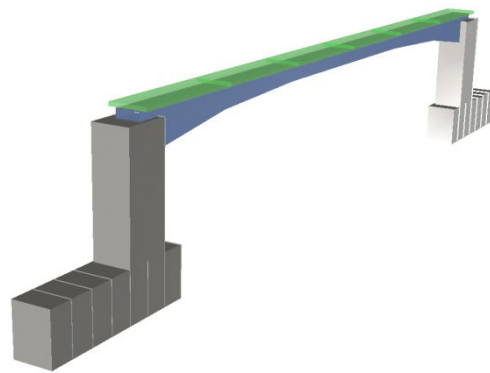
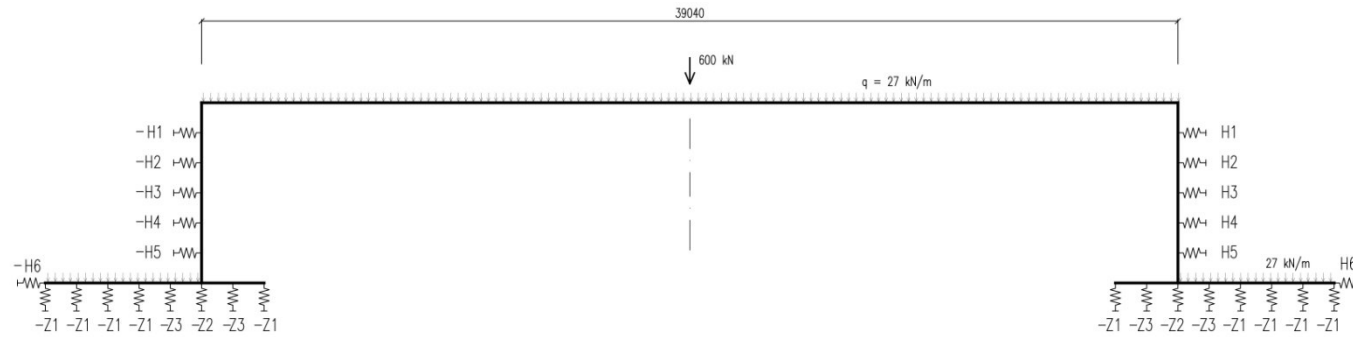
Niektoré technické riešenia považuje investor zatiaľ za problematické a neoverené a budú predmetom ďalšieho sledovania a vyhodnotenia. Medzi ne patrí napríklad : ● detail prechodu medzi segmentmi a asfaltovou vozovkou ● správanie sa tanierového pružného uloženia pri pozdĺžnom ukotvení segmentov ● použitie predpínacích kotevných tyčí pre tvarovanie napätia v rohoch rámov ● sledovanie detailov spojov segmentov a iné.

Výstavba mosta stála okolo troch miliónov eur.

VÝPOČTY

Za účelom pochopenia statického pôsobenia konštrukcie sme previedli veľmi zjednodušený výpočet mostu. V prvom kroku sme riešili jeden rám integrovaného mostu s cieľom posúdenia VFT nosníka v dvoch nepriaznivých miestach, a to v strede rozpätia a na kraji vo votknutí. V druhom kroku bolo riešené posúdenie segmentu. Všetky výpočty prebiehali v zmysle Eurokódov, a to jednak v zaťaženiach a jednak v materiálových vlastnostiach prvkov.

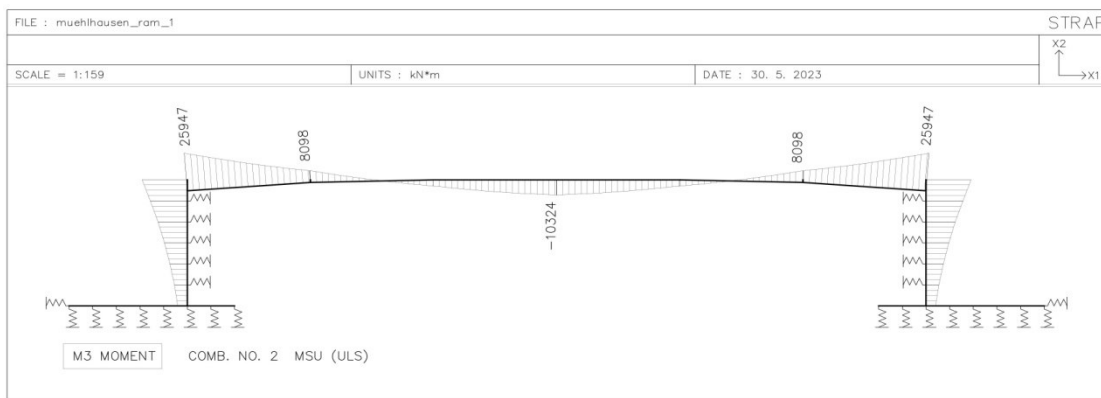
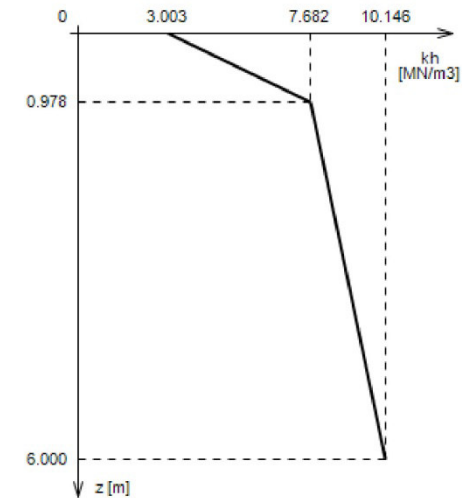
Statická a zaťažovacia schéma rámu



← Výpočtový model v programe STRAP

Distribution of Moduli k_h - Curve M (Combination of Translation and Rotation)

Point	k_h [MN/m ³]	z [m]
1	3.003	0.000
2	7.682	0.978
3	10.146	6.000



Výsledné momenty

Rozdelenie tuhostí pasívneho tlaku za oporou pre integrálny most (Křížek)

Posúdenie priereзов

Plastic bending resistance of composite beam

Plastická odolnosť spriahnutého prierezu

Oceľový nosník symetrický k zvislej osi, namáhanie ohybom

VSTUPNÉ ÚDAJE

Výška betónovej dosky "d" [m]	0,2
Efektívna šírka bet. dosky "B" [m]	1,9
Výška kónusu "di" [m] nezapočítaná	0,025
Plocha oceleového nosníka "Aa" [m ²]	0,1083
Výška oceleového nosníka "ha" [m]	2,05
Ťažisko ocel. nosníka "ta" [m] zhora	1,025
Šírka hornej pásnice nosníka "Ba" [m]	1,2
Výška hornej pásnice nosníka "dc" [m]	0,02
Hrúbka stojiny nosníka "t1" [m]	0,03
Plocha výstuže "As" [m ²]	0,004
Vzdialen. ťažiska výstuže "ds" [m] zhora	0,1
Medza klzu nosníka "fy" [kN/m ²]	355000
Medza klzu výstuže "fsk" [kN/m ²]	500000
Pevnosť betónu v tlaku "fck" [kN/m ²]	50000
Súčiniteľ materiálu nosníka "γ _{mo} "	1,00
Súčiniteľ materiálu výstuže "γ _s "	1,15
Súčiniteľ materiálu betónu "γ _c "	1,50

Medzivýsledky

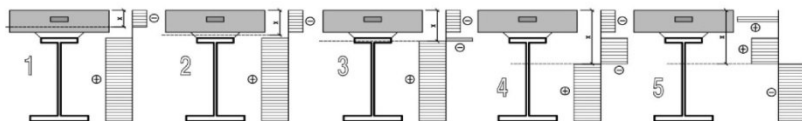
Návrh. hodn. mat. nosníka "fyd" [kN/m ²]	355000
Návrh. hodn. mat. výstuže "fsd" [kN/m ²]	434783
Návrh. hodn. mat. betónu "fcd" [kN/m ²]	333333
Ta od horného povrchu "da" [m]	1,250
Neutrálna os "x" [m] kladný moment	0,745
Neutrálna os "x" [m] záporný moment	1,168

CHYBOVÉ SPRÁVY

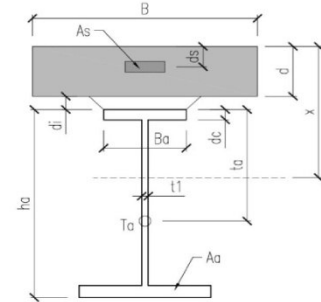
OK
OK

VÝSLEDKY

Mpl,Rd (+) [kNm]	37159
Mpl,Rd (-) [kNm]	29981



www.budinskysk.sk © SSK 2018
STN EN 1994-2



Mühlhausen bridge
KRAJ NOSNÍKA

Pomocné hodnoty

X _{1,2}	0,714	Aac	0,038986
Mpl1	0	Ba x dc	0,024
Mpl2	0	X ₃	0,032488
Mpl3	0	X ₄	0,499523
Mpl4	37159	X ₅	0,923351
Aat	0,051701	X _{4t}	0,109849
		X _{5t}	0,262718

PODMIENKY

- fy < 460 Mpa
- požaduje sa plné spriahnutie
- betonárska výstuž v tlaku nepôsobí

Plastic bending resistance of composite beam

Plastická odolnosť spriahnutého prierezu

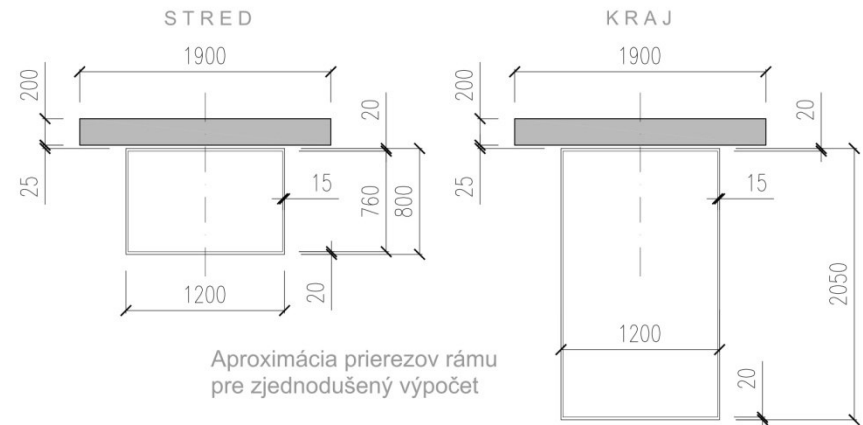
Oceľový nosník symetrický k zvislej osi, namáhanie ohybom

VSTUPNÉ ÚDAJE

Výška betónovej dosky "d" [m]	0,2
Efektívna šírka bet. dosky "B" [m]	1,9
Výška kónusu "di" [m] nezapočítaná	0,025
Plocha oceleového nosníka "Aa" [m ²]	0,0708
Výška oceleového nosníka "ha" [m]	0,8
Ťažisko ocel. nosníka "ta" [m] zhora	0,4
Šírka hornej pásnice nosníka "Ba" [m]	1,2
Výška hornej pásnice nosníka "dc" [m]	0,02
Hrúbka stojiny nosníka "t1" [m]	0,03
Plocha výstuže "As" [m ²]	0,002
Vzdialen. ťažiska výstuže "ds" [m] zhora	0,1
Medza klzu nosníka "fy" [kN/m ²]	355000
Medza klzu výstuže "fsk" [kN/m ²]	500000
Pevnosť betónu v tlaku "fck" [kN/m ²]	50000
Súčiniteľ materiálu nosníka "γ _{mo} "	1,00
Súčiniteľ materiálu výstuže "γ _s "	1,15
Súčiniteľ materiálu betónu "γ _c "	1,50

VÝSLEDKY

Mpl,Rd (+) [kNm]	10827
Mpl,Rd (-) [kNm]	8622



Aproximácia priereзов rámu
pre zjednodušený výpočet

TEXT

Mühlhausen bridge STRED NOSNÍKA

Pomocné hodnoty

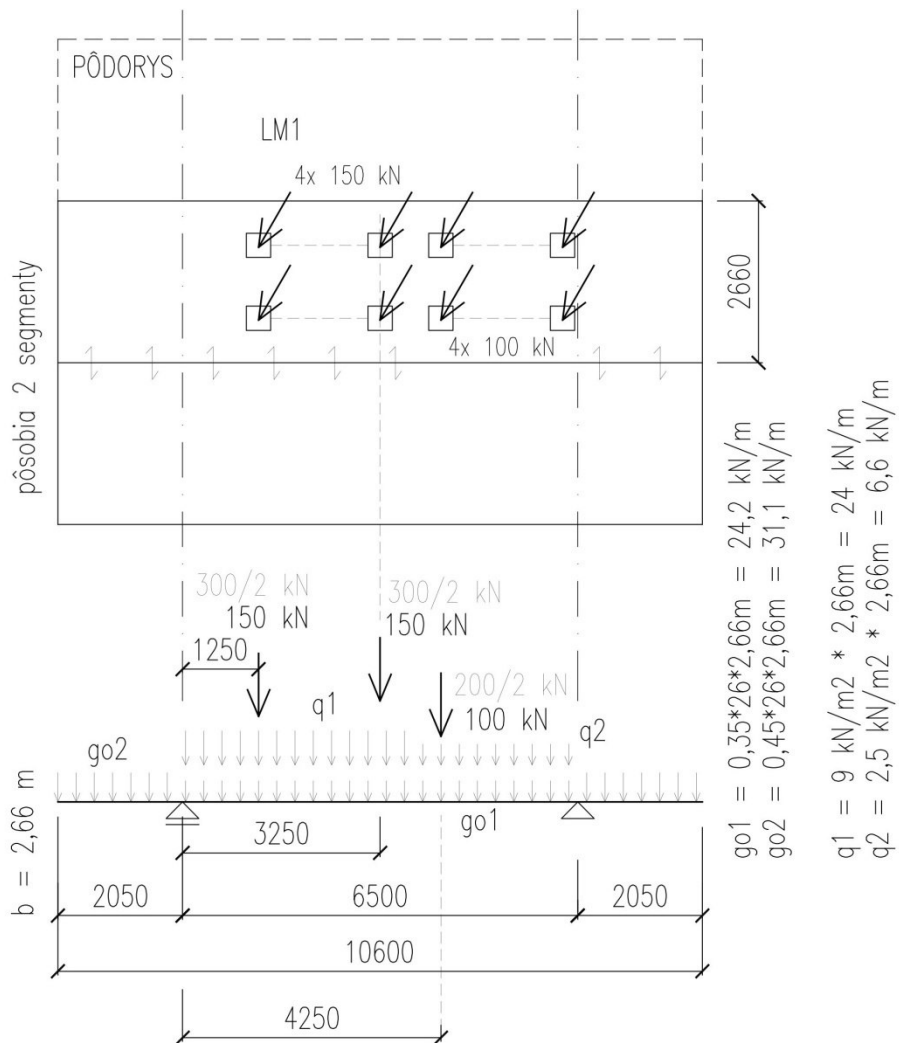
X _{1,2}	0,467	Aac	0,020236
Mpl1	0	Ba x dc	0,024
Mpl2	0	X ₃	0,016863
Mpl3	0	X ₄	-0,12548
Mpl4	10827	X ₅	0,339175
Aat	0,034175	X _{4t}	0,019811
		X _{5t}	0,06347

Medzivýsledky

Návrh. hodn. mat. nosníka "fyd" [kN/m ²]	355000
Návrh. hodn. mat. výstuže "fsd" [kN/m ²]	434783
Návrh. hodn. mat. betónu "fcd" [kN/m ²]	333333
Ta od horného povrchu "da" [m]	0,625
Neutrálna os "x" [m] kladný moment	0,120
Neutrálna os "x" [m] záporný moment	0,584

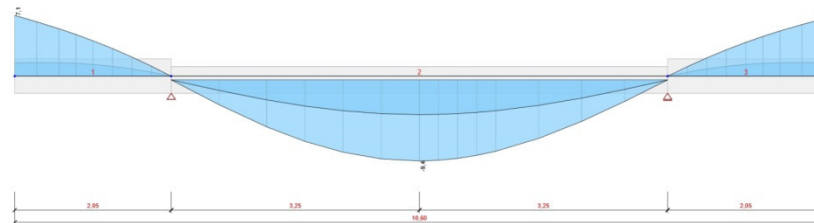
Kraj nosníka $M_{ED} = 25947 \text{ kNm} < M_{pl,Rd} (-) = 29981 \text{ kNm} \checkmark$
Stred nosníka $M_{ED} = 10324 \text{ kNm} < M_{pl,Rd} (+) = 10827 \text{ kNm} \checkmark$

VÝPOČET SEGMENTU

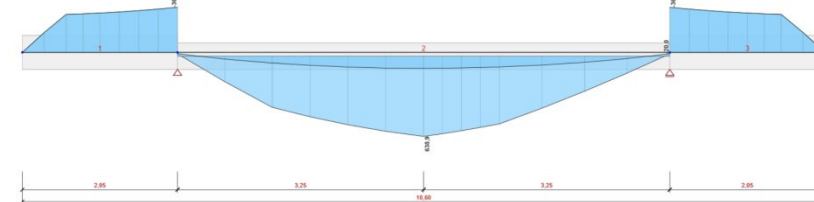


Zaťažovacia schéma

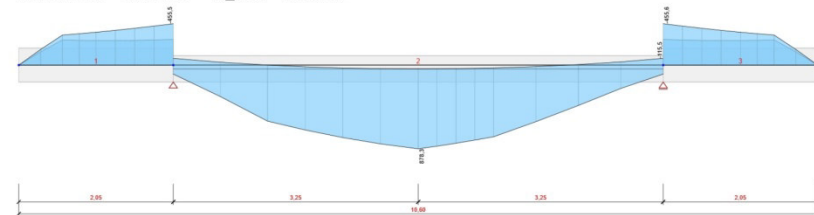
Displacement - characteristic combination SLS - $u_{max} = -9,4 \text{ mm}$



Moment - characteristic combination SLS - end of life - $M_{max} = 639 \text{ kNm}$

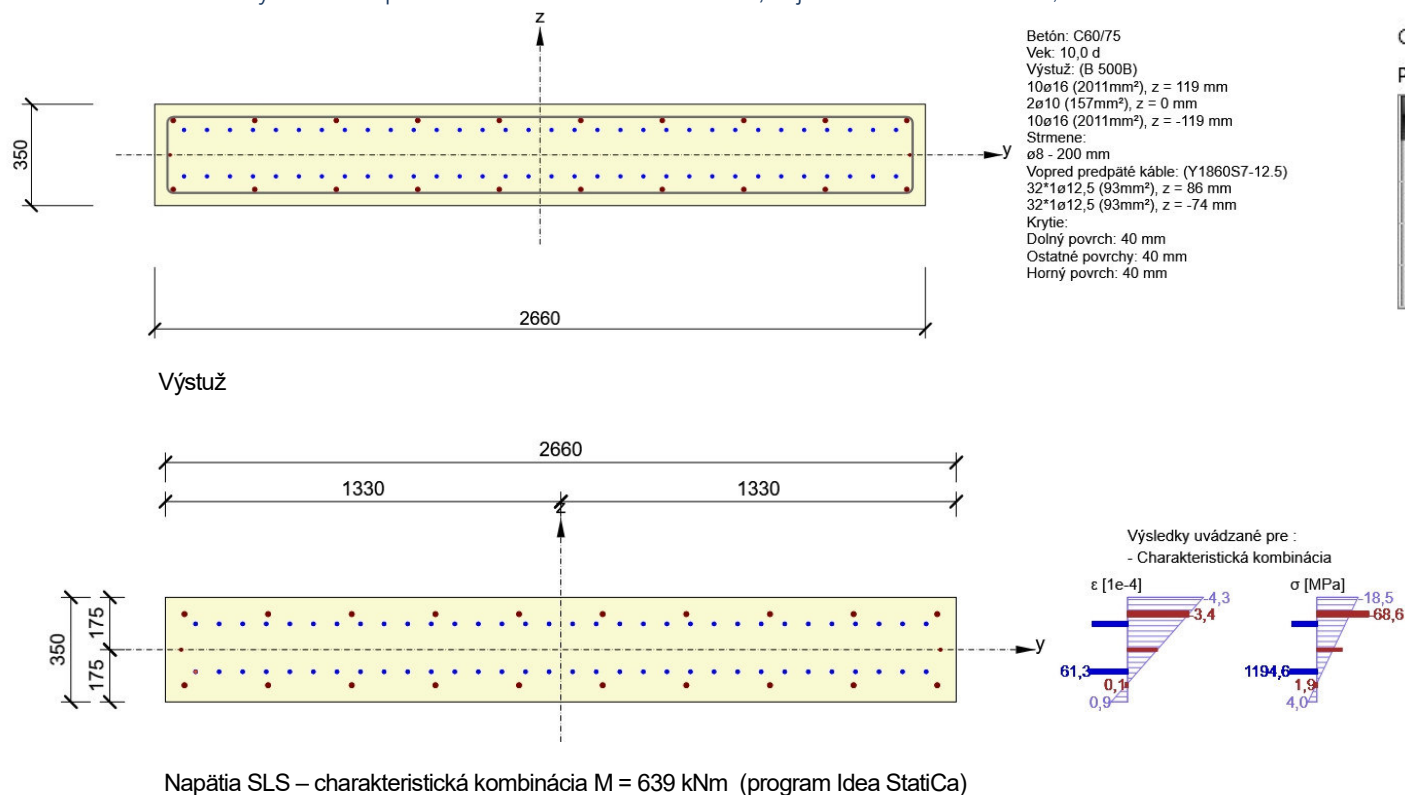


Moment ULS - end of life - $M_{max} = 878 \text{ kNm}$



Pružné posuny a niektoré kombinácie momentov (program Idea StatiCa)

Poznámka : betonárska výstuž nezodpovedá skutočnému rozmiestneniu, tu je len kvôli zavedeniu $A_{s,min}$



Niektoré ZDROJE, použité pri tvorbe článku :

- [1] Victor Schmitt, Anton Braun, Thomas Lechner, Günter Seidl : Entwicklung von Bauweisen im Brückenbau, 19. Symposium Brückenbau in Leipzig, 2019
- [2] STN EN 1992–1–1 Navrhovanie betónových konštrukcií
- [3] STN EN 1990/A1 Zásady navrhovania konštrukcií, príloha A2 – Použitie pre mosty
- [4] STN EN 1991–2 Zaťaženie mostov dopravou
- [5] STN EN 1993–1–1 Navrhovanie oceľových konštrukcií
- [6] STN EN 1994–1–1 Navrhovanie spriahnutých oceľobetónových konštrukcií. Všeobecné pravidlá
- [7] STN EN 1994–2 Navrhovanie spriahnutých oceľobetónových konštrukcií. Všeobecné pravidlá a pravidlá pre mosty

- [8] Günter Seidl, Martin Hierl, Michael Breu, Martin Mensinger, Mislav Stambuk : Segmentbrücke Greißelbach als Stahlverbundbrücke ohne Abdichtung und Asphalt, Stahlbau Februar 2016
- [9] Thomas Oehler : Ersatzneubau Speelberger Straße über die BAB 3, VSVI NRW, 2019
- [10] Jaromír Křížek : Integrované mosty, Integral Bridges, disertační práce, ČVÚT Praha, 2009

Poznámka : Vo vizualizáciách nie sú zobrazené spády mostovky

Všetky obrázky a prepočty v tomto príspevku sú pôvodné a nekopírované.
Pri zostavovaní článku boli použité nasledovné POČÍTAČOVÉ PROGRAMY :

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

