

Pedestrian bridge near Tübingen GERMANY

*static
behavior*

*statické
pôsobenie*

*theory, analysis
Vladimír Budinský SSK*



Keywords: footbridge, pedestrian bridge, bridge, computation, calculation, structural analysis, Fußgängerbrücke, Rad- und Fußwegbrücke, statische Berechnung, most, lávka pre peších, statický výpočet, SSK

Úvod (Introduction)

Južne od mestečka Tübingen pri odbočke cesty B27 do obce Nehren stojí elegantný most pre peších a cyklistov. Tento most prekleňuje štvorprúdovú cestu B27 spolu s jej vetvami za účelom bezpečného prechodu cyklistov a chodcov z obce Nehren do neďalekého športového areálu. Pôvodne dvojprúdová cesta B27 musela byť z dôvodu zvýšenej premávky rozšírená na 4-prúdovú, táto prestavba cesty sa uskutočnila až po výstavbe lávky, ktorá bola na takéto rozšírenie už naprojektovaná. Most okrem funkcie prechodu predstavuje aj orientačný a dobre viditeľný bod pre motoristov.

Architekti :	Dipl. – Ing. Roland Wetzel , arch22, Architektenpartnerschaft mbB, Stuttgart
Konštrukčné inžinierstvo (statika) :	Peter und Lochner , Beratende Ingenieure für Bauwesen GmbH, Stuttgart
Investor :	Regierungspräsidium Tübingen
Náklady stavby :	0,6 milióna eur
Projekt a výstavba :	2010 – 2011

Popis konštrukcie lávky

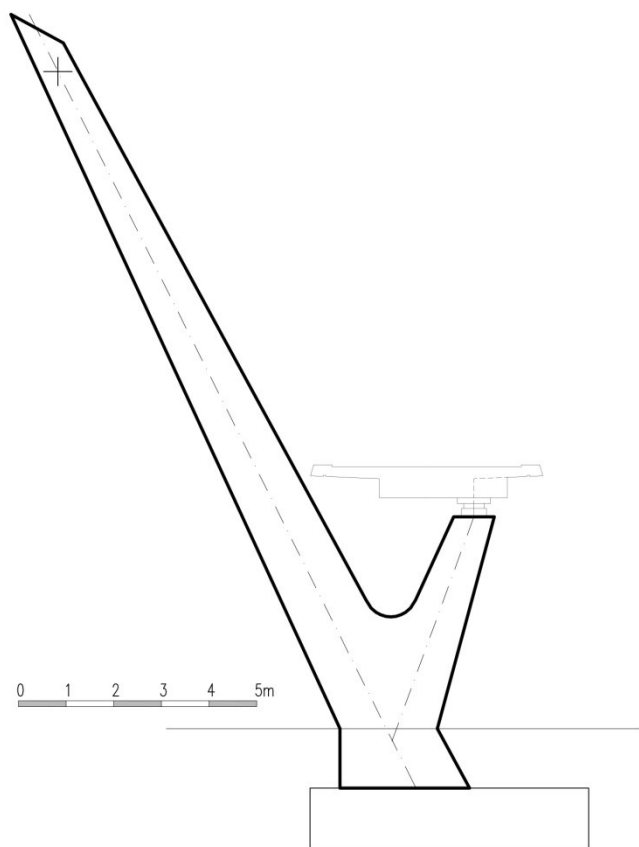
Počet polí :	4
Najväčší rozpon :	20 m
Priečhodná šírka :	3,0 m
Výška nad terénom :	~ 5,4 m
Výška pylóna :	~ 15 m
Polomer oblúka :	~ 70 m
Dĺžka mosta L (oblúka) :	~ 87 m
Typ konštrukcie :	Semi – integrálny železobetónový rámový most s pylónom a oceľovými závesnými tiahkami

Konštrukcia mosta je pozoruhodná a výnimočná ako z konštrukčného, tak aj z estetického hľadiska. Nemenej podstatný je aj jej ekonomický a úsporný spôsob výstavby a budúcej údržby. Všetky tri vnútorné podpery zaisťuje jediný pylón, čo je výhodné z hľadiska eliminácie možného nárazu a stiesneného priestoru pre podpery pod mostom. Stredná pevná podpera pylónu delí most na dve polovice a dve „pružné“ oceľové tiahla, vedené od vrcholu pylóna, delia dĺžku oblúka na štvrtiny. Tiahla sú zakotvené cez čapové spoje na vonkajšej strane oblúka a pevná podpera je vyosená na vnútornú stranu oblúka. Mostovka je na oboch masívnych koncových oporách votknutá prostredníctvom do krivky tvarovaných nábehov. Nábehové krivky sledujú koncové momentové namáhanie. Most je bez záverov a ložísk, teda takmer bezúdržbový. Jediné pohyblivé ložisko je nad stredovou oporou na pylóne.

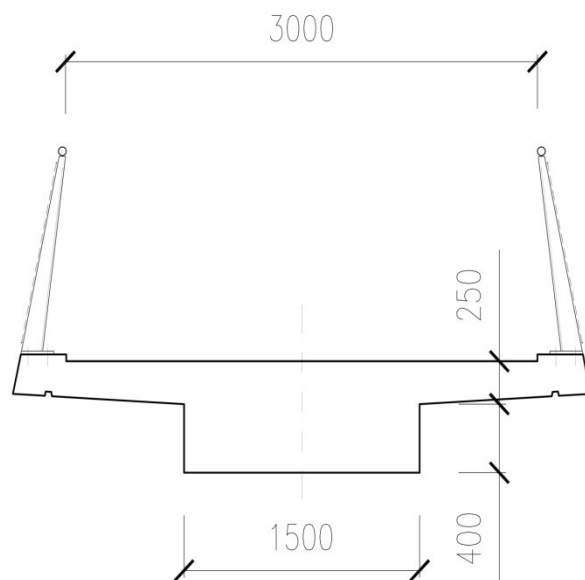


Tepelné namáhanie mosta, ako aj menej významnú časť dotvarovania a zmršťovania, eliminuje pôdorysný oblúk nosnej konštrukcie. Pylón je tvaru nesúmerného „Y“ a je natočený nie kolmo na mostovku, ale sleduje os štvorprúdovej cesty.

Závesné tyče majú priemer 72 mm a sú z ocele S460N. Mostovka je z betónu C45/55 a ocele B500B.



Pohľad na pylón



Rez mostovkou

Pri takto konštrukčne usporiadanom moste si treba uvedomiť jednu podstatnú vec : Nejedná sa o klasický zavesený most, aj keď to vizuálny tvar mosta evokuje. Závesné tiahla slúžia len ako pružné podpory, ktoré vylepšujú kladný momentový priebeh v štvrtinách rozpätia a rovnako tu znižujú prieťah. Rozdiel je v tom, že tiahla sa nepredpínajú, ale len dopínajú, aby zaberali v rozsahu svojej únosnosti. Materiál ocele tiahel má cca 4 až 5 násobne menšiu medzu pevnosti ako predpínacie drôty. Na klasickom zavesenom moste sa závesy z predpínacej ocele predpínajú tak, aby vyvodili na mostovke nulový prieťah a zároveň z hľadiska únavy neprekročili 0,45 násobok medze pevnosti. Keby sme niečo také chceli urobiť pri danom konštrukčnom nesymetrickom usporiadaní na našom moste, vzniknuté krútiace momenty by sa nedali vydimenzovať a tiahla by museli mať vyššiu únosnosť.

Ďalšiu okolnosť, ktorú treba vziať do úvahy, je mimoriadne zaťaženie, vzniknuté zlyhaním jedného tiahla. Takúto situáciu by mala mostovka zvládnuť aj bez tiahla prostredníctvom zvyškovej únosnosti aj za cenu extrémneho prieťahu. Túto možnosť sme v našom príspevku neskúmali.





Výpočty

Za účelom pochopenia statického pôsobenia konštrukcie sme previedli veľmi zjednodušený výpočet lávky (*simplified calculation*). Vyplyva to hlavne z toho, že sme nemali k dispozícii konštrukčné výkresy a výkresy výstuže. Preto sme si výstuž zvolili podľa výsledkov nášho približného výpočtu. Z nám dostupných zdrojov sme sa nikde nedozvedeli, či je most predpätý, alebo aspoň čiastočne predpätý. Preto sme vychádzal len zo železobetónovej verzie, ktorá je deklarovaná v [1], [5] a [6].

Ako hlavné náhodilé zat'azenie sme použili spojité rovnomerné zat'azenie $q_{fk} = 2,0 + (120/(L+30)) = 3,0 \text{ kN/m}^2$. Výpočty sa robili na prúťovom modeli MKP (FEM). Tepelné zat'azenia :

- osovú $\Delta T_N = \pm 27^\circ\text{C}$ pri východzej teplote $+10^\circ\text{C}$
- teplotný spád po výške prierezu $\Delta T_M = +15^\circ\text{C}$; -8°C
- kombinácia tepelných zat'azení $\rightarrow \Delta T_K = 0,35 \Delta T_N + \Delta T_M$ alebo $\Delta T_K = \Delta T_N + 0,75 \Delta T_M$

Výpočtový model konštrukcie FEM (program STRAP)

Ďalej sme uplatnili nasledujúce kombinácie :

G – vlastná tiaž, T – teplota, Q – chodci

Súčinitele ψ :	ψ_0	ψ_1	ψ_2
T	0,6	0,6	0,5
Q	0,4	0,4	0

MSÚ (ULS) :

$$1,35G + 1,35Q + 0T$$

$$1,35G + 1,5T + 0,4*1,35Q$$

MSP (SLS) :

Charakteristická $G+Q+0,6T$

$$G+0,4Q+T$$

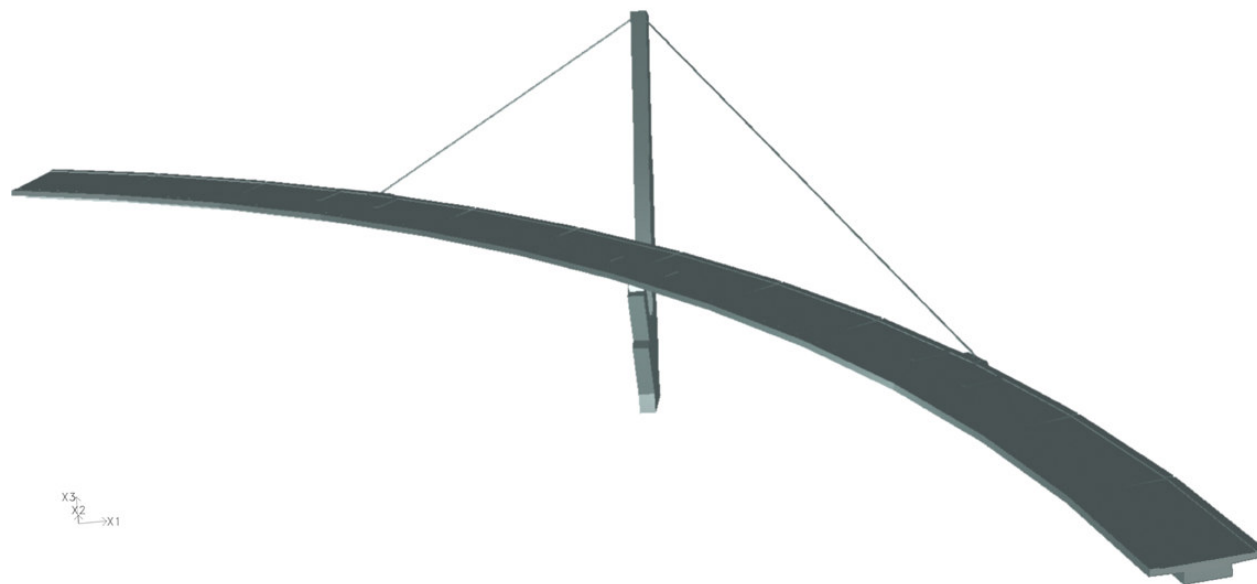
Častá

$$G+0,4Q+0,5T$$

$$G+0*Q+0,6T$$

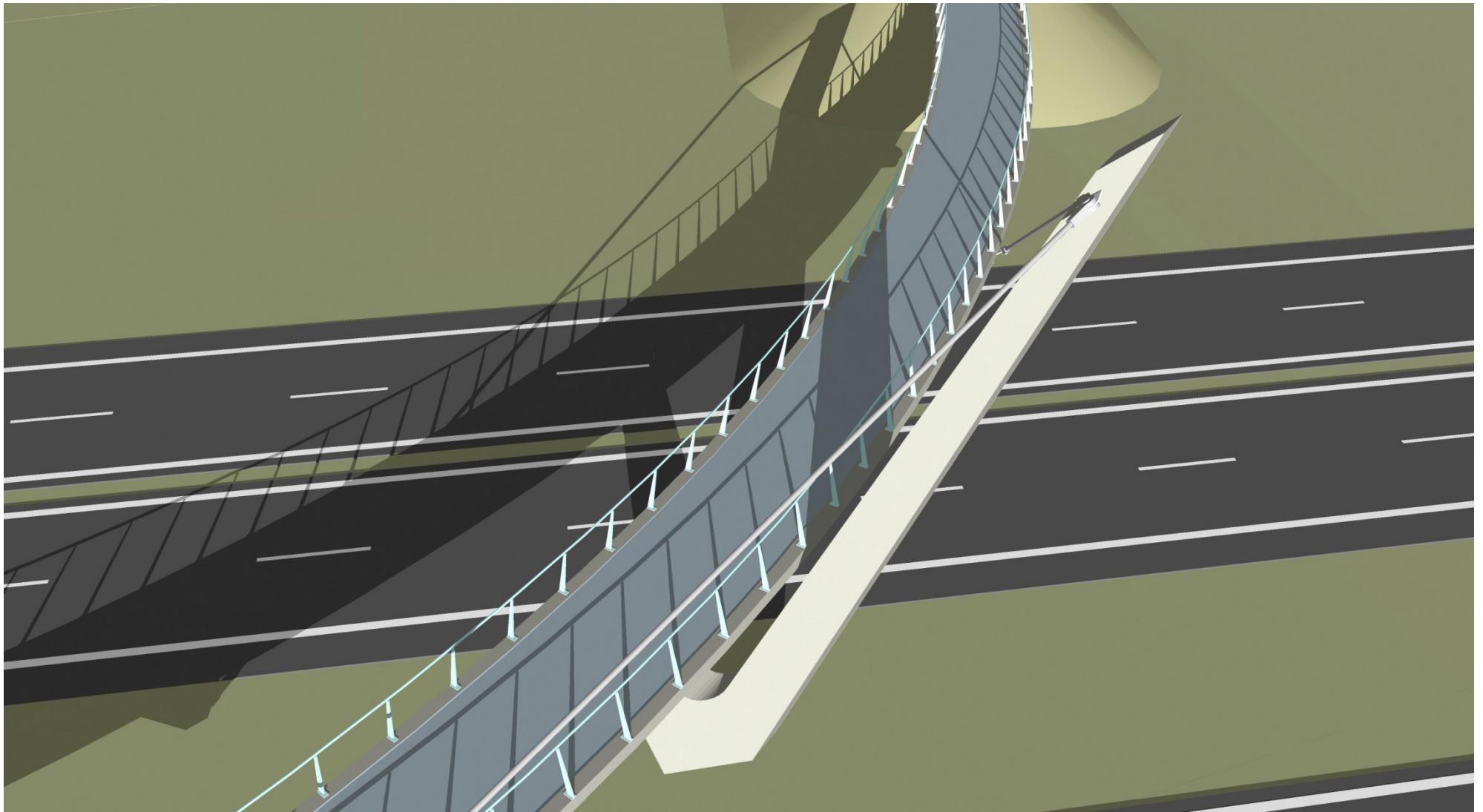
Kvázistála

$$G+0*Q+0,5T$$

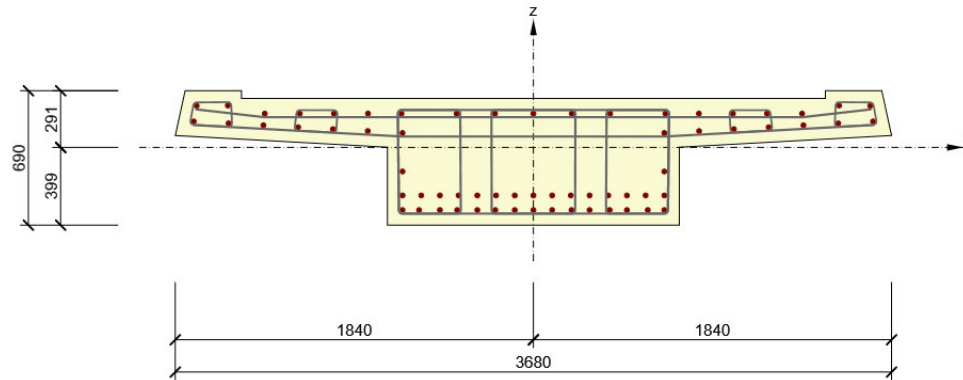


Celkovo to činilo 72 kombinácií pri takto zjednodušenom postupe, pri uplatnení šachovnicového usporiadania Q by to činilo 216 kombinácií.

Keďže mostovka je značne krútená, pri posúdeniach bolo treba klásť dôraz na kombinácie šmykovej sily a krútenia, ako aj interakcie s ohybovým momentom. Šmykové sily a momenty pôsobia v dvoch rovinách, zvislej aj vodorovnej v nezanedbateľných hodnotách. Hlavne interakcia zvislej a vodorovnej šmykovej sily nie je podchytená v normách, preto je pri zložitom priereze vhodné využiť numerickú integráciu a optimalizáciu sklonu tlačenej betónovej diagonály, aby vyšli reálne stupne vystuženia pri tak štíhľom priereze.



Vystužený prierez: R 1



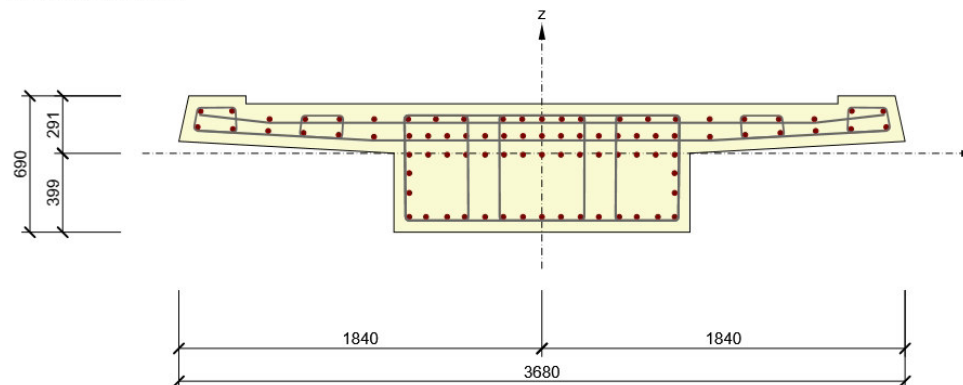
Betón: C45/55
Vek: 28,0 d
Výstuž: (B 500B)
2ø25 (982mm²), z = 215 mm
2ø25 (982mm²), z = 213 mm
15ø25 (7363mm²), z = 173 mm
2ø25 (982mm²), z = 133 mm
2ø25 (982mm²), z = 124 mm
2ø25 (982mm²), z = 114 mm
2ø25 (982mm²), z = 104 mm
2ø25 (982mm²), z = 94 mm
2ø25 (982mm²), z = 84 mm
2ø25 (982mm²), z = 74 mm
2ø25 (982mm²), z = -124 mm
15ø25 (7363mm²), z = -247 mm
15ø25 (7363mm²), z = -322 mm

Strmene:
ø12 - 200 mm
ø12 - 200 mm
ø12 - 200 mm
ø12 - 100 mm
ø10 - 200 mm
ø10 - 200 mm
ø10 - 200 mm
ø10 - 200 mm
ø12 - 200 mm
ø12 - 200 mm
Krytie:
Ostatné povrchy: 50 mm

Alternatíva vystuženia prierezu v poli so
spodným kladným momentom
– výpočtová schéma

program Idea StatiCa

Vystužený prierez: R 1

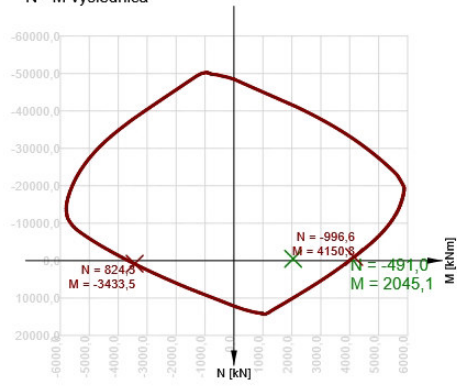


Betón: C45/55
Vek: 28,0 d
Výstuž: (B 500B)
2ø25 (982mm²), z = 215 mm
2ø25 (982mm²), z = 213 mm
19ø25 (9327mm²), z = 173 mm
2ø25 (982mm²), z = 133 mm
2ø25 (982mm²), z = 124 mm
2ø25 (982mm²), z = 114 mm
2ø25 (982mm²), z = 104 mm
2ø25 (982mm²), z = 94 mm
15ø25 (7363mm²), z = 88 mm
2ø25 (982mm²), z = 84 mm
15ø25 (7363mm²), z = -7 mm
2ø25 (982mm²), z = -100 mm
2ø25 (982mm²), z = -200 mm
15ø25 (7363mm²), z = -322 mm

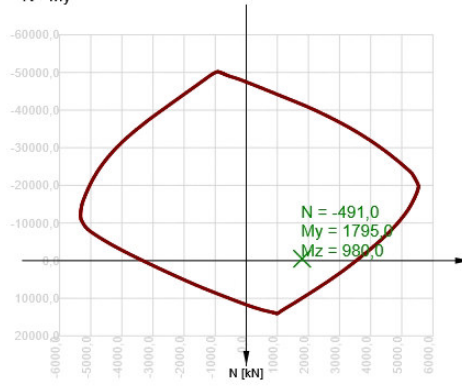
Strmene:
ø12 - 200 mm
ø12 - 200 mm
ø12 - 200 mm
ø12 - 100 mm
ø10 - 200 mm
ø10 - 200 mm
ø10 - 200 mm
ø10 - 200 mm
ø12 - 200 mm
ø12 - 200 mm
Krytie:
Ostatné povrchy: 50 mm

Alternatíva vystuženia prierezu
vo votknutí s horným záporným
momentom
– výpočtová schéma

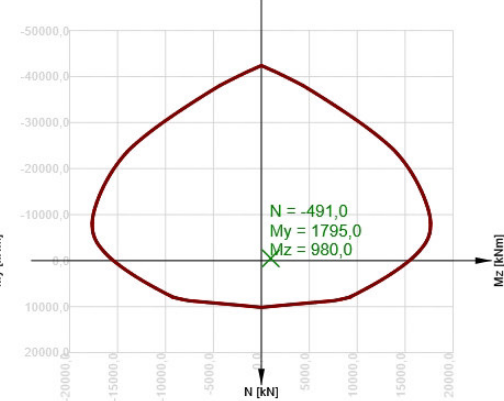
N - M výslednica



N - My



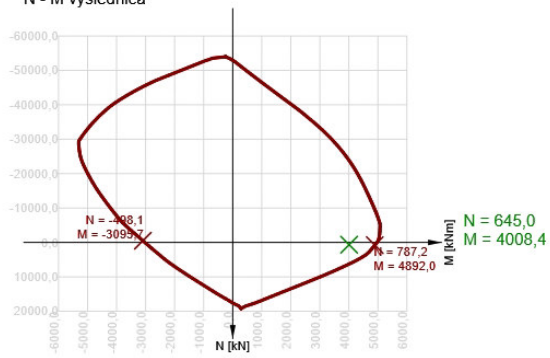
N - Mz



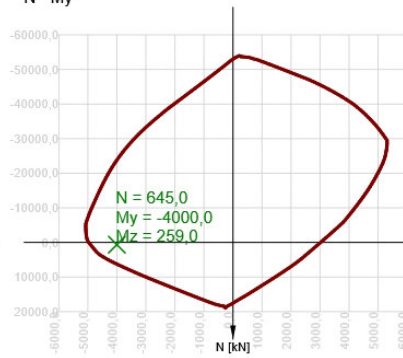
Niektoré výslednice MSÚ,
interakčné diagramy spodného
momentu

program Idea StatiCa

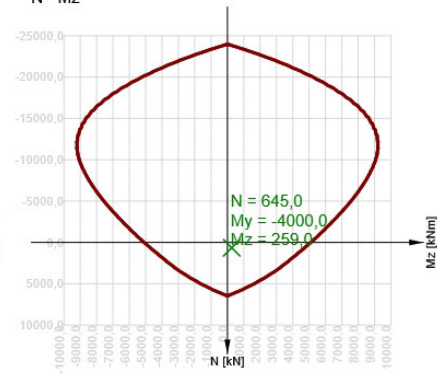
N - M výslednica



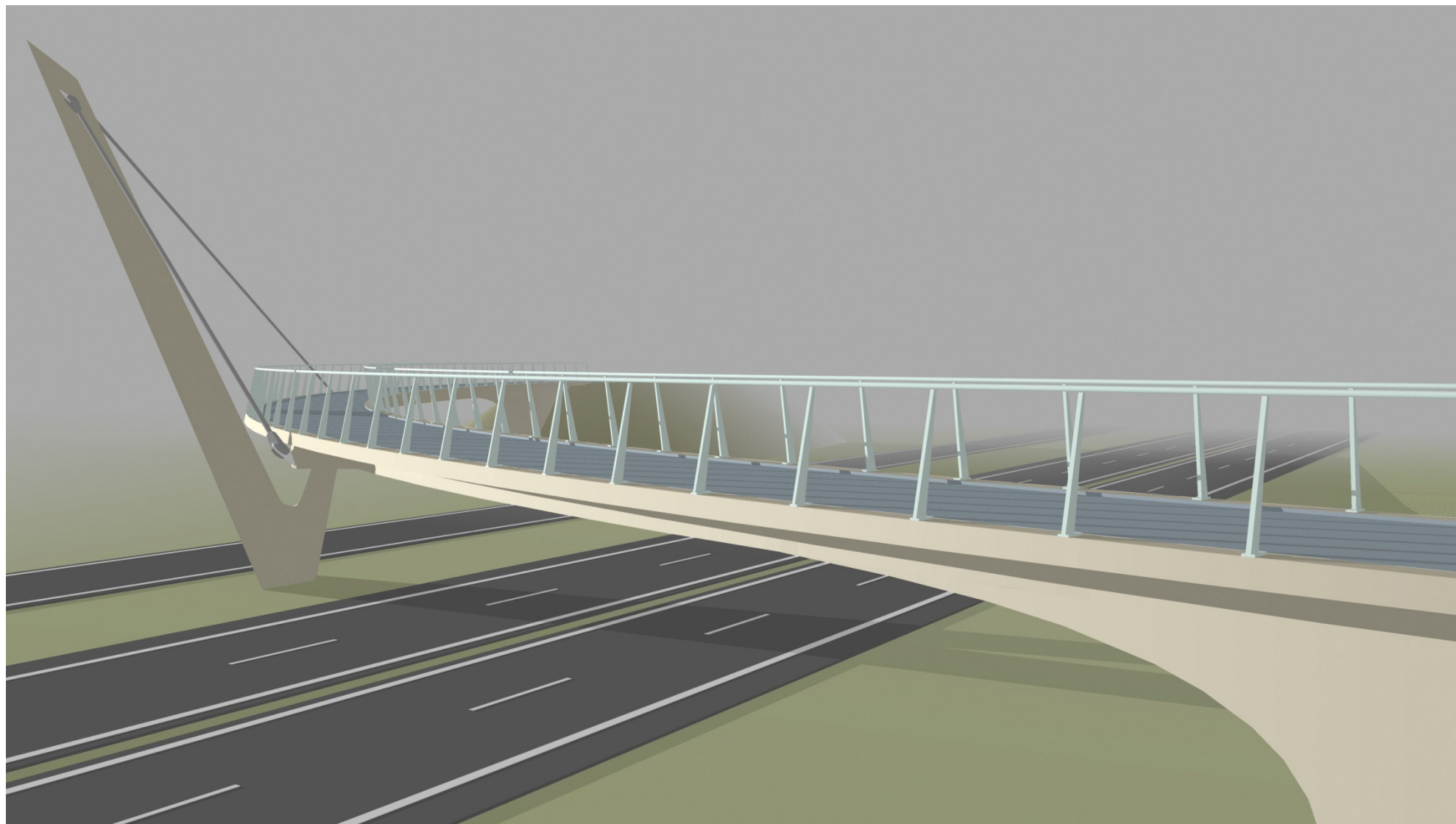
N - My

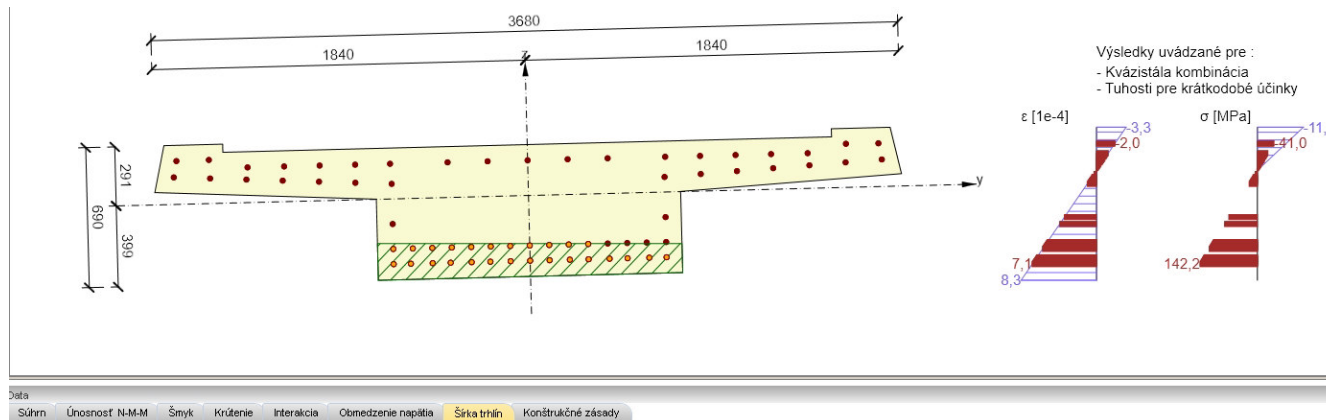


N - Mz



Výslednice MSÚ, interakčné
diagramy horného momentu na konci
mostovky tesne pred nábehmi





Posúdenie šírky trhliny – spodný moment v poli
program Idea StatiCa

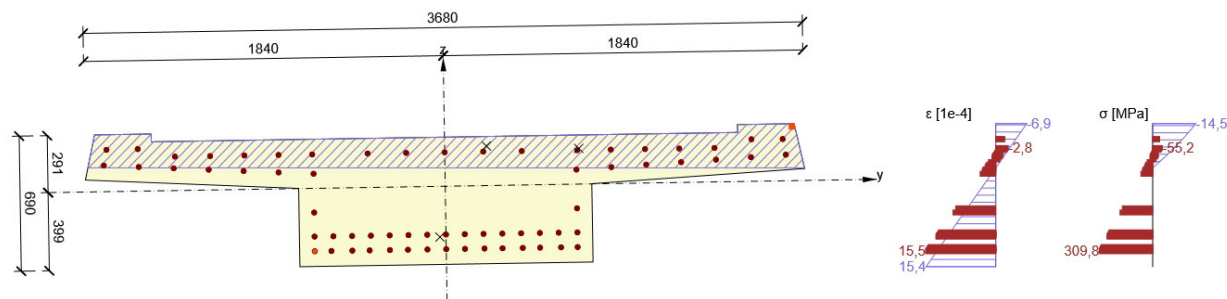
Šírky trhlín

Šírka trhlín - krátkodobé účinky

Kombinácia	N [kN]	M _y [kNm]	M _z [kNm]	w _k [mm]	w _{lim} [mm]	Využitie [%]	Medza [%]	Posudok
Kvázii	-87,0	967,0	993,0	0,158	0,300	52,8	100,0	OK

Šírka trhlín - dlhodobé účinky

Kombinácia	N [kN]	M _y [kNm]	M _z [kNm]	w _k [mm]	w _{lim} [mm]	Využitie [%]	Medza [%]	Posudok
Kvázii	-87,0	967,0	993,0	0,157	0,300	52,4	100,0	OK



Posúdenie interakcie napätí

Dynamické zaťaženie lávky sme zaviedli ako zaťaženie chodcami, a to zjednodušené odporúčané zaťaženie jedným chodcom v mieste amplitúdy príslušnej vlastnej frekvencie mosta, v našom prípade je to spoj tiahla s mostovkou pri šikmejšom tiahle

$$F(t) = 280 \sin(2\pi f_1 t) \quad [\text{N}]$$

Tiež sme približne skúmali vplyv vandalizmu, keď sme zaviedli desaťnásobok tejto sily. Výsledné zrýchlenia sme porovnávali so zrýchlením $a < 0,5 (f_0)^{-1} = 0,573 \text{ [ms}^{-2}\text{]}$.

Tlmenie konštrukcie ξ bolo zadané ako súčiniteľ tlmenia (*damping factor*), pre železobetónové konštrukcie $\xi = \vartheta / (2\pi) * 100 \approx 5\%$, kde ϑ je *logaritmický dekrement* útlmu pre železobetónové konštrukcie $\approx 0,3$.

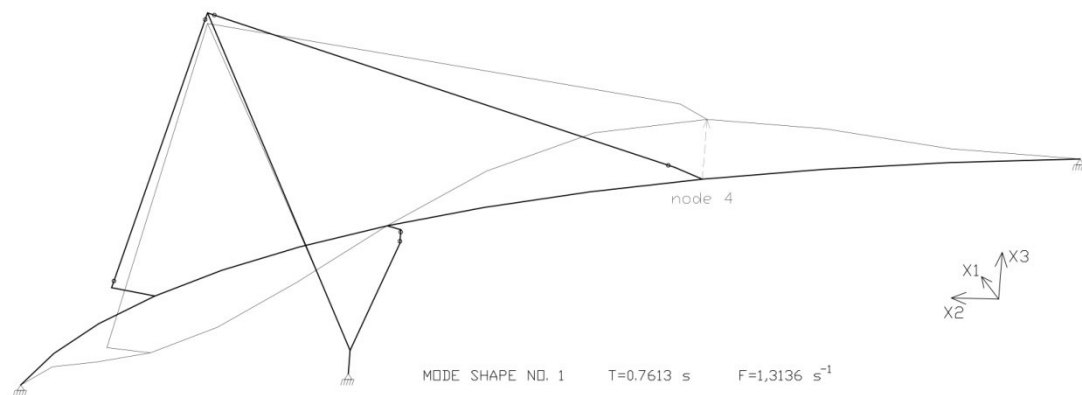
Relevantné vlastné zvislé frekvencie konštrukcie

$$f_1 = 1,3136 \text{ Hz}$$

$$f_2 = 2,2798 \text{ Hz}$$

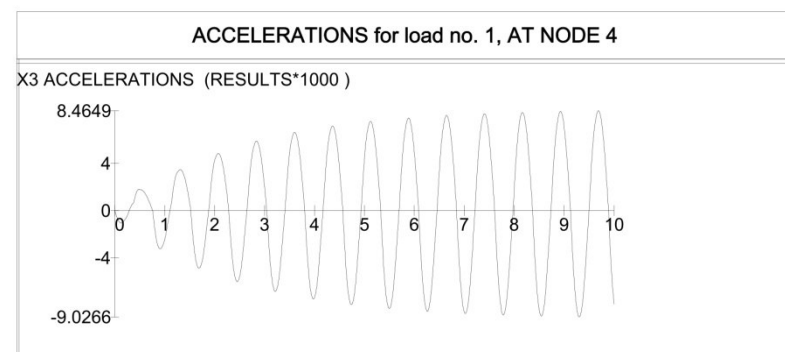
Vodorovné frekvencie sú vzhľadom na tvar žb mostovky nezaujímavé.

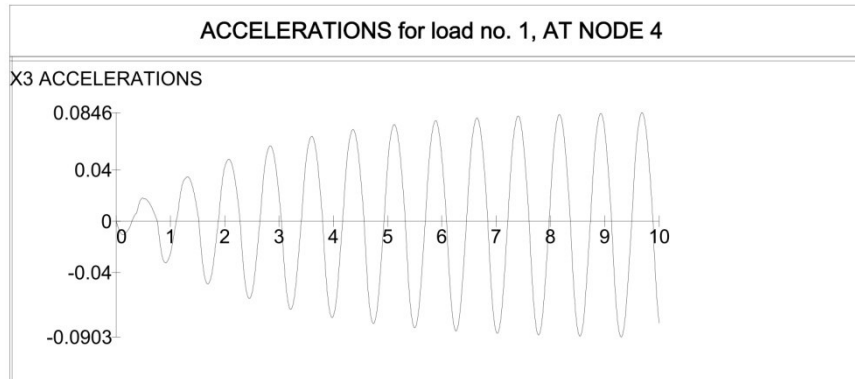
Vo všetkých prípadoch vyšlo zrýchlenie menšie ako odporúčané hodnoty, a to v dôsledku priaznivých tlmiacich charakteristík pre železobetónové konštrukcie (v porovnaní napr. s oceľovými mostami).



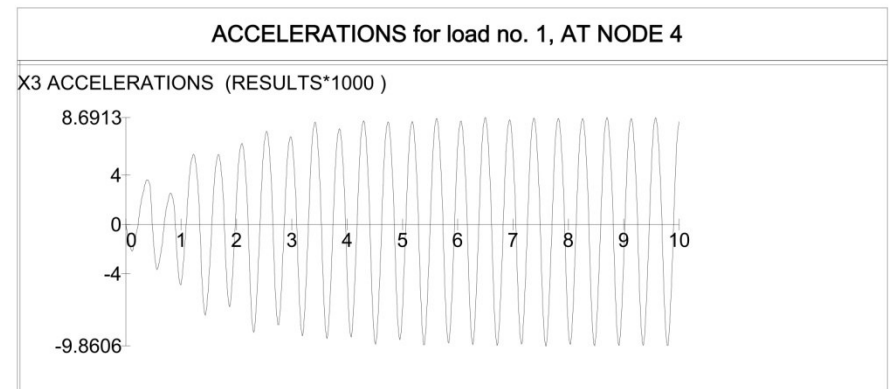
Prvý vlastný tvar kmitania (program STRAP)

Zrýchlenie pre 1. vlastný tvar jedného chodca $a = 0,0090266 \text{ ms}^{-2}$
vodorovná os $\rightarrow 10 \text{ s}$

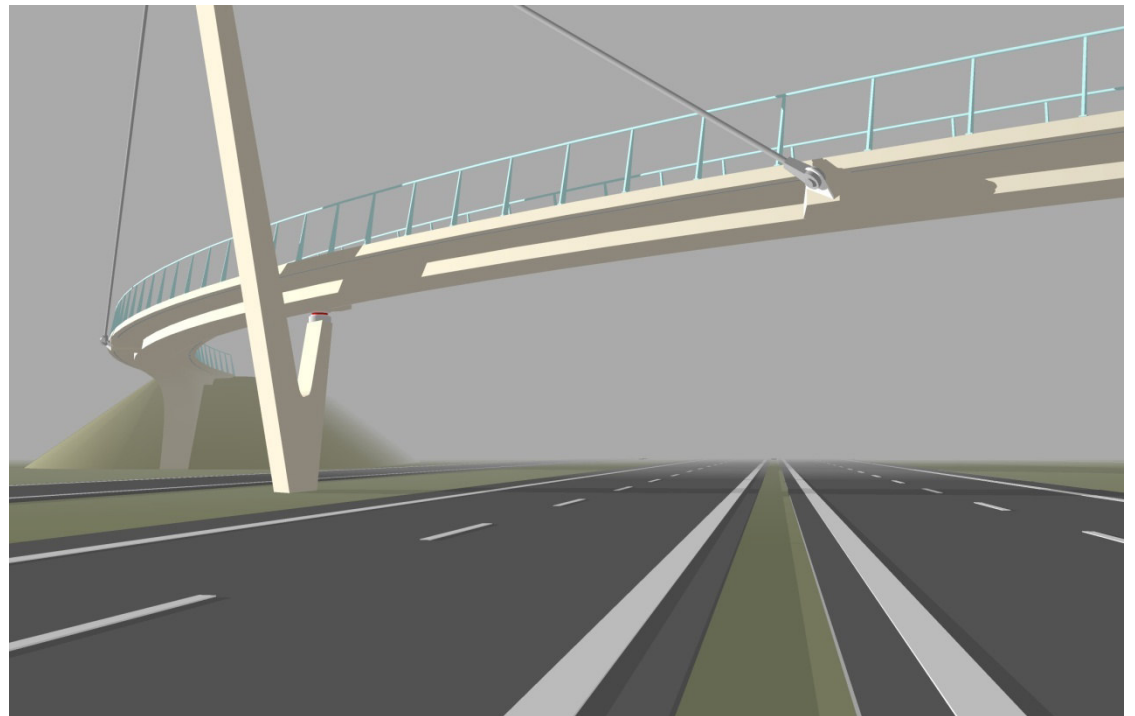




Zrýchlenie pre 1. vlastný tvar desiatich chodcov $a = 0,0903 \text{ ms}^{-2}$
vodorovná os $\rightarrow 10 \text{ s}$



Zrýchlenie pre 2. vlastný tvar jedného chodca $a = 0,00986 \text{ ms}^{-2}$



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

- [1] B27 Vierstreifiger Ausbau zwischen Tübingen und Nehren, Baden–Württemberg Ministerium für Verkehr und Infrastruktur, 2014
- [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] www.pul-ingenieure.de
- [6] www.arch22.de
- [7] STN P ENV 1992–2 Betónové mosty, 1999, odsek 4.4.4.4 Lávky pre chodcov a cyklistov
- [8] Footbridges – Assessment of Vibrational Behaviour of Footbridges under Pedestrian Load, Technical Guide, Sétra 2006

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

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

© Ing. Vladimír Budinský SSK, Banská Bystrica, XII/2022



