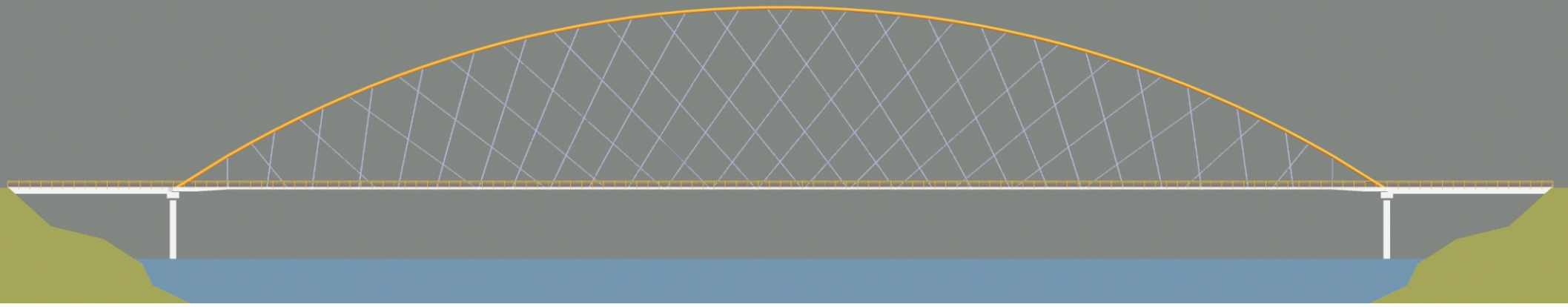
Brandanger bridge
Norway

PRÍLOHA Sieťové oblúkové mosty na Slovensku
APPENDIX Network arch bridges in Slovakia
autor mostov Ing. Ján Roman

static
behavior

statické
pôsobenie

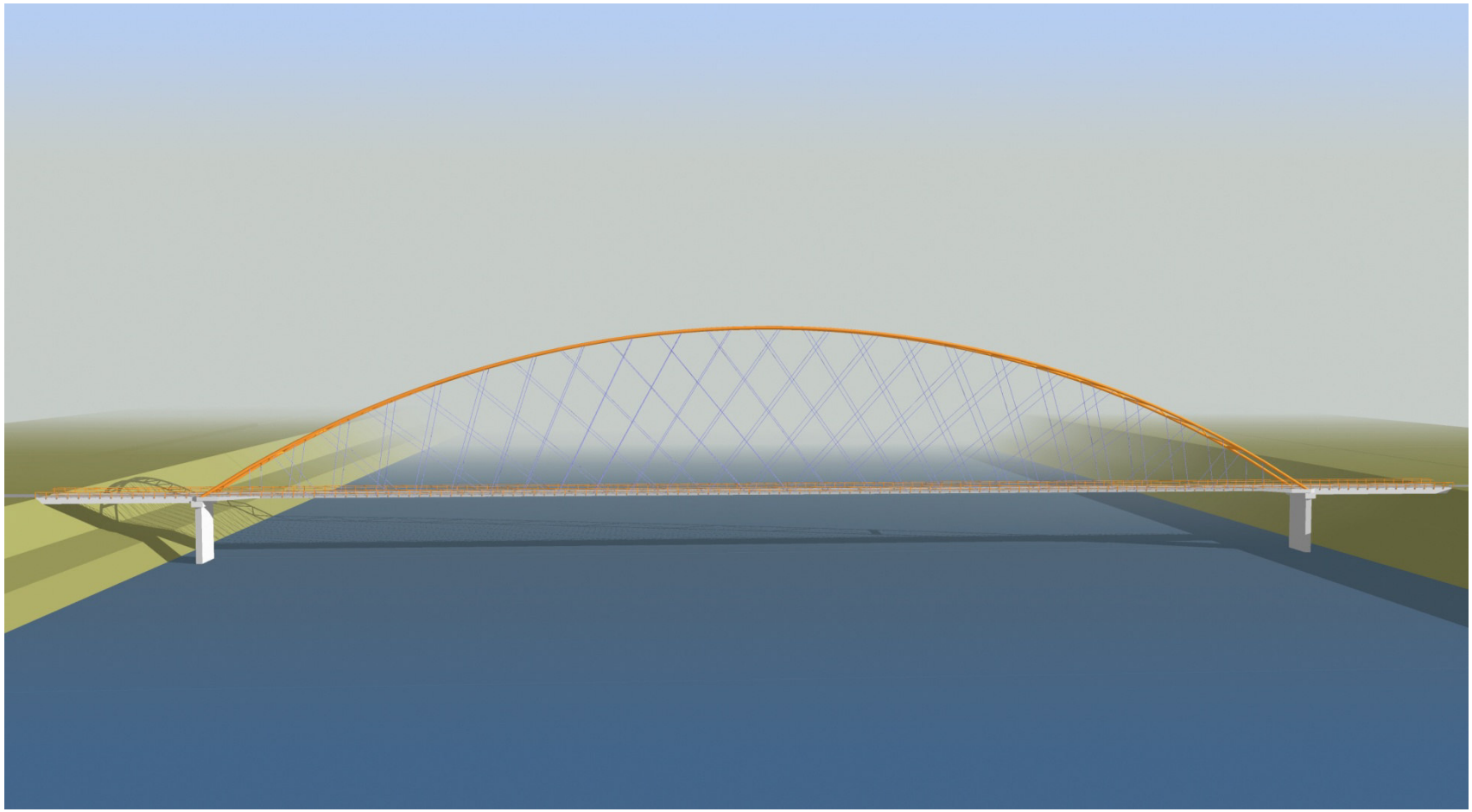
theory, analysis
Vladimír Budinský SSK



KEYWORDS : bridge, network arch bridge, computation, calculation, structural analysis, most, sieťový oblúkový most, statický výpočet, SSK

ÚVOD (Introduction)

Most by mohol mať podtitul *najštíhlejší cestný sieťový oblúk na svete*. Jeho štíhlosť dosahuje 198, pri zaužívanom kritériu oblúkových mostov *rozpon / (výška oblúka + mostovky)*. Tento titul v najbližšom období pravdepodobne málokto prekoná, lebo kto by už staval taký drahý most s jedným pruhom cez morskú úžinu pre 400 obyvateľov na roztrúsených ostrovoch. Most sa nachádza v stredo–západnom Nórsku. Priemerná intenzita dopravy sa predpokladá na 20 rokov len 300 vozidiel denne.



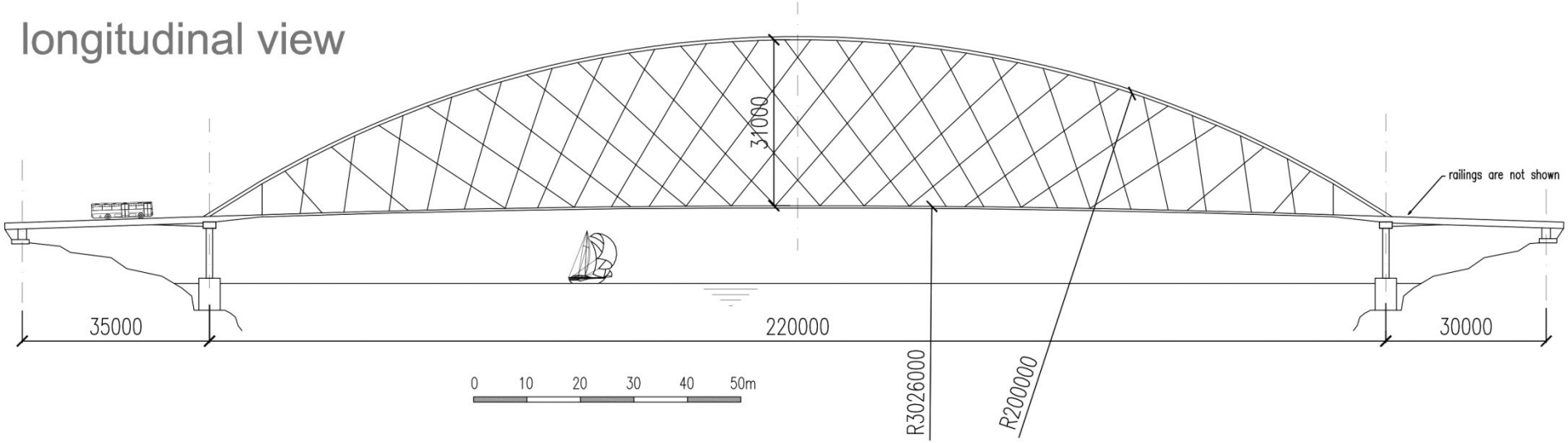
Most má jeden jazdný pruh šírky 5 m. Popri sebe v kritickom momente teda môžu prejsť naproti sebe dve osobné autá, ale len jeden nákladný automobil alebo autobus. Zaujímavosťou je vzhľadom na stredoeurópske pomery úplná absencia dopravných značiek pred a za mostom, žiadna nosnosť, rýchlosť alebo prednosť protiidúceho vozidla.

IDENTIFIKAČNÉ A TECHNICKÉ ÚDAJE MOSTA

Investor :	Nórska správa verejných komunikácií (The bridge office of the Norwegian public road administration)	Maximálny rozpon :	220 m
Začiatky projektovania :	≈ 2004	Počet polí :	3 (35+220+30)
Výstavba :	2009 ÷ 2010	Výška oblúka :	≈ 33 m
Typ mosta :	sieťový oblúk (network arch bridge)	Šírka mosta :	7,6 m
Zakladanie :	základové pätky v skalnom podloží	Autor návrhu :	Per Tveit
Hlavný dodávateľ :	SKANSKA	Hlavný projektant :	AAS – Jakobsen
		Kontrola výpočtov :	ABES Österreich

UPOZORNENIE : Vo všetkých vizualizáciách a výpočtoch nie je zohľadnené zvislé zakrivenie mostovky (okrem pozdĺžneho rezu dole ↓)

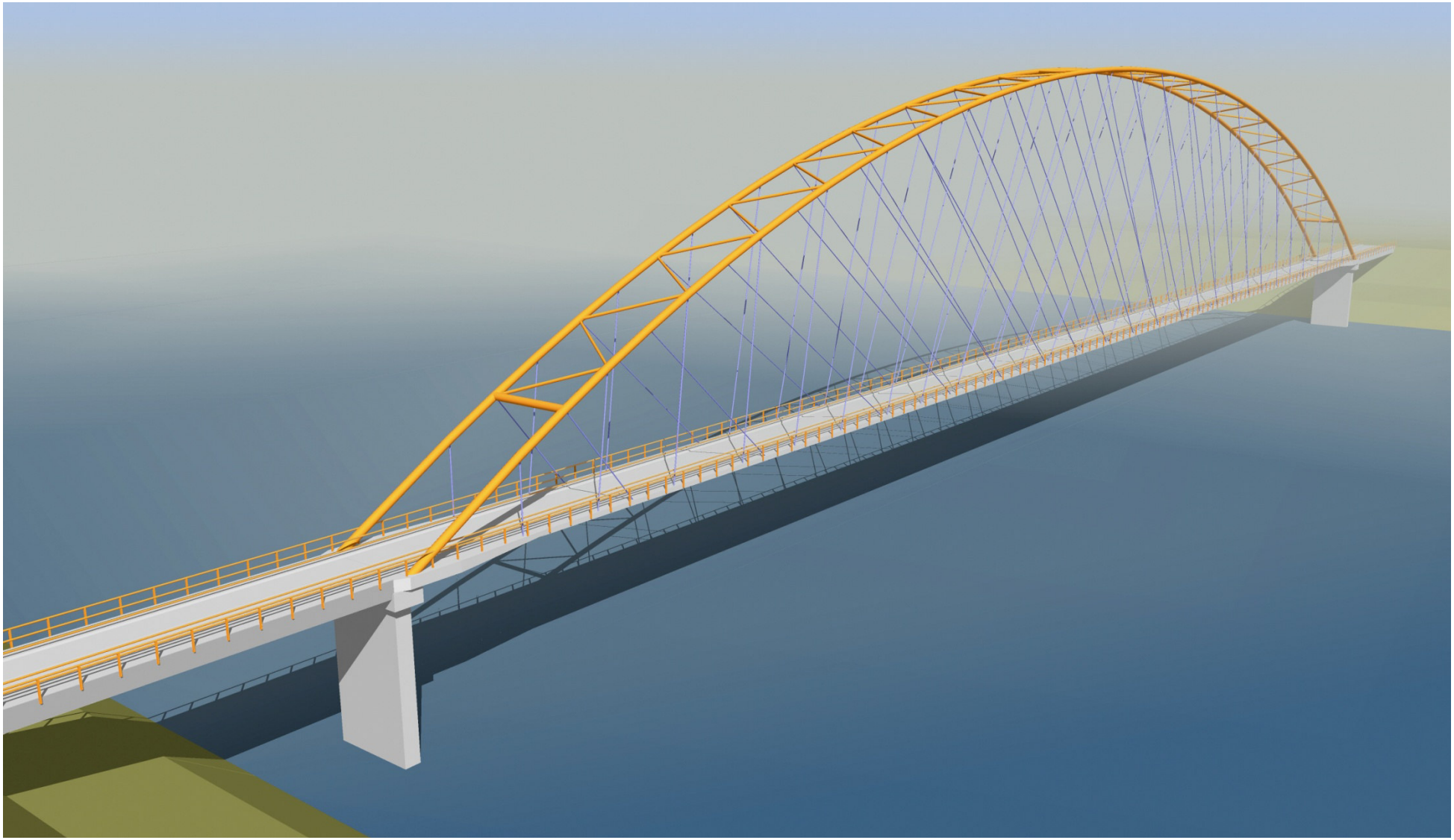
NOTE : Views and calculations do not take into account the vertical curvature of the bridge deck (*except elevation* ↓)

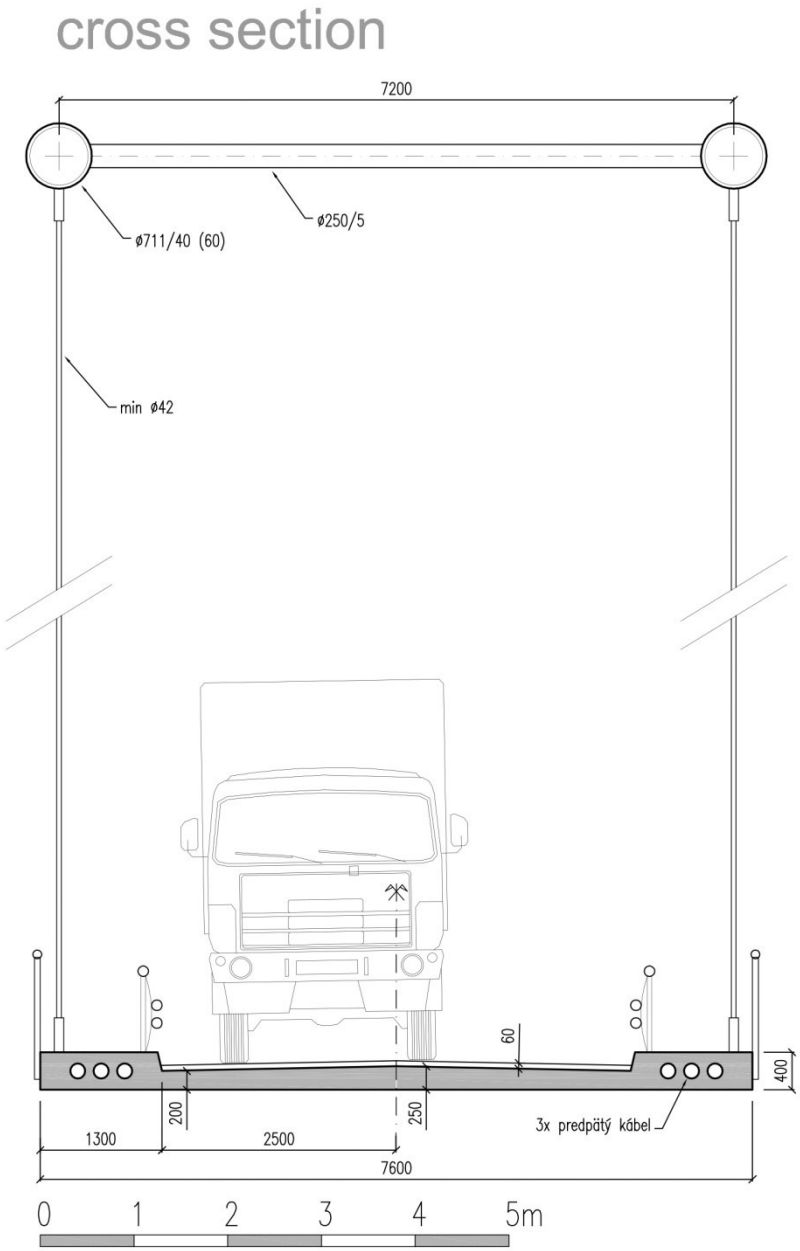


SIEŤOVÝ OBLÚKOVÝ MOST

Sieťový oblúk je definovaný šikmými závesmi, pričom každý záves by sa mal pretínať aspoň s dvomi opačne sklonenými závesmi. Záves spája tlačený oblúk s ťahanou spodnou mostovkou. V roku 1926 si dal dánsky inžinier Olaf Frederik Nielsen patentovať oblúkový most so šikmými závesmi, ktoré sa však nekrížili. V roku 1928 aj postavil vo Švédsku prvý taký most. Hoci tieto mosty výrazne znižovali ohybové momenty v oblúku a v tiahle, pri niektorých nesymetrických zaťažovacích stavoch krajné závesy ovísali (resp. sa dostali sa pod tlakové

namáhanie). Týmto problémom sa vo svojej diplomovej práci v päťdesiatych rokoch minulého storočia začal zaoberať Per Tveit (1930–2025), ktorý študoval stavebné inžinierstvo na Nórskom technologickom inštitúte na univerzite v Trondheime. Zistil, že ak zvýši uhol závesov voči kolmici, problém relaxácie zmizne a celá konštrukcia sa začne správať staticky veľmi efektívne. Tým pádom sa však závesy navzájom krížili a Tveit zaviedol pojem *sieťový oblúkový most*. V tom čase bolo prakticky nemožné vykonať presný výpočet konštrukcie; napriek tomu si Tveit uvedomil, že závesy boli nielen menej náchylné na relaxáciu, ale ohybové momenty oblúka a mostovky sa výrazne znížili.





Po ukončení štúdia získal grant na ročný pobyt na technickej univerzite v nemeckom Aachene za účelom vypracovania dizertačnej práce (1959). Väčšinu jeho času mu zaberali sieťové oblúky, ktoré boli aj témou jeho práce. Nikto iný sa nezdal byť tak zaujatý oblúkovými mostami so šikmými závesmi. Avšak profesor *Phillip Stein* si všimol jeho nadanie a pomohol mu presadiť stavbu modelu sieťového oblúka. Aj on bol prekvapený, ako výstižne modelové testy podporili jeho myšlienky o relaxácii závesov.

Z Aachenu sa vrátil znovu na univerzitu v Trondheime, kde sa stal výskumným asistentom a získal titul Dr.-Ing. v roku 1964. Počas svojho pôsobenia ako výskumný asistent navrhol dva sieťové oblúkové mosty, most Håkkadal v Steinkjeri a most Bolstadstraumen vo Vaksdale, oba boli otvorené pre dopravu v roku 1963. V tom čase bol most Bolstadstraumen najštíhlejším oblúkovým mostom na svete. Oba mosty dokázal vypočítať pomocou vtedy revolučnej metódy konečných prvkov na počítačoch *SAAB*, ktorá však iba potvrdila prierezy, ktoré Tveit už aj tak určil.

Per Tveit roky publikoval svoje výsledky v nádeji, že sieťový oblúk sa stane populárnym. Premýšľal, prečo ich väčšie rozšírenie trvalo desaťročia. Zjavným vysvetlením by mohlo byť, že optimálne sieťové oblúky nie sú ekonomické. Avšak vďaka svojej účinnosti je možné sieťovo viazané oblúkové mosty navrhnúť extrémne štíhle a ľahké s veľkou úsporou materiálu. Sú však náročné na analýzu a detailné spracovanie jednak projektovej dokumentácie a tiež výrobných detailov. Konečné napínanie mnohých závesov je pomerne zložitý proces. Vyžadujú úzku spoluprácu projektanta s výrobnými závodmi. S modernými metódami analýzy, kreslenia a výroby je však možné tieto výzvy zvládnuť.

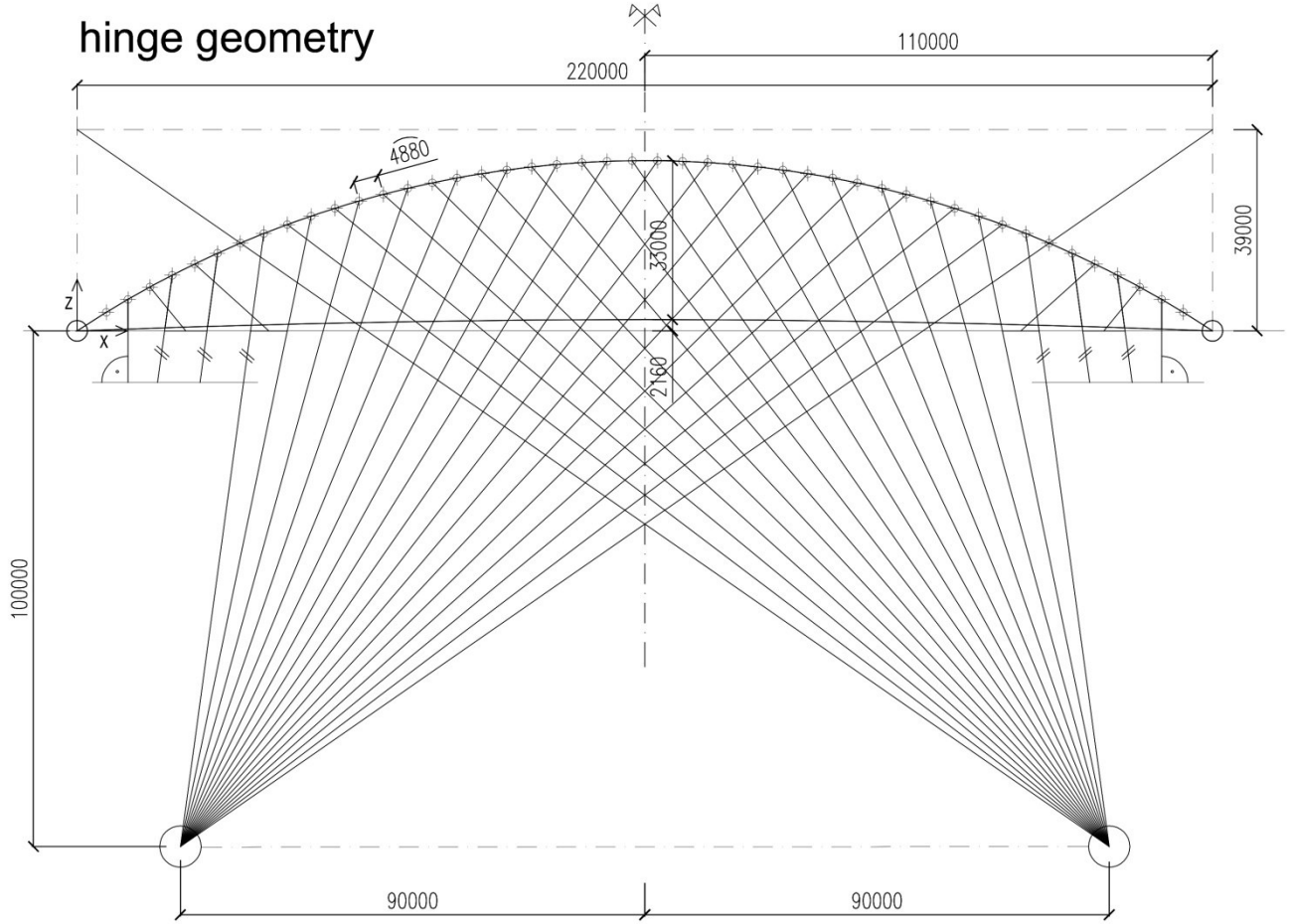
KONŠTRUKCIA MOSTA

Oceľové trubkové oblúky majú rozmer ø711/40 mm, na krajoch sú zosilnené na hrúbku 60 mm. Oceľ je S420N/NL. Priečne zavetrovanie je z profilov ø250/5 mm, krajné vodorovné priečle zavetrovania majú ø611/40 mm. Hlavný dodávateľ oceľových konštrukcií bola spoločnosť *HSM Steel Structures Netherlads*. Oceľové lanové závesy majú priemer ø42 mm a medzu klzu 1550 MPa. Závesy dodala firma *Kongsberg Gruppen*. Pod jedným oblúkom je umiestnených 44 závesov.

Rozmery predpätej železobetónovej mostovky sú zrejmé z priečneho rezu vľavo. Šesť predpätých káblov je zložených každý z 15 lán pravdepodobne s plochou 140 mm^2. Betón je triedy C35/45. Krajné nosníky sú na koncoch kónicky zosilnené na hrúbku 800 mm a priečne predpäté.

Krajné polia dĺžky 30 a 35 m sú predpäté betónové dosky s krajnými nosníkmi 900x1000 mm, monoliticky spojené s mostovkou oblúkového mosta. Predpäté káble sú napojené spojkami na stredné pole s rovnakými lanami. Pokiaľ autor mosta Per Tveit presadzoval kĺbové napojenie, firma *AAS – Jakobsen* si presadila monolitické spojenie. V tomto článku je vzhľadom aj na postup výstavby uvažované kĺbové spojenie, lebo oblúk tak pôsobí v prvej etape výstavby.

Založenie mosta je na monolitických základoch, ktoré sú umiestnené v skalnej hornine a ich uloženie muselo byť uvoľnené podmorským odstrelom.



POSTUP VÝSTAVBY

Vlastná konštrukcia mosta – oblúky, závesy a mostovka – bola zmontovaná 5 km od konečného umiestnenia na rovnej ploche. Najprv bolo zostavené debnenie pre betónovú mostovku v plánovanom prevýšení. Po zaliatí betonárskej výstuže a kanálikov pre predpínaciu výstuž sa čakalo na vytvrdnutie betónu. Po predpínaní káblov zostala konštrukcia 280 dní bez ďalšej aktivity kvôli ustáleniu zmrašťovania a dotvarovania betónu, aby ostala úplne stabilná pri dopínaní závesov. Z Holandska boli po častiach dovezené prvky oblúka so stužením a zostavené nad mostovkou. Namontovali sa závesy a predbežne sa predopli na montážny stav. Potom bolo odstránené debnenie mostovky, čím sa závesy dopli do ďalšej fázy.

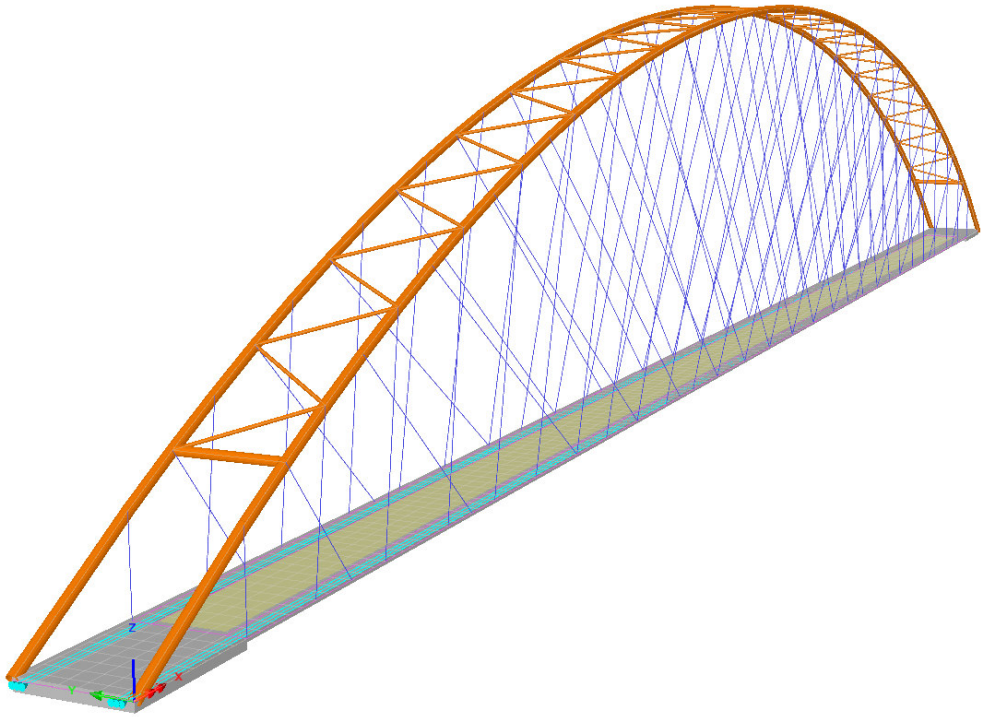
Nastala najriskantnejšia operácia výstavby – zavezenie zostavenej konštrukcie na konečné miesto dvomi plávajúcimi žeriavmi od spoločnosti *Smit Heavy Lift* a jej uloženie na pripravené betónové základy.

VÝPOČTY

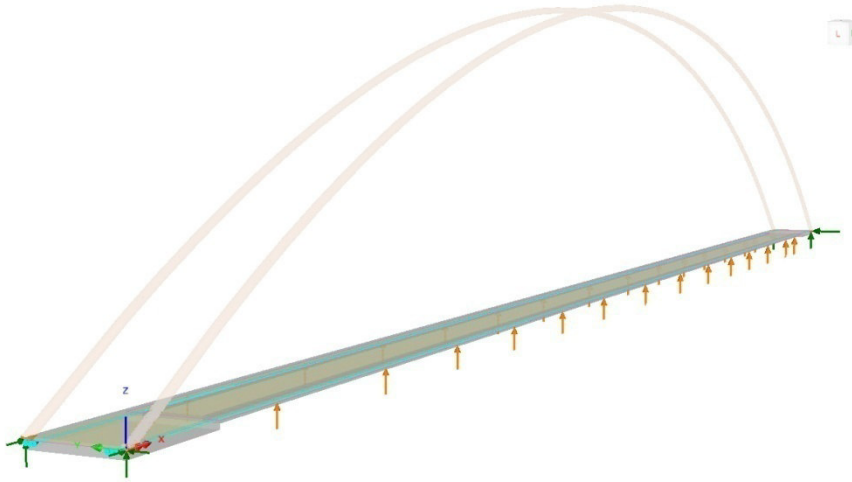
Na základe niektorých veľmi zjednodušených predpokladov a prepočtov sme sa pokúsili interpretovať pôsobenie sústavy. Zjednodušenie spočívalo v zanedbaní prevýšenia mostovky, ako aj v zavedení dvojrozmerného plošného statického modelu pri niektorých operáciách so závesmi. Na koncoch stredného poľa bolo uvažované kĺbové napojenie na krajné polia, tak, ako to pôvodne uvažoval Per Tveit.

Zaťaženie dopravou bolo uvažované v zmysle EN 1991–2 ako LM1 s jedným vozidlom 0,9 x 600 kN. Zaťaženie vetrom bolo uvažované pre $v_{b,0}$ = 30 m/s pre kategóriu terénu I.

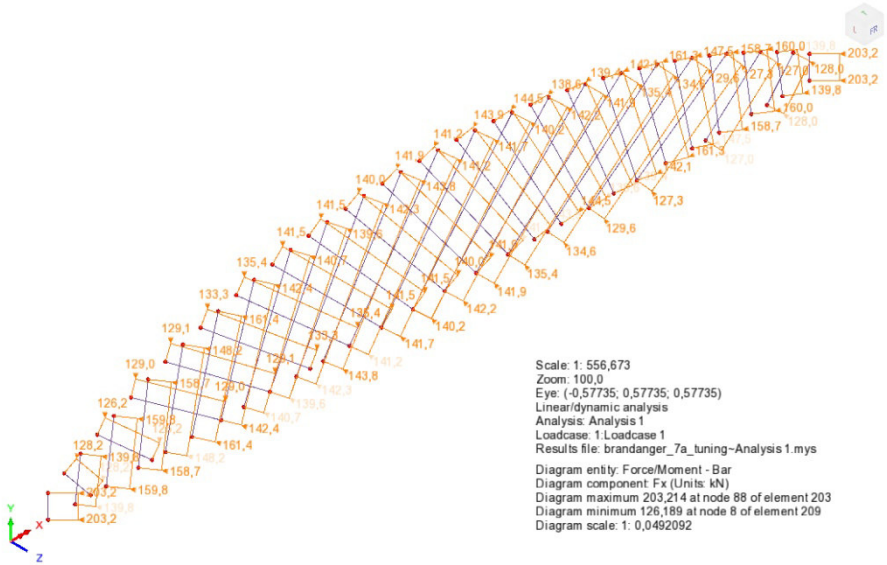
Na stanovenie konečných síl v závesoch sme zvolili zjednodušenú metódu: Primárne pomerové napätia v závesoch sme odčítali zo zaťaženia od vlastnej tiaže sústavy po odstránení debnenia mostovky. Tie mali veľmi vyrovnaný priebeh ťahových síl „*N*“. Z týchto síl sme odvodili pomerné pretvorenia $\varepsilon_i = N/(EA) * k$, kde parameter „*k* “ sme zvolili 1,5. Týmto pomerným pretvorením ε_i sme zaťažili závesy, kde „*i*„ je počet závesov. Z takého zaťažovacieho stavu vzniknú pri danej konfigurácii prekrížených závesov aj tlaky v závesoch, čo je samozrejme neprípustné. Avšak ďalšou kombináciou zaťažovacích stavov → vlastná tiaž + zaťaženie pomerným pretvorením ε_i (prípadne + zaťaženie dopravou) sa len primerane zníži ťahová sila v závese. Pri stanovení parametra „*k* “ treba len zohľadniť, aby v závese nevzniklo tlakové napätie a aby ťahové napätie neprevýšilo únosnosť závesu.



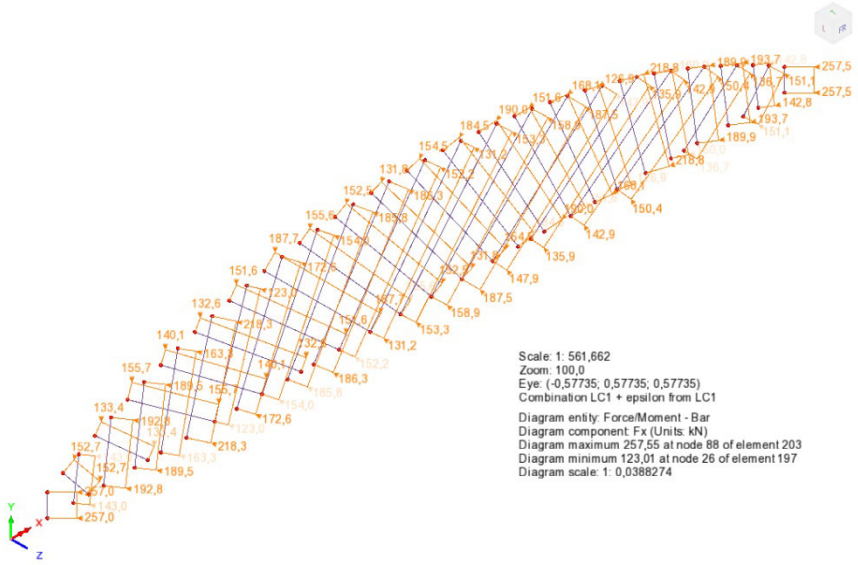
↑ Celkový priestorový model FEM s predpätými káblami v mostovke



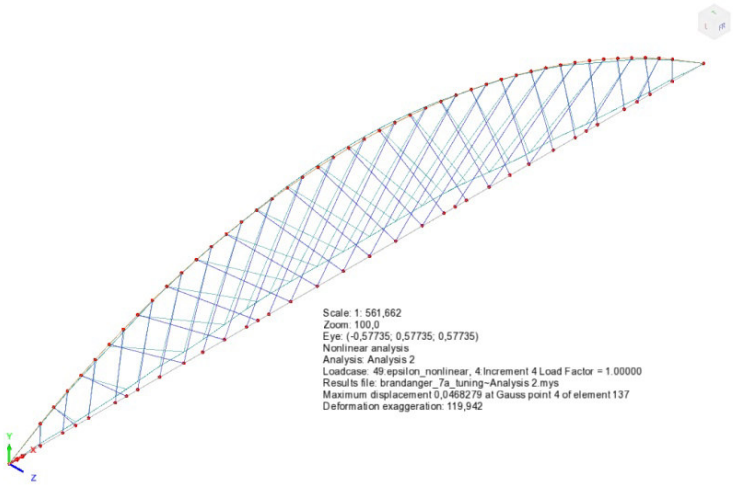
Fáza výstavby 1 (stage 1) ↑ (oblúky naznačené len orientačne)



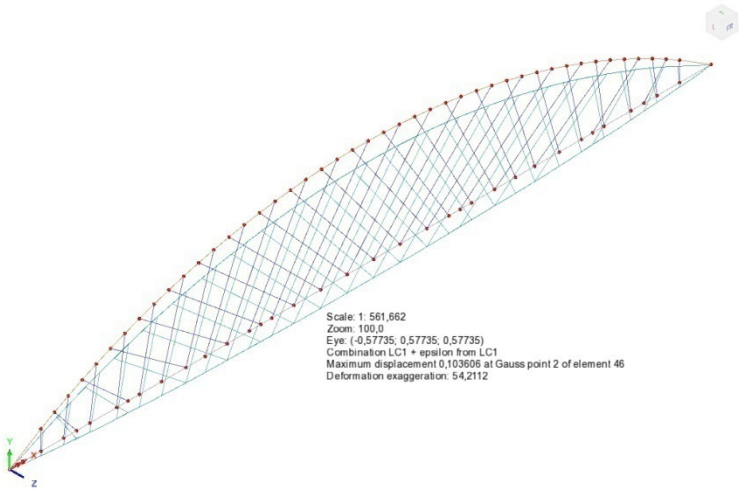
↑ Osové sily v závesoch ***N*** [kN] od vlastnej tiaže *sústava 2D*



↑ Osové sily v závesoch ***N*** [kN] od vlastnej tiaže a zaťaženia ε *sústava 2D*

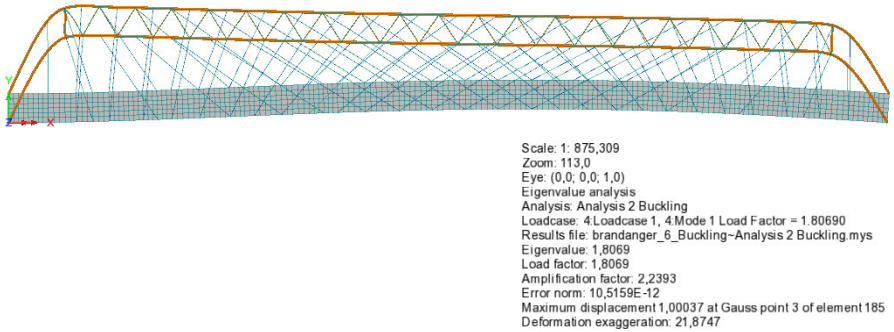


↑ Posuny od zaťaženia ε [0,046 m] *sústava 2D*

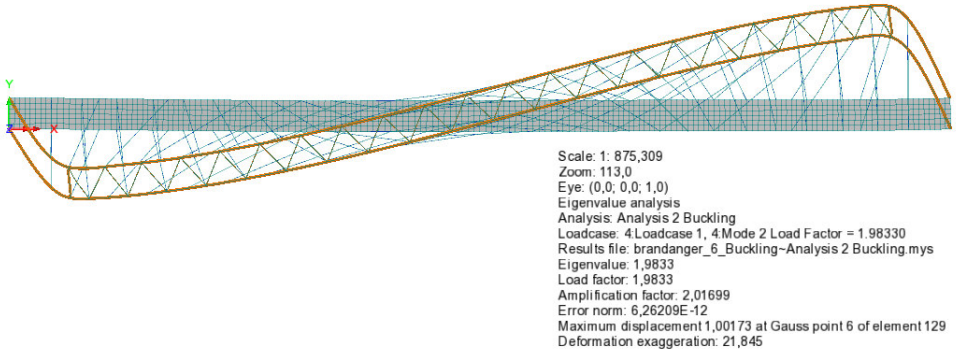


↑ Posuny od zaťaženia ε a vlastnej tiaže [– 0,1036 m] *sústava 2D*

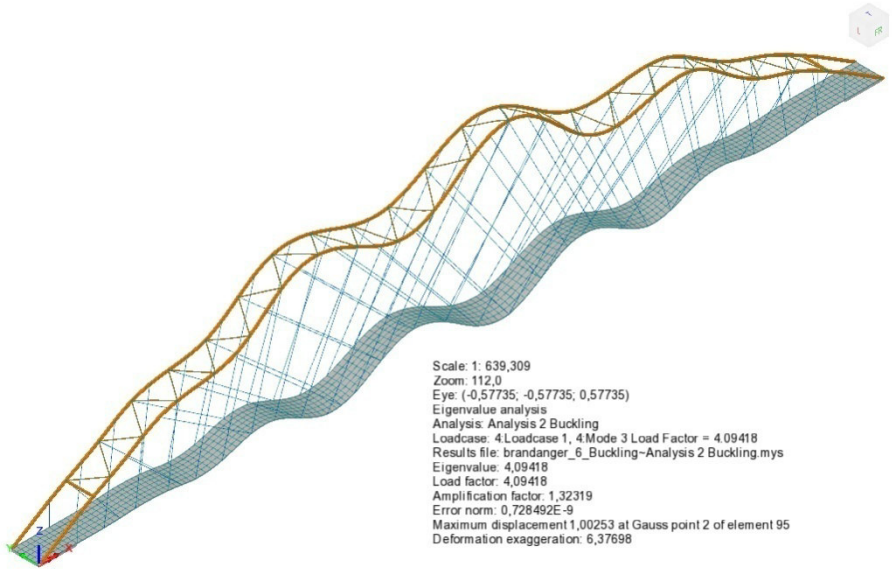
Vzperné posúdenie oblúkov :



↑ Najnižší násobok zaťaženia pri kombinácii (Vlastná tiaž + Doprava + Vietor) = 1,8069
Pôdorys 3D – vybočenie z roviny oblúka (prvý vlastný tvar)

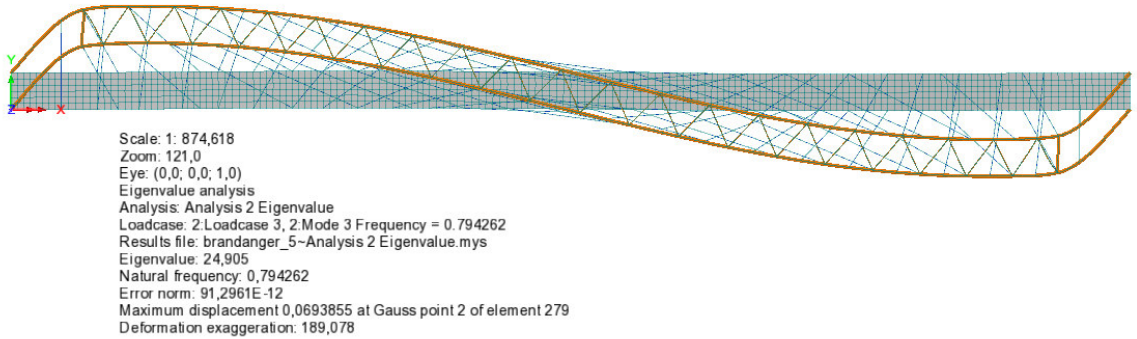


Druhý najnižší násobok zaťaženia pri kombinácii (Vlastná tiaž + Doprava + Vietor) = 1,9833 ↑
Pôdorys 3D – vybočenie z roviny oblúka (druhý vlastný tvar)



Na tejto strane sa nachádza vzperné posúdenie oblúkov na základe nelineárneho výpočtu vlastného tvaru s určením súčiniteľa zaťaženia (*Load Factor*), ktorým treba vynásobiť uvažované zaťaženie pre dosiahnutie kolapsu sústavy vzperom.

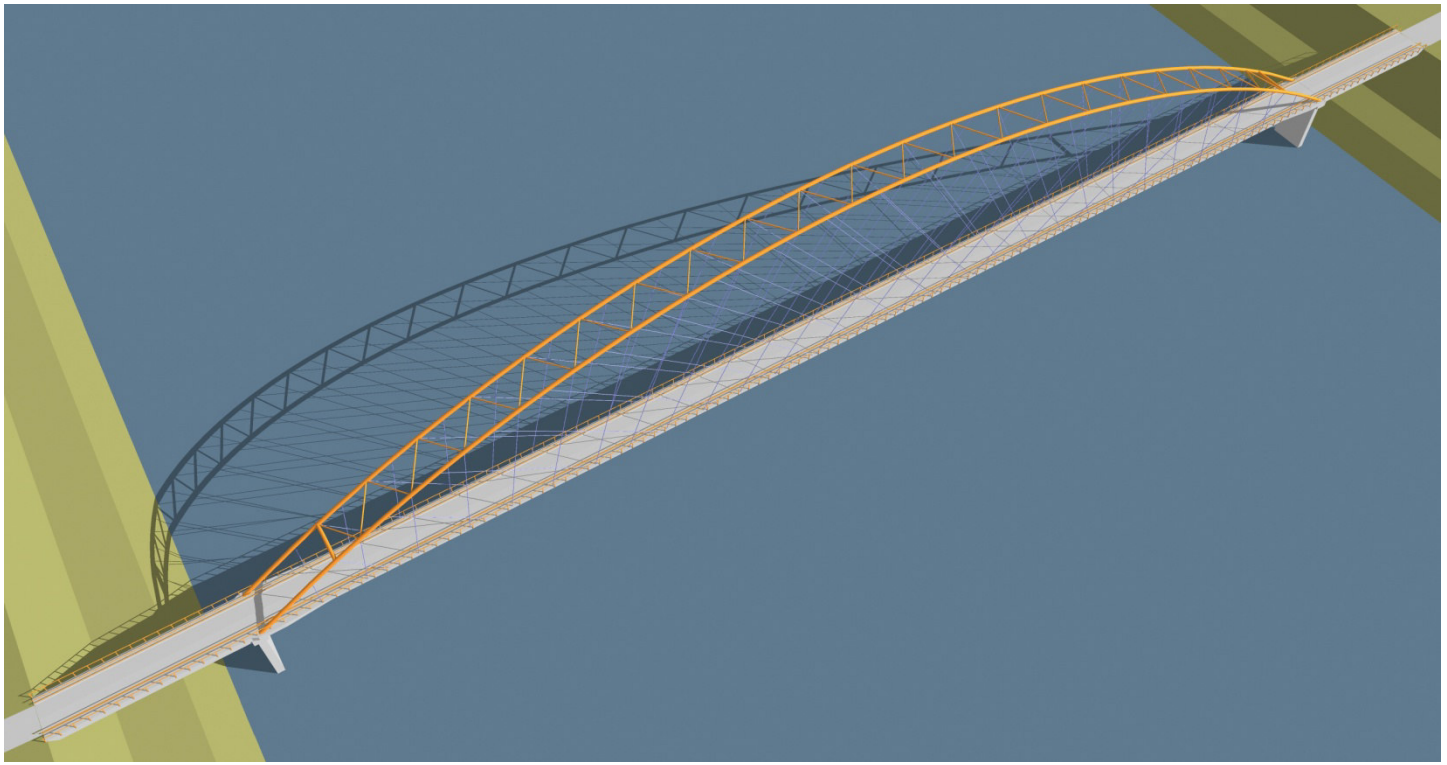
← Tretí najnižší násobok zaťaženia pri kombinácii (Vlastná tiaž + Doprava + Vietor) = 4,09418
Axonometria 3D – vybočenie v rovine oblúkov (tretí vlastný tvar)

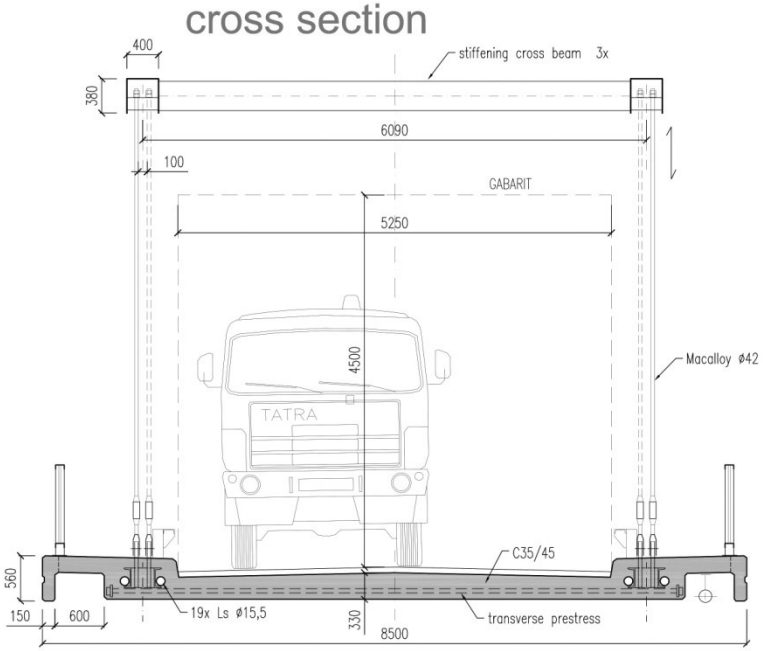


↑ Tretia vlastná frekvencia kmitania – Pôdorys 3D
Poznámka : táto frekvencia nie je nepriaznivá, len je efektná tvarom kmitania

	Mass participation factors				
Mode	Mass PF X	Mass PF Y	Mass PF Z	Frequency	Period
1	1,087E-08	0,55	6,011E-08	0,3708	2,6971
2	6,525E-09	0,13	4,452E-08	0,5147	1,9428
3	6,908E-08	7,184E-05	4,477E-07	0,7943	1,2590
4	2,576E-02	1,688E-06	0,56	1,2931	0,7733
5	2,456E-07	2,405E-02	4,604E-06	1,3748	0,7274
6	4,686E-07	7,032E-03	5,716E-08	1,5234	0,6564
				[Hz]	

↑ Energetické vyhodnotenie dynamických vlastností konštrukcie





PRÍLOHA Sieťové oblúkové mosty na Slovensku
APPENDIX Network arch bridges in Slovakia

Prvý sieťový most na Slovensku bol postavený v roku 2006 pri obci Parchovany. Po povodni v roku 2005 na rieke Topli bolo nutné nahradiť poškodenú časť mosta novou konštrukciou. Pod názvom projektu „PARCHOVANY Rekonštrukcia mosta cez rieku Topľa“ spracovala firma ISPO s.r.o. projekt v stupni DSP a DRS. Autorom mostnej konštrukcie a zodpovedným projektantom bol Ing. Ján Roman, projektant statiky a absolvent STÚ Bratislava.

Ing. Ján Roman navrhol aj ďalšie sieťové oblúkové mosty na Slovensku, pričom bol v spojení s Per Tveitom a priekopníkom týchto konštrukcií v Českej republike, Ladislavom Šašekom (most v Bechyně–Zářečí, 2004).

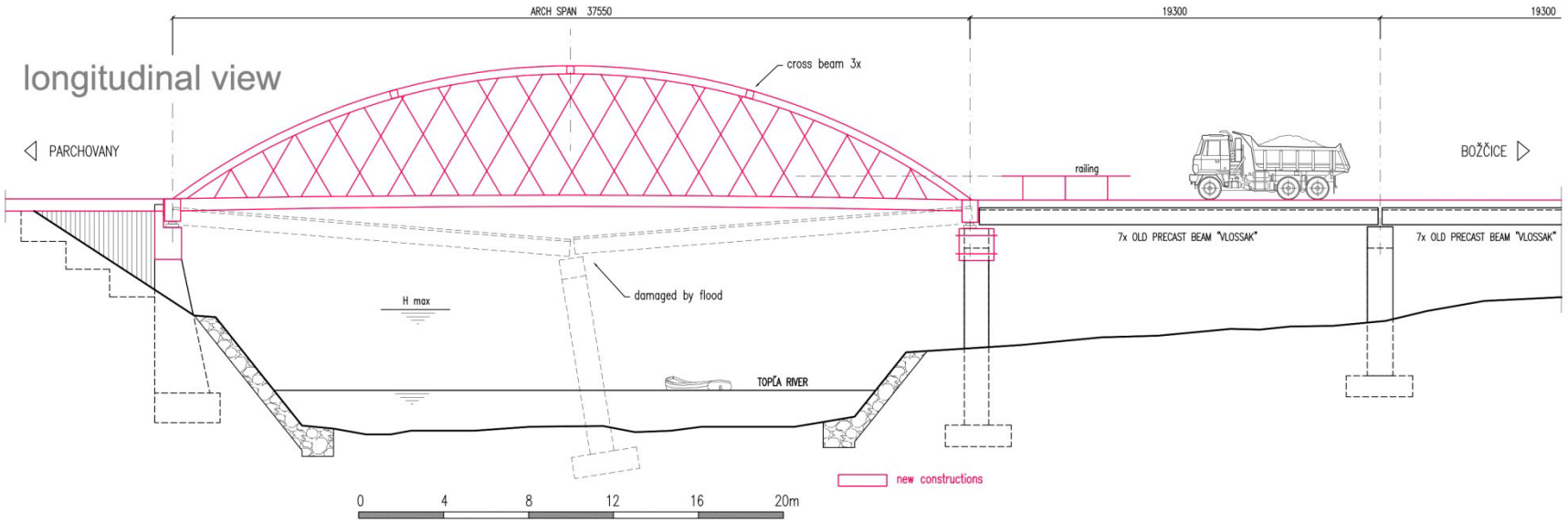
Na tejto strane je schéma priečneho a pozdĺžneho rezu mosta Parchovany.

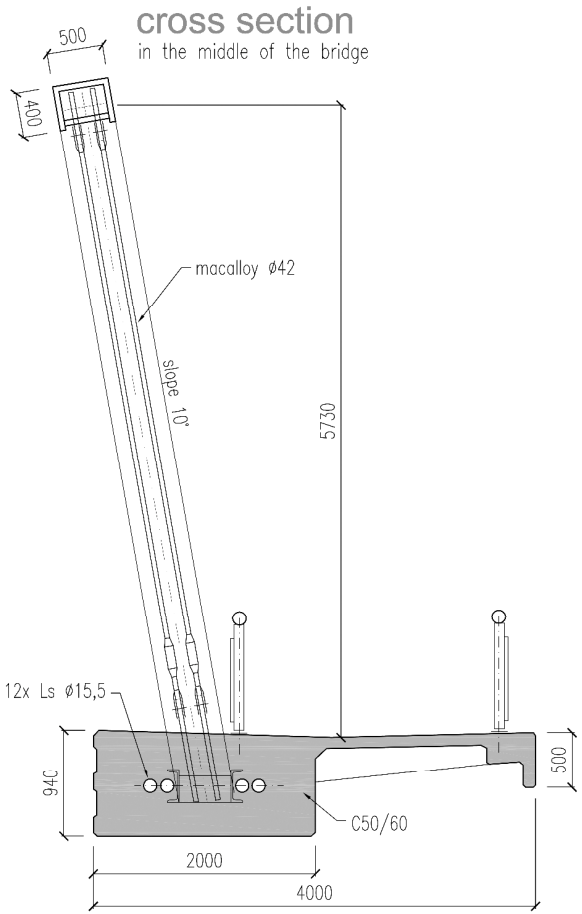
Ďalšie mosty, ktoré nasledovali pod autorstvom Ing. Jána Romana sú

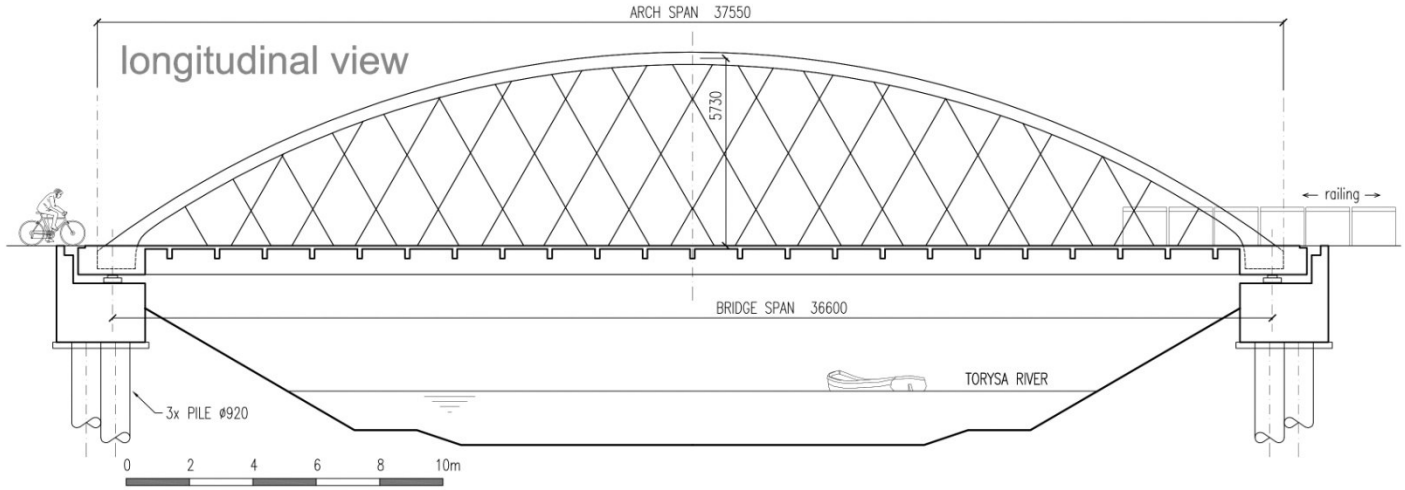
- Most cez rieku Poprad, privádzač Poprad–Kežmarok, 2008
- Lávka pre peších nad riekou Torysa, Prešov, 2009 ÷ 2010 → rezy pozri nasledujúca strana → →
- Lávka pre peších a cyklistov Brodno–Vranie, 2018 ÷ 2019
- Lávka pre peších a cyklistov cez rieku Laborec v Humennom, 2020 ÷ 2023

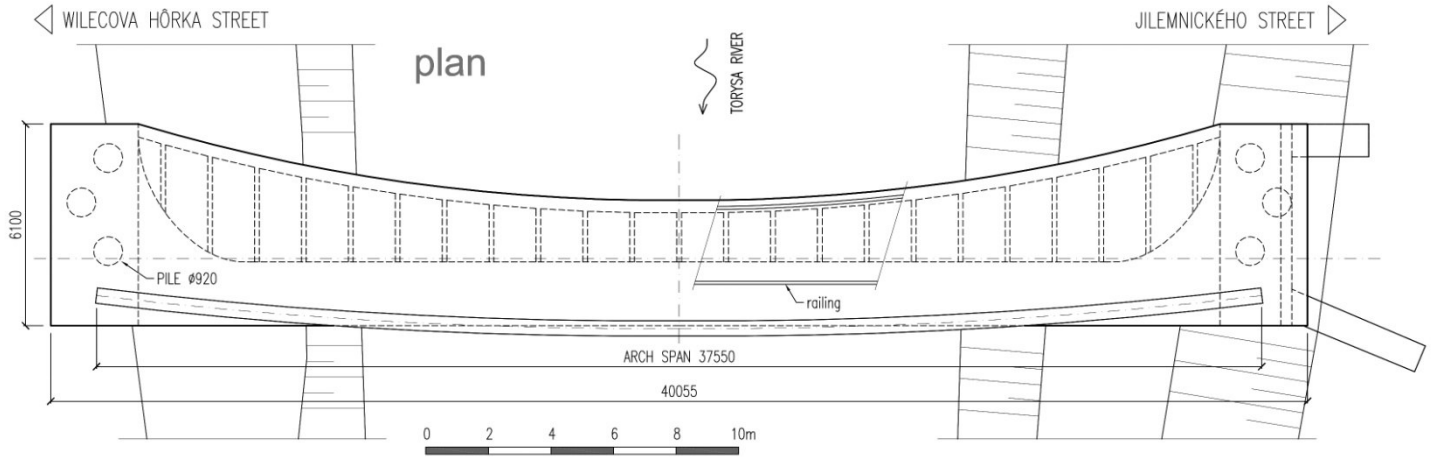
Projekty mostov vznikali pod hlavičkou firiem ISPO s.r.o. a ISPRIM s.r.o.

← Schéma priečneho a pozdĺžneho rezu mosta Parchovany ↓









↑ Lávka pre peších nad riekou Torysa, Prešov, autor Ing. Ján Roman ↑

ZÁVER

Niektoré ZDROJE, použité pri tvorbe článku :

[1] STN EN 1990/A1 Zásady navrhovania konštrukcií, príloha A2 – Použitie pre mosty
[2] STN EN 1991–2 Zaťaženie mostov dopravou
[3] Per Tveit : About the Network Arch, Second Edition, January 2011
[4] Anders Rønnquist, Arvid Naees : System Reliability Analysis Of Slender Network Arch Bridges, Thematic Conference on Computational Methods.... , Greece, 12-14 June 2013
[5] Výkresové podklady uvedených slovenských mostov, ISPO s.r.o., Ing. Ján Roman

Všetky obrázky a prepočty v tomto príspevku sú pôvodné a neokopírované. Na slovenské mosty boli využité zdroje [5].

Pri zostavovaní článku boli použité nasledovné POČÍTAČOVÉ PROGRAMY :

LUSAS Bridge Plus, SketchUp, AutoCad LT, Microsoft Word, Microsoft Excel, PDF Creator, IrfanView, Corel Draw

© Ing. Vladimír Budinský SSK, Banská Bystrica, VI/2026