

# ANALISIS PENGARUH SUDUT KABEL PENGGANTUNG RADIAL TERHADAP KINERJA STRUKTURAL PADA JEMBATAN PELENGKUNG TERIKAT BAJA NETWORK DENGAN INKLINASI

Fajar Tamami<sup>1</sup>, Mohammad Salman Alfarisi<sup>1</sup>, Daffa Syarif Abdullah<sup>1</sup>, Nindyawati<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Departemen Teknik Sipil dan Perencanaan, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Malang

\*Penulis korespondensi  
nindyawati.ft@um.ac.id

**Abstract:** This study analyzes the effect of radial hanger angles on the structural performance of tied-arch steel bridges with an inward inclination of 5 degrees. The research was conducted using the finite element method (FEM) with SAP2000 v.25 software. The main parameter analyzed was the hanger angle relative to the arch, aiming to optimize axial force distribution, maximum deflection, and total structural weight. The results showed that a configuration with 74 hanger angles produced the optimal combination of the lightest structural weight of 1464.71 tons and a minimum deflection of 34.41 mm. Increasing the number of hangers generally improved structural performance efficiency, as evaluated using the Performance formula. The highest performance value of 1 was achieved in this configuration, reflecting a more even load distribution. This configuration is recommended for use in tied-arch bridge designs to achieve maximum material efficiency and structural performance. Further studies are suggested to explore the effects of load variations and materials on different hanger configurations.

**Keywords:** Tied-arch bridge, radial hanger angle, arch inclination, structural performance, finite element method, material efficiency

**Abstrak:** Penelitian ini menganalisis pengaruh sudut kabel penggantung radial terhadap kinerja struktural pada jembatan pelengkung terikat baja dengan inklinasi ke dalam sebesar 5 derajat. Studi dilakukan menggunakan metode elemen hingga (FEM) dengan perangkat lunak SAP2000 v.25. Parameter utama yang dianalisis adalah sudut penggantung relatif terhadap pelengkung, dengan tujuan mengoptimalkan distribusi gaya aksial, lendutan maksimum, dan berat total struktur. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konfigurasi dengan sudut penggantung 74 menghasilkan kombinasi optimal antara berat struktur yang paling ringan sebesar 1464,71 ton dan lendutan minimum 34,41 mm. Peningkatan jumlah penggantung secara umum meningkatkan efisiensi kinerja struktural, yang dinilai menggunakan formula Performance. Nilai kinerja tertinggi sebesar 1 tercapai pada konfigurasi ini, mencerminkan distribusi beban yang lebih merata. Konfigurasi ini direkomendasikan untuk diterapkan pada desain jembatan pelengkung terikat guna mencapai efisiensi material dan kinerja yang maksimal. Penelitian lanjutan disarankan untuk mengeksplorasi efek variasi pembebanan dan material pada konfigurasi hanger yang berbeda.

**Kata Kunci:** Jembatan pelengkung terikat, sudut penggantung radial, inklinasi pelengkung, kinerja struktural, metode elemen hingga, efisiensi material.

## PENDAHULUAN

Jembatan pelengkung *network* (*network arch bridges*) pertama kali ditemukan pada abad ke-20 (Geißler dkk., 2008). Banyak dari jembatan ini telah dibangun di negara-negara seperti Norwegia, Jerman, Spanyol, Jepang, dan Amerika Serikat. Sebagian besar jembatan pelengkung *network* yang dibangun dalam beberapa dekade terakhir dirancang untuk transportasi kereta api dan kendaraan bermotor. Desain jembatan-jembatan ini telah menjadi fokus penelitian dalam sejumlah penelitian, yang umumnya membahas analisis perilaku struktural dan pemilihan parameter konstruksi yang tepat (Ostrycharczyk & Malo, 2017a; Teich, 2011).

Brunn (2003) meneliti jembatan pelengkung jaringan dengan konfigurasi radial dan menentukan rentang sudut penyebaran optimal antara penggantung yang berdekatan. Penelitian tersebut juga membandingkan distribusi

tegangan pada elemen jembatan pelengkung jaringan dengan jembatan pelengkung tradisional, serta mengevaluasi perbedaan massa total dari kedua jenis jembatan tersebut. Sementara itu, Tveit (1999) mengusulkan nilai optimal untuk rasio tinggi pelengkung terhadap bentang jembatan, termasuk sudut ideal antara penggantung dan gelagar. Secara umum, penelitian menunjukkan bahwa jembatan dengan konfigurasi penggantung jaringan memberikan kinerja yang lebih unggul secara global. Hal ini terlihat dari pengurangan momen lentur pada pelengkung dan gelagar, serta gaya aksial yang lebih terdistribusi pada penggantung (Pellegrino dkk., 2010).

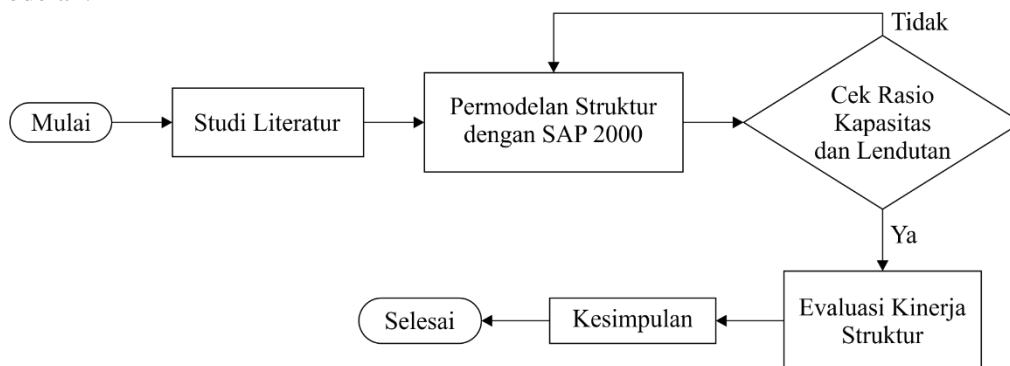
Namun, semua penelitian sebelumnya terutama berfokus pada jembatan dengan desain pelengkung yang tegak sempurna (Ostrycharczyk & Malo, 2017b, 2018). Penelitian ini menghadirkan pendekatan baru dengan memanfaatkan pelengkung yang memiliki inklinasi ke dalam. Pendekatan ini diharapkan dapat menghasilkan konfigurasi penggantung yang lebih optimal serta memberikan efisiensi struktural yang lebih baik, terutama dalam kondisi pembebanan yang lebih kompleks. Hal ini akan menjawab kekurangan pada penelitian terdahulu yang belum mengeksplorasi desain pelengkung dengan inklinasi sebagai parameter tambahan.

## METODE

### Rancangan Penelitian

Optimalisasi pelengkung terikat (*tied-arch bridges*) meningkatkan kinerja struktural dengan mengurangi berat struktur dan mempertahankan atau meminimalkan defleksi. Penggantung memiliki peran penting dalam mentransfer beban dari lantai jembatan ke struktur pelengkung, sehingga pemilihan konfigurasi yang tepat dapat menghemat material. Dalam metodologi penelitian ini, penulis menyusun alur kerja, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1, untuk menemukan sudut penggantung yang optimal.

Penelitian diawali dengan melakukan studi literatur untuk menemukan penelitian sebelumnya yang memiliki kesamaan dalam beberapa aspek dan menggunakan hasil-hasil tersebut sebagai dasar. Penulis menggunakan perangkat lunak SAP2000 versi 25 untuk melakukan proses analisis dalam pemodelan desain jembatan. Geometri jembatan yang harus ditentukan dalam pemodelan adalah sudut penggantung relatif terhadap pelengkung. Selain itu, diperlukan juga penentuan kombinasi pembebanan dan beban yang diterapkan dalam proses pemodelan.



Gambar 1. Metode Penelitian

Setelah pemodelan selesai, struktur perlu divalidasi, yaitu memastikan bahwa struktur yang telah dianalisis cukup kuat menahan beban yang ditunjukkan oleh nilai rasio kapasitas baja yang tidak melebihi batas yang diizinkan sesuai SNI 1729:2020 “Spesifikasi untuk Bangunan Baja Struktural”, serta mampu menghasilkan nilai defleksi yang tidak melampaui batas yang diizinkan sesuai RSNI T-03-2005 “Perencanaan Struktur Baja untuk Jembatan”. Setelah pengecekan rasio kapasitas baja dan batas toleransi defleksi, dilakukan investigasi dan evaluasi. Pada tahap ini, gaya aksial, momen, defleksi, dan berat jembatan dianalisis untuk membandingkan perubahan nilai antar parameter. Metodologi ini diharapkan dapat menghasilkan konfigurasi gantungan vertikal yang optimal pada jembatan lengkung tertumpu, yang mampu mengurangi biaya material dan biaya pemeliharaan.

### Material

Pada jembatan pelengkung terikat, semua elemen struktur dimasukkan ke dalam pemodelan, termasuk pelengkung, balok pengikat (*tie beam*), gelagar melintang, gelagar memanjang, pengaku atas, pengaku bawah, dan penggantung. Dalam konteks penelitian ini, pelengkung memiliki inklinasi ke dalam sebesar 5 derajat,

yang merupakan karakteristik khusus yang dimasukkan untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap kinerja struktural jembatan secara keseluruhan.

Pemilihan material baja untuk rangka pelengkung, balok pengikat, penggantung, serta elemen lainnya, didasarkan pada spesifikasi material yang tersedia di pasaran dan umum digunakan dalam konstruksi jembatan. Oleh karena itu, material yang digunakan mencerminkan praktik standar yang ada di lapangan, seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 1.

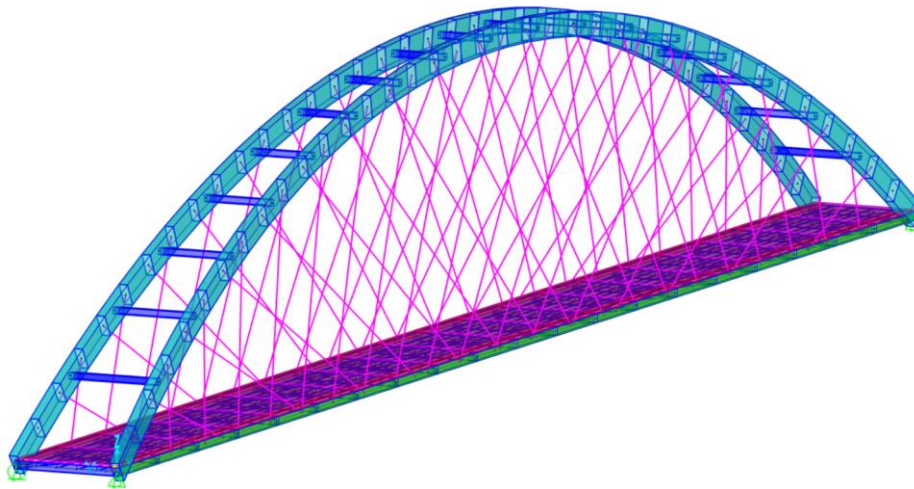
Tabel 1. Spesifikasi Material Jembatan

Material	Spesifikasi	Nilai
SS400	Tegangan Leleh ( $f_y$ )	245 MPa
	Tegangan Putus ( $f_u$ )	400-510 MPa
	Modulus Elastisitas (E)	200000 MPa
	Berat Jenis	7850 kg/m <sup>3</sup>
SS316	Tegangan Leleh ( $f_y$ )	205 MPa
	Tegangan Putus ( $f_u$ )	515 MPa
	Modulus Elastisitas (E)	187500 MPa
	Berat Jenis	7850 kg/m <sup>3</sup>

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Permodelan Struktur

Permodelan struktur dilakukan menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method*) dengan perangkat lunak SAP2000 versi 25. Dimensi jembatan pelengkung terikat yang dianalisis memiliki lebar 11 meter (dua lajur tidak terbagi), panjang bentang utama 150 meter, dan tinggi pelengkung 25 meter, dengan inklinasi pelengkung sebesar 5 derajat ke arah dalam. Gambar 2 menunjukkan detail permodelan struktur yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 2. Tampak 3D Permodelan Struktur

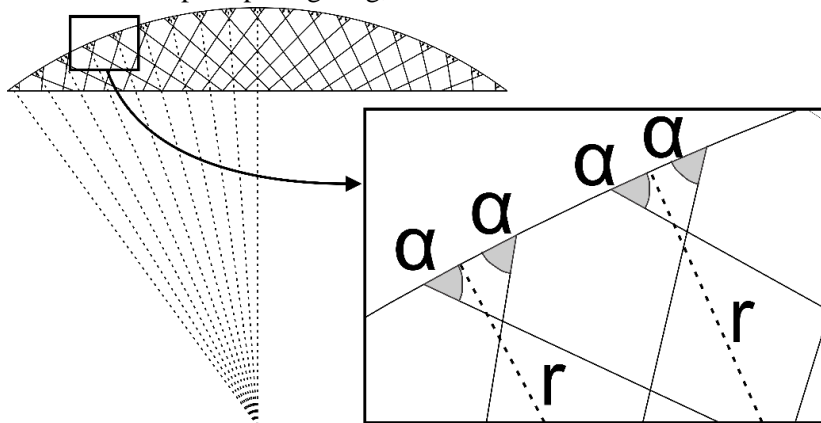
Sedangkan pada tabel 3 menunjukkan jenis dan ukuran profil baja yang digunakan pada masing-masing elemen struktur.

Tabel 2. Spesifikasi Material Jembatan

Elemen Struktur	Profil
Pelengkung ( <i>Arch</i> )	Box 2000x800x38
Gelagar Melintang	WF 700x300x13x24
Balok Pengikat ( <i>Tie Beam</i> )	Box 700x400x15
Pengaku Atas	Box 550x550x22
Pengaku Bawah	WF 250x250x9x14
Gelagar Memanjang	WF 400x200x8x13

### Konfigurasi Penggantung

Pada jembatan pelengkung terikat, hanger berperan penting dalam mentransfer beban dari balok lantai ke struktur pelengkung. Konfigurasi hanger memiliki pengaruh signifikan terhadap kinerja struktural jembatan. Optimalisasi konfigurasi ini dapat meningkatkan efisiensi material, seperti yang telah dijelaskan dalam penelitian sebelumnya (Alfarisi dkk., 2025; Bathista dkk., 2024). Dalam penelitian ini, variabel utama yang digunakan untuk analisis adalah sudut hanger relatif terhadap posisi pangkal hanger di pelengkung ( $\alpha$ ). Penelitian ini menggunakan satu konfigurasi dasar, yaitu hanger dengan jarak yang seragam (spasi tetap) di sepanjang pelengkung, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Konfigurasi ini dipilih untuk menyederhanakan analisis variabel sudut hanger ( $\alpha$ ) tanpa melibatkan perubahan jarak atau pola spasi antar hanger. Hasil analisis akan memberikan informasi tentang pengaruh sudut hanger terhadap distribusi gaya aksial pada hanger, momen lentur pada pelengkung, dan efisiensi material secara keseluruhan.



Gambar 3. Parameter sudut penggantung

### Pembebanan Jembatan

Pembebanan jembatan dalam penelitian ini mengacu pada SNI 1725:2016 tentang pembebanan untuk jembatan. Beban-beban yang diterapkan dalam analisis dirangkum dalam Tabel 3 berikut:

Tabel 3. Rekapitulasi pembebanan jembatan

Arah	Jenis
Vertikal	Mati (DL)
	Hidup (LL)
	Mati Tambahan (SDL)
	Lalu Lintas (TD, BTR, BGT)
	Pejalan Kaki (PL)
Lateral	Angin (WL)
	Gempa (EQ)
	Rem (BR)

Kombinasi beban dilakukan berdasarkan Pasal 6.1 SNI 1725:2016, dengan mempertimbangkan pembebanan vertikal dan lateral. Tujuan dari penerapan beban ini adalah untuk melakukan evaluasi konfigurasi hanger dalam berbagai skenario pembebanan. Analisis ini dilakukan untuk mengeksplorasi pengaruh variabel sudut hanger terhadap respons struktural jembatan, termasuk distribusi gaya aksial, momen lentur, defleksi, serta efisiensi material.

### Kinerja Struktur

Kinerja struktur dalam penelitian ini dievaluasi untuk menentukan konfigurasi hanger yang optimal berdasarkan kombinasi sudut hanger terhadap pelengkung. Pendekatan yang digunakan adalah dengan melakukan pengurutan terhadap setiap konfigurasi berdasarkan formula kinerja struktur sebagai berikut:

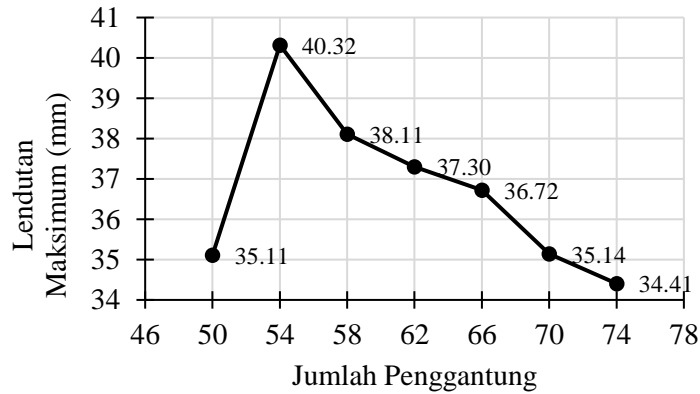
$$P_x = 0.5 \times \left( \frac{\delta_{min}}{\delta_x} \right) + 0.5 \times \left( \frac{W_{min}}{W_x} \right) \tag{1}$$

di mana:

$P_x$  Kinerja konfigurasi ke-x

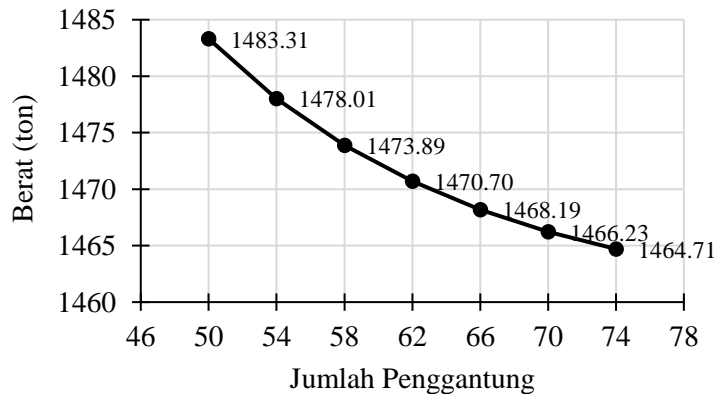
- $\delta_{min}$  : Defleksi minimum di antara seluruh konfigurasi.
- $\delta_x$  : Defleksi konfigurasi ke-x
- $W_{min}$  : Berat minimum di antara seluruh konfigurasi.
- $W_x$  : Berat konfigurasi ke-x

**Analisis Lendutan dan Berat Jembatan**



Gambar 4. Jumlah penggantung terhadap lendutan maksimum

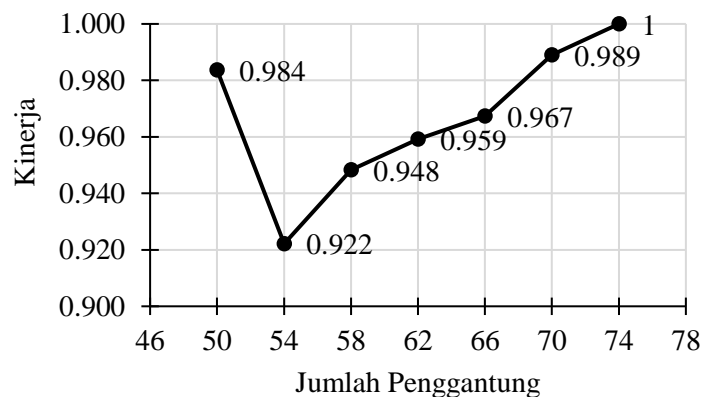
Gambar 4 menunjukkan grafik hubungan antara jumlah penggantung (hanger) dan lendutan maksimum jembatan. Hasil analisis menunjukkan bahwa lendutan maksimum awalnya meningkat seiring bertambahnya jumlah penggantung, mencapai nilai tertinggi sebesar 40,32 mm pada jumlah penggantung 54. Setelah titik tersebut, lendutan maksimum mulai menurun secara konsisten hingga jumlah penggantung mencapai 74, dengan lendutan minimum sebesar 34,41 mm.



Gambar 5. Jumlah penggantung terhadap berat jembatan

Gambar 5 menunjukkan grafik hubungan antara jumlah penggantung dan berat total jembatan. Dari analisis ini, terlihat bahwa berat jembatan menurun secara konsisten dengan bertambahnya jumlah penggantung. Pada jumlah penggantung 50, berat jembatan tercatat sebesar 1483,31 ton, sementara pada jumlah penggantung 74, berat total berkurang menjadi 1464,71 ton. Penurunan berat ini menunjukkan bahwa penggunaan lebih banyak penggantung memungkinkan distribusi beban yang lebih baik, sehingga dimensi elemen struktural dapat lebih optimal, menghasilkan pengurangan berat total jembatan.

## Analisis Kinerja Struktur



Gambar 6. Jumlah penggantung terhadap kinerja struktur

Gambar 6 menunjukkan hubungan antara jumlah penggantung (hanger) dan nilai kinerja struktur yang dihitung menggunakan formula (1). Hasil analisis mengindikasikan adanya variasi nilai kinerja berdasarkan jumlah penggantung yang berbeda.

Pada grafik ini, nilai kinerja tertinggi sebesar 1 dicapai pada konfigurasi dengan jumlah penggantung sebanyak 74. Nilai ini menunjukkan bahwa konfigurasi tersebut memberikan kombinasi terbaik antara efisiensi defleksi (lendutan) dan berat struktur. Sebaliknya, nilai kinerja terendah sebesar 0,922 terjadi pada jumlah penggantung sebanyak 54, yang juga bertepatan dengan lendutan maksimum tertinggi pada grafik lendutan sebelumnya.

Tren yang terlihat pada grafik menunjukkan bahwa peningkatan jumlah penggantung secara umum meningkatkan nilai kinerja struktur. Setelah jumlah penggantung melewati 54, nilai kinerja secara bertahap meningkat, mencerminkan distribusi beban yang lebih merata dan efisiensi struktural yang lebih baik. Selain itu, konfigurasi dengan jumlah penggantung mendekati 74 menghasilkan kombinasi berat total yang lebih rendah dan lendutan maksimum yang minimal, sehingga memberikan kontribusi positif terhadap peningkatan kinerja.

## KESIMPULAN

Penelitian ini menganalisis pengaruh jumlah dan konfigurasi hanger pada jembatan pelengkung terikat untuk menghasilkan desain yang optimal. Konfigurasi dengan 74 hanger terbukti paling efisien dalam mengurangi berat struktur dan menghasilkan lendutan minimum. Konfigurasi ini juga menghasilkan distribusi gaya aksial yang lebih merata pada pelengkung dan balok pengikat, sehingga meminimalkan konsentrasi gaya internal. Penempatan hanger secara merata membantu meningkatkan kinerja struktural secara keseluruhan. Hasil penelitian ini dapat diterapkan dalam perencanaan jembatan dengan menggunakan konfigurasi hanger serupa untuk mencapai efisiensi material dan kinerja yang maksimal. Disarankan penelitian lanjutan dilakukan dengan variasi pembebanan untuk menguji pengaruhnya terhadap konfigurasi hanger yang berbeda.

## DAFTAR PUSTAKA

- Alfarisi, M. S., Tamami, F., Abdullah, D. S., & Risdanareni, P. (2025). Effect of Spacing Configuration and Number of Hangers on Structural Performance of Tied-Arch Bridges. *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, 9(1), 255–265. <https://doi.org/10.70609/gtech.v9i1.6165>
- Bathista, Moch. D., Sulasmono, R. I., & Risdanareni, P. (2024). Optimization of Hanger Spacing of Steel Arch Bridges Using Dynamic Loads. *INERSIA Informasi dan Ekspose Hasil Riset Teknik Sipil dan Arsitektur*, 20(1), 86–96. <https://doi.org/10.21831/inersia.v20i1.67074>
- Brunn, B. (2003). *Calculation of a double track railway network arch bridge applying the European standards*. [https://www.researchgate.net/publication/299977258\\_Calculation\\_of\\_a\\_double\\_track\\_railway\\_network\\_arch\\_bridge\\_applying\\_the\\_European\\_standards](https://www.researchgate.net/publication/299977258_Calculation_of_a_double_track_railway_network_arch_bridge_applying_the_European_standards)
- Geißler, K., Steimann, U., & Graße, W. (2008). Netzwerkbogenbrücken – Entwurf, Bemessung, Ausführung. *Stahlbau*, 77(3), 158–171. <https://doi.org/10.1002/stab.200810019>

- Ostrycharczyk, A. W., & Malo, K. A. (2017a). Parametric study of radial hanger patterns for network arch timber bridges with a light deck on transverse crossbeams. *Engineering Structures*, 153, 491–502. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.10.021>
- Ostrycharczyk, A. W., & Malo, K. A. (2017b). Parametric study of radial hanger patterns for network arch timber bridges with a light deck on transverse crossbeams. *Engineering Structures*, 153, 491–502. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.10.021>
- Ostrycharczyk, A. W., & Malo, K. A. (2018). Parametric study on effects of load position on the stress distribution in network arch timber bridges with light timber decks on transverse crossbeams. *Engineering Structures*, 163, 112–121. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.02.046>
- Pellegrino, C., Cupani, G., & Modena, C. (2010). The effect of fatigue on the arrangement of hangers in tied arch bridges. *Engineering Structures*, 32(4), 1140–1147. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.12.040>
- Teich, S. (2011). Entwicklung allgemeiner Entwurfsgrundsätze für Hängernetze von Netzwerkbogenbrücken. *Stahlbau*, 80(2), 100–111. <https://doi.org/10.1002/stab.201001395>
- Tveit, P. (1999). Comparison of Steel Weights in Narrow Arch Bridges with Medium Spans (Vergleich der Stahlgewichte von schmalen Bogenbrücken mit mittleren Spannweiten). *Stahlbau*, 68(9), 753–757. <https://doi.org/10.1002/stab.199902580>.

