

## Optimalisatie staalconstructies met beperkt aantal verschillende profielen

van Woudenberg, T.R.

**Publication date**

2022

**Document Version**

Final published version

**Published in**

Bouwen met Staal

**Citation (APA)**

van Woudenberg, T. R. (2022). Optimalisatie staalconstructies met beperkt aantal verschillende profielen. *Bouwen met Staal*, 286, 46-49. <https://vakbladbouwenmetstaal.nl/archief/optimalisatie-staalconstructies-met-beperkt-aantal-verschillende-profielen/>

**Important note**

To cite this publication, please use the final published version (if applicable). Please check the document version above.

**Copyright**

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

**Takedown policy**

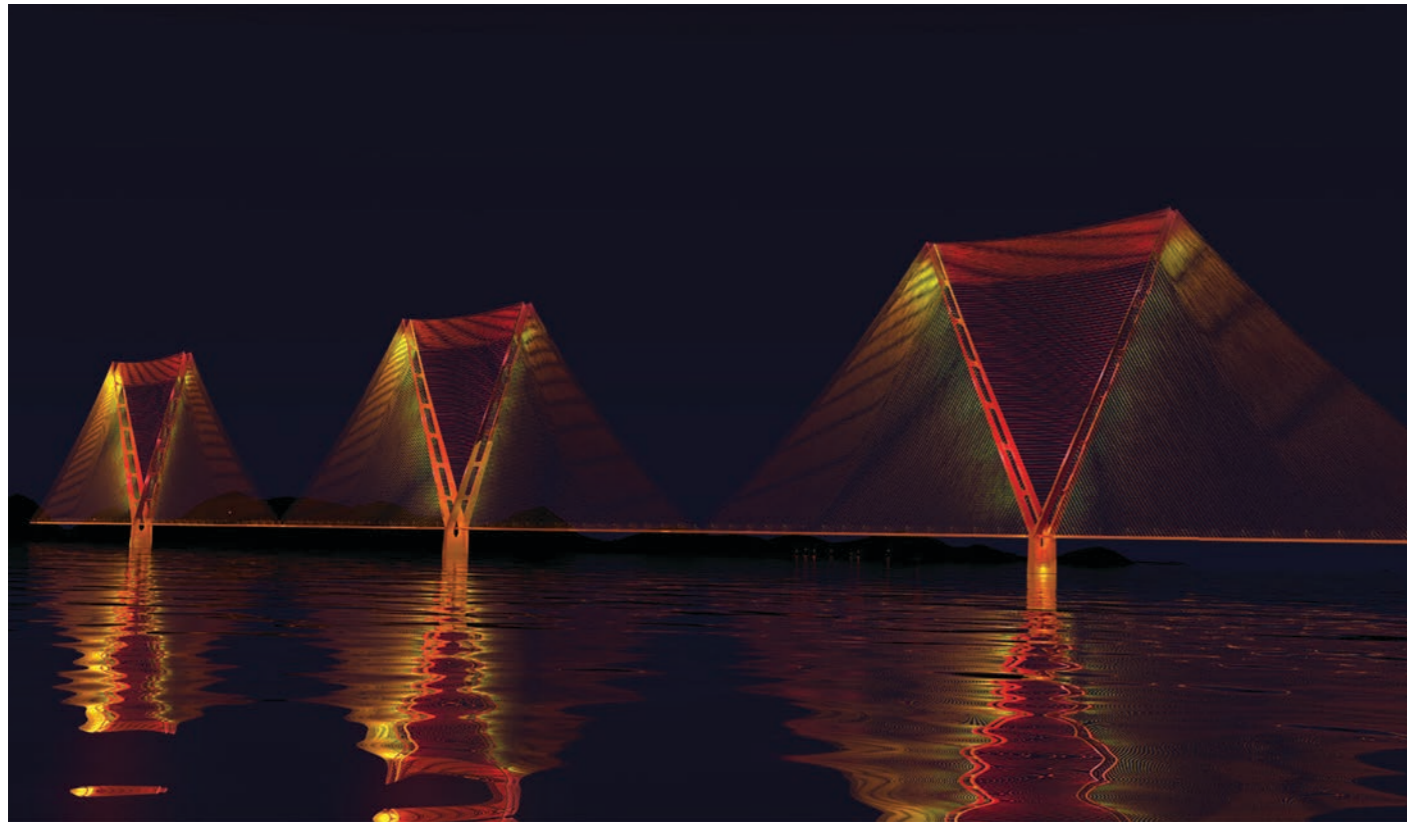
Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights. We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

***Green Open Access added to TU Delft Institutional Repository***

***'You share, we take care!' - Taverne project***

**<https://www.openaccess.nl/en/you-share-we-take-care>**

Otherwise as indicated in the copyright section: the publisher is the copyright holder of this work and the author uses the Dutch legislation to make this work public.



1. Voorbeeld van nieuw type brug gevonden met optimalisatiemethodes (Fairclough et al. 2018).

# Optimalisatie staalconstructies met beperkt aantal verschillende profielen

Het is mogelijk om lichte en goedkope staalconstructies te ontwerpen terwijl de rekenkracht ten opzichte van bestaande methodes beperkt is. Dit volgde, na parametrisch onderzoek, uit een afstudeeronderzoek vorig jaar aan de TU Delft, bij de faculteit Civiele Techniek. Deze methode is tevens toegepast op het constructief ontwerp van een ligger zoals ontworpen door Royal HaskoningDHV. Op verzoek licht de auteur toe hoe een optimaal ontwerp,

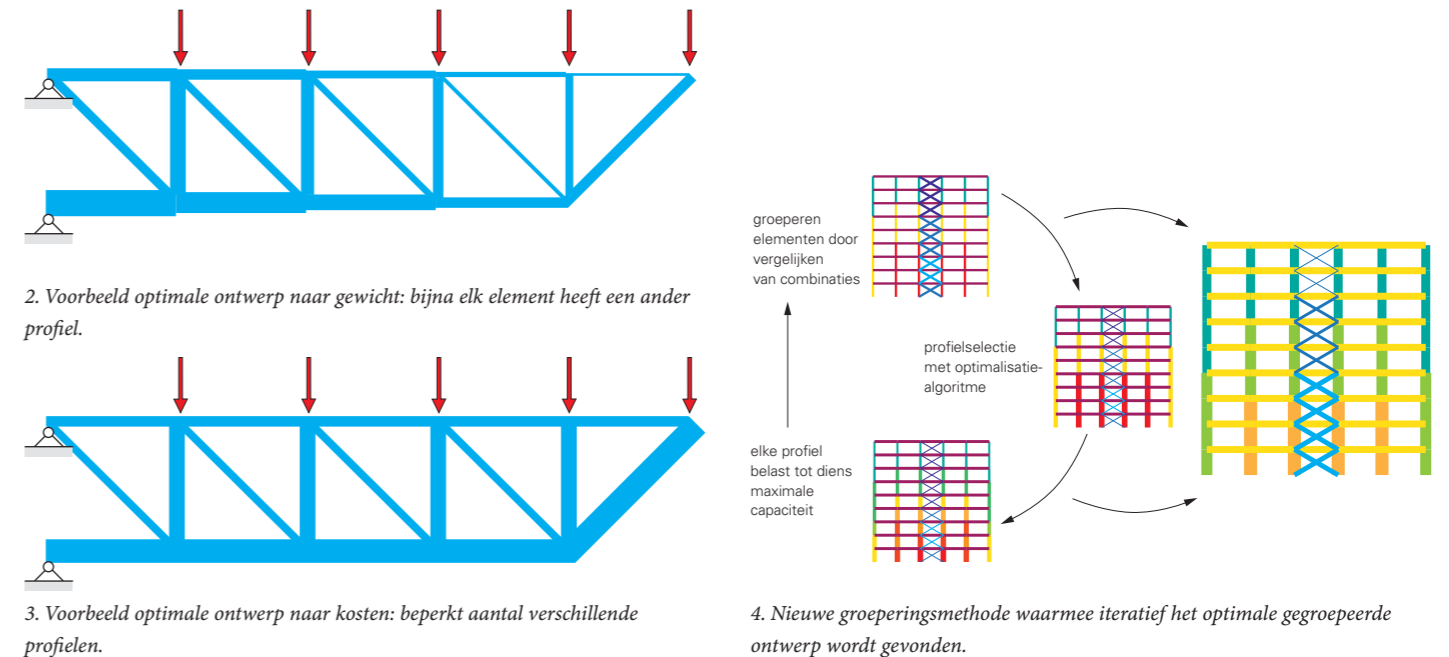
volgens een nieuwe groeperingsmethode, met een beperkt aantal verschillende profielen goed toepasbaar is.

ir. T. van Woudenberg.

Tom van Woudenberg is docent constructiemechanica en betonconstructies bij de Hogeschool van Amsterdam.

Het ontwerp van staalconstructies is dagelijks werk van de constructeur, maar er is ruimte voor verbetering. Bij het constructief ontwerp wordt gezocht naar het lichtste, goedkoopste

of duurzaamste ontwerp. Deze zoektocht kan worden uitgevoerd en verbeterd door het gebruik van een wiskundige optimalisatiemethode. Echter, is de toepassing hiervan beperkt door praktische beperkingen: het optimale ontwerp, in termen van gewicht, is te complex en te duur om te bouwen. Dit is deels toe te schrijven aan het hoge aantal verschillende profielen. Een optimaal ontwerp met een beperkt aantal verschillende profielen zou wel goed toepasbaar zijn. In dit artikel wordt een methode besproken om het aantal



verschillende profielen te beperken binnen een optimalisatie. Deze methode is toegepast bij het constructief ontwerp van een staalspan door Royal HaskoningDHV. Met deze nieuwe methode is het mogelijk lichte en goedkope staalconstructies te ontwerpen met beperkte rekenkracht ten opzichte van bestaande methodes.

## Ontwerpproces met optimalisatie

Optimalisatie is het vinden van de optimale oplossing van een wiskundig probleem, waarbij de oplossing bijvoorbeeld het gewicht of de kosten kunnen zijn. Buiten de civiele sector zijn optimalisatiemethodes veelvuldig opgenomen in het ontwerpproces met indrukwekkende resultaten: van gewichtsreductie van vliegtuigvleugels tot het beperken van verpakkingsmateriaal (Langelaar en van Keulen 2019). De civiele sector heeft ook baat bij dergelijke optimalisatiemethodes, waarmee in combinatie met lage kosten en beperkt materiaalgebruik, de veiligheid van constructies kan worden gegarandeerd. Bij de bestaande toepassingen van optimalisatie in de civiel sector zijn indrukwekkende resultaten geboekt, zoals een nieuw type brug (afb. 1). Dit type brug met gespleten pylonen kan grotere overspanningen maken dan conventionele bruggen in vergelijking met het eigengewicht (Fairclough et al. 2018).

In een ontwerpproces met optimalisatie wordt

de iteratieve taak van ontwerpen en controleren uit handen genomen door diverse wiskundige procedures. De taak van de constructeur verschuift daarmee naar het bepalen van het optimalisatieprobleem. Dit maakt het mogelijk om voor complexe ontwerp vraagstukken de optimalisatie-oplossing te vinden, als het voor de constructeur niet meer mogelijk is op basis van ervaring het meest optimale ontwerp te vinden.

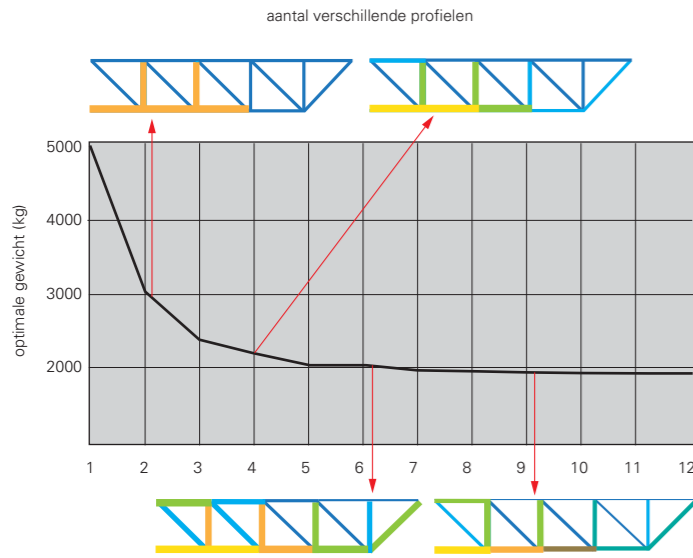
Voor de dimensionering van staalconstructies kan het optimalisatieprobleem gedefinieerd worden als: het vinden van het lichtste of goedkoopste ontwerp gegeven een grote set profielen, waarbij moet worden voldaan aan de normen. Voor een uitkragend vakwerkspan zou het lichtste ontwerp er uit kunnen zien zoals in afbeelding 2. De dikte van de lijnen geeft het gewicht van het profiel weer. Er valt op dat bijna elk element een ander profiel heeft.

Het goedkoopste ontwerp zou echter kunnen afwijken van het lichtste ontwerp, wat is geïllustreerd met een mogelijk goedkoopste ontwerp in afbeelding 3. Voor het vinden van deze optimaal goedkoopste oplossing dient een uitgebreide beschrijving te zijn opgesteld die alle kosten van een constructie bevatten. Er zijn meerdere initiatieven op de kosten te kwantificeren (Pavlovčič et al. 2004; Haapio 2012; Ajouz 2018). Deze kosten zijn echter sterk variabel en zijn daarom moei-

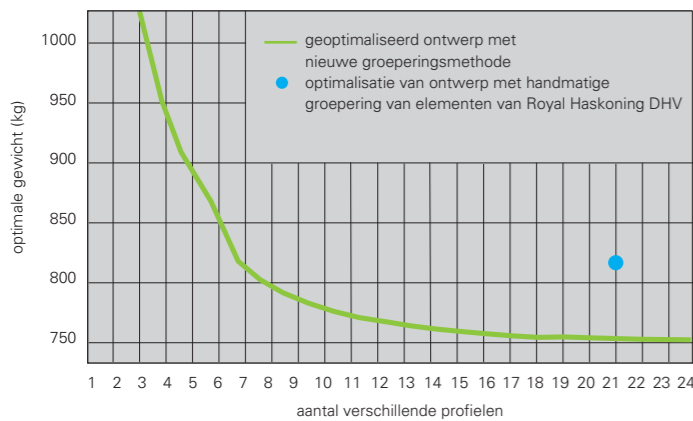
lijk te kwantificeren. Hoewel het gewicht van dit tweede ontwerp groter is, kunnen de uiteindelijke kosten lager zijn omdat het ontwerp goedkoper is in de uitvoering. Daarbij kan worden opgemerkt dat, hoe minder verschillende profielen een ontwerp bevat, hoe goedkoper de constructie is; hoe groter de diversiteit in het ontwerp, hoe hoger de kosten. Hier wordt in de literatuur naar verwezen als het principe van gemeenschappelijkheid (Templeman 1988). In afbeelding 6 is dit principe toegelicht met een conceptuele weergave van de grondstofkosten van het staal, kosten die voortvloeien uit de diversiteit van het ontwerp, en de som van deze twee. De grondstofkosten van het staal nemen af bij een toenemend aantal verschillende profielen. De kosten van de diversiteit van het ontwerp nemen echter toe bij een toenemend aantal verschillende profielen. Voor de totale kosten ontstaat daarmee een optimaal aantal verschillende profielen.

## Groeperingsmethodes

Omdat het lastig is de exacte kosten te bepalen die het principe van gemeenschappelijkheid meenemen, is een mogelijke oplossingsstrategie het vinden van het lichtste ontwerp voor een vastgesteld aantal verschillende profielen. Dit optimalisatieprobleem bestaat uit twee gekoppelde subproblemen, zoals toegelicht in afbeelding 5 voor de uitkragende vakwerklig-



5. Gewicht van de gegroepede oplossing per aantal groepen ter ondersteuning van de afweging door een constructeur.



7. Vergelijking ontwerp met handmatige groepering en ontwerp met nieuwe groeperingsmethode.

ger met 25 mogelijke profielen: selectie van een beperkt aantal profielen en selectie van een groep elementen met hetzelfde profiel. Dit optimalisatieprobleem kan worden opgelost door groeperingsmethodes toe te passen. Deze groeperingsmethodes dienen, afhankelijk van de methode, te worden toegepast voor, tijdens of na een optimalisatieproces. De meest gebruikelijke groeperingsmethodes kunnen worden ingedeeld in vier categorieën.

#### Handmatige selectie elementen met hetzelfde profiel

Dit is een veelgebruikte methode binnen het constructeursvak, waarbij eerst het tweede subprobleem wordt opgelost op basis van ervaring. Vervolgens wordt met deze groepering een geschikt profiel gekozen, wederom op basis van ervaring of met een optimalisatiemethode. De kwaliteit van dit ontwerp is sterk afhankelijk van de ervaring van de constructeur, waarbij de constructeur met zijn oplossing voor het tweede subpro-

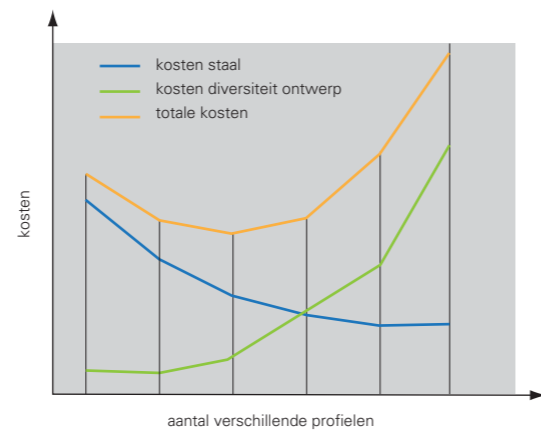
bleem de optimale oplossing mogelijk al heeft uitgesloten.

#### Groeperen elementen op basis van normaalkracht in een uniform ontwerp

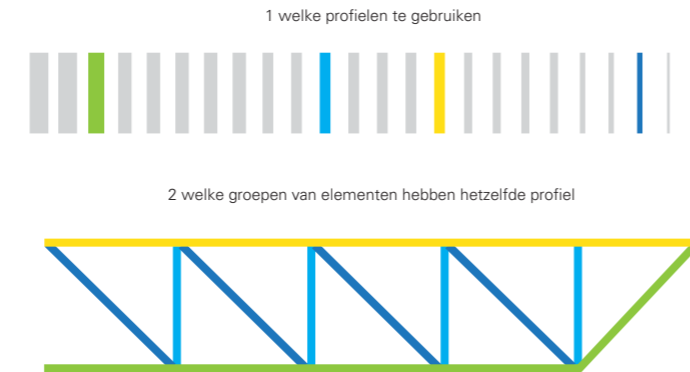
In deze methode wordt wederom eerst het tweede subprobleem opgelost, maar ditmaal met een vastgestelde procedure op basis van de normaalkrachtverdeling in een uniform ontwerp van een vakwerk (Krishnamoorthy et al. 2002; Toğan en Daloglu 2006, 2008; Yang et al. 2016). De groepering die hieruit volgt, is de basis voor een optimalisatie met de gehele set profielen. Echter, kan onder andere knikgedrag van staven niet goed worden meegenomen in deze methode en verandert de krachtafdracht bij dimensionering.

#### Aanpassen optimale profielen en verdeling van profielen tijdens optimalisatieproces

Er zijn diverse mogelijkheden om het optimalisatieproces aan te passen: het toevoegen van een additionele diversiteitseis aan de normen (Barbosa et al. 2008), het optima-



6. Vergelijking van kosten constructies (Gutkowski, 1997). De totale kosten zijn de som van de grondstofkosten van staal en de kosten die voortvloeien uit de diversiteit van het ontwerp. Daarmee ontstaat een optimaal aantal verschillende profielen.

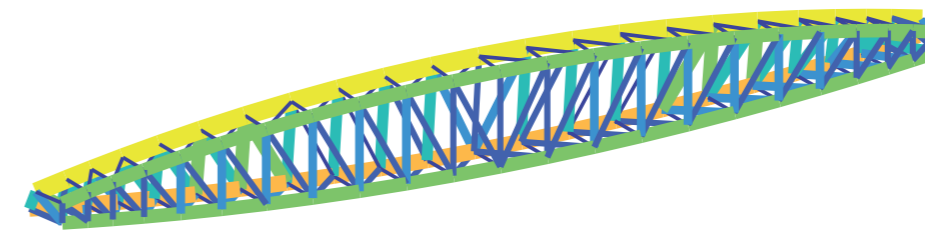


8. De twee gekoppelde subproblemen van het groeperingsprobleem.

liseren naar zowel gewicht als aantal profielen (Galante en Oñate 1996, Shea et al. 1997), en het aanpassen van de mogelijke set oplossingen (Barbosa en Lemonge 2008, Reitman en Hall 1990). Hoewel de optimale oplossing niet wordt uitgesloten, is het optimalisatieprobleem lastig op te lossen vanwege het grote aantal mogelijke oplossingen. Daardoor is een optimalisatiealgoritme mogelijk niet in staat de optimale oplossing te vinden.

#### Afronden profielen ongegroepeerde optimale ontwerp

Bij deze methodes wordt de lichtste oplossing van het ongegroepeerde optimalisatieprobleem (afb. 2), afgerond naar een gegroepede oplossing (Templeman 1988, Provatidis en Venetsanos 2006, Adeli en Sarma 2006, Walls en Elvin 2010). De wijze waarop deze afronding gebeurt kan verschillen. Door het afronden worden echter de krachtafdracht aangepast, waardoor de optimale oplossing mogelijk niet gevonden wordt.



9. Ontwerp ligger met geoptimaliseerd zeven verschillende profielen.

#### Nieuwe groeperingsmethode

Vanwege de nadelen van de bestaande groeperingsmethodes is een nieuwe methode ontwikkeld waarmee een optimaal ontwerp kan worden gevonden met een laag aantal verschillende profielen; het lichtste ontwerp dat tegelijkertijd goedkoop gerealiseerd kan worden. In deze methode worden elementen gegroepeerd door de lichtste combinatie te vinden van elementen uit een ontwerp waarin ieder profiel tot de maximale capaciteit is belast. Voor deze groepen worden de optimale profielen gevonden. Dit proces wordt herhaald tot het optimaal gegroepede ontwerp is gevonden (afb. 4). Deze methode is vergeleken met de bestaande groeperingsmethodes, waaruit geconcludeerd kan worden dat deze

nieuwe methode met beperkte rekenkracht consequent lichtgewicht ontwerpen vindt (Van Woudenberg en Van der Meer, 2021).

#### Optimale gewicht per aantal groepen

Een constructeur dient uiteindelijk een afweging te maken tussen het aantal groepen en het gewicht of de verwachte kosten van een constructie. Door herhaaldelijk het optimaal gegroepede ontwerp te vinden voor een variabel aantal groepen, is deze afweging mogelijk. In afbeelding 5 is ter illustratie de uitkragende vakwerklijger geoptimaliseerd van een ontwerp met één profiel voor alle elementen, tot een ontwerp met twaalf verschillende profielen. Het blijkt dat het optimale gewicht drastisch afneemt bij het

toevoegen van de eerste paar groepen, daarna is de gewichtsbesparing beperkt. Het bijbehorende ontwerp voor twee, vier, zes en negen groepen is ook getoond.

#### Potentiële winst

Om de potentiële winst te illustreren is de nieuwe groeperingsmethode ook toegepast voor een daadwerkelijk ontwerp van een ligger zoals uitgevoerd door Royal HaskoningDHV (afb. 9) met een handmatige groepering van 21 verschillende profielen in de ligger. Optimalisatie van de kokerprofielen geeft een ontwerp van 820 ton. Dezelfde ligger is geoptimaliseerd met de nieuwe groeperingsmethode van 1 tot 24 verschillende profielen (afb. 7). In vergelijking met het ontwerp met een handmatige groepering is een gewichtsbesparing van 63 ton mogelijk, of een vergelijkbaar gewicht maar wel met zeven verschillende profielen. Dit is mogelijk omdat diverse diagonale en verticalen uit verschillende delen van de constructie in dit ontwerp dezelfde profielen hebben, of een vergelijkbaar gewicht maar wel met zeven verschillende profielen. •

#### Literatuur

- Adeli H, Sarma KC (2006), *Cost Optimization of Structures*, John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, UK.
- Ajouz R (2018), *Optimising production costs of steel trusses*, TU Delft.
- Barbosa HJC, Lemonge ACC, Borges CCH (2008), *A genetic algorithm encoding for cardinality constraints and automatic variable linking in structural optimization*, Eng. Struct., <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.06.014>.
- Fairclough HE, Gilbert M, Pichugin A V., et al (2018), *Theoretically optimal forms for very long-span bridges under gravity loading*, Proc. R. Soc A Math. Phys. Eng., Sci 474:20170726. <https://doi.org/10.1098/rspa.2017.0726>.
- Galante M, Oñate E (1996), *Genetic algorithms as an approach to optimize real-world trusses*, Int. J. Numer Methods Eng., [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0207\(19960215\)39:3<361::AID-NME854>3.0.CO;2-1](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0207(19960215)39:3<361::AID-NME854>3.0.CO;2-1).
- Gutkowski W (1997), *Discrete Structural Optimization*, NV-1 onl, Springer Vienna.
- Haapio J (2012), *Feature-based costing method for skeletal steel structures based on the process approach*, Tampere University of Technology.
- Krishnamoorthy CS, Prasanna Venkatesh P, Sudarshan R (2002), *Object-oriented framework for genetic algorithms with application to space truss optimization*, J. Comput. Civ. Eng., [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(2002\)16:1\(66\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(2002)16:1(66)).
- Langelaar M, van Keulen F (2019), *Lecture slides ME46060 Engineering Optimization*, Delft.
- Pavlovčič L, Krajnc A, Beg D (2004), *Cost function analysis in the structural optimization of steel frames*, Struct. Multidiscip. Optim., 28:286–295. <https://doi.org/10.1007/s00158-004-0430-z>.
- Provatidis CG, Venetsanos DT (2006), *Cost minimization of 2D continuum structures under*

- stress constraints by increasing commonality in their skeletal equivalents*, Forsch im Ingenieurwesen/Engineering Res., <https://doi.org/10.1007/s10010-006-0026-4>.
- Reitman MI, Brent Hall W (1990), *Optimal structural optimisation*, Eng. Optim., 16:109–128. <https://doi.org/10.1080/03052159008941167>.
- Shea K, Cagan J, Fennes SJ (1997), *A Shape Annealing Approach to Optimal Truss Design With Dynamic Grouping of Members*, J. Mech Des, 119:388–394. <https://doi.org/10.1115/1.2826360>.
- Templeman AB (1988), *Discrete optimum structural design*, Comput. Struct., [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(88\)90284-2](https://doi.org/10.1016/0045-7949(88)90284-2).
- Toğan V, Daloglu AT (2006), *Optimization of 3d trusses with adaptive approach in genetic algorithms*, Eng. Struct., 28:1019–1027. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.11.007>.
- Toğan V, Daloglu AT (2008), *An improved genetic algorithm with initial population strategy and self-adaptive member grouping*, Comput. Struct., 86:1204–1218. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2007.11.006>.
- Yang X-S, Bekdas G, Nigdeli SM (2016), *Metaheuristics and Optimization in Civil Engineering*, Springer International Publishing, Cham.
- Walls R, Elvin A (2010), *An algorithm for grouping members in a structure*, Eng. Struct., 32:1760–1768. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.02.027>.
- Woudenberg, TR van, Meer, FP van der (2021), *A grouping method for optimization of steel skeletal structures by applying a combinatorial search algorithm based on a fully stressed design*, Eng. Struct., <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113299>.