

Beitrag zur Frage der Optimierung von Tragwerken

Autor(en): **Faltus, F.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH
Kongressbericht**

Band (Jahr): **8 (1968)**

PDF erstellt am: **09.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-8748>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

DISCUSSION PRÉPARÉE / VORBEREITETE DISKUSSION / PREPARED DISCUSSION

Beitrag zur Frage der Optimierung von Tragwerken

Contribution to the Question of Optimisation of Structures

Contribution à la question de l'optimisation des structures

F. FALTUS

Prof. Ing. Dr., Dr. Sc.

Tschechoslowakei

Herr Courbon hat in seinem Einführungsartikel eine beachtenswerte Zusammenstellung allgemeiner Gesichtspunkte zur Frage der Optimierung von Tragwerken gegeben, welche zeigt, wie vielseitig die Aufgabe ist, auch wenn wir uns nur auf Tragwerke bzw. Bauten beschränken und nicht das ganze Bauvorhaben mit seinen mannigfaltigen ökonomischen Zusammenhängen ins Auge fassen. Ich möchte zu diesen Ausführungen einige Bemerkungen hinzufügen.

1) Die einfachste Optimierungsaufgabe ergibt sich, wenn als Kriterium lediglich das Minimum des Aufwandes eines Baustoffes gestellt wird. Da bei Stahlkonstruktionen der Materialpreis die Gesamtkosten wesentlich beeinflusst und die Anarbeitungskosten bei nicht zu grosser Änderung der Technologie dem Gewicht etwa proportional sind, genügt oft diese vereinfachte Aufgabenstellung. Sie ist sogar zu gewissen Zeiten mit Stahlmangel ausschlaggebend. Courbon weist richtig darauf hin, dass das Gewichtsminimum gewöhnlich sehr flach verläuft, wenn nur geometrische Abmessungen variiert werden. Es werden dann auch ziemlich grosse Abweichungen von der optimalen Form nur geringfügige Änderungen des Gewichtes bringen. Es sollte daher auch immer dieser Zusammenhang untersucht werden, da dann scheinbar untergeordnete, und daher vernachlässigte Einflüsse die Lage des Minimums stark verschieben können. Es soll noch hervor- gehoben werden, dass sich eine Tragkonstruktion minimalen Gewichtes i.A. nicht aus Bauteilen zusammensetzt, die an sich minimale Gewichte haben.

Grössere Stahleinsparungen bringen nur prinzipielle Änderungen.

der Tragkonstruktion. Als Beispiel sei eine Überlegung erwähnt, die beim Entwurf der Bogenbrücke über den Stausee der Moldau südlich Prag gemacht wurde. Es handelt sich um eine Strassenbrücke von 380 m lichter Weite, deren Fahrbahnkonstruktion auf vollwandigen Zweigelenkbogen von 330 m Stützweite aufgeständert ist (Abb. 1 und 2). Es wurde die Frage aufgeworfen, ob bei dieser grossen Stützweite die Fahrbahnplatte als leichte orthotrope Platte, oder wie bei Brücken kleinerer Spannweiten besser als Stahlbetonplatte in Verbund mit den Fahrbahnhauptträgern von 23 m Spannweite ausgeführt werden soll. Eine Vergleichsrechnung zeigte, dass der Stahlbedarf und dieser war zur Zeit der Projektverfassung ausschlaggebend für eine orthotrope Platte grösser ist, als die Vermehrung des Stahlgewichtes der Bogenträger zufolge der Vergrösserung der ständigen Last. Einen grossen Einfluss auf dieses Ergebnis hatte auch der Umstand, dass mit Grenzlaster gerechnet wurde, d.h. dass in die Berechnung nach der Theorie zweiter Ordnung das Eigengewicht mit einem kleineren Überlastfaktor eingeführt wurde als die Nutzlast.

2) Wesentlich schwieriger ist die Optimierung mit Hinblick auf die Gestehungskosten. Die in Betracht gezogene Technologie der Fertigung hat einen entscheidenden Einfluss auf die optimale Form des Tragwerkes. Denken wir z.B. an die Verschiebung der ökonomischen Grenzen zwischen Fachwerk und Vollwandträger zu Gunsten des letzteren durch die Einführung der Schweisstechnik und Rückkehr zu Fachwerkträgern im Leichtbau. Die Erzeugungskosten werden wesentlich von der Fabrikationseinrichtung und diese von den herzustellenden Stückzahlen beeinflusst. Bei Massenerzeugung sind auch komplizierte Formen mit grossen Anforderungen an die Genauigkeit zulässig, wie die Fachwerkplatten und Kuppeln beweisen. Ganz wesentlich wirkt sich auch das Verhältniss zwischen Materialpreis und Lohnkosten aus, sodass die Ergebnisse nicht einfach auf andere Wirtschaftsgebiete übertragen werden können.

Ein typisches und nur scheinbar einfaches Beispiel einer solchen Aufgabe ist die optimale Aussteifung eines Stehbleches. Theorie und Versuch zeigen, dass die tragfähigkeitserhöhende Wirkung einer Aussteifung nicht linear mit ihrem Querschnitt zunimmt und dass sich nach einer gewissen Grösse der Steife die Tragfähigkeit des Stehblechs nur langsam seinem Maximum nähert. Es besteht also sicherlich ein optimaler Steifenquerschnitt und mit Hinblick auf die Herstellungskosten auch eine optimale Steifenzahl. Diese Aufgabe wurde

eigentlich noch nicht gelöst, insbesondere nicht für die überkritische Beulfestigkeit. Form und Querschnitt der Gurtungen eines Vollwandträgers beeinflussen sowohl die Tragfähigkeit des Stehbleches, als auch die Kippgefahr des Trägers. In der Praxis werden sehr verschiedene Lösungen verwendet, wie Abb. 3 an einigen Beispielen zeigt. Entscheidend ist hier wieder der Gesamterfolg.

Dies möge noch ein Beispiel von dem Bau der oben erwähnten Bogenbrücke zeigen. Die Brücke ist mit einer Breite von 13,0 m zwischen den Geländern schmal im Verhältnis zur Spannweite (Abb. 3). Um eine genügende Seitenstabilität zu sichern, war ursprünglich vorgesehen, die Bogen schräg zu stellen und die damit verbundenen Erzeugungs und Montagekosten in Kauf zu nehmen. Nach entsprechenden Studien wurde jedoch folgende, wesentlich einfachere Lösung zur Ausführung bestimmt. Die beiden Bogen wurden in einem Abstand von 13 m angeordnet und mit Windverbänden bei beiden Gurtungen als torsionssteifes Gebilde ausgeführt. Die Säulen, welche die in einem Abstand von 12 m liegenden Fahrbahnhauptträger tragen, sind über den inneren Stehblechen aufgeständert. Zur Seitensteifigkeit und Stabilität der Brücke trägt wesentlich die Fahrbahn bei, welche als durchlaufender, wagrechter Balken auf fünf Stützen die Windkräfte auf den Fahrbahnträger und die Fahrzeuge nur zu einem kleinen Teil im Bogenscheitel abgibt. In Abb. 4 sind die horizontalen Reaktionen des Fahrbahnträgers bei verschiedenen Anordnungen gezeigt. Im Bogenscheitel würde bei der üblichen Ausführung (Abb. 4d) eine Reaktion von 132 Mp zu übertragen sein, bei der Ausführung als Durchlaufträger über 5 Stützen (Abb. 4b) beträgt die Reaktion nur 32 Mp, da sich der Bogen unter seiner auf ihn entfallenden Windlast auch horizontal durchbiegt. Durch diese Ausnutzung des räumlichen Zusammenwirkens konnte viel an Anarbeitungskosten gespart werden. Es sei nur nebenbei bemerkt, dass der horizontale Träger mit einer Länge von 542 m wohl der längste Vollwandträger ist, der je gebaut wurde. Den Querschnitt bildet die 12 m breite, ohne Dilatationsfugen durchlaufende Stahlbetontafel als "Stehblech" in Verbund mit den 1,8 m hohen Fahrbahnhauptträgern als Gurtungen. Der provisorische Windverband zwischen den Fahrbahnhauptträgern wurde nach Erhärten der Betonplatte entfernt.

3) Eine besondere Art der Optimierungsaufgaben bildet die Festlegung von Typenreihen. Hier kommt als neue Veränderliche noch die Grösse des Typenschrittes hinzu, welche die wirtschaftlichen Ergeb-

nisse stark beeinflussen kann. Die optimale Grösse des Typenschrittes hängt wesentlich von den zu erwartenden Ausführungszahlen ab. Grosse Schritte erhöhen den Materialverbrauch, bringen jedoch durch die Vergrösserung der Stückzahlen gleicher Ausführung Einsparungen an Fertigungskosten.

4) Wesentlich komplizierter wird die Auffindung der optimalen Lösung, wenn verschiedene Baumaterialie, also zB. Stahl, Beton, Holz usw. in Wettbewerb treten. Die Vergleichsbasis sollte nicht, wie es oft geschieht, die Gestehungskosten, sondern der Gebrauchswert der einzelnen Ausführungen sein. Dass in solchen Fällen die optimalen Lösungen für die einzelnen Bauarten verglichen werden sollten, ist wohl selbstverständlich. Unter Verbrauchswert können wir die Zusammenfassung aller während der Exploitationszeit anfallenden Kosten verstehen, also die Gestehungskosten mit entsprechender Berücksichtigung des günstigen Einflusses einer Verkürzung der Bauzeit, die Erhaltungskosten, die Möglichkeit von Einsparungen durch bessere Adaptibilität der Konstruktion bei etwaiger Änderung der Anforderungen an den Bau, und schliesslich noch die Abbruchkosten und der Altmaterialwert. Der letztgenannte Posten hat in erzarmen Ländern einen nicht ausser Acht zu lassenden Einfluss.

5) Noch schwieriger ist die Optimierungsaufgabe, welche in Ländern mit strenger Planwirtschaft gestellt wird : die geplanten Bauvorhaben sind optimal auf die vorhandenen, bzw. noch zu schaffenden Erzeugungskapazitäten der einzelnen, auf verschiedene Baumaterialien eingestellten Betriebe zu verteilen. Für gewisse Baugruppen ist es von allem Anfang an klar, dass sie bei Erfüllung der technischen Erfordernisse nur in bestimmten Materialien ausgeführt werden können. Es bleibt jedoch ein, mit dem technischen Fortschritt sich vergrösserndes Gebiet übrig, auf dem die verschiedenen Baustoffe in Wettbewerb treten können. Da keine Reserven vorhanden sind und die einzelnen Materialien daher nicht optimal eingesetzt werden können, besteht die Aufgabe darin, die durch die weniger vorteilhafte Verwendung der Baumaterialie entstehenden Verluste möglichst klein zu halten. Es kann sich auch ergeben, dass auch tragende Konstruktionen aus Leichtmetall so vorteilhaft ihren Platz im Bauplan zugewiesen bekommen. Es ist einzusehen, dass die Lösung einer so umfangreichen Aufgabe mit den zur Verfügung stehenden Mitteln und Kenntnissen nicht immer restlos gelingt.

6) Als höchste und schwierigste Optimierungsaufgabe, die weit

über das hinausgeht, was hier behandelt wird und die nur der Vollständigkeit halber angeführt wird, ist die Abschätzung der optimalen Zusammensetzung der Baukapazitäten, welche ein Land braucht, um den anfallenden Baubedarf in günstigster Weise zu befriedigen. Hierbei sind auch die notwendigen Nebenbetriebe usw. ins Kalkül zu ziehen.

Es ist sehr zu begrüßen, dass unter dem Stichwort "Optimierung" auf diesem Kongress auch ökonomische Fragen zur Sprache kommen. Der Theoretiker betrachtet oft als vordringlichste Aufgabe die möglichst exakte Berechnung der Spannungen in einer gegebenen Konstruktion, für eine gegebene Belastung. In Wirklichkeit ist die Aufgabe immer umgekehrt gestellt: für einen gegebenen Zweck ist das nach Form, Technologie und Gebrauchswert optimale Bauwerk zu entwerfen. Eine allgemeine Lösung ist ausser für einfachste Fälle noch unbekannt. Es fehlt eine tragfähige Theorie des Konstruierens und des Entwerfens.

Bei dem Fortschritt und der Verfeinerung der Berechnungsmethoden und der Möglichkeit des Einsatzes von Rechenautomaten sollte die Fragestellung mit Einschluss der Wirtschaftlichkeit immer mehr an Bedeutung gewinnen. Das Ziel einer Berechnung sollte nicht der Nachweis des Spannungszustandes oder der Sicherheit einer gegebenen Konstruktion sein, sondern direkt das Auffinden der optimalen Gestalt derselben. Es sollte sich also der Übergang von der Beurteilung eines Querschnittes zu dessen Bemessung und weiter zu seiner optimalen Formgebung vollziehen. Wir sind erst bei wenigen einfachen Aufgaben bei dieser dritten Stufe angelangt. Leider wird auch bei den Statikern in der Praxis oft mehr Wert auf eine (oft nur scheinbar) genaue Berechnung gelegt, als auf eine kritische Beurteilung der Ergebnisse und hauptsächlich auf die aus ihnen zu ziehenden Lehren für eine wirtschaftlichere Gestaltung der Konstruktion. Trotz elektronischer Rechenautomaten bleibt das Schaffensfeld des schöpferischen Gestalters der Konstruktion noch vollkommen uneingeschränkt. Dies auch deswegen, weil der Begriff "optimale Konstruktion" mathematisch schwer formulierbar bleibt.

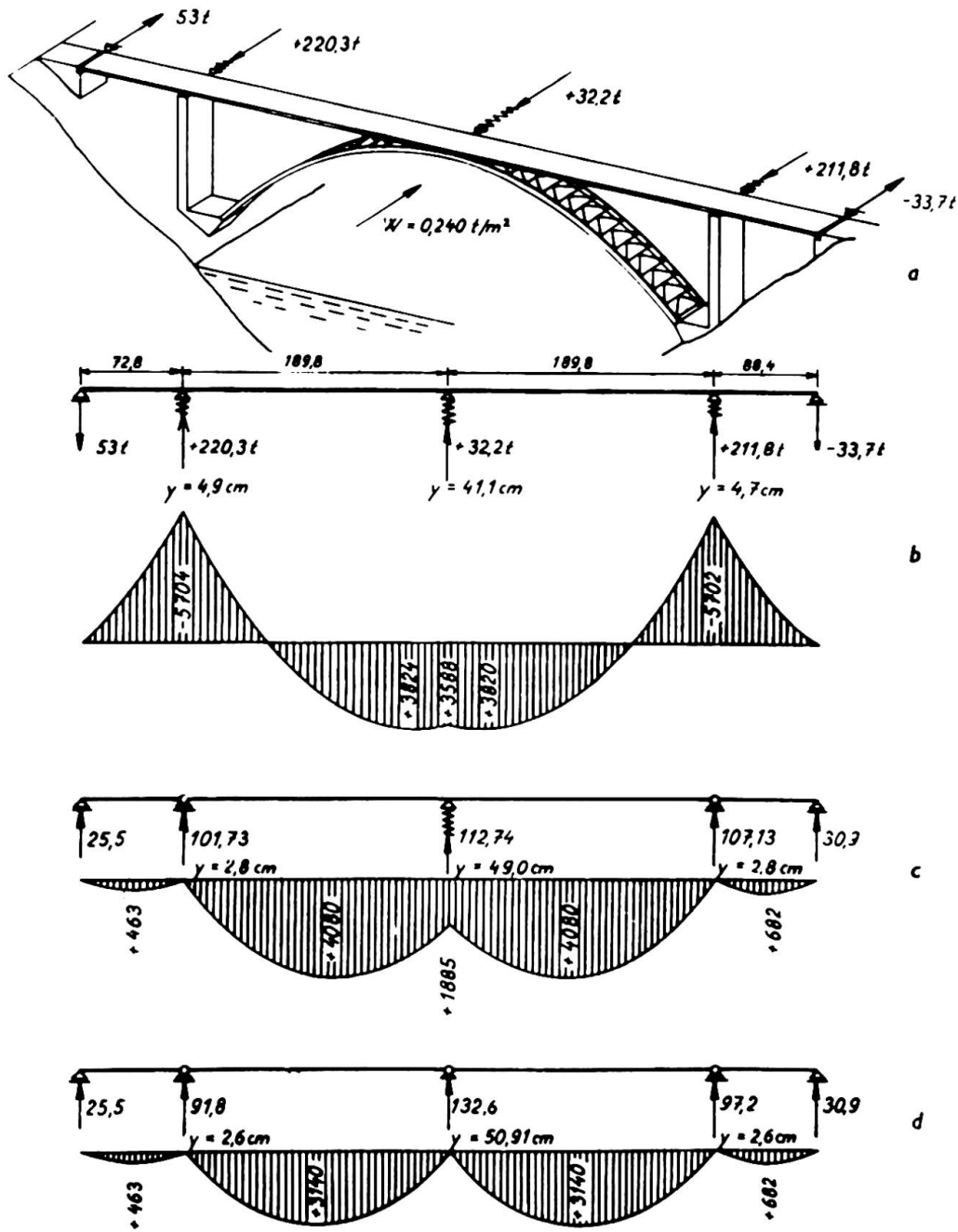


Abb. 4. Die Brücke als Raumkonstruktion bei Windbelastung
 a) Ansicht der Brücke. Horizontale Reaktion der Fahrbahnplatte und Biegemoment bei Ausbildung
 b) als Durchlaufträger über die ganze Brückenlänge
 c) als Durchlaufträger nur im Mittelfeld
 d) als 4 freiaufliegende Träger

Legend of figures:

- Fig. 1 Elevation of the two-hinged arch bridge near Prague
 Fig. 2 Cross-section of the road bridge in the quarter and in the middle of the span
 Fig. 3 Different sections with enlarged stiffness against lateral buckling
 Fig. 4 The bridge as a space structure with wind load
 a) perspective view
 Horizontal reactions and bending moments in the horizontal girder constructed
 b) as a continuous girder over the whole length of the bridge
 c) as a continuous girder only over the length of the arch
 d) as four simply supported girders

Légende de figures:

- Fig. 1 Elévation du pont en arc à deux articulations près de Prague
 Fig. 2 Coupe transversale au quart et au sommet de l'arc
 Fig. 3 Différentes sections à résistance agrandie contre déversement latéral
 Fig. 4 Le pont comme construction dans l'espace sous la poussée du vent
 a) Vue perspective du pont
 Réactions horizontaux et moments fléchissants de la poutre horizontale
 conçue comme:
 b) poutre continue sur toute la longueur du pont
 c) poutre continue dans la partie médiane
 d) poutres à deux appuis

ZUSAMMENFASSUNG

Es werden 6 verschiedene Stufen von Optimierungsaufgaben angeführt: minimaler Baustoffaufwand, minimale Gestehungskosten, Optimierung von Typenreihen, optimaler Einsatz verschiedener Baustoffe, optimale Aufteilung der gegebenen Baukapazitäten für verschiedene Baumaterialien auf den Baubedarf und schliesslich deren günstigste Zusammensetzung. Es werden zwei Beispiele von Optimierungsaufgaben vom Bau der Bogenbrücke über die Moldau gebracht.

SUMMARY

Six different problems of optimization are presented: structures with lowest weight, with lowest cost, optimization of type-ranges, optimal use of different building materials, optimal distribution of the disponible building capacity and finally for different materials the best combination of building capacities. The arch bridge over the Vltava-river is used, to demonstrate two examples of optimization.

RÉSUMÉ

L'auteur présente 6 différents problèmes d'optimisation: minimum du poids, minimum du prix de revient, optimisation des rangées types, choix optimal parmi différents matériaux de construction, distribution optimale des capacités de construction possibles, la combinaison optimale des capacités de construction. Le pont en arc sur la Vltava sert comme exemple pour 2 solutions d'optimisation.