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

Band: 8 (1968)

Artikel: Optimierung von Tragwerken

Autor: Courbon, J.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-8693

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 15.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Ic

Optimierung von Tragwerken

J. COURBON
Prof., Paris

Die Optimierung eines Tragwerks beruht darauf, daß dieses Tragwerk in Hinsicht auf einen genau definierten Zweck möglichst wirtschaftlich geplant und ausgeführt wird. Dabei muß der Sicherheitskoeffizient des Tragwerks gegeben sein. Dieser Punkt bereitet bereits Schwierigkeiten, müssen doch verschiedene Entwürfe für dasselbe Tragwerk, unter Verwendung von Baumaterialien mit sehr verschiedenen Eigenschaften, miteinander verglichen werden. Zur Bestimmung der Kosten müssen selbstverständlich die Lebensdauer des Tragwerks, seine Instandhaltung und seine Anpassungsfähigkeit an voraussichtliche Abänderungen des ursprünglichen Zweckes mit veranschlagt werden. Solche Abänderungen ergeben sich für Brücken zum Beispiel aus Gewichts- und Geschwindigkeitszunahmen der Lastenzüge, für Rollbahnen aus der Gewichtszunahme der Flugzeuge und für Hafenanlagen aus der Vergrößerung der Schiffsabmessungen.

Die Kosten des Tragwerks hängen von zahlreichen Faktoren ab; einerseits von gegebenen Größen und anderseits von Veränderlichen, die so gewählt werden müssen, daß das Tragwerk möglichst wirtschaftlich wird. Die gegebenen Größen können eingeteilt werden in:

A. Allgemeine Gegebenheiten

A 1. Eigenschaften und Preise der verfügbaren Materialien im Zeitpunkt der Tragwerkerstellung.

A 2. Die Kenntnis des mechanischen und physikalischen Verhaltens dieser Materialien, die sich in Sicherheitskriterien und mathematischen Schemen ausdrücken und die auch die Bemessung des Tragwerks ermöglicht.

B. Besondere Gegebenheiten des zu untersuchenden Tragwerks

B 1. Die gegebenen geometrischen Größen, vor allem die vorgeschriebenen Abmessungen des Tragwerks, wie zum Beispiel der Lichtraum, der unter einer Brücke sowohl während des Baues als auch nach der Ausführung vorgesehen werden muß.

B 2. Mechanische und andere Beanspruchungen (zum Beispiel infolge Temperatur). Dabei muß zwischen Beanspruchungen, die durch ein System gegebener äußerer Kräfte, die nicht im Gleichgewicht sind, verursacht werden, und solchen Beanspruchungen, die zu einem Eigenspannungszustand führen, unterschieden werden.

B 3. Die geographischen Gegebenheiten, die sich vor allem in den Transportpreisen, Personalkosten, aber auch zum Beispiel in der Beschaffenheit des Baugrundes ausdrücken.

B 4. Die Bauzeit. Wenn sie nicht eingehalten wird, muß man die Bauzinsen berücksichtigen und die aus der verspäteten Inbetriebnahme resultierenden Schäden schätzen.

B 5. Möglicherweise auch die Ästhetik des Tragwerks.

C. Die dem Ingenieur zur Bestimmung überlassenen Veränderlichen sind im wesentlichen:

C 1. Wahl der Baustoffe: Stein, Holz, Stahl, Beton, Stahlbeton, Spannbeton usw.

C 2. Wahl des Tragwerks.

C 3. Die Art der Ausführung des Tragwerks, einschließlich des grundsätzlichen Problems, der Verbindungen und des Bauverfahrens.

Wenn es sich um eine Brücke handelt, ist die Wahl des Baustoffs und des Tragwerks verhältnismäßig einfach, weil der Ingenieur aus der Erfahrung vieler Bauwerke weiß, welche Möglichkeiten in die engere Wahl kommen. Handelt es sich dagegen um Industriebauten, bei denen meist mehrere Bau- und Maschinenzweige zusammenarbeiten müssen, so wird das Problem wesentlich komplizierter. Nehmen wir zum Beispiel einen Behälter für einen Atomreaktor: Wenn man diesen Behälter in Spannbeton ausführt, muß man den Beton isolieren und abkühlen, um die durch das Temperaturgefälle verursachten Spannungen zu vermindern. Die Optimierung hat also hier über die Summe der Kosten des Tragwerks, der Isolierung und des Abkühlsystems – variable Kosten also, je nachdem welches Temperaturgefälle man bestehen läßt – zu erfolgen.

Ein anderes Beispiel für die Zusammenarbeit mehrerer Techniken, ebenfalls aus dem Bereich der Atomreaktoren: Durch die Verminderung ihres Raumbedarfes konnten die Wärmeaustauscher innerhalb des Behälters angebracht werden, also wesentliche Vereinfachungen und Einsparungen erreicht werden.

Ganz allgemein muß es sich also immer um eine Gesamtoptimierung handeln. Jede Technik muß den übrigen ihr Problem stellen und sagen: «Das und das halte ich für das günstigste. Habt ihr einen andern Vorschlag oder um wieviel teurer würde diese Lösung euch kommen? Ziehen wir die Bilanz.»

Das Problem der Optimierung, wie wir es hier gestellt haben, ist allgemeiner Natur: Es ist die Aufgabe des Ingenieurberufs schlechthin. Das Können des Ingenieurs wird danach beurteilt, wie gut oder schlecht er dieses Problem löst.

Halten wir fest, daß die Kosten eines Tragwerks immer eine unstetige Funktion der unter C aufgeführten Parameter sind. Sind diese Parameter einmal festgelegt, so beschränkt sich das Problem auf die Bestimmung des Minimums einer stetigen Funktion einer oder mehrerer Veränderlicher. Das sind zum Beispiel die klassischen Probleme der Träger oder Stützen gleicher Festigkeit, der Bestimmung von Tragwerken mit minimalem Gewicht oder minimaler Formänderungsenergie.

Allerdings ist die Lösung dieser besonderen Probleme im Grund nur von untergeordneter Bedeutung, denn einerseits werden dabei nur geringfügige Einsparungen erzielt, und anderseits ist sehr oft das so ermittelte Tragwerk zu teuer oder seiner großen Komplexität wegen unausführbar. Dagegen erlauben gut durchdachte Entwürfe bei Ausnützung der vorhandenen Einrichtungen und der Ausrüstung oft theoretisch befriedigende Tragwerke ohne eine Erhöhung des Einheitspreises. Man muß einen Vergleich ziehen zwischen zu weit gehender Vereinfachung der Formen und den zusätzlich erforderlichen Kosten, im Fall von Beton zum Beispiel infolge verfeinerter Schalung und anspruchsvollerer Ausführung. Dieses Vorgehen ist besonders am Platz, wenn viele gleiche Elemente ausgeführt werden müssen.

Diejenigen Faktoren, von denen die Kosten in erster Linie abhängen, sollten besonders eingehend untersucht werden. Es handelt sich unter den gegebenen Größen um die Parameter A 1 und unter den Veränderlichen um die Parameter C 2 und C 3, weshalb zuerst diese wesentlichen Punkte betrachtet werden.

1. Verbesserung der Qualität der Materialien und Erforschung neuer Materialien

Zwei Faktoren haben besondere Bedeutung für die Verbesserung der Qualität der Materialien: erstens die Erhöhung der mechanischen Eigenschaften (Festigkeit und Dehnung) und zweitens die Verminderung der Streuung dieser Eigenschaften. Dadurch ist es möglich, höhere zulässige Spannungen zuzulassen, ohne daß die Sicherheit vermindert wird. Die Druckfestigkeit des Betons hat bisher ständig zugenommen, und in den nächsten Jahren werden sicher noch große Fortschritte zu verzeichnen sein. In den letzten zehn Jahren hat dank der Vorspannung die Bruchspannung der Spanndrähte um ungefähr 20% zugenommen, ohne daß dabei die Verformungsfähigkeit reduziert worden wäre – ganz im Gegenteil.

Wie wichtig die Erforschung neuer Materialien ist, zeigt die phantastische Entwicklung des Spannbetons in den letzten dreißig Jahren. Der Spannbeton stellt tatsächlich ein neues Material dar, das die Ausführung von Tragwerken, die ein verschiedenartiges mechanisches Verhalten aufweisen, ermöglicht. Aber

das ist nicht das einzige Beispiel: Immer häufiger werden Leichtbetons verwendet, wodurch das Eigengewicht vermindert werden kann, und in nächster Zukunft werden bestimmt Betons auf Kunstharzbasis, die ausgezeichnete Festigkeiten sowohl auf Druck wie auf Zug aufweisen, verwendet werden.

2. Materialkenntnis, Sicherheitskriterien und Berechnungsmethoden

Die gesamte Berechnung von Tragwerken beruhte lange Zeit auf dem Hookeschen Gesetz (elastische Betrachtungsweise). Das Sicherheitskriterium war durch die Begrenzung der Spannung gegeben, ohne weitere Berücksichtigung der Verformungen.

Die heutigen großen Fortschritte verdanken wir der Tatsache, daß auf Grund der Plastizitätstheorien unelastische Verformungen mit in Betracht gezogen wurden. Nur mit Hilfe dieser Theorien kann man dem Spannungsausgleich in den Trägerquerschnitten Rechnung tragen und im Fall von statisch unbestimmten Tragwerken zeigen, daß der Ausgleich der inneren Schnittkräfte diesen Tragwerken eine höhere Tragfähigkeit gewährleistet, als die Elastizitätstheorie glauben ließe.

Durch die Untersuchung der unelastischen Verformungen war es möglich, neue mathematische Berechnungsmodelle zu schaffen, zum Beispiel das steifplastische Modell, das elastoplastische Modell, das visco-elastische Modell usw., die eine bessere Darstellung der wirklichen Phänomene geben als die elastischen Modelle. – Selbstverständlich sind diese Modelle je nach Material, das zu untersuchen ist, verschieden. Allerdings ist unsere Kenntnis der unelastischen Verformung noch ungenügend, vor allem wenn diese Verformungen zeitabhängig sind. Die Forschungen über die Zusammenhänge zwischen Spannungen und Verformungen müssen fortgesetzt werden, damit der Ingenieur das tatsächliche Verhalten eines Tragwerks besser vorausbestimmen kann. – Ein wichtiges und noch nicht in befriedigender Weise gelöstes Problem ist das der zeitabhängigen Entwicklung der Spannungen in einem statisch unbestimmten Tragwerk aus Stahl- oder Spannbeton.

Die Plastizitätstheorien finden ihre einfachste Anwendung in der Berechnung der Traglasten der Tragwerke. Diese Berechnungsweise hat gegenüber der auf dem Hookeschen Gesetz beruhenden den Vorteil, daß sie einen genaueren Näherungswert des Sicherheitskoeffizienten liefert. So haben auch die Ingenieure und die Normen die Notwendigkeit einer Kontrolle der Bruchsicherheit von Trägern in Spannbeton erkannt. Warum führt man sie nicht auch für Betonbrücken durch, bei denen doch ganz ähnliche Voraussetzungen vorliegen? Nur aus Gewohnheit, in Erinnerung der Zeiten, wo allein die Elastizitätstheorien als maßgebend erachtet wurden.

Allerdings darf der Ingenieur nie die Bedingungen vergessen, die notwendig sind, damit die Berechnung der Traglasten richtige Ergebnisse liefert. In erster

Linie müssen die Verformungen klein gehalten werden; für gewisse Tragwerke muß unbedingt eine Verformungsgrenze festgelegt werden. Daneben ist zu beachten, daß im Fall von veränderlichen Beanspruchungen die Traglastberechnung oft zu einer Überschätzung der Tragfähigkeit führt. Das verallgemeinerte Ausgleichstheorem erlaubt eine genaue Berechnung von statisch unbestimmten Systemen mit veränderlicher Belastung. Der Wortlaut des Theorems, das mittels der Hypothese kleinster Verformungen aufgestellt wurde, lautet:

«Falls für ein gegebenes Tragwerk der Spannungszustand, resultierend aus einer Überlagerung:

a) des elastischen Spannungszustandes infolge der veränderlichen äußeren Kräfte und
b) eines unveränderlichen Eigenspannungszustandes, der als Ausgleichszustand bezeichnet wird,

sich innerhalb des elastischen Bereichs befindet, bleibt dieses Tragwerk stabil und die Eigenspannungen streben den Ausgleichsspannungen zu.»

Übrigens kann der Ausgleich durch Vorverformung, die zu einer Vorauskompensierung führt, erleichtert werden.

Ein wichtiges Problem für die Optimierung von Tragwerken ist das folgende: Wie kann man in den Sicherheitskriterien den Spannungen Rechnung tragen, die durch einen Zwängungszustand verursacht sind, der zum Beispiel durch Temperatur, Kriechen oder Fließen hervorgerufen wird? Sollen sie einfach zu den Spannungen gezählt werden, die durch die Einwirkung eines Systems äußerer Kräfte entstehen? Wir glauben nicht, aber das Sicherheitskriterium ist hier noch nicht gefunden worden. Als Beispiel seien Betonbogen angeführt, wo das Kriechen und die Temperatur zu hohen Spannungen führen können, und vor allem die Behälter für Atomreaktoren in Spannbeton, wo die thermischen Spannungen eine starke Erhöhung der Vorspannung nötig machen. Zudem müssen die zyklischen Veränderungen besonders beachtet werden, da ein großer Unterschied besteht zwischen einem stationären Zwängungszustand und Zwängungszuständen, die sich aus veränderlichen Beanspruchungen ergeben.

3. Erforschung neuer Tragwerke

Obwohl es nicht so aussieht, sind noch viele neue Tragwerke zu erfinden. Der Ingenieur, der ein Projekt untersucht, soll seine Erfindungsgabe unter Beweis stellen und sich vor allem vor der Routine hüten, die nachahmt, ohne zu verbessern. Warum werden zum Beispiel immer noch Ständerfachwerke erstellt, wo doch das Strebenfachwerk wirtschaftlicher ist? Wie kommt es, daß man erst jetzt seilverspannte Brücken gebaut hat, die wirtschaftlicher und sicherer sind als die klassischen Hängebrücken mit parabolischer Kabelform?

Sehr häufig ergibt sich die Erforschung neuer Tragwerke aus der Verbesserung der Bautechnik. Die Entwicklung der Schweißtechnik hat die Herstellung

dreidimensionaler Stahltragwerke ermöglicht und das Freivorbauverfahren die Ausführung neuartiger Brückensysteme in Spannbeton.

Die Schalen stellen ein riesiges Forschungsfeld dar. Hier spielt die Erfahrung eine wichtige Rolle und ermutigt zu kühneren Konstruktionen, trotz den noch schlecht bekannten Phänomenen, wie zum Beispiel das Durchschlagsproblem der Schalen. Diese Erfahrung wird auf zwei Arten gewonnen: Sie ist einmal die Erfahrung des Ingenieurs, der, weil er ein Bauwerk erstellt und erprobt hat, weiß, daß er noch weiter gehen kann, und sie ist die Erfahrung des Forschungsinstitutes, gewonnen aus Modellversuchen, und zwar trotz den schwierigen Problemen der Ähnlichkeit.

4. Verbesserungen der Bautechnik

Wir müssen unterscheiden zwischen Verbindungen und den eigentlichen Bauverfahren.

Zahlreiche Beispiele zeigen, daß die Verbindungen einen Hauptfaktor für die Wirtschaftlichkeit eines Tragwerks darstellen. – Heute braucht man für Holzkonstruktionen, zum Beispiel für das Lehrgerüst eines großen Bogens, dreimal weniger Holz als vor fünfzig Jahren. Diese Einsparung beruht ausschließlich auf der Entwicklung neuer Verbindungen: Nagelverbindungen, die Zugkräfte übertragen können, Betonknoten, die die Enden der Holzfasern zusammenfügen und Zugkräfte übertragen. Tragwerke in verleimter Holzbauweise (Hetzer-Bauweise) haben die wirtschaftliche Ausführung großer Überdachungen möglich gemacht. Die Vorspannung ist das einzig befriedigende Verfahren für die Verbindung großer vorgefertigter Betonelemente: Daß neuerdings große Brücken aus vorgefertigten Elementen ausgeführt worden sind, zeigt die Vorteile dieses Verfahrens in bezug auf schnelle und gute Arbeitsausführung und in bezug auf seine Wirtschaftlichkeit. Auf dem Gebiet der Stahlkonstruktionen bringt das Aufkommen hochfester Schrauben schnelles und billiges Verbinden großer fabrikgeschweißter Elemente auf der Baustelle mit sich. Dank der Fortschritte in der Schweißtechnik konnten sich die leichten und wirtschaftlichen Stahlrohrkonstruktionen entwickeln.

Aber entwerfen allein genügt noch nicht, man muß auch bauen. Das angewendete Bauverfahren ist für die Wirtschaftlichkeit eines Bauwerks von ganz erheblicher Bedeutung. Als Beispiele seien die Entwicklung der Vorfabrikation, die Anwendung von Gleitschalungen, des Freivorbaus vorgespannter Brücken und die großen Fortschritte in der Fundationstechnik genannt. Der Ingenieur muß bereits beim Entwerfen stets an die Ausführung seines Projekts denken, er muß auf leichte Ausführbarkeit, die Zeit- und Geldgewinn bedeutet, bedacht sein und sich vor allem davor hüten, unter dem Vorwand von Materialeinsparungen knauserig zu werden.

Obenstehende Ausführungen zeigen, wie vielseitig der Ingenieur sein muß, wenn er das beste Projekt eines Tragwerks zustande bringen soll. Wollte er die

von ihm getroffene Lösung mit absoluter Sicherheit beurteilen, so müßte er alle überhaupt in Frage kommenden Lösungen untersuchen, bauen und benützen, das heißt, er müßte auf Versuche zurückgreifen. Das ist eine Möglichkeit und in dem Falle, wo ein gleiches Element sehr oft ausgeführt werden muß, zum Beispiel vorgespannte Betonmasten für elektrische Freileitungen, die beste Lösung des Problems der Optimierung.

Bei großen Tragwerken dagegen muß der Ingenieur die Lösung à priori beurteilen. Dabei wird er mit Ausnahme sehr einfacher oder altbekannter Tragwerke auf Probleme stoßen, die sich rechnerisch nicht lösen lassen, weil die Berechnung keine neue Lösung kreiert, sondern einzig Hypothesen umformt. Unterschätzen wir jedoch die Bedeutung von elektronischen Rechenmaschinen für die Berechnung der Tragwerke nicht: Nur durch sie konnten bestimmte Fragen restlos geklärt werden. Sie haben unter anderem den Vorteil, daß sie den Ingenieur von einer mühsamen Arbeit befreien und ihm dafür Zeit geben für den Entwurf, die kritische Untersuchung der Hypothesen, die Schätzung des Sicherheitsgrades und die Ausführung.

Weil der Ingenieur seine Probleme nicht mit Hilfe von Berechnungen lösen kann, ist er darauf angewiesen, einen oder mehrere Modellversuche eines Tragwerks oder einzelner Tragwerkteile durchzuführen. Dabei sollte das Material des Modells dieselben mechanischen und physikalischen Eigenschaften aufweisen wie das Material des Tragwerks, sonst bleiben die Versuche, wie bei der Photoelastizität, nur ein Mittel analoger Berechnungen. Modellversuche haben bereits sehr gute Dienste geleistet bei der Untersuchung von Bogenstaumauern, dünnen Schalen und Behältern für Atomreaktoren.

Kurz gesagt, die Optimierung muß aus der Erfahrung und der genauen Kenntnis der mechanischen und physikalischen Eigenschaften der Materialien hervorgehen. Wenn in nächster Zukunft wesentliche Fortschritte in der Wirtschaftlichkeit der Tragwerke gemacht werden sollen, müssen noch mehr Versuchsanstalten für Tragwerke entstehen. Diese Versuchsanstalten hätten eine doppelte Aufgabe: Sie müßten sich einerseits der grundlegenden Untersuchung der Eigenschaften der Materialien widmen und anderseits Modellversuche durchführen. Was den Ingenieur betrifft, so sollte er in erster Linie danach trachten, seine schöpferische Phantasie in bezug auf Entwurf und Ausführung unter Beweis zu stellen.