

# Über die Bedeutung von Gleichgewichtsbetrachtungen im Massivbau

Autor(en): **Marti, Peter**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **101 (1983)**

Heft 7: **Prof. Dr. Bruno Thürlimann zum 60. Geburtstag II.**

PDF erstellt am: **08.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-75071>

## **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.

# Über die Bedeutung von Gleichgewichtsbetrachtungen im Massivbau

Von Peter Marti, Toronto

## Einleitung

Obwohl der mit der rasanten Computerentwicklung in den letzten beiden Jahrzehnten verbundene Ausbau der Baustatik eigentlich das Gegenteil hätte ermöglichen sollen, hat sich das Schwergewicht der Tätigkeit des Massivbauingenieurs mehr und mehr vom Entwerfen und Konstruieren zum Berechnen verlagert. Anstatt sich bei der Berechnung auf das Notwendige zu beschränken und dieses mit einem gezielten Einsatz der modernen Hilfsmittel mit möglichst geringem Aufwand zu erreichen, werden vielfach mit sehr detaillierten Analysen beeindruckende Mengen von Resultaten produziert. Es wird häufig nicht erkannt, dass derartige Resultate zu einem Teil gar nicht nötig und oft auch nicht zureichend sind, da sie auf recht einseitigen Berechnungen beruhen.

In krassem Gegensatz zu den oft übertriebenen Berechnungen steht die Tatsache, dass die konstruktive Durchbildung über weite Bereiche aufgrund von mehr oder weniger willkürlichen Regeln vorgenommen wird. In der Lehre wird «Konstruktives» allzuoft als Anhängsel an theoretische Erwägungen dargeboten, ohne das Ganze auf eine gemeinsame vernünftige Basis zu stellen. Dies ist von geringem erzieherischem Wert und kann zu gefährlichen Fehlern führen.

Die namentlich in den letzten beiden Jahrzehnten unternommenen Anstrengungen, Problemstellungen des Massivbaus durch Anwendung von Methoden der Plastizitätstheorie zu behandeln, haben nicht nur zu einer bemerkenswerten Reihe direkt anwendbarer Ergebnisse geführt, sondern vor allem auch dazu, die grundlegende Bedeutung der alten Forderung nach konsequent durchgedachten Gleichgewichtszuständen neu hervorzuheben. Diese noch keineswegs abgeschlossene Entwicklung ist sehr vielversprechend, weil sie dazu beitragen kann, die heute bestehende Kluft zwischen Berechnung und konstruktiver Durchbildung zu überbrücken.

Die für Gleichgewichtsbetrachtungen im Massivbau erforderlichen Hilfsmittel sind andernorts beschrieben worden [1, 2]. Die wichtigsten sind drei Grund-

elemente zur Erzeugung von statisch zulässigen Spannungsfeldern im Beton, nämlich Streben, Strebenverbindungen und Auffächerungen von Streben. Einige der Überlegungen, die hinter den erwähnten Arbeiten gestanden sind, werden mit den folgenden Bemerkungen über konstruktiven Ingenieurbau, Baustatik und Plastizitätstheorie zusammengefasst.

## Konstruktiver Ingenieurbau

Der im konstruktiven Ingenieurbau tätige Ingenieur befasst sich mit dem Entwurf, der Projektierung und der Erstellung von neuen und mit der Überprüfung und dem Umbau von bestehenden Tragwerken. Die Tragwerke müssen bei angemessenem Aufwand an Mitteln ausreichend tragfähig ausgebildet werden und genügend steif und dauerhaft sein.

Die Arbeit des Ingenieurs bewegt sich innerhalb eines Systems von Verträgen, gesetzlichen Vorschriften, Normen und Richtlinien, die alle dazu dienen, die vielfältigen Beziehungen zwischen den am Bau Beteiligten zu ordnen und die Interessen der Öffentlichkeit zu schützen. Der Ingenieur stützt sich bei seiner Arbeit auf seine Ausbildung und Erfahrung und namentlich auch auf die in Normenwerken niedergelegten sogenannten «anerkannten Regeln der Baukunst».

In den verschiedenen Phasen des Entwurfs und der Projektierung ist die Arbeit des Ingenieurs gekennzeichnet durch einen im allgemeinen mehrmals sich wiederholenden Ablauf des Vorbereitens und Fällens von Entscheidungen, mit denen im Rahmen der Problemstellung die noch freien Abmessungen und die Konstruktion eines Tragwerks sukzessive festgelegt werden. Mit zunehmender Konkretisierung vom ersten Entwurf bis zum endgültigen Projekt nimmt der Entscheidungsspielraum ständig ab. Im endgültigen Projekt werden aufgrund der einzelnen Bemessungsentscheide verbindliche Anordnungen für die Realisierung in der Form von Plänen, Listen und Arbeitsverzeichnissen ausgearbeitet. Beim Bau kontrolliert der Ingenieur die Durchführung der Anordnungen, leitet gegebenenfalls notwendige Korrekturmaß-

nahmen ein und sorgt für deren Durchsetzung.

Für die einem Bemessungentscheid vorangehende Beurteilung benützt der Ingenieur Methoden der Baustatik. Bei der Wahl dieser Methoden richtet er sich nach deren Zweck und nach dem im Rahmen der gesamten Problemstellung erforderlichen Mass an Übereinstimmung mit der Wirklichkeit. Der Ingenieur versucht, durch geschickte Abgrenzung und Idealisierung der Tragwerke die Problemstellungen in möglichst einfache, aber aussagekräftige Aufgaben der Baustatik überzuführen. Er interpretiert die Lösungen dieser Aufgaben, indem er sie mit seiner Erfahrung, seinem Wissen und Können in Zusammenhang bringt, und beurteilt damit die vorhandenen Unsicherheiten im Hinblick auf die möglichen Folgen. Gegebenenfalls modifiziert er seine ersten Annahmen und wiederholt das Vorgehen.

## Baustatik

Die Baustatik ist ein nach den besonderen Bedürfnissen des Ingenieurs ausgestaltetes Teilgebiet der Mechanik. Sie ist ein Hilfsmittel zur Beurteilung eines Tragwerks in bezug auf Tragfähigkeit und Steifigkeit. Sie dient der Erfassung des Kräftespiels im Gleichgewichtszustand und liefert Grundlagen für die konstruktive Durchbildung.

Bei einer Problemstellung im Rahmen der Mechanik soll im allgemeinen der ganze Spannungs- und Verformungszustand im betrachteten Körper bestimmt werden. Im Gegensatz dazu interessiert man sich in der Baustatik im Blick auf die praktische Anwendung im Einzelfall lediglich für die hauptsächlichsten Aspekte davon. Meistens genügen Antworten auf Teilfragen. Der besondere Charakter der Baustatik innerhalb der Mechanik zeigt sich ferner in speziell entwickelten, für die numerische Lösung im Einzelfall geeigneten Methoden.

Baustatische Probleme werden in statischen und kinematischen Grössen formuliert. Ihre Lösung beruht auf den Gleichgewichtsbedingungen, den kinematischen Beziehungen und den Stoffgleichungen. Gleichgewichtsbedingungen und kinematische Beziehungen sind allgemein gültig. Unterschiedliche Annahmen über das Materialverhalten führen dagegen zu verschiedenen Stoffgleichungen und damit zu verschiedenen Teilgebieten der Baustatik.

Bis heute wird im Rahmen der Baustatik vorwiegend die Elastizitätstheorie

herangezogen. Weit weniger verbreitet ist die Anwendung der Plastizitätstheorie.

Die Computerentwicklung hat die Baustatik ausserordentlich stark beeinflusst. Einerseits ist die Lösung von sehr grossen baustatischen Problemen ermöglicht worden. Andererseits hat die Entwicklung entsprechender Lösungsverfahren zu einer nützlichen Vereinheitlichung in der Darstellung von baustatischen Problemen und Lösungsverfahren geführt.

Angesichts der leichten Verfügbarkeit und der verlockenden Anwendungsmöglichkeiten der modernen Hilfsmittel für die numerische Behandlung baustatischer Probleme bleibt zu bedenken, dass sie nur für einen Teil der Arbeit des Ingenieurs wertvolle Dienste leisten. Sinnvolle Einsatzmöglichkeiten ergeben sich vor allem in den mittleren Phasen der Projektierung, als ergänzende Kontrollen und als Grundlage für die definitive Fixierung der im Entwurf und in den frühen Phasen der Projektierung bereits innerhalb bestimmter Schranken festgelegter Bemessungsgrössen. Für die anfänglichen, hinsichtlich der Sicherstellung der Tragfähigkeit äusserst wichtigen Entscheide stützt sich der Ingenieur zweckmässigerweise auf einfache Abschätzungen, indem er versucht, sein Problem im Sinne einer Eingabelung von mehreren Seiten unter der Annahme unterschiedlicher Voraussetzungen in den Griff zu bekommen. Dafür und für eine vernünftige Interpretation der Ergebnisse umfangreicher Berechnungen werden einfache baustatische Betrachtungen auch in Zukunft ausserordentlich wertvoll sein. Speziell in dieser Hinsicht und im Hinblick auf die immer notwendiger werdende gedankliche Einordnung einzelner Methoden in einer umfassenderen Betrachtungsweise kann eine vermehrte Orientierung der Baustatik an der Plastizitätstheorie nur hilfreich sein.

## Plastizitätstheorie

Die Plastizitätstheorie gestattet die Berechnung von Traglasten von Systemen und damit die Beurteilung des Widerstandes von Tragwerken beziehungsweise der Gefahr ihres Versagens. Einfache und leistungsfähige Verfahren stehen zur Verfügung, die dem Denken und den Bedürfnissen des durch theore-

tisches Wissen und praktische Erfahrung gleichermaßen geschulten Ingenieurs naheliegen.

Wesentlich ist die Erkenntnis, dass in einem elastisch-plastischen System für eine bestimmte Belastung ausser dem einzigen, elastisch verträglichen Spannungszustand weitere Spannungszustände möglich sind, die sich durch Überlagerung von Eigenspannungszuständen aus der elastischen Lösung ergeben. Der wirkliche Spannungszustand wird infolge Zwängungen, die stets vorhanden sind, rechnerisch praktisch aber nicht erfasst werden können, immer mehr oder weniger vom elastisch verträglichen Spannungszustand abweichen.

Diese Feststellung ist einerseits ernüchternd. Andererseits ermöglicht sie dem Ingenieur, sich von den zu engen Vorstellungen der elastischen Festigkeitslehre zu lösen, und unterstreicht die Bedeutung einfacher Gleichgewichts-betrachtungen. Anstatt wie zum Beispiel in der elastischen Balkentheorie die Hypothese von Jacob Bernoulli und die Forderungen nach Gleichgewicht und elastischer Verträglichkeit in einen Algorithmus zu verpacken, darf man weitgehend auf die Berücksichtigung kinematischer Beziehungen verzichten und mit grosser Freiheit verschiedene mögliche Gleichgewichtszustände untersuchen.

Mit der weitgehenden Befreiung von kinematischen Erwägungen wird der Ingenieur instand gesetzt, seine Betrachtungen im grossen und im kleinen, die Berechnung und die konstruktive Durchbildung, auf eine gemeinsame Basis zu stellen. Diese Basis ist das Gleichgewicht, das systematische Verfolgen des Kräfteflusses.

Es soll nicht verschwiegen werden, dass das Arbeiten nach der sogenannten statischen Methode der Plastizitätstheorie allein nicht vollständig ausreichend ist. Nicht alle möglichen Gleichgewichtszustände sind gleich vernünftig, und bei blinder Anwendung besteht auch hier die Gefahr, dass unsinnige Resultate produziert werden. Ferner werden gegen eine umfassendere Anwendung der Plastizitätstheorie im Massivbau ernstzunehmende Einwände hinsichtlich des Verhaltens des Betons vorgebracht, die nicht leichtfertig aus dem Weg geräumt werden dürfen.

Es ist jedoch zu bemerken, dass die Forderung nach einem konsequent durchgedachten und möglichst in graphi-

scher Form dargestellten Gleichgewichtszustand im ganzen Tragwerk eine harte Forderung darstellt. Wenn diese Forderung wirklich ernst genommen und mit einer Portion gesunden Ingenieurverstandes verbunden wird, dürfte sie, auch wenn Verträglichkeitsbedingungen nicht direkt berücksichtigt werden, in den meisten praktischen Fällen zu sicheren und damit genügenden Lösungen führen. Unter Beachtung bestimmter Vorsichtsmassnahmen kann ein ausreichendes Anpassungsvermögen und damit die erforderliche Umlagerung der inneren Kräfte sichergestellt werden. Allenfalls können dazu in einem zweiten Schritt die rein statischen mit kinematischen Betrachtungen ergänzt werden.

Die Forderung, den Kraftfluss konsequent zu verfolgen und durch eine entsprechende Bemessung und konstruktive Durchbildung auch sicherzustellen, ist alt. Mit der grossen Verbreitung und den vielen erfolgreichen Anwendungen, welche die Elastizitätstheorie gefunden hat, ist sie aber etwas in den Hintergrund gedrängt worden. Das Interesse galt mehr den entsprechenden Lösungsverfahren. Auch heute, vielleicht noch in ausgeprägterem Masse als früher, besteht die Gefahr, dass die grundlegende Bedeutung der Forderung nach Gleichgewicht nicht in der wünschbaren Schärfe erkannt wird. Es sei deshalb zum Schluss an einen Ausspruch von Robert Maillart erinnert [3]: «Eine ganz einfache Berechnungsweise ist also einzig möglich und genügend. Die vernünftige Beurteilung ihrer Resultate ergibt jedenfalls eine Konstruktion von gleichmässigerer Sicherheit als die strikte, aber gedankenlose Anwendung einer mit allen Feinheiten ausgestatteten Rechenmethode.»

### Literatur

- [1] *Marti, P.* (1980): «Zur plastischen Berechnung von Stahlbeton». Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Bericht Nr. 104, Birkhäuser-Verlag Basel und Stuttgart, 176 S.
- [2] *Thürlimann, B.* und *Marti, P.* (1981/1982): «Plastizität im Stahlbeton». Vorlesungsautographie, Abteilung für Bauingenieurwesen, ETH Zürich
- [3] *Maillart, R.* (1938): «Aktuelle Fragen des Eisenbetonbaus». Schweizerische Bauzeitung, Bd. 111, Heft 1, S. 1-5

Adresse des Verfassers: Dr. P. Marti, Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto (Ontario) M5S 1A4.