

**Zeitschrift:** Schweizerische Bauzeitung  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 71 (1953)  
**Heft:** 9: Sonderheft zum Geburtstag von Prof. Dr. E. Meyer-Peter. 2. Teil

**Artikel:** Ueber einige neue Untersuchungsmethoden mit besonderer Anwendung auf Gewichts-Staumauern bei nachgiebigem Baugrund  
**Autor:** Lardy, Pierre  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-60506>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 16.05.2025

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

## Zweiter Teil des Sonderheftes zum Geburtstag von Prof. Dr. E. Meyer-Peter

## Ueber einige neue Untersuchungsmethoden mit besonderer Anwendung auf Gewichts-Staumauern bei nachgiebigem Baugrund

Von Prof. Dr. PIERRE LARDY, ETH, Zürich

DK 627.82.04

## 1. Einführung

Im Zusammenhang mit dem Bau von neuen Gewichtsstaumauern in der Schweiz veranlasste Prof. Dr. E. Meyer-Peter, Direktor der Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau an der ETH, den Verfasser dieses Beitrages, neue Untersuchungen über Gewichtsstaumauern an seinem Institut für Baustatik und Massivbau an der ETH durchzuführen.

Von den Problemen, die untersucht wurden und noch weiter in Behandlung stehen, soll im folgenden als Beispiel dasjenige des Einflusses der Nachgiebigkeit des Baugrundes auf den Spannungs- und Formänderungszustand einer Gewichtsstaumauer in kurzer Fassung dargelegt werden, wobei, im engen Rahmen dieser Veröffentlichung, nicht so sehr die einzelnen Berechnungsstufen als vielmehr die Voraussetzungen, die besondere Art der Schwierigkeiten und die Tragweite der einzelnen Methoden gezeigt werden sollen.

## 2. Ueberblick über die modernen Untersuchungsmethoden

Dem Bauingenieur stehen heute zwei grosse Gebiete der Untersuchungsmethoden zur Verfügung:

## A. Die Berechnungsmethoden

## a) Strenge analytische Methoden der Elastizitätstheorie

Zu den hervorragenden Vorzügen dieser Methoden gehören vor allem ihr Charakter der Allgemeingültigkeit (im Gegensatz zu den experimentellen Methoden der Modellmessung), die bemerkenswerte Uebereinstimmung der Ergebnisse mit dem Verhalten des Tragwerkes im Gebrauchszustand (auch bei Beton) sowie die Tatsache, dass Lösungen auf dieser Grundlage wohl das beste Kriterium für die Möglichkeit und Tragweite aller Arten von Näherungsberechnungen bilden.

Als Nachteile sind vor allem die grossen Schwierigkeiten mathematischer Natur zu werten, die auftreten, sobald das Problem Randbedingungen aufweist, die nicht mehr einfach sind und damit den Arbeitsaufwand untragbar oder gar illusorisch gestalten. Daher sind Untersuchungsmethoden notwendig, die in vielen Fällen dem Problem besser angepasst sind als die strengen analytischen Verfahren.

## b) Numerische Methoden der angewandten Mathematik

In den letzten Jahren ist in diesem Gebiet ein grosser Aufschwung zu verzeichnen, der sowohl im Rahmen der eigentlichen Baustatik wie besonders auch in der Aufstellung neuer rein numerischer Methoden offensichtlich wird.

Eine der neuesten Entwicklungsstufen ist durch den engen Zusammenhang numerischer Methoden mit dem Gebrauch von modernen Rechenmaschinen deutlich charakterisiert und heute bei weitem noch nicht abgeschlossen. Dabei werden Lösungen gewonnen, die auf anderem Wege undenkbar sind.

## c) Elasto-plastische Berechnungsmethoden

Es liegen einige Ansätze vor («Bruchlinientheorie»), die eine bessere Erfassung der Sicherheit sowie der Bemessung im Eisenbeton zum Ziele haben.

## B. Die experimentellen Methoden (Modellmessung)

Infolge grosser Fortschritte in der Messtechnik, wo die Messungen auf elektrischer und optischer Grundlage immer mehr an Bedeutung gewinnen, ist die experimentelle Methode der Modellmessung heute bereits von bemerkenswerter Tragweite. Die Beobachtung ersetzt hier die Berechnung, wobei die Interpretation der Messergebnisse mit grösster Sorgfalt gehandhabt werden muss. Der Hauptvorteil der Methode ist die weitgehende Anpassung des Modells an die wirklichen Verhältnisse des Tragwerkes, wobei als besonders günstig bewertet werden kann, dass die Untersuchung in vielen Fällen durchgehend, d. h. über den elastischen und elasto-plastischen Zustand bis zum Bruch durchgeführt werden kann.

Allerdings kann mit der Modellmessung keine Lösung «allgemeinen Charakters» erstrebt werden; im Gegensatz zur analytischen Berechnung kann hier immer nur der Sonderfall untersucht werden.

Es besteht kein Grund, in der Wahl der Untersuchungsmethoden einseitig vorzugehen; im Gegenteil bieten die verschiedenen Methoden hervorragende Ergänzungsmöglichkeiten, die nicht hoch genug eingeschätzt werden können.

## 3. Gewichtsstaumauern bei nachgiebigem Baugrund

## A. Problemstellung und Berechnungsidee

Die früheren Berechnungen fussten auf der Trapezregel, d. h. auf einem nach unten unbeschränkt gedachten Dreieckprofil. Das neue Problem verlangt die Berücksichtigung der tatsächlichen Verhältnisse der Fundation, d. h. der elastischen Einspannung der Mauer-Dreieckscheibe in den Baugrund, der einer elastischen Halbebene gleichgesetzt wird<sup>1)</sup>.

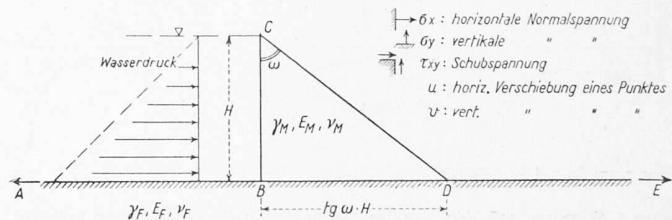


Bild 1. Grundlagen der Berechnung

Berechnungsgrundlage: Mathematische Elastizitätstheorie.

Voraussetzungen: Staumauer-Dreieck: Ebenes Spannungsproblem. Baugrund-Halbebene: Ebenes Formänderungsproblem.

Belastungen: Eigengewicht, verteilt. Wasserdruck bei vollem Becken.

Die Berechnungsidee ist analog derjenigen bei der Berechnung statisch unbestimmter Systeme in der Baustatik.

**Grundsystem:** Dieses entsteht durch Trennung an der Fundamentfuge BD. Es entstehen zwei Teilgebiete: 1. Dreieck der Staumauer; 2. Halbebene des Baugrundes. Es erfolgt die Berechnung des «Grund-Spannungszustandes» im Dreieck und in der Halbebene. Durch die künstliche Trennung entsteht eine Klaffung zwischen Mauer und Baugrund.

**Überzählige Grössen.** Als solche werden in der Trennfuge ein Normalspannungszustand und ein Schubspannungszustand eingeführt ( $\infty^2$  überzählige Grössen!).

**Elastizitätsbedingungen und Elastizitätsgleichungen:** Die überzähligen Grössen sind so zu bestimmen, dass sie zusammen mit dem «Grundspannungszustand» die Klaffung an der Trennfuge wieder rückgängig machen; d. h. die horizontalen und vertikalen Relativverschiebungen der Punkte der Trennfuge müssen alle verschwinden.

Im folgenden werden nur die Hauptgesichtspunkte kurz zusammengefasst.

## B. Durchführung der Berechnung

## a) Analytische Berechnung

Die analytische Berechnung hat die Gleichgewichtsbedingungen, die Verträglichkeitsbedingungen, die äusseren Randbedingungen sowie die Stetigkeitsbedingungen für Formänderungen und Spannungen an der Trennfuge zu berücksichtigen und führt damit zu einem System von partiellen Differentialgleichungen (darunter die Airysche Differentialgleichung) mit  $\infty^2$  Unbekannten.

<sup>1)</sup> T ö l k e, Wasserkraftanlagen, 1938.

Die Hauptschwierigkeit der Berechnung liegt in der Herstellung des Zusammenhanges zwischen den beiden Gebieten: Mauer-Dreieck und Baugrund-Halbebene, die nach ihrer Form und ihren Elastizitätseigenschaften völlig verschieden sind und die somit weder mit gemeinsamen Koordinatensystemen noch mit gemeinsamen Airyschen Spannungsfunktionen charakterisiert werden können.

Eine weitere Schwierigkeit ist die Tatsache, dass die überzähligen Grössen «Eigenspannungszustände» sind und damit zu komplex-imaginären Funktionen führen, die ins Reelle umgedeutet werden müssen. Die überzähligen Grössen werden in unendlichen Reihen angesetzt und die Elastizitätsbedingungen nach der Ritzschen Minimumbedingung als Minimum des Integrals über die quadratischen Abweichungen der Verschiebungen an der Trennfuge formuliert.

Die Durchführung der Berechnung auf dieser Grundlage erfordert einen ausserordentlichen Arbeitsaufwand. Als Gewinn bleibt die Tatsache, dass zahlreiche mathematische Operationen (Auflösung transzendenter Gleichungen, Aufstellung von Funktionsklassen usw.) ein für allemal durchgeführt sind und bei späteren Berechnungen wieder benützt werden können.

Die Ergebnisse sind bemerkenswert; es zeigt sich, dass der Spannungszustand nach der Trapezregel nur in der oberen Hälfte der Mauer gilt und dass im unteren Teil, je näher bei der Fundamentfuge der Spannungszustand untersucht wird, umso grössere Unterschiede mit der Trapezregel auftreten. Charakteristisch sind die grossen Spannungsspitzen mit mittleren Abweichungen von der Trapezregel bis 100% in der Nähe der Fundamentfuge.

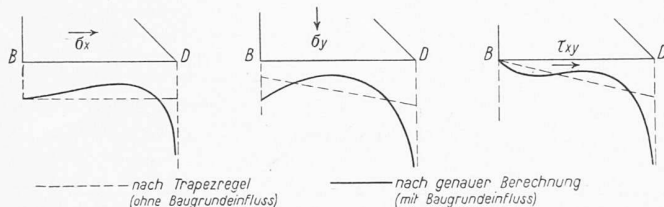


Bild 2. Unterschied der Ergebnisse zwischen herkömmlicher und genauer Berechnung

Die Ergebnisse zeigen, dass die angesetzten unendlichen Reihen nur sehr langsam konvergieren. Dies brachte den Verfasser auf die Idee, das vorliegende Problem mit numerischen Methoden der angewandten Mathematik zu lösen.

#### b) Numerische Untersuchung

Das Ziel der Untersuchung war ein doppeltes: einerseits sollten die analytischen Ergebnisse bestätigt werden, andererseits sollten die Möglichkeit (Arbeitsaufwand, Genauigkeit) und die Tragweite numerischer Methoden erforscht werden.

Als Berechnungsmethode wurde die Differenzenrechnung zu Grunde gelegt, d. h. die Transformation der Differentialgleichungen in Differenzen-Gleichungen durchgeführt, und zwar an einem bestimmten, numerischen Beispiel. Die Trennung von Mauer und Baugrund als Grundsystem wurde wie früher festgelegt, mit dem Unterschied, dass die unendliche Halbebene durch ein genügend grosses Rechteck ersetzt wurde. Die Integration der Differentialgleichungen überträgt sich in der Differenzenrechnung als Auflösung eines Systems von linearen Differenzgleichungen. Daher sind bei solchen Operationen grundsätzlich zwei Probleme zu betrachten: 1. Wahl der «Maschenweite» derart, dass die Genauigkeit (Konvergenz) genügend und der Arbeitsaufwand tragbar bleibt. 2. Wahl des geeignetsten Lösungsverfahrens.

Zahlreiche Ueberlegungen führten zu der von Southwell

begründeten *Relaxationsmethode*, deren Anwendung im Zusammenhang mit der programmgesteuerten Rechenmaschine aus dem Institut für angewandte Mathematik an der ETH erfolgt; dessen Leiter, Prof. Dr. E. Stiefel, hat die Relaxationsmethode bedeutend ausgebaut<sup>2)</sup>.

Für das vorliegende Problem war es notwendig, die Technik der Relaxationsmethode von der Potential- auf die «Bipotential-Gleichung» zu erweitern. Die Methodik dieser Berechnung liegt heute vor<sup>2)</sup> und gehört zu den wertvollen Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung. Durch Einführung von «Einflussfunktionen»<sup>3)</sup> konnte schliesslich die Relaxation im Baugrund-Rechteck vermieden werden, was eine wesentliche Zeitersparnis bedeutete.

Es zeigt sich, dass die Genauigkeit der Ergebnisse mit einem mittleren Fehler von  $\pm 5\%$  völlig genügend ist und dass der Arbeitsaufwand für zukünftige Berechnungen, eingedenk der Bedeutung der vorliegenden Bauwerke, in tragbaren Grenzen gehalten werden kann. Die numerischen Ergebnisse bestätigen diejenigen der analytischen Methode. Die Durchführbarkeit solcher numerischer Berechnungen kann auf Grund der an der ETH gewonnenen Erfahrungen positiv beurteilt werden.

Es ist Sache des Konstrukteurs, gegebenenfalls die grossen Abweichungen von der Trapezregel gebührend zu berücksichtigen.

#### C. Experimentelle Methode

Der Vollständigkeit halber sei in diesem Zusammenhang erwähnt, dass am Institut für Massivbau Modelluntersuchungen an Gewichtsstauauern durchgeführt wurden, bei denen der Baugrund völlig unregelmässige Gestalt aufwies. Es ist von vornherein klar, dass eine Berechnung, wie sie oben geschildert wurde, in einem solchen Fall vorläufig unüberwindliche Schwierigkeiten bietet und dass die Modellmessung allein in der Lage ist, den notwendigen Aufschluss zu geben. Ueber die besonderen Schwierigkeiten dieser Untersuchung, insbesondere über die Realisierung des Modells mit verschiedenen Elastizitätsmoduli von Mauer und Baugrund usw., soll später berichtet werden. Jedenfalls bestätigte auch diese Untersuchung, dass der Einfluss der Nachgiebigkeit des Baugrundes auf den Spannungs- und Formänderungszustand der Stauwand wesentliche Ausmasse annimmt.

#### 4. Schlussfolgerungen

Heute besteht die Notwendigkeit, zu stark vereinfachte Berechnungen durch entsprechend vertiefte Untersuchungen an bedeutenden Tragwerken zu ersetzen. Die Ergebnisse aus den besprochenen Untersuchungen beweisen diese Notwendigkeit. Die Nichtberücksichtigung wesentlicher Zusammenhänge (im Beispiel: Mauer und Baugrund) führt zu unvollständigen, ja falschen Ergebnissen.

Es soll keine Gegensätzlichkeit zwischen den verschiedenen Untersuchungsmethoden «konstruiert» werden, da keine solche besteht. Sie sind im Gegenteil dazu berufen, sich weitgehend zu ergänzen. Der Bauingenieur umgeht die Klippe der Einseitigkeit, wenn er den Ueberblick über das gesamte Gebiet der Untersuchungsmethoden gewinnt und behält. Dabei soll er nicht vergessen, dass die Beobachtung an ausgeführten Bauwerken das richtungweisende Kriterium für alle Untersuchungsmethoden bildet und allein die Möglichkeit bietet, den Zeitfaktor zu berücksichtigen.

Auch die eleganteste Untersuchungsmethode ist niemals Selbstzweck. Sie bringt uns der Wirklichkeit näher, behält aber einen dienenden Charakter.

<sup>2)</sup> Prof. Dr. E. Stiefel, ZAMP 1952.

<sup>3)</sup> Dr. Preissmann, Zürich.

## Baggeraushub im Hochbau

Von Ing. M. STAHEL, Professor ETH, Thalwil

DK 624.152.2

Die Vorteile des Baggereinsatzes auch für Aushubarbeiten im Hochbau, nämlich die relativ billige und rasche Bewältigung beträchtlicher Kubaturen, sind allgemein bekannt und brauchen hier nicht näher dargelegt zu werden.

Es soll im folgenden vielmehr auf einige typische Schwierigkeiten, deren Auswirkungen von ärgerlichen Frikationen bis zu schwerwiegenden Misserfolgen reichen, hingewiesen und der Versuch gemacht werden, aus den Erfahrungen einige Lehren zu ziehen. Wir beschränken uns dabei

auf den Baggereinsatz im Hochbau, obwohl sich diese Probleme im Tiefbau ebenfalls stellen können, weil sie im Hochbau aus verschiedenen Gründen häufiger und deutlicher in Erscheinung treten.

Neben den Tiefbauunternehmungen mit eigenem grossem Maschinenpark und einer relativ kleinen Zahl mittlerer Baugeschäfte mit Aushubgeräten stehen vor allem auch «reine» Baggerunternehmungen für die Ausführung maschineller Aushubarbeiten zur Verfügung. Die überwiegende Mehrheit