Zeitschrift:	Schweizerische Bauzeitung					
lerausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine						
Band:	125/126 (1945)					
Heft:12: Generalversammlung Schweiz. Ingenieur- und Architek22. bis 24. September 1945 in Zürich						
Artikel:	Näherungsberechnung dreiseitug eingespannter Platten					
Autor:	Straub, Hans					
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-83725					

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. <u>Siehe Rechtliche Hinweise.</u>

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. <u>Voir Informations légales.</u>

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. <u>See Legal notice.</u>

Download PDF: 15.05.2025

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

SCHWEIZERISCHE BAUZEITUNG

22. September 1945 Der Dachstuhl

Mit seinem doppelten Sprengwerk von 15 m Spannweite stellt der Dachstuhl eine beachtenswerte handwerkliche Leistung dar. Er krankte jedoch schon zur Zeit seiner Erstellung am Ende des 17. Jahrhunderts unter der Verwendung von zu langen und zu schlanken Hölzern, schlechter Ausbildung der Binderfüsse und zu schwach bemessenen Unterzügen in der Südwestecke. Die dort durchgebrochenen Unterzüge hat man durch Hetzer-

Näherungsberechnung dreiseitig eingespannter Platten Von Dipl. Ing. HANS STRAUB, Rom

Der im Wasser- oder Tiefbau tätige Eisenbetoningenieur hat häufig rechteckige, durch Erd- oder Wasserdruck belastete Platten zu berechnen, die längs drei Seiten eingespannt, längs der vierten jedoch frei beweglich sind. Die Aufgabe stellt sich z. B. beim Bau von offenen Behältern, Schwimmkasten, Druckluftcaissons u. dgl.

Die strenge Lösung des Problems, die auf die Integration der Differentialgleichung der elastischen Fläche

$$rac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 rac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + rac{\partial^4 w}{\partial y^4} = rac{12 \, (m^2 - 1)}{m^2 E \, h^3} \, p$$

hinausläuft, ist, auch bei Benützung der von Nadai1) angegebenen Differenzenmethode, zu kompliziert und zeitraubend, um in der Praxis Anwendung zu finden. Da anderseits Tafeln für diesen Lagerungsfall, soweit mir bekannt ist, nicht veröffentlicht sind²), pflegt der Konstrukteur die für die Bemessung und Bewehrung massgebenden Biegungsmomente nach den beiden Richtungen auf Grund elementarer Ueberlegungen abzuschätzen, was bei einiger Uebung auch zu praktisch durchaus genügenden Ergebnissen führt.

Um jedoch bei der häufig wiederkehrenden Aufgabe nicht nur auf gefühlsmässige Schätzungen angewiesen zu sein, hat der Verfasser versucht, auf Grund eines Näherungsverfahrens zwei kleine Tafeln zu berechnen, denen die Koeffizienten zur Berechnung der Biegungsmomente unmittelbar entnommen werden können. Das benützte Verfahren beruht auf dem Umstand, dass «es für die näherungsweise Berechnung des Biegungspfeiles ziemlich gleichgültig bleibt, von welcher besonderen Annahme über die Gestalt der elastischen Fläche man dabei ausgeht, wenn sie nur einigermassen den Umständen angemessen ist»3).

Die Gestalt der elastischen Fläche der Platte (Abb. 1) sei durch folgenden Ansatz gegeben:

$$w = C \left(\xi^2 - 2 \, \xi^3 + \xi^4
ight) \left(4 - 5 \, \eta + \eta^5
ight) \quad . \quad . \quad (1)$$

Man überzeugt sich leicht, dass dieser Ansatz den Randbedingungen genügt. In der Tat werden längs der drei eingespannten Seiten Verschiebung und Neigung (w und w') gleich null, während längs des freien Randes in Richtung normal zur Randlinie Moment und Querkraft (w'' und w''') den Wert null annehmen (wobei für die Querkraft allerdings der Einfluss des Scherungs-Momentes vernachlässigt wird).

worin

Die Konstante C ergibt sich wie üblich durch Gleichsetzen der Formänderungsarbeit mit der äusseren Arbeit der Belastung. Die Formänderungsarbeit ist durch folgenden Ausdruck gegeben⁴):

$$\begin{split} A_{I} &= \frac{G h^{3}}{12} \int_{0}^{F} \frac{m}{m-1} \left[\left(\frac{\partial^{2} w}{\partial x^{2}} \right)^{2} + \left(\frac{\partial^{2} w}{\partial y^{2}} \right)^{2} \right] + \\ &+ \frac{2}{m-1} \frac{\partial^{2} w}{\partial x^{2}} \frac{\partial^{2} w}{\partial y^{2}} + 2 \left(\frac{\partial^{2} w}{\partial x \partial y} \right)^{2} \right\} dF \\ \text{oder, wenn, wie für Eisenbeton zulässig, } m = \infty \text{ und } G = \\ \frac{mE}{2 \left(m+1 \right)} = \frac{E}{2} \text{ gesetzt wird,} \end{split}$$

Nadai, «Elastische Platten». Springer, Berlin.
 Vgl. Dr. H. Bleich, «Die Berechnung schmaler, dreiseitig gelagerter Platten» in Bd. 114, S. 141* der SBZ (16. Sept. 1339), wo der Verfasser ein-leitend feststellt: «Während der Ingenieur zur Berechnung vierseitig ge-lagerter Platten in jedem Handbuch Zahlentafeln vorfindet, . . . sind ent-sprechende Tafeln für die Berechnung dreiseitig gelagerter Platten nicht veröffentlicht worden, obwohl solche Platten häufig genug vorkommen».
 ³ A. und L. Föppl, «Drang und Zwang», 3. Aufl., 1. Bd., § 20 (S. 145).
 ⁴) Föppl, 1. c., S. 131.

konstruktionen ersetzt, die Dachhaut gehoben und gesichert unter Erhaltung des alten Bestandes der Dachkonstruktion.

Dass die Restaurierungsarbeiten am «Napf» zum guten Gelingen gebracht wurden, verdankt der Architekt der wertvollen Mitarbeit des Städtischen Hochbauinspektorates. Die baugeschichtlichen Angaben gehen auf Forschungen des Stadtarchivars Dr. H. Waser zurück, für die ich auch hier bestens danke.

$$A_{f} = \frac{E h^{3}}{24} \int_{-\infty}^{F} \left(\left(\frac{\partial^{2} w}{\partial x^{2}} \right)^{2} + \left(\frac{\partial^{2} w}{\partial y^{2}} \right)^{2} + 2 \left(\frac{\partial^{2} w}{\partial x \partial y} \right)^{2} \right) dF \qquad (2)$$

worin h die Plattendicke bedeutet. Mit dem durch Gl. (1) gegebenen Wert von w erhält man

nach Durchführung der Differenzierungen Eh^3

$$A_{f} = \frac{1}{24} G^{2} \int \left\{ \frac{1}{a^{4}} \left(2 - 12\xi + 12\xi^{2}\right)^{2} \left(4 - 5\eta + \eta^{5}\right)^{2} + \frac{1}{b^{4}} \left(\xi^{2} - 2\xi^{3} + \xi^{4}\right)^{2} \left(20\eta^{3}\right)^{2} + \frac{1}{b^{4}} \left(\xi^{2} - 2\xi^{3} + \xi^{4}\right)^{2} \left(\xi^{2} - \xi^{3}\right)^{2} \left(\xi^{2} - \xi^{3}\right)^{2} + \frac{1}{b^{4}} \left(\xi^{2} - \xi^{3}\right)^{2} \left(\xi^{2}$$

 $+ \, rac{1}{a^2 \, b^2} \, 2 \, (2 \, {\circlet}{z} - 6 \, {\circlet}{\xi}^2 + 4 \, {\circlet}{\xi}^3)^2 \, (5 \, \eta^4 - 5)^2 \Big\} \, d \, F$

und über die Plattenfläche ab integriert

$$A_{f} = \frac{E h^{3}}{24} C^{2} \left(\frac{800}{231 a^{4}} + \frac{40}{441 b^{4}} + \frac{128}{189 a^{2} b^{2}} \right). \quad (3)$$

Die äussere Arbeit der Belastung p beträgt

$$A_a = \int \frac{p w}{2} dF \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad (4)$$

Es sollen die beiden Fälle einer gleichmässig verteilten und einer linear von null am freien bis p_{\max} am gegenüberliegenden, eingespannten Rand wachsenden Belastung betrachtet werden.

Für die gleichmässig verteilte Belastung p ergibt sich nach den Gl. (4) und (1)

$$A_{a} = \frac{p}{2} C \int^{F} (\xi^{2} - 2\xi^{3} + \xi^{4}) (4 - 5\eta + \eta^{5}) dF = \frac{pC}{36}$$
(5)

Für die dreieckförmig verteilte Belastung $p=rac{y}{h}p_{ ext{max}}=$

 ηp_{\max} hingegen

$$A_{a} = \frac{p_{\max}}{2} C \int^{r} (\xi^{2} - 2\xi^{3} + \xi^{4}) (4 - 5\eta + \eta^{5}) \eta \, dF = \frac{p_{\max}C}{126}$$
(6)

Da die elastische Fläche nach der getroffenen Näherungs-Annahme für beide Belastungsfälle bis auf den Koeffizienten C die selbe Gestalt besitzt, unterscheiden sich auch die Biegungs-Momente in beiden Fällen nur durch einen konstanten Faktor, und wir können uns im folgenden auf die Behandlung eines von beiden beschränken. Wir wählen dazu den Fall der dreieckförmig verteilten Last.

Der Wert von C ergibt sich wie gesagt durch Gleichsetzen der Ausdrücke für A_f und A_a , in unserm Fall somit der rechten Seiten der Gl. (3) und (6):

$$\frac{E\hbar^3}{24}C^2\left(\frac{800}{231a^4} + \frac{40}{441b^4} + \frac{128}{189a^2b^2}\right) = \frac{p_{\max}C}{126}$$
(7)

woraus

$$C = p_{\max} \frac{a^2 b^2}{E \hbar^3} \frac{693 \lambda^2}{330 \lambda^4 + 2464 \lambda^2 + 12600}$$
 . . (8)

wenn das Seitenverhältnis $\frac{a}{b}$ mit λ bezeichnet wird.

Mit der Bestimmung von C ist die Gestalt der elastischen Fläche vollständig festgelegt und die Biegungsmomente ergeben sich ohne weiteres nach den bekannten Ausdrücken

$$\frac{M_x}{EJ} = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad \text{und} \quad \frac{M_y}{EJ} = \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$$

Durch Differenzieren des Ausdrucks für w aus Gl. (1) erhält man

$$M_{x} = E J \frac{C}{a^{2}} \left(2 - 12\xi + 12\xi^{2}\right) \left(4 - 5\eta + \eta^{5}\right)$$
$$M_{y} = E J \frac{C}{\xi^{2}} \left(\xi^{2} - 2\xi^{3} + \xi^{4}\right) \left(20\eta^{3}\right)$$
(9)

Nach Einsetzen des Ausdrucks für C aus Gl. (8) und kürzen von J gegen $\frac{h^s}{12}$ ergibt sich schliesslich



126

Tabelle 1

SCHWEIZERISCHE BAUZEITUNG

Bd. 126 Nr. 12

λ	C_1	c_3	λ	C_1	c_3
1,4	0,309	1,187	2,6	0,130	5,953
1,6	0,274	1,796	2,8	0,111	6,800
1,8	0,240	2,521	3,0	0,094	7,605
2,0	0,208	3,331	3.2	0.080	8.360
2,2	0,179	4,194	3,4	0,068	9.060
2,4	0,153	5,077	3.6	0.058	9.704

$$M_{x} = p_{\max} a^{2} \frac{251}{1320 \lambda^{4} + 9856 \lambda^{2} + 50400} \times \\ \times (2 - 12 \xi + 12 \xi^{2}) (4 - 5 \eta + \eta^{5}) \\ M_{y} = p_{\max} b^{2} \frac{231 \lambda^{4}}{1320 \lambda^{4} + 9856 \lambda^{2} + 50400} \times \\ \times (\xi^{2} - 2 \xi^{3} + \xi^{4}) 20 \eta^{3}$$

$$(10)$$

Für den Fall der gleichmässig verteilten Belastung wird an Stelle von Gl. (7) die rechte Seite des Ausdrucks (5) dem Ausdruck für A_f nach Gl. (3) gleichgesetzt, wodurch man für C, M_x und M_y einen $\frac{126}{36} = 3^{1/2}$ mal grösseren Wert erhält (wobei an Stelle von p_{\max} ganz einfach p gesetzt wird).

Die Koeffizienten der Ausdrücke (10) können ein für allemal ausgewertet und in Zahlentafeln zusammengestellt werden, mit deren Hilfe sich dann die Berechnung der Biegungsmomente äusserst rasch und einfach gestaltet. Wir setzen zu diesem Zweck

$$\begin{array}{c} \frac{23100}{1320\,\lambda^4 + 9856\,\lambda^2 + 50400} = c_1 \\ 23100\,\lambda^4 \\ \hline 1320\,\lambda^4 + 9856\,\lambda^2 + 50400 \\ -12\,\xi + 12\,\xi^2)\,(4 - 5\,\eta + \eta^5) = c_2 \end{array} \right\} . \quad . \quad (11)$$

$$(\xi^2 - 2\xi^3 + \xi^4) 20\eta^3 = c_4$$

Dann erhält man für die Momente folgende einfache Ausdrücke

(2 -

$M_x = -$	$-\frac{0_1 0_2}{100} p_{\max} a^2$	für droigeltförmige Belestung	
$M_y \equiv -$	$-\frac{c_{3}c_{4}}{100}p_{\max}b^{2}$	ful dielectrorinige belastung .	
$M_x = -$	$- \frac{3,5 c_1 c_2}{100} p a^2$	für gleichmässig verteilte Bela-	· (12)
$M_y = -$	$- \frac{3,5 c_3 c_4}{100} p b^2 \Big)$	stung	

(Das Minuszeichen wurde lediglich beigefügt, weil es in der Praxis üblich ist, die Einspannmomente als negativ zu bezeichnen).

Tabe	Tabelle 2											
$\frac{\xi \rightarrow}{\eta \downarrow} = 0$		0,	, 1	0,	2	0,8	3	0,4	dado nautr	0,5	diase,	
	C_2	c_4	<i>C</i> ₂	c_4	c_2	c_4	<i>C</i> ₂	c_4	c_2	c_4	C_2	c_4
0	8,00	0	3,68	0	0,32	0	-2,08	0	3,52	0	- 4.00	0
0,2	6,00	0	2,76	0	0,24	0	-1,56	0,01	-2,64	0,01	- 3,00	0.01
0,4	4,02	0	1,85	0,01	0,16	0,03	-1,05	0,06	-1,77	0,07	-2,01	0,08
0,5	3,06	0	1,41	0,02	0,12	0,06	0,80	0,11	-1,35	0,14	-1,53	0,16
0,6	2,16	0	0,99	0,03	0,09	0,11	-0,56	0,19	0,95	0,25	-1,08	0,27
0,8	0,66	0	0,30	0,08	0,03	0,26	-0,17	0,45	-0,29	0,59	- 0,33	0,64
1,00	0,00	0	0,00	0,16	0,00	0,51	0,00	0,88	0,00	1,15	0,00	1,25

Tabelle 1 enthält die nur vom Seitenverhältnis $\lambda = \frac{a}{b}$ abhängigen Koeffizienten c_1 und c_3 ; c_2 und c_4 , die die Veränderlichkeit der Momente über die Plattenfläche in Funktion der Koordinaten $\xi = \frac{x}{a}$ und $\eta = \frac{y}{b}$ spiegeln, sind in Tabelle 2 zusammengestellt, wobei die Koeffizienten der massgebenden Momente M_x für $\xi = 0, \eta = 0$ und für $\xi = 0.5, \eta = 0$, sowie M_y für $\xi = 0.5, \eta = 1$ fett gesetzt sind.

Zur grösseren Bequemlichkeit sind die Koeffizienten c_1 und c_3 auch in einem Diagramm dargestellt (Abb. 2, S. 124).

Durch Gleichsetzen der Ausdrücke für die Einspannmomente in den Punkten $\xi \equiv 0$, $\eta \equiv 0$ und $\xi \equiv 0.5$, $\eta \equiv 1.0$ ($c_2 \equiv 8$ und $c_4 \equiv 1.25$) erhält man das Seitenverhältnis $\lambda = \frac{4}{5} \sqrt{10} = 2.53$, für das die grössten Einspannmomente in beiden Richtungen gleich werden, und zwar

 $M_{x \max} = M_{y \max} = -0,0110 p_{\max} a^2$ für dreieckförmig verteilte Last und $M_{x \max} = M_{y\max} = -0,0386 p a^2$ für gleichmässig verteilte Last.

Es ist offensichtlich, dass an die Genauigkeit vorstehenden Näherungsverfahrens keine zu strengen Ansprüche gestellt werden dürfen. Während bei vierseitig gelagerten Platten analoge Näherungslösungen sehr gute Uebereinstimmung mit den Ergebnissen der strengen Theorie zeigen (Beispiele bei Föppl, l. c.), ist es für die dreiseitig gelagerte und erst recht für die auf drei Seiten eingespannte, doch längs der vierten frei bewegliche Platte viel schwieriger, einen der Wirklichkeit sich nähernden, einfachen Ansatz für die Form der elastischen Fläche zu finden. Die rohe Anschauung zeigt schon, dass diese bei verhältnismässig langen, schmalen Platten eine grundsätzlich verschiedene Gestalt besitzt, je nachdem eine der langen oder eine der kurzen Seiten



des Rechtecks frei beweglich ist. Für die Grenzwerte $\lambda = 0$ und $\lambda = \infty$ geht die Aufgabe in den Fall des beidseitig, bzw. einseitig eingespannten Balkens über, und daraus ergeben sich ohne weiteres zwei Grenzen, jenseits derer die Näherungsformeln auf keinen Fall mehr verwendet werden dürfen. Für gleichmässig verteilte Belastung müssen nämlich auf alle Fälle die Einspannmomente

$$M_x \leq rac{p \, a^2}{12}$$
 und $M_y \leq rac{p \, b^2}{2}$

bleiben. Mit den Bezeichnungen der Formeln (12) gehen diese Bedingungen in folgende Ausdrücke über:

Das Projekt 1943/44 der Urseren-Kraftwerke

Bautechnischer Bericht, erstattet im Auftrag des Studiensyndikats für die Urseren-Kraftwerke

- Von Prof. Dr. E. MEYER-PETER und Dipl. Ing. TH. FREY, Zürich
- IV. BESCHREIBUNG DER ANLAGEN

A) Akkumulieranlage

1. Staumauer Schöllenen

Nachdem sich auf Grund der geologischen und geotechnischen Untersuchungen ergeben hat, dass die Staumauer ohne Bedenken zum Teil auf Aargranit und zum Teil auf dessen Gneishülle fundiert werden kann, hängt die Wahl der Sperrstelle und der damit zusammenhängende Mauertyp in erster Linie von der Topographie der Schöllenenschlucht, insbesondere von der Tiefe und Breite der mit Schutt erfüllten alten Talrinne ab. Mit Rücksicht auf den letzten Umstand musste der erste, sehr eingehend verfolgte Gedanke, am eigentlichen Schluchteingang, südlich des Urnerlochs, eine kombinierte Gewichts-Bogenmauer zu erstellen, fallen gelassen werden. Will man einen sehr bedeutenden, kostspieligen und zeitraubenden Schuttaushub vermeiden, muss die Sperre mit ihrer wasserseitigen Flucht etwa 20 m südlich des oberen Ausgangs des Urnerlochs zu stehen kommen, wo der Fundamentaushub nur noch etwa 30 m Tiefe umfasst (Abb. 6). Die Form der Talhänge erlaubt hier aber nur eine Gewichtsmauer, deren Fuss etwas oberhalb des ersten Absturzes des Teufelfalles liegt, deren linkes Widerlager sich gegen eine sehr steile und talabwärts etwas ausweichende Felswand anlehnt und deren rechtes Widerlager zum Teil in der «Grossen Kehle» liegt und sich gegen deren nördliche Seitenwand abstützt. Da der tiefste Punkt des Cañons im Bereich der Fundation auf etwa Kote 1388 liegt, während die Mauerkrone im Vollausbau Kote 1633 erreichen soll, beträgt also die maximale Sperrenhöhe 245 m.

Für die Dimensionierung der Talsperre war der Nachweis der Vermeidung von Zugspannungen auf der Wasserseite bei $rac{3,5\,c_{_1}\,c_{_2}}{100} \leq rac{1}{12} ext{ und } rac{3,5\,c_{_3}\,c_{_4}}{100} \leq rac{1}{2}$

woraus sich die beiden erwähnten Grenzen zu $\lambda = 1,46$ und $\lambda = 4,25$ ergeben. Praktisch wird es ratsam sein, den Anwendungsbereich der auf den gewählten Ansatz (1) aufgebauten Näherungslösung etwa auf das Gebiet $1,6 < \lambda < 3,5$ zu beschränken, das übrigens ungefähr demjenigen entspricht, für das kreuzweise Bewehrung überhaupt in Frage kommt.

Es wäre von Interesse, vorstehende Näherungslösung mit Versuchsergebnissen zu vergleichen.

(Fortsetzung von Seite 110)

vollem Becken unter Annahme eines $100 \, {}^{0}_{0}$ igen Auftriebes (mit vollem Wasserdruck auf der Wasserseite und Druck Null auf der Luftseite) massgebend. Weiter wurde mit Rücksicht auf absolute Sicherheit auch gegen äussere Angriffe eine Mauerkrone von 20 m Breite gewählt. Der Anzug auf der Wasserseite nimmt von oben, wo er 5 $^{0}_{0}$ beträgt, gegen den Fuss auf 20 $^{0}_{0}$ zu; auf der Luftseite erfährt er eine allmähliche Steigerung von 75 $^{0}_{0}$ auf 78 $^{0}_{0}$. Die Basisbreite auf dem ungefähr auf Höhe der heutigen Talsohle liegenden Mauersockel (Kote 1425) beträgt 176,9 m. Das Verhältnis von Mauerbreite zu Mauerhöhe wird somit an der Basis zu 0,85. Die Kronenlänge (Abb. 7) misst 550 m, die erforderliche Betonkubatur 4 700 000 m³; der Aushub bis zur Felsrinne erfordert nur eine Kubatur von 100 000 m³ gegenüber mehr als 1 Mio m³ bei einer weiter nach Süden angeordneten Gewichts-Bogenmauer. Der Felsaushub wird auf 900 000 m³ geschätzt. Auf der Luftseite soll die Sperre mit Granit verkleidet werden.

Die Sperre wird unter Offenhalten von Dilatationsfugen in Blöcke von 15 m Breite unterteilt, was auch zur Sicherung guter Auflagerbedingungen notwendig ist.

Die Maximalwerte der berechneten Hauptspannungen betragen: bei vollem Becken auf der Luftseite 50,7 kg/cm², bei leerem Becken auf der Wasserseite 44,3 kg/cm². Bei Anwendung eines hochwertigen Betons, dessen Prismendruckfestigkeit im Minimum zu 400 kg/cm² angenommen wird, ist somit ausreichende Sicherheit gewährleistet. Dazu kommen die vorzüglichen Fundationsverhältnisse, die durch Hochdruckinjektionen bis in grosse Tiefe unter dem Fundament noch verbessert werden sollen, sodass das projektierte Bauwerk trotz seiner aussergewöhnlichen Höhe unbedenklich erstellt werden darf.

