Contribution à l'étude des fondations

Autor(en): **Sarrasin, A.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **109/110 (1937)**

Heft 21

PDF erstellt am: **24.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-49147

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.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

INHALT: Contribution à l'étude des fondations. — Ein moderner Getreidesilo in Tunis. — Bericht über die XIII. Tagung der Internationalen Eisenbahn-Kongress-Vereinigung. — Aus dem Berufsleben des Architekten. — Mitteilungen: «Schatten»-Fabriken in England. Ingenieur und Regierung. Geometrischer Rechenschieber. Farbige Automobilscheinwerfer. Bougie nouvelle. Contribution à l'étude des fondations. — Nekrologe: Emil Schwengeler. — Wettbewerbe: Neubau Warenhaus Globus, Zürich. Kantonspital Schaffhausen. Schulhaus Hochstrasse Zürich. — Mitteilungen der Vereine. — Sitzungs- und Vortrags-Kalender.

Band 110 Der S. I. A. ist für den Inhalt des redaktionellen Teils seiner Vereinsorgane nicht verantwortlich. Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet. Nr. 21

Contribution à l'étude des fondations

Par A. SARRASIN, Ingénieur, Lausanne/Bruxelles

Dans le domaine des fondations, quelques chercheurs ont réellement créé, ces dernières années, la «science du sol». Et si l'application de leurs études à des cas concrets est encore relativement rare aujourd'hui, cela tient à la seule complication des méthodes utilisées. C'est pour faciliter la généralisation de ces études, que nous voulons développer ici une méthode simplifiée de reconnaissance du sol. Nous en établissons tout d'abord les bases.

Déformation du sol

Nous supposons, sur une hauteur h, un sol isotrope et élastique dans les limites de la charge qu'il aura à supporter, et nous voulons déterminer, pour le cas où la semelle qui transmet la charge au sol a une rigidité nulle, les tassements de la surface chargée, provoqués par le seul raccourcissement de la couche de hauteur h. Nous négligerons, dans ce calcul, comme on le fait habituellement, l'influence des composantes horizontales des pressions dans le sol, et ne tiendrons compte que des composantes verticales.

D'après *Boussinesq*, dont la formule est classique, la pression unitaire p_z le long de la verticale sous une charge concentrée P, sera, à une profondeur z, $p_z = \frac{3P}{2\pi z^2}$. Lorsque la charge n'est pas concentrée, mais uniformément répartie sur une certaine surface, l'expérience prouve que l'on a une bonne approximation en concentrant la charge et en appliquant cette formule, pour autant que z soit suffisamment grand par rapport aux dimensions de la surface chargée. Si ce n'est pas le cas, l'erreur commise est importante. Pour $z = 0$, par exemple, on aurait: $p_z = \infty$.

Pour le cas particulier d'une charge unitaire p uniformément répartie sur un cercle de rayon r (fig. 1), nous allons utiliser la relation suivante que l'on pourra appliquer, pour les petites valeurs de z, et qui, pour les grandes valeurs de z, nous donnera pratiquement les mêmes valeurs que Boussinesq:

$$p_z = \frac{1{,}5\,p\,r^2}{(z + 1{,}225)r^2} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (1)$$

où p_z représente la pression unitaire à la profondeur z le long de la verticale passant par le centre du cercle.

Dans les hypothèses que nous avons faites, par cette seule loi énoncée pour un cas particulier, le problème de la déformation du sol est complètement déterminé, quel que soit le cas de charge ou la forme de la surface chargée.

En effet, puisque nous avons supposé un sol isotrope et élastique, le tassement dy d'un élément situé entre z et $z + dz$ sera proportionnel à la pression unitaire. Il s'exprimera, pour la verticale passant par le centre, par:

$$dy_C = \frac{p_z}{E}\,dz \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (2)$$

où E est une constante qui caractérise la couche de sol donné. Nous appellerons E le module apparent d'élasticité du sol.

Le tassement y_C du centre du cercle provenant seulement de la couche de hauteur h, sera:

$$y_C = \int_0^h \frac{p_z}{E}\,dz$$

En remplaçant p_z par sa valeur et en intégrant, on obtiendra:

$$y_C = \frac{1{,}225\,p\,r\,h}{E\,(h + 1{,}225\,r)} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (3)$$

ou, si l'on pose $h = l\,r$,

$$y_C = \frac{1{,}225\,p\,r\,l}{E\,(l + 1{,}225)} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (3\,\text{bis})$$

La relation (3) va nous permettre d'établir l'influence d'une charge élémentaire $p\,r\,d\alpha\,dz$ (fig. 2) sur le tassement d'un point quelconque C.

Traçons en effet, autour du point C, deux circonférences de rayon r et $r + dr$. Le tassement dy_C du point C sous la charge unitaire p t/m² sur l'anneau circulaire délimité par les rayons r et $r + dr$ s'obtiendra en différentiant l'expression (3):

$$dy_C = \frac{1{,}225\,p\,h^2\,dr}{E\,(h + 1{,}225\,r)^2}$$

Pour une charge élémentaire $p\,r\,d\alpha\,dr$, l'accroissement sera:

$$d\,(dy_C) = \frac{1{,}225\,h^2\,p\,r\,d\alpha\,dr}{E\,(h + 1{,}225\,r)^2\,2\pi\,r} \quad . \; . \; . \; . \quad (4)$$

La relation (4) nous donne l'influence, sur le tassement d'un point quelconque C, d'une charge élémentaire $p\,r\,d\alpha\,dr$ située à une distance quelconque r de ce point C. Le problème de la déformation du sol est donc théoriquement résolu.

Pratiquement, pour simplifier les calculs, nous pourrons, avec une exactitude suffisante, appliquer cette formule pour une charge de grandeur finie P, répartie sur une surface dont le centre se trouve à la distance r du point C, pourvu que les dimensions de la surface chargée soient suffisamment petites par rapport à r.

Nous aurons alors:

$$y_{C\,(P)} = \frac{1{,}225\,h^2\,P}{E\,2\pi\,r\,(h + 1{,}225\,r)^2} \quad . \; . \; . \; . \quad (5)$$

Si, de nouveau, $h = l\,r$, la formule 5 s'écrira:

$$y_{C\,(P)} = \frac{0{,}195\,P}{E\,r}\left(\frac{l}{l + 1{,}225}\right)^2 \quad . \; . \; . \; . \quad (5\,\text{bis})$$

Par les relations que nous avons établies, nous connaissons maintenant, avec une approximation suffisante, les tassements de n'importe quel point sous n'importe quel cas de charge. Voici, en applications des formules 3 et 5, la détermination des tassements au centre et aux angles de surfaces carrées et rectangulaires, dans le cas d'une charge unitaire p uniformément partie[1]).

Nous voulons, — nous l'avons déjà dit, — obtenir une méthode simple que chacun puisse appliquer. Nous ne nous embarrasserons donc pas de complications inutiles, et, au lieu de diviser un carré en un grand nombre d'éléments de surface très petite et d'appliquer la formule 5, nous admettrons simplement, avec une approximation très suffisante puisqu'il s'agit du sol, que le tassement y_C au centre d'un carré de côté a, chargé par une charge p uniformément répartie sur la surface de ce carré, est égal à celui du centre d'un cercle de surface équivalente sous le même cas de charge.

Si nous posons, pour simplifier, $\frac{h}{a} = m$, nous aurons (fig. 3):

$$y_C = \frac{p\,a\,m}{E\,(m\sqrt{2} + 1)} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (6)$$

Le tassement y_A de l'angle A du carré sera, par raison de symétrie, égal au quart du tassement du centre d'un carré de côté $2a$, chargé uniformément par une charge unitaire p.

$$y_A = \frac{p\,a\,m}{2\,E\,(m\sqrt{2} + 2)} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (7)$$

[1]) L'addition de certains de ces résultats, judicieusement choisis, nous donnera immédiatement aussi les tassements au milieu des côtés.

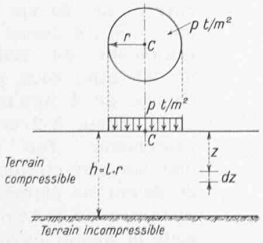

Fig. 1

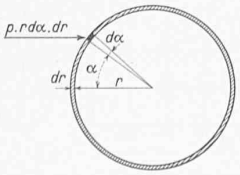

Fig. 2

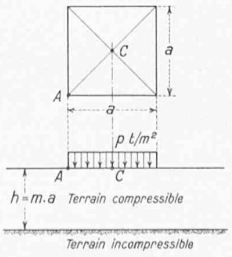

Fig. 3

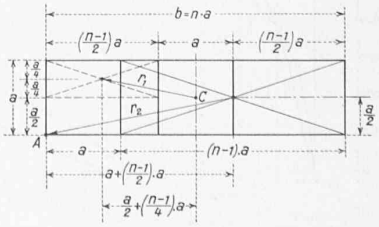

Fig. 4

Passons maintenant, en faisant usage des formules 5, 6 et 7, au cas d'un rectangle dont le petit côté est a et dont le grand côté b est égal à $n\,a$ (fig. 4).

Le tassement y_C au centre C sera[2]):

$$y_C = \frac{p\,a}{E}\left[\frac{m}{m\sqrt{2}+1} + \frac{0{,}78\,(n-1)}{\sqrt{(n+1)^2+1}}\left(\frac{m}{m+0{,}306\sqrt{(n+1)^2+1}}\right)^2\right] \quad (8)$$

et le tassement y_A à l'angle A:

$$y_A = \frac{p\,a}{2E}\left[\frac{m}{m\sqrt{2}+2} + \frac{0{,}78\,(n-1)}{\sqrt{(n+1)^2+1}}\left(\frac{m}{m+0{,}612\sqrt{(n+1)^2+1}}\right)^2\right] \quad (9)$$

Nous n'avons jusqu'à maintenant considéré que le tassement d'une seule couche de terrain compressible. Il n'y a évidemment aucune difficulté à étendre les développements précédents à un nombre quelconque de couches différentes de terrains. Il sera toutefois plus rapide, pour un cas donné, de porter sur un graphique les variations du tassement du point à étudier, en fonction de h, c'est-à-dire de m ou respectivement l, comme s'il n'y avait qu'une seule couche à considérer. Puis, sur ces graphiques, nous découperons des tranches correspondant à chaque couche, et leur appliquerons le module apparent d'élasticité E convenable.

A cet effet, nous avons reproduit, ci-contre (fig. 5), tout d'abord le graphique pour le tassement d'un point sous l'influence d'une charge concentrée agissant à une distance r, puis, sur la même figure, le graphique du tassement du centre du cercle sous une charge unitaire p uniformément répartie, et enfin (fig. 6), les graphiques du tassement du centre et de l'angle du carré et d'un certain nombre de rectangles sous la même charge unitaire uniformément répartie p, et nous donnons un exemple simple de détermination des tassements, en supposant les diverses valeurs de E connues pour chaque couche.

Exemple. Soit un bâtiment rectangulaire de 16 sur 24 m, à fonder sur un terrain composé de deux couches compressibles; la hauteur de la première couche est 4 m; son module apparent d'élasticité $E_1 = 3820$ t/m². La deuxième couche compressible a 12 m de hauteur; son module apparent d'élasticité $E_2 = 2040$ t par m². La charge unitaire sur le terrain atteint 1 kg/cm².

Dans ce cas, $n = \frac{24}{16} = 1{,}5$

Pour la première couche de terrain, $m_1 = \frac{4}{16} = 0{,}25$.

Le tassement au centre, pour cette couche, sera, d'après le graphique, $y_{C_1} = \frac{0{,}193 \cdot 10 \cdot 16}{3820} = 0{,}008$ m.

La deuxième couche de terrain est comprise entre les valeurs $m_1 = 0{,}25$ et $m_2 = 1$; son tassement sera, d'après le graphique,

$$y_{C_2} = \frac{(0{,}456 - 0{,}193)\ 10 \cdot 16}{2060} = 0{,}0204 \text{ m.}$$

Le tassement total au centre sera donc $y_C = 0{,}0284$ m.

[2]) Ces formules s'appliquent avec une exactitude suffisante pour $n \leq 3$. Pour $n > 3$, il est préférable de diviser le rectangle en un plus grand nombre de parties.

D'après le même graphique, le tassement de l'angle atteindra:

$$y_A = \frac{0{,}0545 \cdot 10 \cdot 16}{3820} + \frac{(0{,}157 - 0{,}0545)\ 10 \cdot 16}{2060} = 0{,}0103 \text{ m.}$$

Si, au lieu d'un rectangle, le bâtiment avait une forme quelconque, on pourrait, avec la même facilité, trouver la valeur des tassements au moyen de nos graphiques, en décomposant le bâtiment en un ou plusieurs rectangles et en des surfaces de forme quelconque au centre desquelles on ferait agir des charges isolées. Il faut naturellement appliquer en chaque point les caractéristiques du sol convenables, qui diffèrent normalement d'un point à un autre.

Pour que le problème de la détermination des tassements dans un cas quelconque soit entièrement résolu, il ne nous reste plus maintenant qu'à trouver le module apparent d'élasticité de chaque couche de terrain.

Détermination du module apparent d'élasticité des diverses couches du sol.

Dans la pratique courante, on prélève des éprouvettes dans chaque couche de terrain, et on détermine expérimentalement en laboratoire la valeur de E pour chaque couche. Cette manière de faire étant assez compliquée, nous voulons utiliser les relations que nous avons établies pour proposer une méthode plus simple.

Supposons, en effet, pour commencer, comme nous l'avons fait jusqu'à maintenant, que le sol compressible n'est formé que par une seule couche de hauteur connue h, et faisons sur le terrain que nous voulons étudier un essai de charge sur petite surface. Nous déduirons immédiatement des résultats de cet essai, le module apparent d'élasticité E, au moyen des relations 3 ou 6.

Si maintenant nous passons au cas général de plusieurs couches différentes de terrain compressible, nous voyons que nous pouvons, de même, déterminer les modules d'élasticité des différentes couches, en faisant simplement un essai de charge au niveau supérieur de chaque couche. Cette manière de procéder n'est ni difficile ni onéreuse. En effet, de toute façon, il faut sonder pour reconnaître le sol. L'on combinera donc le sondage avec les essais de charge à différentes profondeurs, en faisant tout simplement les essais à l'intérieur du tube utilisé pour le sondage. Comme c'est le tassement du centre que l'on vent déterminer, il faudra transmettre la pression au sol par un organe sans rigidité. On réalisera facilement cette condition en introduisant dans le tube un piston muni d'une tige creuse fermée à son extrémité supérieure, au centre de laquelle coulisserait une tige mince, qui mesurerait le tassement au centre, et, par l'intermédiaire d'un levier, transmettrait son mouvement au pivot d'une aiguille. La face inférieure du piston serait munie d'une membrane élastique en forme de sac, que l'on remplirait d'eau. On comprimerait le piston contre le sol en prenant appui contre le tube, de manière à exercer sur l'eau une pression contrôlée par un manomètre. Il est évident qu'il faut charger le tube lui-même, de manière que son poids soit égal à la pression totale qu'on exerce, pour que l'essai ne soit pas faussé par une poussée vers le haut. La mesure du tassement ne commencera que lorsque sera rétablie dans le tube une pression correspondant au poids du terrain enlevé. On procédera naturellement avec toute la patience et le soin désirables, pour avoir des résultats exacts.

Les tassements sous une charge donnée, au niveau des différentes couches étant connus, l'on en déduira facilement le module apparent d'élasticité de chaque couche.

Nous allons prendre comme *exemple* le terrain précédent composé de deux couches compressibles de 4 et 12 m de hauteur. Un essai, fait au niveau du sol, sur une surface carrée de 50 cm de côté, nous a donné un tassement au centre de 3,8 mm, sous une charge de 4 kg/cm², et un essai, à 2 m de profondeur, fait sur une surface circulaire de 30 cm de diamètre, un tassement de 3,5 mm, sous la même pression unitaire (majorée du

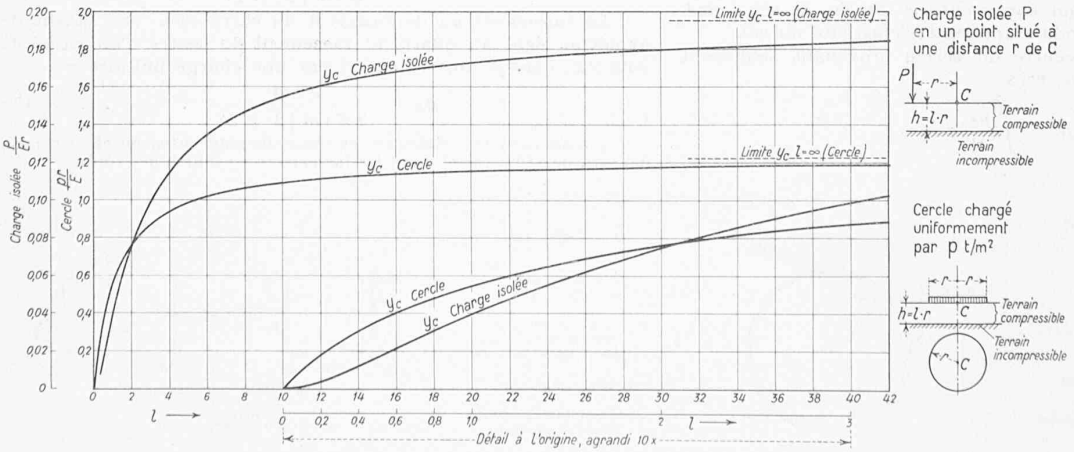

Fig. 5. Variation des tassements y_c du point C en fonction de l

poids de la terre enlevée). La hauteur des couches a été reconnue par un sondage.

Pour déterminer le module apparent d'élasticité de la couche inférieure, nous utilisons le graphique du cercle, avec $l = \frac{12}{0{,}15} = 80$. Nous posons: $\frac{1{,}203\, p\, r}{E_2} = 0{,}0035 \ldots$ d'où $E_2 = 2060$ t/m².

E_2 étant connu, nous pouvons déterminer l'influence du tassement de la deuxième couche sur le premier essai. Nous utilisons le diagramme du carré, avec $m_1 = \frac{4}{0{,}5} = 8$ et $m_2 = \frac{16}{0{,}5} = 32$. Le tassement provenant de la deuxième couche sera égal à:

$$y_{C_2} = (0{,}692 - 0{,}650)\,\frac{p\,a}{E_2} = \frac{0{,}042 \cdot 40 \cdot 0{,}5}{2060} = 0{,}0004 \text{ m.}$$

Le tassement provenant de la première couche atteint donc 0,0034 m. Le module apparent d'élasticité de la première couche sera donné par la relation: $0{,}65\,\frac{p\,a}{E_1} = 0{,}0034$. $E_1 = 3820$ t/m².

Nous avons maintenant exposé une méthode complète permettant de déterminer simplement les tassements du sol, en partant d'hypothèses admises actuellement. Nous voudrions encore tirer quelques remarques de la discussion des formules établies.

Remarques.

Les formules 6 et 7, avec leurs diagrammes, nous montrent que, pour un sol de fondation isotrope et élastique donné, le tassement du centre d'un carré ou d'un rectangle chargé par une charge unitaire uniformément répartie, est toujours plus grand que le double du tassement de l'angle. Donc, contrairement à une opinion encore trop répandue, un radier général chargé uniformément ne donne pas partout les mêmes tassements. Pratiquement, la meilleure manière de réduire, dans ce cas, les différences de tassements, c'est d'avoir partout des tassements très faibles [3]).

Nous voyons aussi que les tassements du carré ou du rectangle sont une fonction déterminée de leurs dimensions et du rapport des hauteurs des diverses couches compressibles à ces dimensions. Plus les dimensions d'un ouvrage sont importantes, plus il y a lieu de prendre de précautions pour fonder, et, en particulier, l'exemple d'un petit bâtiment fondé sur un sol semblable à celui sur lequel doit s'élever une construction importante, ne nous autorise pas à adopter, sans autre, le même type de fondation pour la même charge unitaire:

Certains auteurs ont étudié la répercussion des dimensions sur les tassements, sans tenir compte de la hauteur du terrain compressible et des différences de E dans les diverses couches. Leurs résultats sont naturellement erronés, et il est heureux que la pratique ne les ait pas suivis. L'un d'eux, par exemple, dans le cas de deux bases carrées dont les côtés sont respectivement a_1 et a_2, donne, pour obtenir des tassements égaux, la relation suivante entre les pressions unitaire:

$$p_2 = \frac{a_1}{a_2}\, p_1$$

où p_1 représente la pression unitaire sous la base de côté a_1, et p_2 la pression unitaire sous la base de côté a_2. Or, cette relation n'est pratiquement exacte que dans le cas où la hauteur du terrain compressible est très grande par rapport aux dimensions de la base, et lorsque le terrain est isotrope sur toute sa hauteur.

Un exemple va nous montrer jusqu'où peut aller l'erreur qu'engendre l'emploi de cette relation: Supposons deux semelles carrées dont les côtés ont respectivement 4 m et 1 m, que l'on doit fonder sur une couche de terrain compressible de 2 m de hauteur, la couche sous-jacente étant pratiquement incompressible. Nous aurons alors, d'après nos graphiques, pour le premier carré:

$$y_{C_1} = \frac{0{,}293}{E}\, p_1\, a_1 \quad \text{et} \quad y_{A_1} = \frac{0{,}093}{E}\, p_1\, a_1$$

et, pour le deuxième carré:

$$y_{C_2} = \frac{0{,}522}{E}\, p_2\, a_2 \quad \text{et} \quad y_{A_2} = \frac{0{,}208}{E}\, p_2\, a_2$$

Le tassement réel de la base, supposée rigide, est une valeur comprise entre y_C et y_A. Admettons, pour simplifier, que ce tassement soit la moyenne arithmétique entre y_C et y_A. Nous devrons avoir, dans ce cas, pour que les tassements des deux bases soient égaux, $\frac{p_1}{p_2} = 0{,}472$, tandis que l'application de la relation erronée donnerait $\frac{p_1}{p_2} = 0{,}25$. La valeur erronée de p_2 atteindrait 189 % de la valeur convenable.[4])

Il ne peut entrer dans le cadre de cette étude de poursuivre toutes les erreurs ordinairement commises en matière de fondation. Nous voulons pourtant en citer encore une.

Il est classique de calculer un radier ou une semelle en appliquant, pour les réactions du sol, la loi $p = k\,y$, où p indique la charge unitaire et y les enfoncements, k étant une constante. Or, l'application de cette loi donne, par exemple, des pressions plus grandes au centre d'une semelle carrée que sur ses bords, alors que nos résultats montrent, sans contestation possible, que lorsque la rigidité de la semelle est grande par rapport à celle du terrain (ce qui est presque toujours le cas), les pressions sont plus fortes sur les bords qu'au centre. Il est donc nécessaire d'apporter à de tels calculs les rectifications qui les fassent correspondre à la réalité, aussi bien pour une semelle que pour un radier.

[3]) Dans cet ordre d'idée, nous voulons signaler une erreur que nous voyons fréquemment commettre. C'est celle qui consiste à faire les déblais ou les démolitions d'un bâtiment longtemps avant la construction du nouvel ouvrage. On permet ainsi au sol de se détendre, et l'on a de plus grands tassements inégaux lorsqu'on reconstruit. — Voir aussi page 265 !

[4]) Nous avons admis ici que les deux semelles sont à une distance telle que l'influence de la charge de l'une sur le tassement de l'autre est négligeable. Si ce n'était pas le cas, l'erreur serait encore plus considérable.

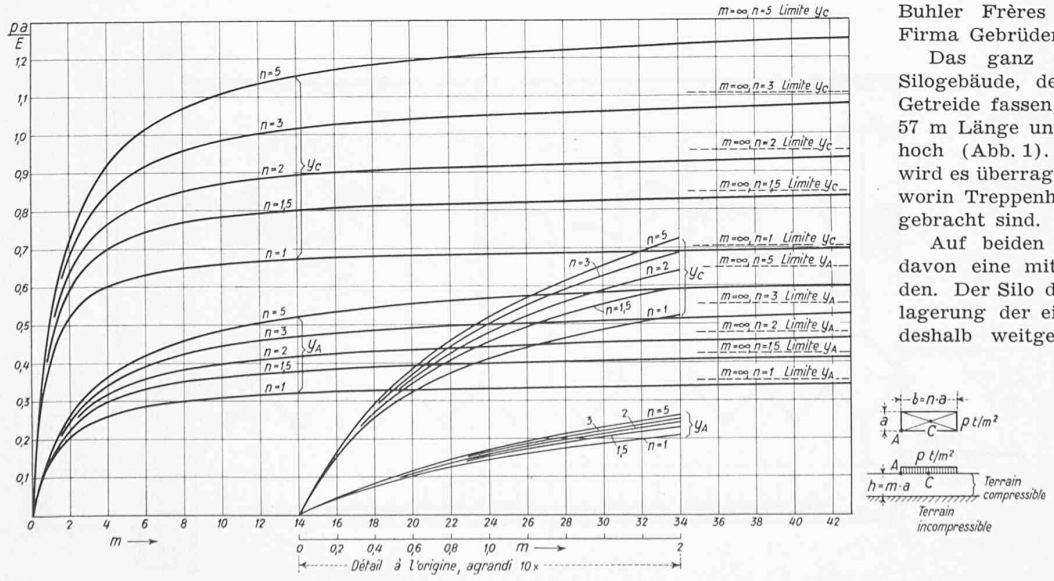

Fig. 6. Surface rectangulaire chargée uniformément par p t/m². Variation des tassements y_C et y_A en fonction de m

Ein moderner Getreidesilo in Tunis

Nach Mitteilungen von GEBRÜDER BÜHLER, Uzwil

In Manouba, in Tunesien, ist vor wenigen Monaten ein neuer, moderner Getreidesilo in Betrieb genommen worden. Mit der Projektierung dieser Anlage sowie der Lieferung der maschinellen Ausrüstung wurde die Firma Buhler Frères Paris, ein Allianzhaus der Firma Gebrüder Bühler, Uzwil, betraut.

Das ganz in Eisenbeton ausgeführte Silogebäude, dessen Zellen total 15000 t Getreide fassen, hat eine Grundfläche von 57 m Länge und 19 m Breite und ist 36 m hoch (Abb. 1). Auf der einen Stirnseite wird es überragt vom 44 m hohen Turmbau, worin Treppenhaus und Elevatoren untergebracht sind.

Auf beiden Längsseiten sind Rampen, davon eine mit Geleiseanschluss, vorhanden. Der Silo dient hauptsächlich zur Einlagerung der einheimischen Ernte und ist deshalb weitgehend unterteilt. 19 Zellen fassen je 500 t, 18 kleinere Zellen je 250 t und 8 Zellen je 125 t, sodass zahlreiche Getreideposten getrennt gelagert werden können (Abb. 2 und 3).

Der unmittelbaren Aufnahme des ankommenden Getreides dienen 64 unter den Rampen eingebaute Trimellen mit einem