Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 91/92 (1928)

Heft: 6

Artikel: Détermination graphique de l'action des terres: contribution au calcul de stabilité des murs de soutènement

Autor: Diesbach, Raoul de

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-42444

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: 08.01.2026

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

INHALT: Détermination graphique de l'Action des terres. — Die Elektrifikation der Schweizerischen Bundesbahnen und die Wirtschaftlichkeit des elektrischen Bahnbetriebes. — Die Pariser Wohnungs-Fürsorge. — Grossgaragen mit d'Humy-Rampen. — Mitteilungen: Neue Eisenbahnbrücke über den Rhein bei Wesel. Internationaler Wohnungs- und Städtebau-Kongress, Paris 1928. Die Lentz-Einheits-Schiffsmaschine. Die Wanderausstellung „Neues Bauen". Basler Rheinhafenverkehr. Die 5. Schweizerische wirtschaftliche Studienreise nach den U. S. A. — Wettbewerbe: Kirchgemeindehaus Evangelisch-Tablat, St. Gallen. — Literatur. — Vereinsnachrichten: Sektion Bern des S. I. A. Zürcher Ingenieur- und Architekten-Verein. Basler Ingenieur- und Architekten-Verein. S. T. S.

Band 91. Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet. Nr. 6

Détermination graphique de l'Action des terres.

Contribution au calcul de stabilité des murs de soutènement.

Par RAOUL DE DIESBACH, Ingénieur E. P. F.

C'est incontestablement à Résal que revient le mérite d'avoir résolu définitivement le problème complexe de la stabilité des murs de soutènement adossés à un massif cohérent ou dépourvu de cohésion. Nous supposerons connue la méthode analytique proposée par cet illustre ingénieur, qui suivit la voie tracée par Boussinesq et Flamant, et nous en déduirons un procédé de calcul graphique applicable au type de mur à fruit intérieur dont l'inclinaison serait moins prononcée que celle du plan de rupture. Nous admettrons que la cohésion est inexistante et nous n'envisagerons pas l'adaptation de notre épure (figure 5) au cas de la terre cohérente, bien qu'elle soit admissible moyennant certaines sujétions. Pour faciliter l'application de la théorie, nous traiterons en détail un exemple numérique (figures 1 à 5) et nous montrerons les erreurs auxquelles on s'exposerait en adoptant les solutions des auteurs anciens tels que Poncelet et Gobin (figures 6 à 9); les résultats ainsi obtenus ne sont pas conformes à la réalité et fournissent des indications inexactes sur la répartition des taux de fatigue.

Une épure analogue à celle de la figure 5 pourrait être établie pour les profils en surplomb et à parement intérieur vertical ou plus raide que le plan de rupture. Cependant la méthode n'est pas rigoureusement exacte et ne doit être adoptée qu'avec circonspection; elle conduit généralement à un excès de stabilité et par conséquent à une dépense exagérée. En effet l'homothétie des lignes de charge ne fournit pas les relations simples applicables au premier type d'ouvrage. A l'intérieur du dièdre formé par le plan de rupture et le parement intérieur, les lignes de poussée ne sont plus des droites mais des courbes dont la concavité est tournée vers la base, du moins pour l'état d'équilibre limite inférieur pris en considération dans notre étude à l'exclusion de toute autre hypothèse fondamentale. Nous avons traité sommairement deux cas concrets relatifs aux profils en surplomb et à face postérieure verticale (figures 10 et 11).

*

En pratique on emploie des tables pour la détermination de l'action des terres S, c'est-à-dire de la résultante, généralement oblique, qui doit être composée avec la réaction du mur P. Le problème est ramené à un petit nombre d'opérations numériques qui dispensent de la résolution plus ou moins laborieuse des équations établies par Résal. Par ailleurs les différences tabulaires des coefficients de poussée correspondent à des variations des 5^0 pour la déclivité du massif i, le talus naturel des terres φ et le fruit du parement intérieur α; il s'ensuit que les interpolations sont parfois une source d'erreur dont il est possible de s'affranchir par une construction qui apparait comme le complément logique de celle de M. d'Ocagne. On sait que ce savant avait envisagé la recherche des angles de rupture β et γ ainsi que la direction Θ de la force S par rapport à la normale au parement; son épure fournissait en outre les intensités des actions moléculaires définies par les expressions analytiques suivantes:

Pression élémentaire:

$$TM = p = \Delta y \cos i \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Poussée élémentaire:

$$q = \Delta y \cos^2 i \left(\frac{\cos i - \sqrt{\cos^2 i - \cos^2 \varphi}}{\cos i + \sqrt{\cos^2 i - \cos^2 \varphi}} \right) = p \cos i \, f(i, \varphi) \quad . \quad (2)$$

Charge élémentaire:

$$TN = r = \frac{q}{\cos i} = \Delta y \cos i \left(\frac{\cos i - \sqrt{\cos^2 i - \cos^2 \varphi}}{\cos i + \sqrt{\cos^2 i - \cos^2 \varphi}} \right) = p f(i, \varphi) \quad (3)$$

Action moléculaire conjuguée du plan de rupture:

$$TC = c = \frac{p \cos \varphi}{\cos i + \sqrt{\cos^2 i - \cos^2 \varphi}} \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

Demi grand axe de l'ellipse directrice des actions moléculaires:

$$TA = a = \frac{p\,(1 + \sin \varphi)}{\cos i - \sqrt{\cos^2 i - \cos^2 \varphi}} \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

Demi petit axe de cette ellipse:

$$TB = b = \frac{p\,(1 - \sin \varphi)}{\cos i - \sqrt{\cos^2 i - \cos^2 \varphi}} \quad . \quad . \quad . \quad (6)$$

Actions moléculaires conjuguées relatives au plan du parement intérieur OM:

$$s_{\min} = s = \frac{(a+b)}{2} \left[\cos \Theta - \sqrt{\cos^2 \Theta - \cos^2 \varphi} \right] . \quad (7)$$

$$s_{\max} = \frac{(a+b)}{2} \left[\cos \Theta + \sqrt{\cos^2 \Theta - \cos^2 \varphi} \right] \quad . \quad . \quad (8)$$

L'examen des figures 4 et 5 dispense de toute explication au sujet de la signification des notations adoptées. Le rappel de la succession des opérations qui a permis à M. d'Ocagne d'atteindre le but proposé trouvera tout naturellement sa place ici:

1° Sur une horizontale décrire un demi-cercle $AB = 2R$ avec un rayon quelconque choisi comme unité de mesure.

2° Sur le prolongement de AB déterminer le point T dont la distance au centre O du demi-cercle est égale à $R/\sin\varphi$.

3° Mener la tangente TC; par construction l'inclinaison de cette droite sur l'horizontale est égale au talus naturel des terres φ. La longueur de TC, mesurée à l'échelle des forces, représente l'action moléculaire c relative à un plan de rupture.

4° Mener la sécante TNM interceptant avec l'horizontale l'angle i égal à la déclivité du massif adossé au mur. Les deux segments TN et TM, délimités par la demi-circonférence sur la droite TNM, représentent respectivement les intensités des actions moléculaires conjuguées suivant la ligne de charge r et la verticale p. Pour les murs de soutènement on considère l'état d'équilibre limite avec poussée minimum; pour les murs d'arrêt la condition $r > p$ est satisfaite et l'état d'équilibre limite avec poussée maximum interviendra dans le calcul de l'action des terres.

5° Mener la bissectrice OE de l'angle NOC; on obtient ainsi les angles de rupture $COE = \beta$ et $BOE = \gamma$.

6° Sur la demi-circonférence AB porter à partir du point N vers l'extrémité A du diamètre horizontal la corde NS capable de 2α, double du fruit du parement intérieur. La sécante TS intercepte avec l'horizontale l'angle Θ égal à l'inclinaison de S sur la normale au parement OM. La longueur $s = TS$ représente à l'échelle des forces l'intensité de l'action moléculaire conjuguée du plan OM.

7° Les segments TB et TA de la sécante horizontale TBA représentent respectivement les demi-axes b et a de l'ellipse directrice des actions moléculaires.

La construction indiquée s'applique plus spécialement au profil à fruit intérieur correspondant à la sujétion $\alpha > \beta$ et constituant l'objet principal de notre étude; pour les autres types de mur, elle comporte des variantes résultant des valeurs nulles ou négatives attribuées à l'angle α et de l'inégalité $\alpha < \beta$.

L'utilisation sans modification de l'épure de la figure 4 pour le calcul de S conduit à une solution mixte analytique et graphique rigoureusement exacte en principe, mais peu pratique pour les applications. Dans le cas particulier que nous avons envisagé, et dans celui-là seulement, on déterminera l'inconnue principale Q en mesurant respectivement à l'échelle des longueurs et à celle des forces: 1° la demi-ordonnée $y/2$ du pied M du parement OM rapportée à la surface libre du massif (figure 1); 2° la projection de TN sur le diamètre horizontal soit $q = TN \cos i$ (cette dernière construction n'est pas indiquée sur la figure 4). L'intensité de Q est le produit $q \frac{y}{2} = u \frac{OM}{2}$, en désignant par u la poussée élémentaire relative au parement OM; l'intensité de u ne peut être relevée directement sur l'épure. En définitive la poussée totale est liée à ses composantes par la relation:

$$Q = \int_0^y \Delta y \cos^2 i f(i, \varphi) = \frac{\Delta y^2}{2} \cos^2 i f(i, \varphi) = q \frac{y}{2} = u \frac{OM}{2} \quad (9)$$

La résolution de l'une des équations (1 à 8) donne l'échelle des forces exprimée par le quotient de l'action moléculaire considérée et de sa longueur représentative en mm mesurée sur la figure 4. On trouve généralement un nombre incommensurable ce qui est un inconvénient; pour l'exemple traité on aurait 100 kg = 0,621 mm. La mesure de la corde de l'angle OTS fournit la valeur approximative de la direction de S; dès lors la composante verticale V de l'action des terres est connue de même que la résultante S. En effet on a immédiatement:

$$V = Q \operatorname{tg}(\Theta + \alpha) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (10)$$

$$S = \frac{V}{\sin(\Theta + \alpha)} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (11)$$

On peut envisager une utilisation plus rationnelle de l'élégante construction de M. d'Ocagne, car elle se prête à la détermination de tous les éléments du problème si on la complète par un calcul graphique auxiliaire. Les causes d'erreur dues à l'introduction d'une mesure angulaire approchée dans les formules (10) et (11) sont éliminées grâce à ce tracé complémentaire, et l'on obtient aisément Q, V et S en fonction de $\frac{q}{\cos i}$, p et s. Dans ce but nous modifierons l'épure de la figure 4 en attribuant au rayon du demi-cercle une valeur définie par la relation:

$$R = p \operatorname{tg} \alpha \sqrt{f(i, \varphi)} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (12)$$

Ayant trouvé R, il est facile de choisir ensuite une échelle des forces convenable. La démonstration de la relation (12) ne présente aucune difficulté; elle s'appuie sur une propriété connue du faisceau des tangentes et sécantes issues d'un point extérieur à un cercle (figures 4 et 5). On a identiquement:

$TN \cdot TM = TA \cdot TB = \overline{TC}^2 =$ Constante. Mais $TC = \frac{R}{\operatorname{tg} \varphi}$;

par conséquent: $TN \cdot TM = \Delta y \cos i f(i, \varphi) \cdot \Delta y \cos i = \frac{R^2}{\operatorname{tg}^2 \varphi}$;

d'où l'on tire: $R = \Delta y \cos i \operatorname{tg} \varphi \sqrt{f(i, \varphi)} = p \operatorname{tg} \varphi \sqrt{f(i, \varphi)}$.

Si l'on reproduit la construction de M. d'Ocagne en tenant compte de cette valeur, il est facile de déterminer ensuite par le calcul graphique Q en fonction de u, puis V et S. Au préalable nous rappellerons la formule de Q utilisée à cet effet. On a identiquement: $s \cos(\Theta + \alpha) \cdot OM = u \cdot QM = qy$. Le théorème du sinus appliqué à la base du prisme triangulaire délimité par le parement OM, la surface libre et le segment y du plan vertical de M donne sans difficulté la valeur $y = OM \frac{\cos(i - \alpha)}{\cos i}$; par conséquent:

$$u = q \frac{\cos(i - \alpha)}{\cos i} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (13)$$

En vertu de la formule (1) il vient:

$$u = \Delta y \cos i \cos(i - \alpha) f(i, \varphi) \quad . \quad . \quad (13\,\text{bis})$$

L'examen de la figure 1 montre que

$$OM = \frac{h}{\cos \alpha} \quad \text{et} \quad y = \frac{h \cos(i - \alpha)}{\cos i \cos \alpha}$$

Donc:

$$u = \frac{\Delta h \cos^2(i - \alpha)}{\cos \alpha} f(i, \varphi) \quad . \quad . \quad . \quad (13\,\text{ter})$$

En définitive l'expression de la poussée totale sur la face postérieure de l'ouvrage s'écrira sous la forme:

$$Q = \frac{q \cdot y}{2} = \frac{u\, OM}{2} = \frac{\Delta h^2 \cos^2(i - \alpha)}{2 \cos^2 \alpha} f(i, \varphi) \quad . \quad (14)$$

On en conclut que la force Q est une 4e proportionnelle entre l'unité de longueur, les quantités $OM/2$ et u mesurées à l'échelle du dessin (figure 5). L'intensité de u est la projection de $TS = s$ sur une droite indéfinie issue du pôle T et interceptant l'angle α avec la sécante TBA; on obtient ensuite sans peine les composantes verticales v et V relatives aux forces s et S ayant une direction commune, car l'intensité de V est évidemment une 4e proportionnelle entre les quantités Q, u et v. L'action des terres S est l'hypothénuse du triangle rectangle dont les côtés sont Q et V.

Pour trouver les inconnues du problème, on effectue successivement les opérations suivantes:

1° Mener par le pôle T une droite indéfinie interceptant avec l'horizontale un angle α égal au fruit du parement intérieur.

2° Projeter $TS = s$ sur deux directions orthogonales, l'une d'elles étant la droite précédente, ce qui permet de mesurer les projections horizontale $u = TQ$ et verticale $v = SQ$ de l'action moléculaire s. La poussée Q est une 4e proportionnelle entre les quantités 1^m, $OM/2$ et u.

3° Rabattre TQ en QT_0 sur SQ et porter $Q = QT_1$ sur le prolongement de TQ.

4° Par l'extrémité S de TS mener la parallèle SS' à $T_0 T_1$; la longueur QS' représente l'intensité de la composante verticale cherchée V qui est une 4e proportionnelle entre les forces Q, u et v.

5° Rabattre QT_1 en QT' sur le prolongement de SQ, puis unir $S'T'$, ce qui donne l'action des terres S.

La solution graphique proposée n'exige qu'une seule opération numérique: le calcul du rayon R. Cette sujétion n'est pas indispensable: néanmoins elle constitue un avantage sérieux puisqu'elle permet le choix d'un nombre entier pour l'unité de mesure des forces de la figure 5.

Pour apprécier le degré d'exactitude du procédé graphique déduit des formules de Résal, nous avons traité en détail un exemple numérique. Les figures 1, 2, 3 et 5 ainsi que le tableau des données caractéristiques qui y sont jointes fournissent les indications nécessaires pour l'étude de ce cas concret. Tout commentaire paraît superflu puisqu'il s'agit d'une opération élémentaire, la composition de l'action S avec la réaction P du mur; cependant quelques observations importantes, d'ordre pratique et théorique, retiendront un instant notre attention.

1° La comparaison des trois méthodes de Résal, Poncelet et Gobin, qui est un des buts que nous nous proposons d'atteindre, nous a incité à rechercher toutes les garanties possibles d'exactitude. A cet effet les bras de levier des forces verticales, rapportés au milieu C de la base, et, les coordonnées de centre de gravité des aires totales et partielles de la section ont été calculées respectivement au moyen du théorème de Varignon et des formules connues de la statique. Ces précautions ne sont d'ailleurs pas inutiles quand il y a lieu de craindre que le centre de pression de la résultante générale se rapproche de la périphérie du noyau central.

2° Pour éviter les tâtonnements inhérents au choix de la section Ω, nous avons utilisé les tables spéciales d'Aubry qui donnent directement ou par interpolation l'épaisseur e à la base des divers types de mur par la relation:

$$e = m h \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (15)$$

Dans l'exemple choisi, le coefficient $m = 0{,}475$ et l'épaisseur $e = 0{,}475 \cdot 5^m00 = 2^m375$, soit 2^m40 en chiffres ronds.

3° Le choix définitif de la section, fixé provisoirement au moyen de la formule (15), est subordonné à une vérification qui doit précéder le calcul de résistance de l'ouvrage. Il importe de s'assurer au préalable si la condition $Q' > Q$ est satisfaite, Q' désignant la butée ou composante horizontale de l'action S' sollicitant la projection verticale y' du parement antérieur des fondations augmentée du

STABILITÉ D'UN MUR DE SOUTÈNEMENT A FRUIT INTÉRIEUR

APPLICATION DE LA MÉTHODE DE RÉSAL DE DÉTERMINATION GRAPHIQUE DE L'ACTION DES TERRES.

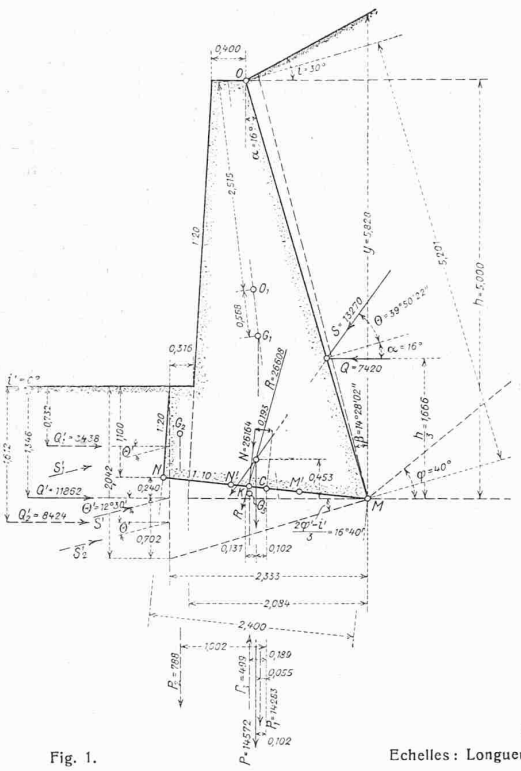


Fig. 1.

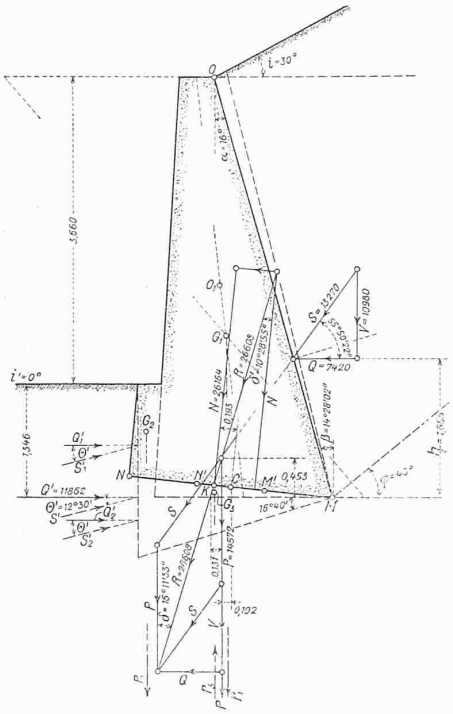


Fig. 2.

Calcul de stabilité
Echelles: Longueurs 1 : 80; Forces 1 mm = 800 kg.

segment y'' sur son prolongement au-dessous de la base. Pour trouver y'' on mène par l'arête M (fig. 1) une oblique interceptant avec l'horizontale l'angle $\left(\frac{2\varphi' - i'}{3}\right)$, puis une verticale par le point d'affleurement de y', ce qui permet de mesurer les segments:

e' sur l'horizontale de M et

$$y'' = e' \operatorname{tg}\left(\frac{2\varphi' - i'}{3}\right)$$

sur le prolongement inférieur de y' augmenté, le cas échéant, de la montée de la base.

Ayant effectué cette construction, on obtiendrait des résultats plausibles pour la butée malgré l'allure passablement arbitraire de la formule proposée qui s'écrira:

$$Q' = B' \frac{\Delta'}{2}\left[y' + e' \operatorname{tg}\left(\frac{2\varphi' - i'}{3}\right)\right] \quad (16)$$

Il suffit de faire varier y' ou e', égal ou un peu inférieur à e, pour que l'inégalité $Q' > Q$ soit vérifiée; pratiquement on pose:

$$Q' = 1{,}5\, Q \quad . \quad (17)$$

On relève sur des tables spéciales le coefficient B' correspondant aux angles φ' et i' du massif des fondations (fig. 1 et 2). On ne compose pas S', correspondant à Q', avec la résultante générale R. Néanmoins nous avons déterminé à titre documentaire les points d'application des deux composantes Q_1' et Q_2' de la butée sur le parement y' et sur le segment y'' à l'aide des relations connues:

$$u' = \frac{2}{3} y';$$

$$u'' = \frac{2}{3}\left[\frac{(y' + y'')^3 - y'^3}{(y' + y'')^2 - y'^2}\right] \quad (18)$$

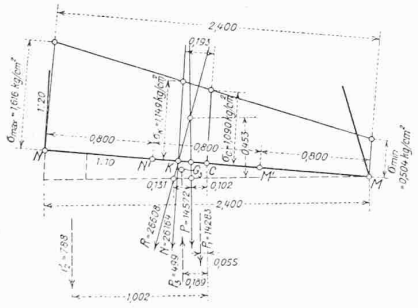


Fig. 3. Taux de fatigue à la base de mur.
Longueurs 1 : 50. — Forces 1 kg/cm² = 1 cm.

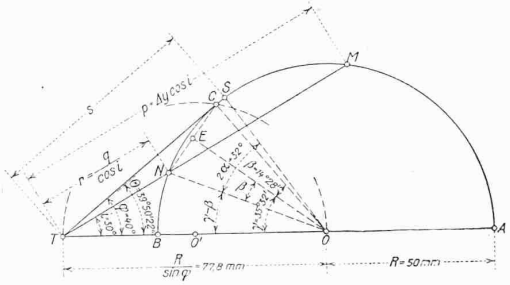


Fig. 4. Calcul graphique de M. d'Ocagne.
Actions modéculaires conjuguées, angles de rupture, direction de l'action des terres.
Echelle des forces (calculée): 0,621 mm = 100 kg.

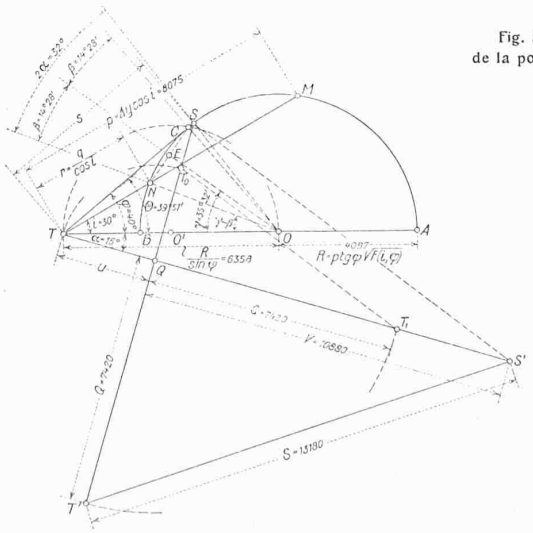
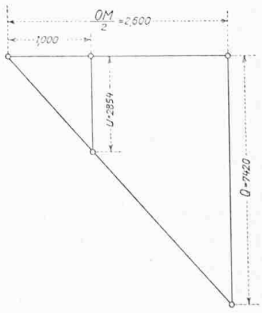


Fig. 5. Détermination graphique de la poussée et de l'action des terres.



Echelle des longueurs 1 : 80,
Echelle des forces: 1 mm = 200 kg.

DONNÉES CARACTÉRISTIQUES:

Terres

- **Remblai Sable et gravier sans argile**
  - Massif de hauteur indéfinie
  - Cohésion $C = 0$
  - Talus naturel $\varphi = 40^0$
  - Déclivité du massif $i = 30^0$
  - Densité $= \Delta\ 1600$ kg/m³
  - Charge de sécurité $\sigma_0 = 2$ kg/cm²
- **Fondations Sable et gravier argileux**
  - Profondeur maximum 1,34 m
  - Cohésion $C' = 0$
  - Talus naturel $\varphi' = 25^0$
  - Déclivité du massif $i' = 0^0$
  - Densité $\Delta' = 1800$ kg/m³
  - Charge de sécurité $\sigma_0 = 2$ kg/cm²

Maçonneries

- Hauteur de mur $h = 5{,}00$ m
- Fruit du parement intérieur $\alpha = +16^0$
- Densité $D = 2300$ kg/m³
- Angle de frottement sur l'argile $\varphi_0 = 27^0$
- Charge de sécurité $\sigma_0 = 8$ kg/cm²

La direction négative de S' est donnée, d'après Aubry, par l'oblique descendante inclinée de l'angle $\Theta' = \frac{i' - \varphi'}{2}$ sur l'horizon. Tout est connu sauf le point d'application de Q' qu'il est aisé de trouver au moyen du théorème des moments.

4° Les conditions de stabilité diffèrent quelque peu de celles qui étaient admises par les auteurs anciens; dans l'énumération qu'il nous a paru utile de rappeler, nous suivrons l'ordre de priorité: a) la butée est liée à la poussée par la relation $Q' = 1{,}5\,Q$; b) la composante tangentielle doit être inférieure au frottement sur le fond des fouilles; en d'autres termes: $\operatorname{tg}\delta' < \operatorname{tg}\varphi_0$; c) le travail à l'extension n'étant pas toléré, le centre des pressions de chaque section doit se trouver à l'intérieur du noyau central; dans l'exemple de la planche I cette vérification a été effectuée seulement pour la base; d) les compressions extrêmes sur les arêtes ne dépasseront pas la charge de sécurité admissible σ_0 pour la maçonnerie; e) le taux de fatigue maximum sur l'arête de renversement de la base sera au plus égal à la charge de sécurité du terrain des fondations σ_0'.

Ce rappel des conditions de stabilité fait ressortir les motifs qui incitent à disposer la base en contre-pente par rapport au talus; les risques de glissement diminuent d'autant plus que cette inclinaison se rapproche davantage de la normale à la courbe des pressions. La vérification du coefficient de stabilité donne des résultats illusoires.

5° La condition $C' = 0$ est rarement satisfaite pour les fondations, car on a presque toujours affaire à un terrain en place plus on moins argileux et par conséquent cohérent. Nous l'avons admise par raison de simplification dans l'exemple étudié à la planche I. Le massif de la plateforme a une densité supérieure à celle du remblai homogène adossé à la face postérieure du mur; cette dernière hypothèse qui nous a paru plausible a l'avantage de ne pas compliquer la recherche du point d'application de la poussée. Fréquemment le terrain est stratifié en bancs hétérogènes dont la densité croit de la surface libre au fond de la fouille. (à suivre.)

Die Elektrifikation der Schweizerischen Bundesbahnen und die Wirtschaftlichkeit des elektrischen Bahnbetriebes.

Von Ing. A. JOBIN, Bern,
Sektionschef bei der Abteilung für die Elektrifikation der S. B. B.

(Schluss von Seite 59.)

III. DIE WIRTSCHAFTLICHKEIT DES ELEKTRISCHEN BAHNBETRIEBES ALS FUNKTION DES VERKEHRS, DES KOHLENPREISES UND DER ENERGIEKOSTEN.

Im vorigen Kapitel wurde an Hand der bisherigen Erfahrungen der Schweizerischen Bundesbahnen gezeigt, dass sich das in der Elektrifizierung im Jahre 1927 angelegte *Mehr*kapital bei den heutigen Erstellungskosten mit 8 % verzinsen würde, wenn der elektrische Betrieb gleich teuer wie der Dampfbetrieb zu stehen kommen soll; dies bei Energieversorgung aus bahneigenen Kraftwerken sowie bei einem mittlern jährlichen Verkehr von 7 750 000 tkm, einschliesslich Lok.-Gew., pro Bahn-km und bei einem Kohlenpreis von 38 Fr./t franco Grenze. Wir wollen im folgenden untersuchen, wie sich die Verhältnisse gestalten würden bei grösserem oder kleinerem Verkehr, bei andern Kohlenpreisen, sowie bei Beschaffung von Energie aus bahnfremden Quellen, sei es direkt ab Werk, sei es in unmittelbarer Nähe der eigenen Unterwerke oder schliesslich am Austritt aus bahnfremden Unterwerken in der für die Speisung der Fahrleitungen erforderlichen Spannung.

Wir beginnen mit der Berechnung des bei verschiedenen Verkehrsdichten in Betracht kommenden *Anlage-Kapitals*, wobei wir dabei einfachheitshalber annehmen, dass lediglich das in den Triebfahrzeugen angelegte Kapital proportional mit dem Verkehr variiert, während die Kosten aller übrigen Anlagen keine Aenderung erfahren (Tab. 11).

Die jährlichen *Betriebskosten*, einschliesslich der Rücklagen für Tilgung und Erneuerung, aber ausschliesslich der Verzinsung, die vorläufig unberücksichtigt bleibt, lassen sich nun an Hand der bisherigen Ausführungen gemäss Tabelle 12 ermitteln.

Die in Tabelle 10a angeführten Ersparnisse können ihrerseits als dem Verkehr ungefähr proportional angesehen werden, wobei sich die Kohlenkosten-Ersparnisse naturgemäss noch nach dem Kohlenpreis richten.

Für die vier in den Tabellen 11 und 12 betrachteten Verkehrswerte kommen somit die in Tabelle 13 zusammengestellten Ersparnisse in Frage. Die Unterschiede zwischen diesen Ersparnissen und den in Tabelle 12 angeführten Betriebskosten, *ausschliesslich Verzinsung*, stellen nun, wenn der elektrische und der Dampfbetrieb gleich teuer zu stehen kommen sollen, Summen dar, die als die *Rendite* der in der Elektrifikation angelegten *Mehr*-Kapitalien zu berücksichtigen sind. Diese Differenzen und die sich hieraus ergebenden Renditen in % der Anlagekapitalien sind in Tabelle 14 zusammengefasst, die für die weitern 66 möglichen Kombinationen der in den Tabellen 11, 12 und 13 angeführten Zahlen fortzuführen wäre. Die Ergebnisse aller dieser Rechnungen sind in den Abbildungen 2 bis 5 auf Seite 75 graphisch aufgetragen.

Diese Abbildungen geben somit zunächst für das betrachtete Netz der S. B. B. die Höhe der Verzinsung an, die, bei gleich hohen Kosten des elektrischen und des Dampfbetriebes, auf das in der Elektrifikation angelegte *Mehr*kapital ausbezahlt werden kann bei verschiedenen Verkehrsmengen, bei verschiedenen Kohlenpreisen und, im Falle der Energieversorgung aus bahnfremden Quellen, bei verschiedenen Gestehungspreisen der Energie.

So zeigt beispielsweise die Abb. 2, dass die Elektrifikation des betrachteten Netzes der S. B. B., bei einem

Tabelle 11. Berechnung des Anlagekapitals.

Mittlerer Jahresverkehr pro Bahn-km in Mill. tkm, einschl. Lok.-Gew.	4,250	6,000	7,750	9,500
	in Millionen Franken			
Heutiger Anschaffungswert				
der elektr. Triebfahrzeuge . . .	79	112	144	177
der entspr. Dampflokomotiven .	55	78	100	123
5. *Mehr*kosten der elektr. Triebfahrzeuge	24	34	44	54
Heutige Baukosten				
1. der Kraftwerke	—	—	130	—
2. der Uebertragungsleitungen . .	—	—	26	—
3. der Unterwerke	—	—	27	—
4. der Streckenausrüstung . . .	—	—	103	—
In der Elektrifikation angelegtes Kapital, abzüglich der Kosten der sonst erforderlichen Dampflokomotiven (= *Mehr*anlagekapital)				
I Mit bahneigenen Kraftwerken 1 + 2 + 3 + 4 + 5	—	320	330	340
II Mit gekaufter bahnfremder Energie ab Werk, 2 + 3 + 4 + 5 .	180	190	200	210
III Mit gekaufter bahnfremder Energie, unmittelbar vor den eigenen Unterwerken 3 + 4 + 5 . . .	154	164	174	184
IV Mit gekaufter bahnfremder Energie, ab bahnfremden Unterwerken 4 + 5	127	137	147	157