

# INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



*This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:*

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

*This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.*

# Méthode graphique et nomographique rapide pour le dimensionnement de talus

A Rapid Graphical and Nomographical Method for Slope Dimensioning

G. STEFANOFF, *Professeur de Mécanique des Sols, Sofia, Bulgarie*

C. CHRISTOW, *Ingénieur des Mines, Sofia, Bulgarie*

## SOMMAIRE

Sur la base de la méthode  $F_p$  de N. N. Maslov, une méthode graphique rapide pour le dimensionnement de talus et une méthode nomographique pour l'évaluation rapide des angles du talus sont proposées. On donne une construction graphique pour la généralisation de la règle de Fellenius au diagramme curviligne de cisaillement. Les méthodes ont été appliquées lors de l'établissement de profondes mines à ciel ouvert en Bulgarie.

## SUMMARY

On the basis of N. N. Maslov's method  $F_p$ , a rapid graphical method for the dimensioning of slopes and a nomographical method for the rapid calculation of the angles of slopes are suggested. A graphical structure for the extension of Fellenius' rule for a curvilinear shear diagram is given. These methods have been applied in designing of deep open pits in Bulgaria.

CHAQUE MÉTHODE DE DÉTERMINATION DE LA STABILITÉ des talus accuse des avantages et des défauts. Un défaut commun à la plupart des méthodes est la grande masse des calculs. La méthode proposée par Maslov (1949, 1955) permet de construire facilement un talus stable, ce qui est d'une importance particulière pour les hauts talus, où l'angle du talus, favorable du point de vue statique, diminue avec la profondeur. La méthode graphique exposée ci-dessous a été employée lors de la construction de mines à ciel ouvert en Bulgarie.

## MÉTHODE $F_p$ DU TALUS À STABILITÉ ÉQUIVALENTE

La méthode repose sur deux prémisses.

Selon la première prémisses et une validité donnée de la loi de Coulomb (fig. 1):

$$\tau(\sigma) = c + \sigma \tan \phi, \quad (1)$$

où  $\tau$ , contrainte de cisaillement,  $c$ , cohésion,  $\sigma$ , contrainte normale,  $\phi$ , angle de frottement; par analogie aux sols non cohérents la pente du talus stable

$$\tan \beta = \tan \Psi_p = F_p \quad (2)$$

où  $\beta$  est l'angle d'inclinaison du talus avec l'horizontale,

$$F_p = \tan \Psi_p = \tau(\sigma)/\sigma = c/\sigma + \tan \phi. \quad (3)$$

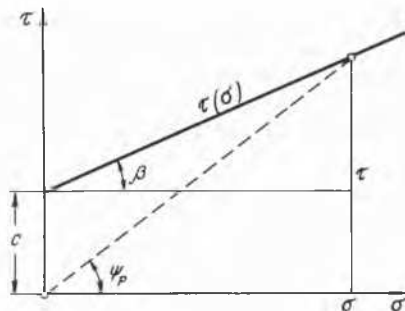


FIG. 1. Loi de Coulomb et première prémisses de la méthode  $F_p$ .

Selon la seconde prémisses la contrainte normale:

$$\sigma = \gamma \cdot H, \quad (4)$$

où  $\gamma$ , poids spécifique du sol;  $H$ , hauteur verticale du talus.

Cela veut dire que Maslov admet l'égalité entre les contraintes principales, agissantes dans le plan vertical, perpendiculaire au talus dans le point respectif. Cette prémisses "extraordinaire" est valide lors d'un équilibre limite du massif.

Des Eqs 3 et 4 il suit que pour les sols non cohérents le talus stable varie graduellement de  $\tan \beta = \tan \Psi_p = \infty$ , lorsque  $H = 0$  à  $\tan \beta = \tan \Psi_p = \tan \phi$ , lorsque  $H = \infty$  (fig. 2). Puisque

$$\tan \beta = \tan \Psi_p = dz/dx, \quad (5)$$

après intégration on obtient l'équation du talus stable d'après le système de coordonnées  $(x, z)$  de la fig. 2

$$x = \frac{1}{\gamma \tan^2 \phi} [\tan \phi \cdot \gamma z + c \ln c - c \ln(\tan \phi \cdot \gamma z + c)]. \quad (6)$$

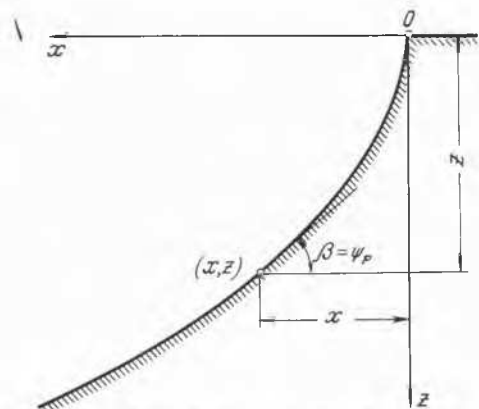


FIG. 2. Talus de forme statique favorable.

Afin d'éviter le travail de calculs sur l'Eq 6, nous avons proposé une méthode graphique et une méthode nomographique pour la construction du talus, basées sur la méthode  $F_p$ . La méthode  $F_p$  peut être appliquée également lors d'une fonction curviligne (figs. 3 et 4).

#### FACTEUR DE SÉCURITÉ $F$

La prémisses  $\beta = \Psi_p$  (Eq 2) est valide pour  $F = 1$ . Pour que le talus déterminé selon la méthode  $F_p$  ait une certaine sécurité, la condition

$$\tan \beta = \tan \Psi_p / F \quad (7)$$

doit être remplie.

En remplaçant  $\tan \Psi_p$  de l'Eq 3 dans l'Eq 7 on obtient

$$\tan \beta = \frac{1}{\sigma} \frac{\tau(\sigma)}{F} = \frac{1}{\sigma} \frac{c}{F} + \frac{\tan \phi}{F}, \quad (8)$$

c'est-à-dire la règle de Fellenius reste en vigueur

$$\left. \begin{aligned} \tan \bar{\phi} &= \tan \phi / F \\ \bar{c} &= c / F \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Dans Eq 9  $\phi$  et  $c$  sont les paramètres de la résistance au cisaillement effectivement déterminés pour un sol donné;  $\phi$  et  $\bar{c}$  sont les paramètres respectifs lors d'un équilibre limite du massif.

La règle de Fellenius peut être aussi appliquée lors d'une fonction curviligne  $\tau(\sigma)$  à l'aide d'une construction graphique, donnée dans la fig. 3 (Stefanoff, 1956): la fonction

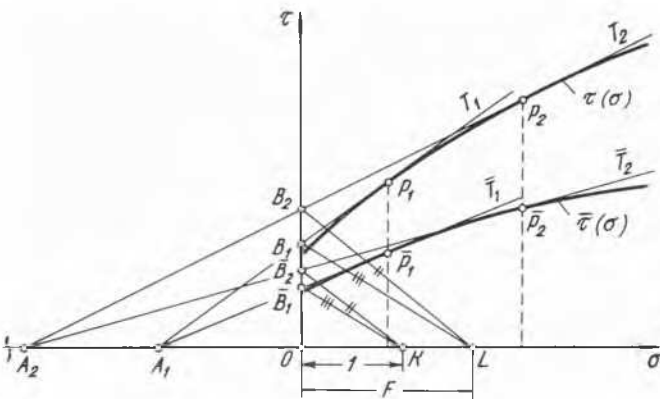


FIG. 3. Construction graphique pour la réduction du diagramme de résistance au cisaillement.

$\tau(\sigma)$  est donnée, portée dans un système de coordonnées  $(\sigma, \tau)$ ; on transporte les distances  $OK = 1$  et  $OL = F$  sur l'abscisse à une échelle arbitraire; vers un point arbitraire  $P_1$  on trace la tangente  $T_1$  jusqu'au point de croisement  $A_1$  avec l'abscisse; le point de croisement  $B_1$  de la tangente avec l'ordonnée est réuni au point  $L$ ; on trace  $\bar{B}_1 K \parallel B_1 L$  et on obtient le point  $\bar{B}_1$ ;  $A_1 \bar{B}_1$  représente la tangente  $\bar{T}_1$  de la courbe cherchée  $\bar{\tau}(\sigma)$ ; le point de croisement  $\bar{P}_1$  de la tangente  $\bar{T}_1$  avec la droite parallèle à l'ordonnée tracée à travers le point  $P_1$  est le point recherché de la courbe  $\bar{\tau}(\sigma)$ ; de manière analogue on peut aussi construire d'autres points de la courbe cherchée et édifier la fonction réduite elle-même; elle est similaire à la courbe donnée.

Lors d'une fonction linéaire (loi de Coulomb) la construction aboutit à trouver l'une des tangentes d'après le mode décrit.

Le coefficient de sécurité dans chaque point du talus est

$$F = \tan \Psi_p / \tan \beta. \quad (7a)$$

L'Eq 8 peut être présentée également de la manière suivante:

$$\tan \beta = \bar{\tau}(\sigma) / \sigma = \bar{F}_p, \quad (8a)$$

où

$$\bar{\tau}(\sigma) = \tau(\sigma) / F \quad (8b)$$

et

$$\bar{F}_p = F_p / F. \quad (8c)$$

A l'aide de calculs comparatifs d'après les méthodes connues pour la détermination de la sécurité contre glissement circulaire nous avons établi que le facteur effectif de sécurité d'un talus construit selon la méthode  $F_p$  est de 20 à 30 pour cent plus élevé que le  $F$  adopté lors du calcul. La raison en est dans la deuxième prémisses de la méthode (Eq 4). La contrainte normale effective dans un point quelconque du talus est toujours  $\sigma < \gamma.H$ . Il s'en suit que selon l'Eq 3, la pente effective du talus stable  $\tan \Psi_p$  est plus inclinée, et, par conséquent,  $F$  d'après l'Eq 7a est aussi plus grand, tandis que le facteur de sécurité adopté pour réduire  $\tau$ , respectivement  $c$  et  $\phi$ , est fictif. Cela signifie que lors de l'application de la méthode  $F_p$  on peut employer un  $F$  plus petit. Notre expérience a démontré que dans certains cas  $F = 1$  est suffisant. De la fig. 1 ou de l'Eq 3 il est évident qu'avec l'augmentation de la cohésion  $c$ , l'angle  $\Psi_p$  varie dans de plus larges limites. C'est-à-dire que la différence entre le facteur de sécurité effectif et le facteur fictif selon la méthode  $F_p$  est sensible en cas de sols fortement cohérents et moindre pour les sols peu cohérents. Elle n'existe point du tout chez les sols non cohérents, parce que, en raison de  $c = 0$ , selon l'Eq 3, on y arrive au fait connu

$$\beta = \Psi_p = \phi, \quad (10)$$

et la seconde prémisses de la méthode  $F_p$ , devenue superflue en l'occurrence, tombe.

#### MÉTHODE GRAPHIQUE

La méthode graphique provient directement des prémisses de Maslov (Stafanoff, 1956). On part du profil géologique et de la fonction réduite  $\bar{\tau}(\sigma)$ . Quand le talus ne comprend qu'une couche, la construction est la suivante (fig. 4):

1. La hauteur totale du talus est subdivisée en lamelles horizontales à hauteur arbitraire  $\Delta H$ . On admet que le talus, établi pour la base de la lamelle, est valable pour tout le domaine de  $\Delta H$ .

2. On mesure la profondeur  $H_1$  de la base de la lamelle la plus inférieure (au pied du talus) à partir de la surface du terrain et on la porte à la même échelle sur l'axe  $H$ , qui est tracé comme troisième axe sous un angle arbitrairement choisi par rapport au système de coordonnées  $(\sigma, \tau)$ .

3. On calcule  $\sigma_1 = \gamma.H_1$  et on la porte sur l'axe  $\sigma$ . On tire la droite  $\overline{H_1 \sigma_1}$ .

4. Sur  $\bar{\tau}(\sigma)$  à l'aide de  $\overline{P_1 \sigma_1} \parallel \overline{O \tau}$  on trouve le point  $P_1$ .

5.  $\overline{A \bar{B}} \parallel \overline{O P_1}$  ( $\beta_1 = \Psi_1$ ).

6. On mesure la profondeur  $H_2$  jusqu'à la lamelle suivante et on porte cette valeur sur l'axe  $H$ .

7. A l'aide de  $\overline{H_2 \sigma_2} \parallel \overline{H_1 \sigma_1}$  on détermine  $\sigma_2$  sur l'axe  $\sigma$ .

8. Sur  $\bar{\tau}(\sigma)$  on détermine le point  $P_2$ .

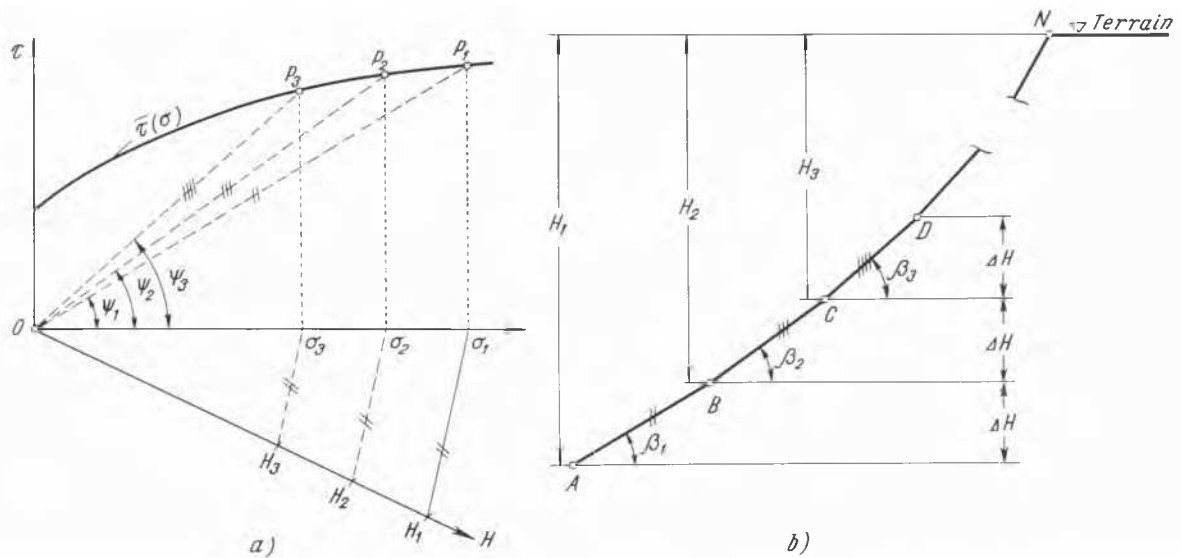


FIG. 4. Méthode graphique pour l'établissement du talus (a) détermination de  $\Psi_i$ ; (b) talus.

9. On trace  $\overline{BC} \parallel \overline{OP}_2$  ( $\beta_2 = \Psi_2$ ), etc.

La ligne brisée ABCD . . . N obtenue représente le talus stable, déterminé selon la méthode  $F_p$ . Il n'est pas indispensable de tracer les lignes pointillées et hachurées dans la fig. 4.

Si la coupe géologique est composée de plusieurs couches, la construction est analogue. Chaque couche est subdivisée en lamelles. Les angles  $\beta_i = \Psi_i$  sont déterminés par les diagrammes respectifs  $\bar{\tau}_i(\sigma)$ , qui doivent être donnés pour chaque couche à part.

#### MÉTHODE NOMOGRAPHIQUE

Nous avons vu que l'angle du talus  $\beta$  est une fonction à 6 variables, c'est-à-dire

$$\bar{F}_p[\beta, c, \phi, F, \gamma, H] = 0. \quad (11)$$

La fig. 5 donne un schéma du nomogramme exprimant cette fonction (Christow, 1960).

Prenant en considération que l'Eq 4 contient  $\gamma$  et  $H$ , et que Eq 8a, en relation avec Eq 1, donne la fonction entre  $F$ ,  $c$ , et  $\phi$ , Eq 11 peut être énoncée

$$\bar{F}_p[\beta, \bar{\tau}(\sigma), \sigma] = 0; \quad (11a)$$

d'ailleurs, cette fonction a déjà été explicitement exprimée

$$\tan \beta = \bar{\tau}(\sigma)/\sigma. \quad (8a)$$

Eq 8a est l'équation canonique du nomogramme. Son aptitude d'être exprimée en nomogramme est prouvée (Christow, 1960). Sur la fig. 5 elle est représentée par le système de coordonnées  $(\sigma, \tau)$ , par la fonction réduite  $\bar{\tau}(\sigma)$  et par l'arc  $\beta = \Psi$ , tracé à l'aide du rayon vecteur  $r = \text{const}$ .

Le nomogramme de l'Eq 4 peut être construit de plusieurs manières (Christow, 1960). L'une d'elles est représentée sur la fig. 5 à l'aide d'un faisceau de rayons, sortant de l'origine du système de coordonnées  $(\sigma, H)$ , pour  $\gamma = 1, 2, 3$ .

En superposant les deux systèmes de coordonnées  $(\sigma, \tau)$  et  $(\sigma, H)$  on obtient le nomogramme intégral. La manipulation avec le nomogramme est indiquée sur la même fig. 5.

Pour des besoins pratiques il est rationnel de multiplier au préalable les réseaux nomographiques contenant tous les

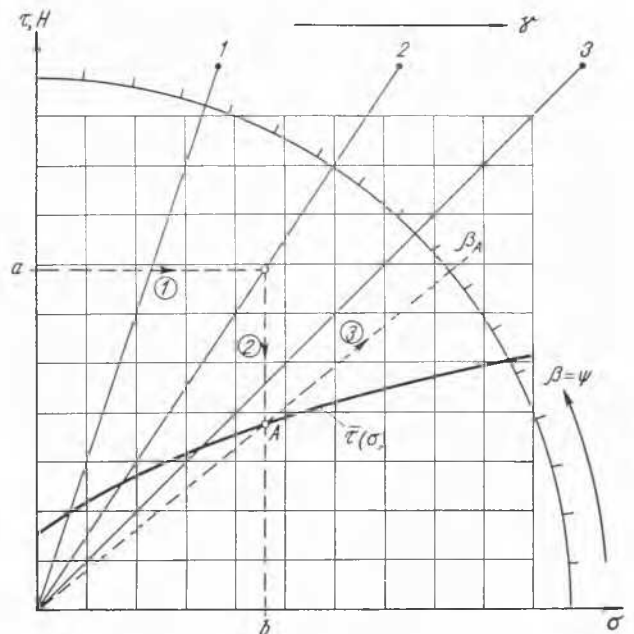


FIG. 5. Schéma du diagramme pour la détermination de l'angle d'inclinaison  $\beta$  du talus avec l'horizontale. Manipulation nomographique: donné:  $H = a$ ,  $\gamma = 2$ ,  $\bar{\tau}(\sigma)$ , déterminé:  $\beta = \beta_A$ ; résultat secondaire:  $\sigma = b$ .

éléments du nomogramme à l'exception de la courbe  $\bar{\tau}(\sigma)$ . Celle-ci est tracée pour chaque cas particulier.

A l'aide de ce même nomogramme on peut aussi résoudre le problème inverse, c'est-à-dire déterminer le coefficient de sécurité d'un certain talus. A cette fin il est nécessaire de porter sur le réseau nomographique les fonctions  $\bar{\tau}_i(\sigma)$ , réduites par différents coefficients de sécurité. La méthode est élaborée en détail (Christow, 1963).

#### CONCLUSION

Les méthodes graphique et nomographique décrites, servant à l'établissement des projets de talus, peuvent être appliquées presque sans restrictions, par exemple pour des

couches ou des terrains en pente. Les méthodes proposées sont simples et rapides. Chez toutes les autres méthodes, qui présument un glissement circulaire, il faut accepter d'abord un talus et vérifier ensuite sa sécurité. Dans ce cas il est utile de construire le talus préliminaire avec un coefficient fictif minimal de sécurité (par exemple,  $F = 1$ ), et ensuite, à l'aide de méthodes précises (par exemple Fröhlich, 1950), d'établir le coefficient réel de sécurité.

Alors que la plupart des méthodes classiques présument un glissement circulaire, la méthode  $F_1$  n'est pas liée à une telle prémisses. Par conséquent, elle peut être appliquée aussi aux cas où les conditions géologiques font nettement entrevoir qu'un glissement circulaire n'est pas possible.

Enfin, à l'appui des méthodes décrites ci-dessus, on pourrait relever le fait suivant: aucune des méthodes connues pour la détermination de la sécurité des talus ne peut prétendre être absolument précise, d'une part, à cause des prémisses idéalisées chez les différentes méthodes et, d'autre part, à cause de l'impossibilité d'établir avec grande précision les paramètres de la résistance au cisaillement du sol. En raison de ces faits, il est indiqué, en employant les méthodes

rapides ci-dessus exposées, d'étudier quelques cas à données de départ différentes. De cette manière on obtient une appréciation plus achevée et on choisit d'une façon mieux fondée la solution la plus convenable.

#### RÉFÉRENCES

- CHRISTOW, C. K. (1960). Nomographie des Verfahrens  $F_1$ , von Prof. N. N. Maslow zur Berechnung von Tagebauböschungen. *Bergbautechnik*, 10.Jg., Heft 12.
- (1963). Ein neues nomographisches Verfahren zur Bestimmung des Standsicherheitsgrades von Böschungen. *Die Bautechnik*, Heft 8.
- FRÖHLICH, O. K. (1950). Sicherheit gegen Rutschung einer Erdmasse auf Kreiszyklindrischer Gleitfläche mit Berücksichtigung der Spannungsverteilung in dieser Fläche. Wien, Federhofer-Girkmann-Festschrift.
- MASLOV, N. N. (1949). *Mécanique des sols appliquée*. Moscou (en russe).
- (1955). *Conditions de stabilité des pentes et des talus dans les travaux hydrotechniques*. Moscou (en russe).
- STEFANOFF, G. (1956). Méthode graphique rapide pour la détermination des talus. *Stroitelstvo* (Sofia), No. 8 (en bulgare).