MARIE VIOLAY, FEDERICA SANDRONE

Exercise TE-03

Convergence – Confinement Method
Méthode de convergence - confinement

Assistant: A. Guggisberg (EPFL-LEMR)

Ex. TE03.1

The following input parameters are considered:
Les paramètres d'entrée suivants sont pris en compte :

Radius / *Rayon*: R = 5.50 m
Depth / *Profondeur* : H = 600 m
Specific weight of the rock mass / *Poids spécifique*: γ = 27 kN / m^3
Young Modulus: E = 800 MN / m^2
Poisson's coefficient: ν = 0.33
Friction angle (Mohr Coulomb failure criterion) / *Angle de frottement*: φ= 21°
Cohesion (Mohr Coulomb failure criterion) / *Cohésion*: c = 1.3 MN / m^2
Dilatancy / *Dilatance*: ψ = 0°

I- The stability ratio can be evaluated using the formula
Le ratio de stabilité, N peut être évalué à l'aide de la formule suivante

$$N = \frac{2\sigma_0}{\sigma_c}$$

With / *avec*

$\sigma_0 = \gamma H = 16.2$ MPa

$$\sigma_c = \frac{2\,c\,\cos\phi}{1-\sin\phi} \sim 3.8 \text{ MPa}$$

N = 8.6

This value is >5, thus a yielded zone around the tunnel and ahead the face is expected. Some failure can be observed and a face support could be necessary.
Cette valeur est > 5, soit une zone plastifiée autour du tunnel et devant le front est attendue. Des ruptures / instabilités peuvent être observées et un soutènement du front pourrait être nécessaire.

II- For evaluating the tunnel wall displacement far from the face without support (u_{pl}) it is necessary to draw the **convergence curve**, using the formulas given for an elastic-perfectly plastic medium, in particular the following points can be evaluated:
*Pour évaluer le déplacement des parois du tunnel très loin du front d'excavation et sans soutènement (u_{pl}), il est nécessaire de tracer la **courbe de convergence**, en utilisant les formules données pour un milieu élastique parfaitement plastique, en particulier les points suivants peuvent être calculés*:

- Start of the elastic behaviour (straight line):
  Début du comportement élastique (ligne droite)
  $p = \sigma_0 = \gamma H = 16.2$ MPa, $u_{el} = 0$mm

- End of the elastic behaviour / Start of the plastic behaviour (curve):
  Fin du comportement élastique / début du comportement plastique (courbe):

  $p_{cr} = \sigma_0 \cdot (1 - \sin\varphi) - c \cdot \cos\varphi$ = 9.2 MPa, u_{cr} = 0.06 m

- End of the plastic behaviour (curve):
  Fin du comportement plastique (courbe):

  p = 0, **u_{pl} = 0.85 m**

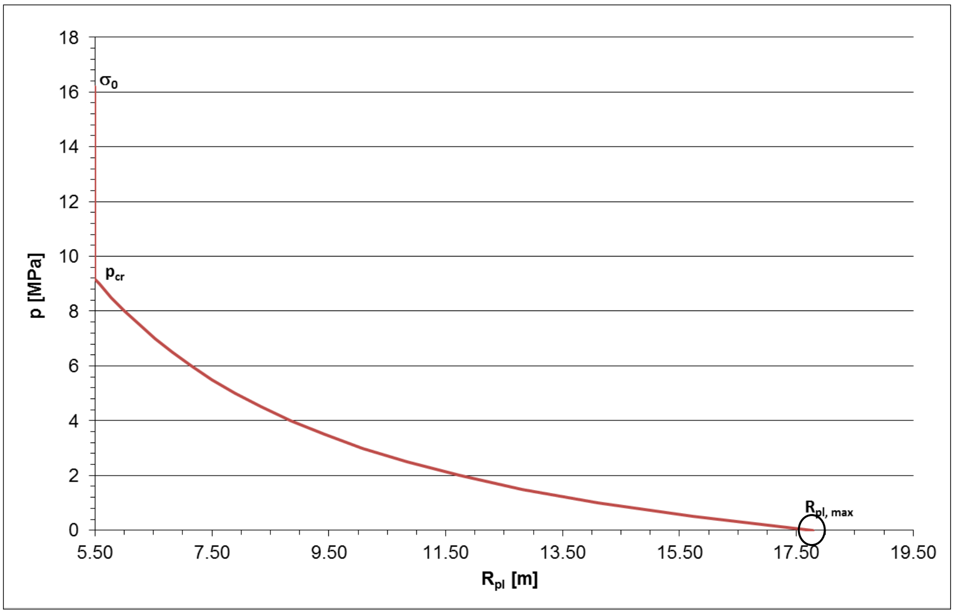
  Calculated using the following formulas:
  Calculé avec les formules suivantes:

$$u_R = \frac{1+\nu}{E} R \left[F_1 + F_2 \left(\frac{R}{R_{pl}} \right)^{K_p - 1} + F_3 \left(\frac{R_{pl}}{R} \right)^{K_{psi}+1} \right]$$

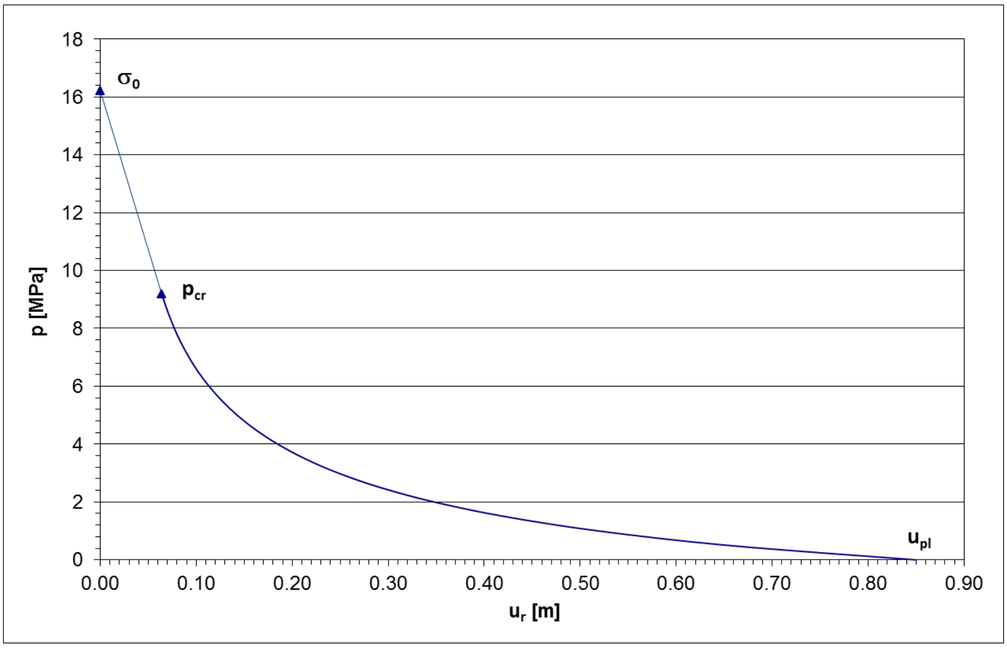
Where: / *où:*

$K_p = \frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi}$	= 2.12
$K_{psi} = \frac{1+\sin\psi}{1-\sin\psi}$	= 1.00
$F_1 = -\left[(1-2\nu)(\sigma_0 + c \cdot ctg\varphi)\right]$	= - 6.66 MPa
$F_2 = \left[\frac{(1-\nu)(1+K_p \cdot K_{psi})}{(K_p + K_{psi})} - \nu \right] \cdot \frac{2(\sigma_0 + c \cdot ctg\varphi)}{(K_p + 1)}$	= 4.27 MPa
$F_3 = \frac{2(1-\nu)(K_p - 1)(\sigma_0 + c \cdot ctg\varphi)}{(K_p + K_{psi})}$	= 9.41 MPa
$R_{pl} = R \left[\frac{2}{(K_p+1)} \cdot \frac{(\sigma_0 + c \cdot ctg\varphi)}{(p_i + c \cdot ctg\varphi)} \right]^{\frac{1}{K_p - 1}}$	*Function of p_i* (*) $R_{pl\,max}$ = 17.8 m with p_i = 0 MPa

(*) Considering the following R_{pl} values, the $R_{pl,max}$ max corresponds to the value obtained with p_i = 0 MPa:
Avec R_{pl} décrit par la courbe ci-dessous, $R_{pl,max}$ max correspond à la valeur obtenue avec p_i = 0 MPa :



The **convergence curve** is: / *La **courbe de convergence** est:*



III- For estimating the rock load acting on the support and the compressive stress in the shotcrete it is necessary to draw the **confinement line.**
Using the following information: the temporary support is placed at D_0 = 3 m behind the face it is possible to **evaluate the u_{in}** (displacement of the sidewalls before placing the support). Since the rock mass behave as elastic-perfectly plastic medium the self-similarity principle introduced by Corbetta applies:
*Pour estimer la charge du massif agissant sur le soutènement et la contrainte de compression dans le béton projeté, il est nécessaire de tracer la **courbe de confinement**.*
*En utilisant les informations suivantes : le soutènement temporaire est placé à D_0 = 3 m derrière le front, il est possible d'**évaluer l'u_{in}** (déplacement des parois latérales avant la mise en place du soutènement). Le massif rocheux a un comportement élastique parfaitement plastique, le principe de similarité introduit par Corbetta s'applique :*

$$u_{in} = \frac{(1+\nu)}{E} \cdot R \cdot \sigma_0 \cdot \chi \cdot \left[1 - 0.71 \cdot e^{-1.5 D^{0.7}}\right],$$

with / *avec*

$$u_{el} = \frac{1+\nu}{E} \cdot \sigma_0 \cdot R \qquad = 0.15 \text{ m}$$

$$\chi = \frac{u_{pl}}{u_{el}} \qquad = 5.73$$

$$D = \frac{D_0}{R \cdot \chi} \qquad = 0.095$$

→ **u_{in} = 0.4 m**

The confinement line can be drawn using the formula:
La courbe de confinement peut être tracée à l'aide de la formule :

$$p_s = (u_R - u_{in}) k_s$$

With **support stiffness k_s = 110. 7 MPa/m** evaluated with the formula for a shotcrete ring
*Avec une **rigidité du soutènement k_s = 110. 7 MPa/m** évaluée avec la formule pour un anneau de béton projeté*

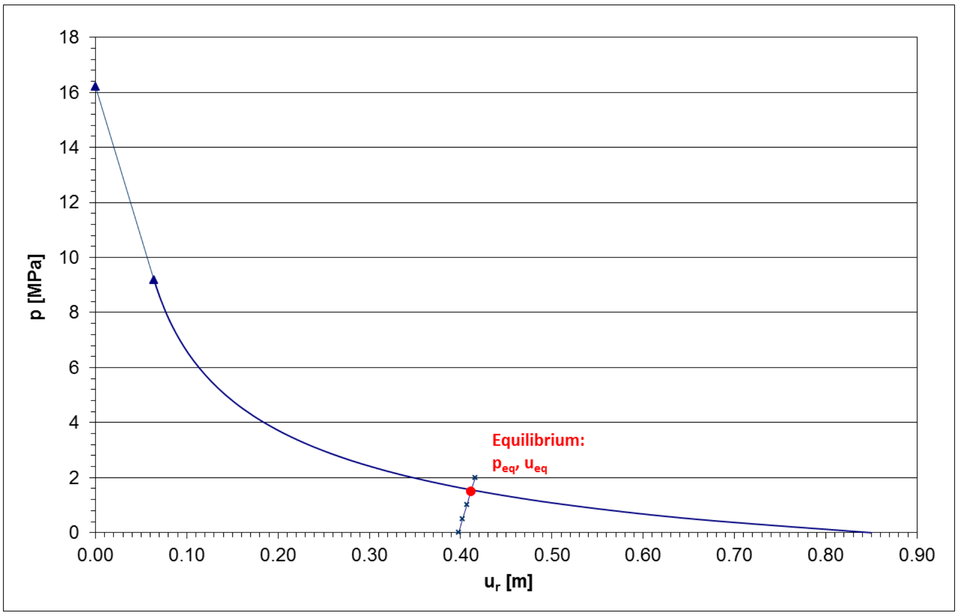
$$k_{shot} = \frac{E_{con} \cdot \left[R^2 - (R-s)^2 \right]}{(1+\nu_{con}) \cdot \left[(1-2\cdot\nu_{con}) R^2 + (R-s)^2 \right]} \cdot \frac{1}{R}$$

Where / *où*

E = 10'000 MN /m2
ν = 0.25
Thickness / *Epaisseur* s = 30 cm

The load acting on the support is given by the intersection of the convergence curve with the confinement line (= tunnel equilibrium):
La charge agissant sur le soutènement est donnée par l'intersection de la courbe de convergence avec la courbe de confinement (= équilibre du tunnel):

p_{eq} = 1.5 MPa, u_{eq} = 0.41 m



The compressive stress acting in the shotcrete can be estimated by assuming that the equilibrium happens at p_{eq} = p_{max}, considering a shotcrete ring with t_s = ring thickness = 30 cm.
La contrainte de compression agissant dans l'anneau de béton projeté peut être estimée en supposant que l'équilibre se produit à p_{eq} =p_{max}, en considérant un anneau de béton projeté avec ts = épaisseur de l'anneau = 30 cm.

$$p_{\max} = \frac{t_s}{R} \cdot \sigma_{s,\max}$$

→ **$\sigma_{s,max}$ = 27.5 MPa**