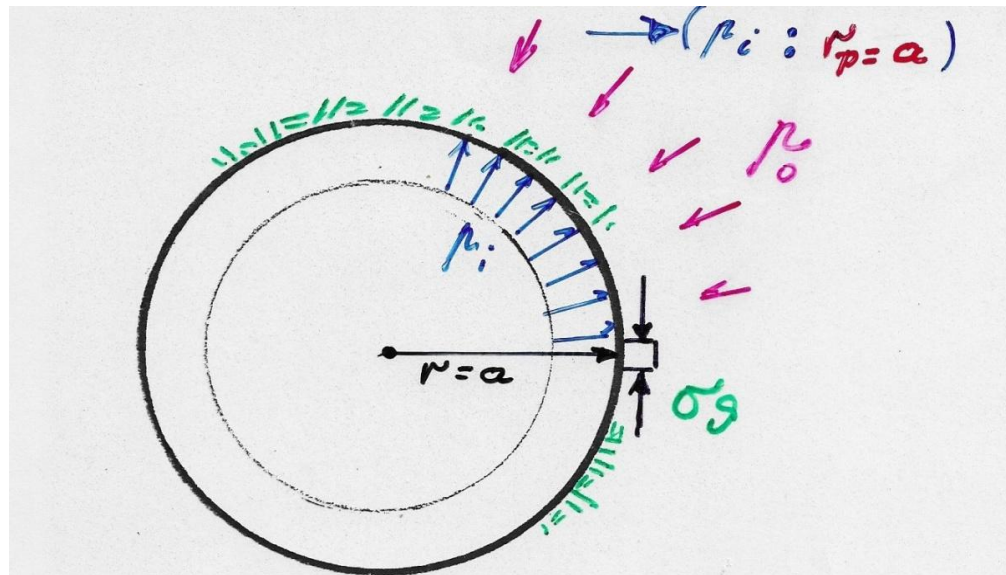


ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ

Βασίλειος Παπαδόπουλος

**ΓΡΑΜΜΗ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ-ΑΠΟΤΟΝΩΣΗΣ
ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΜΕ ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ**

ΟΡΙΑΚΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΠΙΕΣΗ p_i



Στην ελαστική περιοχή: ($r = a$)

$$\sigma_\theta = 2p_o - p_i \quad (\text{εφαρμογή})$$

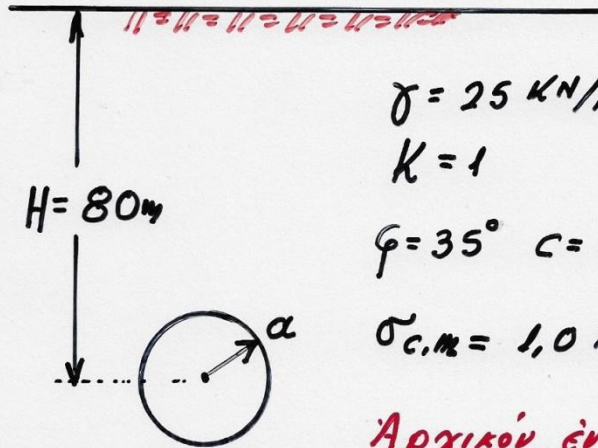
Στην πλαστική περιοχή: ($r = a$)

$$\sigma_1 = \sigma_{c,m} + k_r \cdot \sigma_3$$

$$\text{ή } \sigma_\theta = \sigma_{c,m} + k_r \cdot p_i = 2p_o - p_i$$

$$\text{άρα } p_i = \frac{2p_o - \sigma_{c,m}}{k_r + 1} \Rightarrow r_p = a$$

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ



$$\gamma = 25 \text{ κΝ/μ}^3$$

$$K = 1$$

$$\varphi = 35^\circ \quad c = 0,26 \text{ ΜΡα}$$

$$\sigma_{c,m} = 1,0 \text{ ΜΡα}$$

Αρχικό έντατικό πεδίο

$$\rho_0 = \gamma H = 2000 \text{ ΚΡα} = 2 \text{ ΜΡα}$$

$$\sigma_{c,m} < 2\rho_0 = \text{ταχσθ} = 4 \text{ ΜΡα} \quad \left(\frac{\sigma_{c,m}}{\rho_0} = 0,50 \right)$$

Για πλήρη αποτόνωση: ($\rho_i = 0$)

$$\rho_p/a = \left[\frac{2}{K_p + 1} \cdot \frac{\sigma_{c,m} + \rho_0(K_p - 1)}{\sigma_{c,m}} \right] \frac{1}{K_p - 1}$$

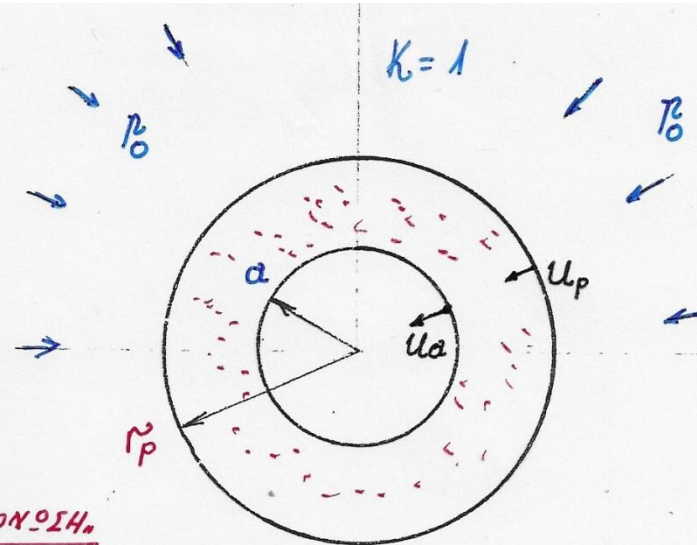
$$K_p = (\lambda_r) = \epsilon \varphi^2 (45^\circ + \varphi/2) = 3,69, \Rightarrow \underline{\underline{\rho_p = 1,45a}}$$

160 δύναμη εσωτερική πίεση $\rho_{i,op}$

$$\rho_{i,op} = \frac{2\rho_0 - \sigma_{c,m}}{K_p + 1} = \frac{2 \times 2,0 - 1,0}{3,69 + 1} = 0,64 \text{ ΜΡα}$$

(Τότε $\rho_p = a$)

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΚΤΙΝΙΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΣ ΣΤΟ ΟΡΙΟ



ΠΛΗΡΗΣ ΑΠΟΤΟΛΩΣΗ

Ακτίνα πλαστικής ζώνης:

$$r_p = a \cdot \left[\frac{2}{k_p + 1} \cdot \frac{\sigma_{c,m} + p_0 (k_p - 1)}{\sigma_{c,m}} \right]^{\frac{1}{k_p - 1}}$$

Μετατόπιση στο όριο της πλαστικής ζώνης ($r = r_p$)

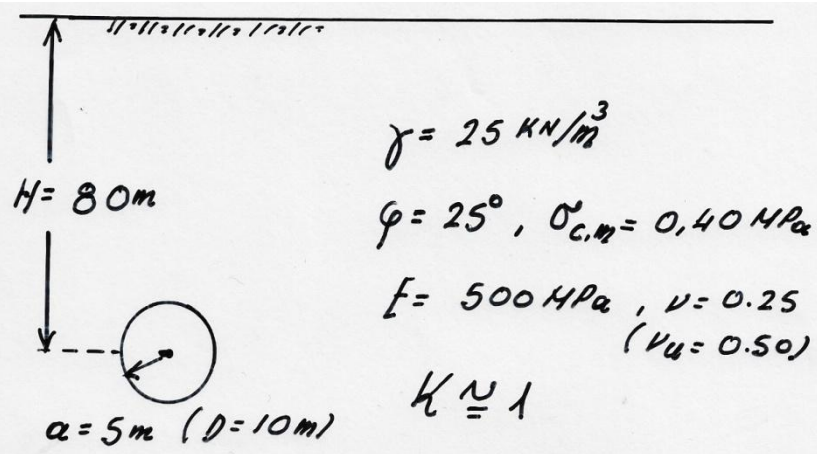
$$u_p = r_p \cdot \frac{(1 + \nu)}{k_p + 1} \cdot \frac{\sigma_{c,m} + p_0 (k_p - 1)}{E}$$

Ακτινική μετατόπιση στην άντυρα ($r = a$)

$$u_a = a - \sqrt{a^2 - u_p (2r_p - u_p)}$$

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

ΧΑΡΑΞΗ ΓΡΑΜΜΗΣ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ-ΑΠΟΤΟΝΩΣΗΣ



• Αρχικό έντατικό πεδίο $P_0 = \gamma \cdot H = 2000\text{ kPa} = 2,0\text{ MPa}$

• Ελαστική παραμόρφωση

$$u_{r,e} = \frac{(1+\nu)}{E} \cdot P_0 \cdot a = \frac{1,25 \times 2,0 \times 500\text{ cm}}{500} = \underline{\underline{2,50\text{ cm}}}$$

• Ίσοδύναμη εσωτερική πίεση

$$P_{i,op} = \frac{2P_0 - \sigma_{c,m}}{\kappa\rho + 1} = \frac{2 \times 2,0 - 0,40}{2,464 + 1} = \underline{\underline{1,04\text{ MPa}}}$$

$$(\kappa\rho = \epsilon\varphi^2 (45^\circ + \varphi/2)) = 2,464)$$

• Ακτίνα πλαστικής ζώνης (ψηφής αντίστασης)

$$r_p = a \left[\frac{2}{\kappa\rho + 1} + \frac{\sigma_{c,m} + P_0(\kappa\rho - 1)}{\sigma_{c,m}} \right]^{\frac{1}{\kappa\rho - 1}} = 2,921 \times a = \underline{\underline{14,605\text{ m}}}$$

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

ΧΑΡΑΞΗ ΓΡΑΜΜΗΣ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ-ΑΠΟΤΟΝΩΣΗΣ

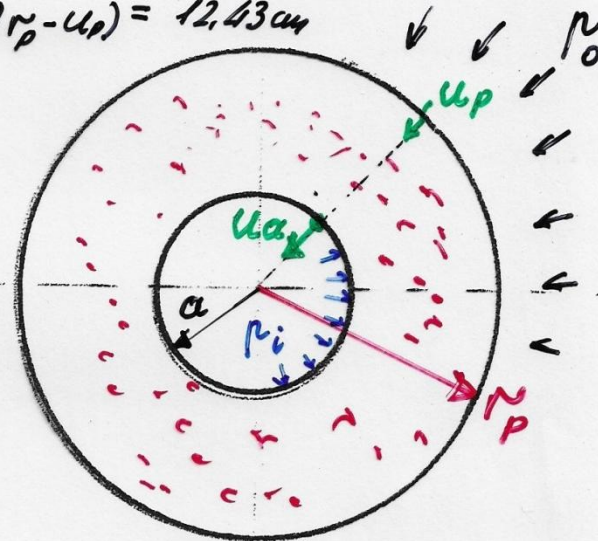
- Μετατόπιση στο όριο της πλαστικής ζώνης

$$u_p = \frac{(1+\nu)}{k_p+1} \cdot \frac{\sigma_{c,m} + p_0(k_p-1) \cdot r_p}{E} = 4,21 \text{ cm}$$

- Μετατόπιση στην άκρη (όριο, $r=a$)

$$u_a = a - \sqrt{a^2 - u_p(2r_p - u_p)} = 12,43 \text{ cm}$$

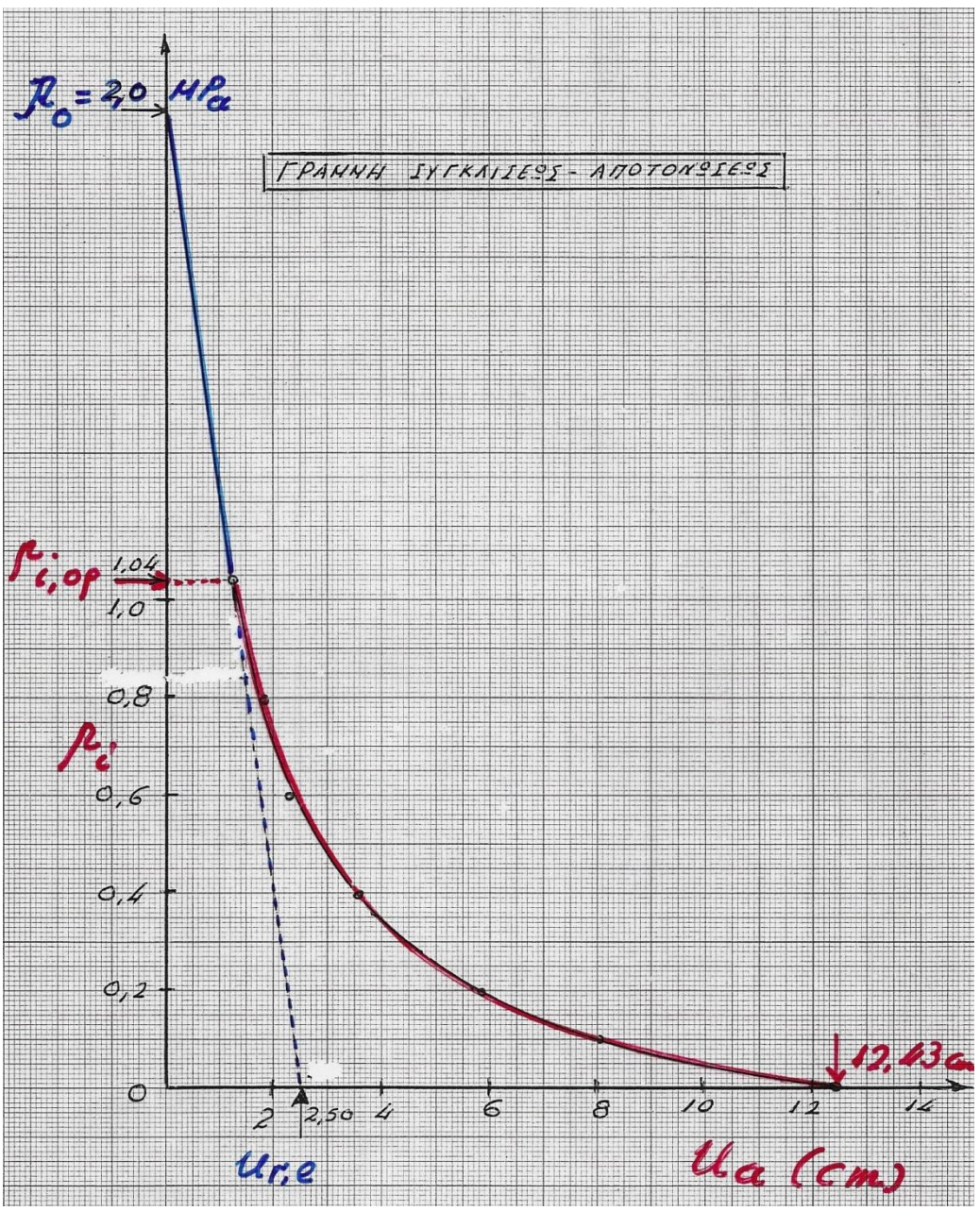
- Όριακή πίεση:
 $p_{i,op} = 1,04 \text{ MPa}$



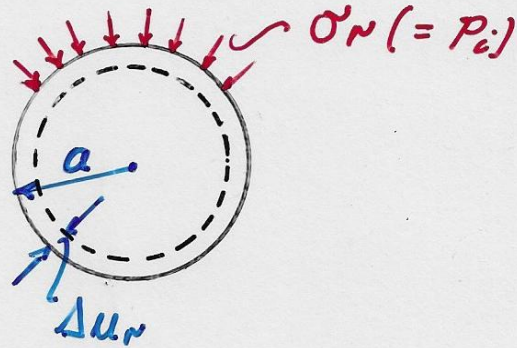
- Για $0 \leq r_i \leq r_{i,op}$

$$r_p/a = \left[\frac{2}{k_p+1} \cdot \frac{\sigma_{c,m} + p_0(k_p-1)}{\sigma_{c,m} + p_i(k_p-1)} \right] \frac{1}{k_p-1}$$

$r_p \rightarrow u_p \rightarrow u_a$, Για κάθε τιμή r_i



ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΜΕ ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ



- Πάχος Ε-Σ (ή ο.Σ): t
- Ελαστικές σταθερές: E_s, ν_s

- Αξονική δύναμη (ανά μ.π.): $N = p_i \cdot a$ (κΝ/μ)
- Αξονική τάση διατομής: $\sigma = \frac{N}{t} = \frac{p_i \cdot a}{t}$ (κΝ/μ²)
- Απλοποιούμε σχέση παραμόρφωσης:

$$\frac{\Delta u_r}{a} = \frac{(1 - \nu_s^2) \cdot p_i \cdot a}{E_s \cdot t} \quad \eta$$

$$\frac{\Delta u_r}{p_i} = \frac{(1 - \nu_s^2)}{E_s} \cdot \frac{a^2}{t}$$

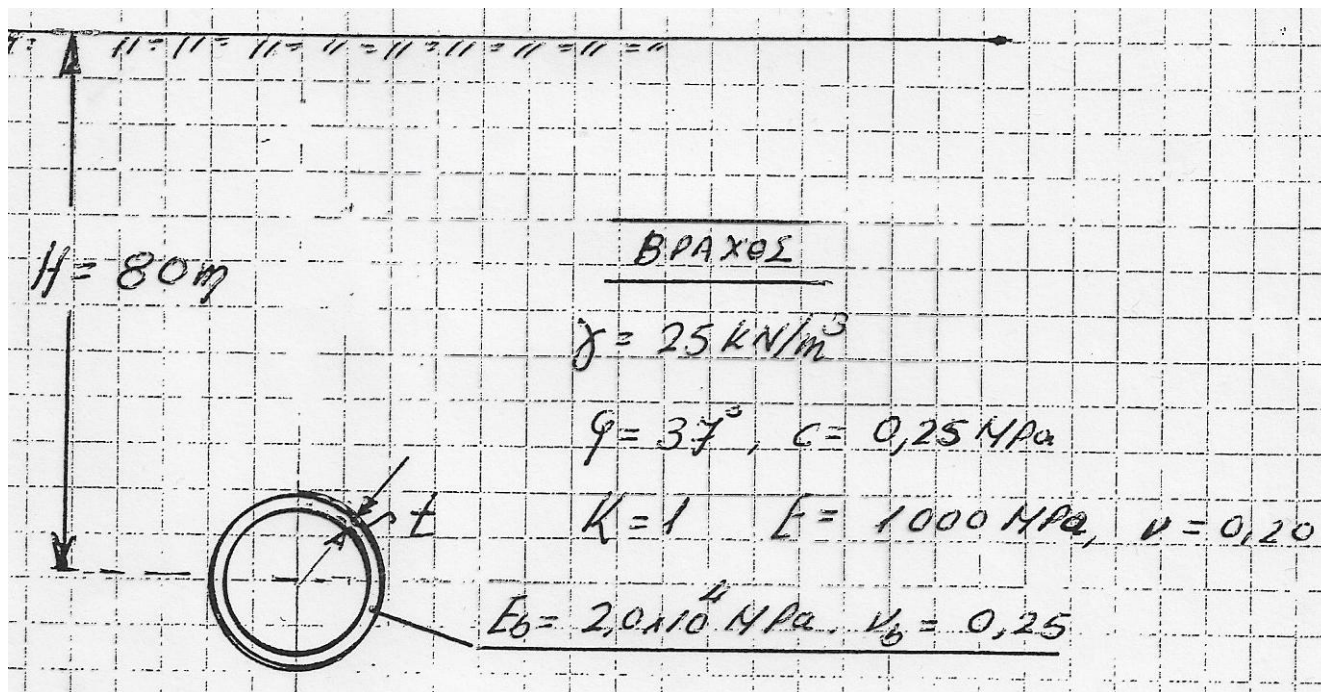
(Δu_r : πρόσδετη ακτινική παραμόρφωση λόγω της ακτινικής τάσεως $\sigma_r = p_i$)

ΑΣΚΗΣΗ

Μετά τη διάνοιξη της σήραγγας διαμέτρου $D = 2a = 10$ m και αμέσως μετά την ανάπτυξη ακτινικής παραμορφώσεως ίσης προς το 25% της θεωρητικής τομής u_e (που θα αναπτυσσόταν τελικώς υπό την προϋπόθεση ισχύος της θεωρίας γραμμικής ελαστικότητας), κατασκευάζεται προσωρινή υποστήριξη πάχους t .

Για δύο ακραίες τιμές, $t_1 = 0,05$ m και $t_2 = 0,30$ m να εκτιμηθούν:

- Οι αντίστοιχες πιέσεις επί της προσωρινής υποστηρίξεως.
- Οι αντίστοιχες τελικές ακτινικές παραμορφώσεις.



Αρχικό εντατικό πεδίο:

$$p_0 = \gamma \cdot H = 25 \cdot 80 = 2000 \text{ kPa} = 2 \text{ MPa}$$

- "Ελαστική" ακτινική παραμόρφωση ($K=1$)

$$u_e = \frac{p_0 (1+\nu)}{E} \cdot a = \frac{2 \text{ MPa} \times 1,20}{1000 \text{ MPa}} \times 500 \text{ cm} = 1,20 \text{ cm}$$

- Ίσοδύναμη έσωτερική πίεση κατά τον χρόνο κατασκευής της προσωρινής υποστήριξης

Με την παραδοχή ισχύος της Θ.Ε ($p_i > p_{i,op}$)

$$\frac{p_0 - p_i}{p_0} = \frac{u_i}{u_e} = 0,25 \Rightarrow p_i = 0,75 p_0$$

$$\text{ή } p_i = 1500 \text{ kPa} = \underline{1,5 \text{ MPa}}$$

- Όριακή έσωτερική πίεση $p_{i,op}$:

$$p_{i,op} = \frac{2p_0 - \sigma_{c,m}}{K_p + 1}$$

$$\sigma_{c,m} = 2 \cdot c \cdot \epsilon_\varphi (15^\circ + \varphi/2) \cong 1000 \text{ kPa} = 1 \text{ MPa}$$

$$K_p = \epsilon_\varphi^2 (15^\circ + \varphi/2) = 4,023$$

$$p_{i,op} = 597 \text{ kPa} \sim 600 \text{ kPa} = 0,6 \text{ MPa}$$

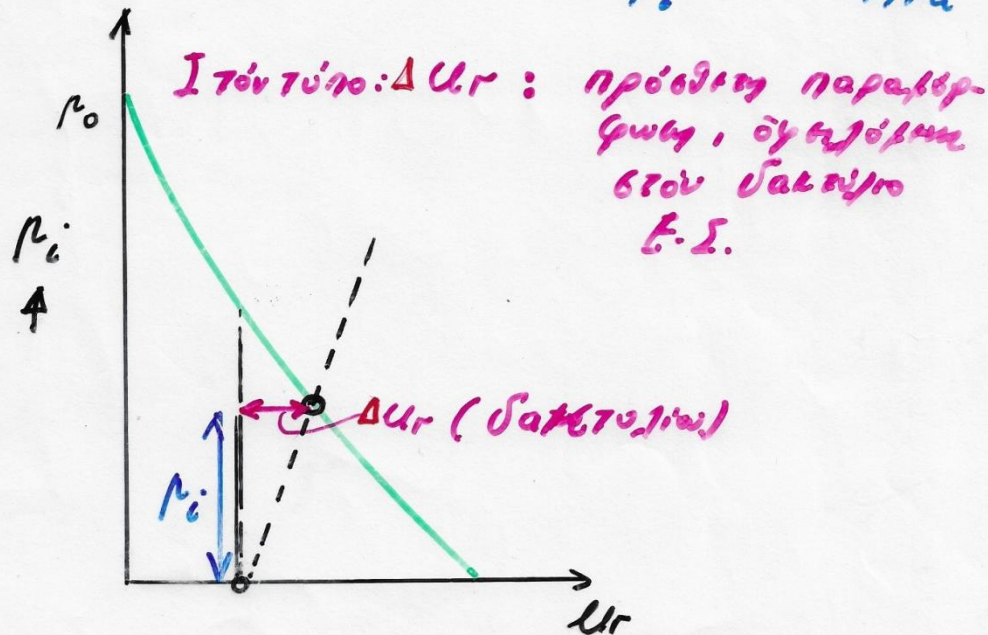
ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΔΑΚΤΥΛΙΟΥ ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

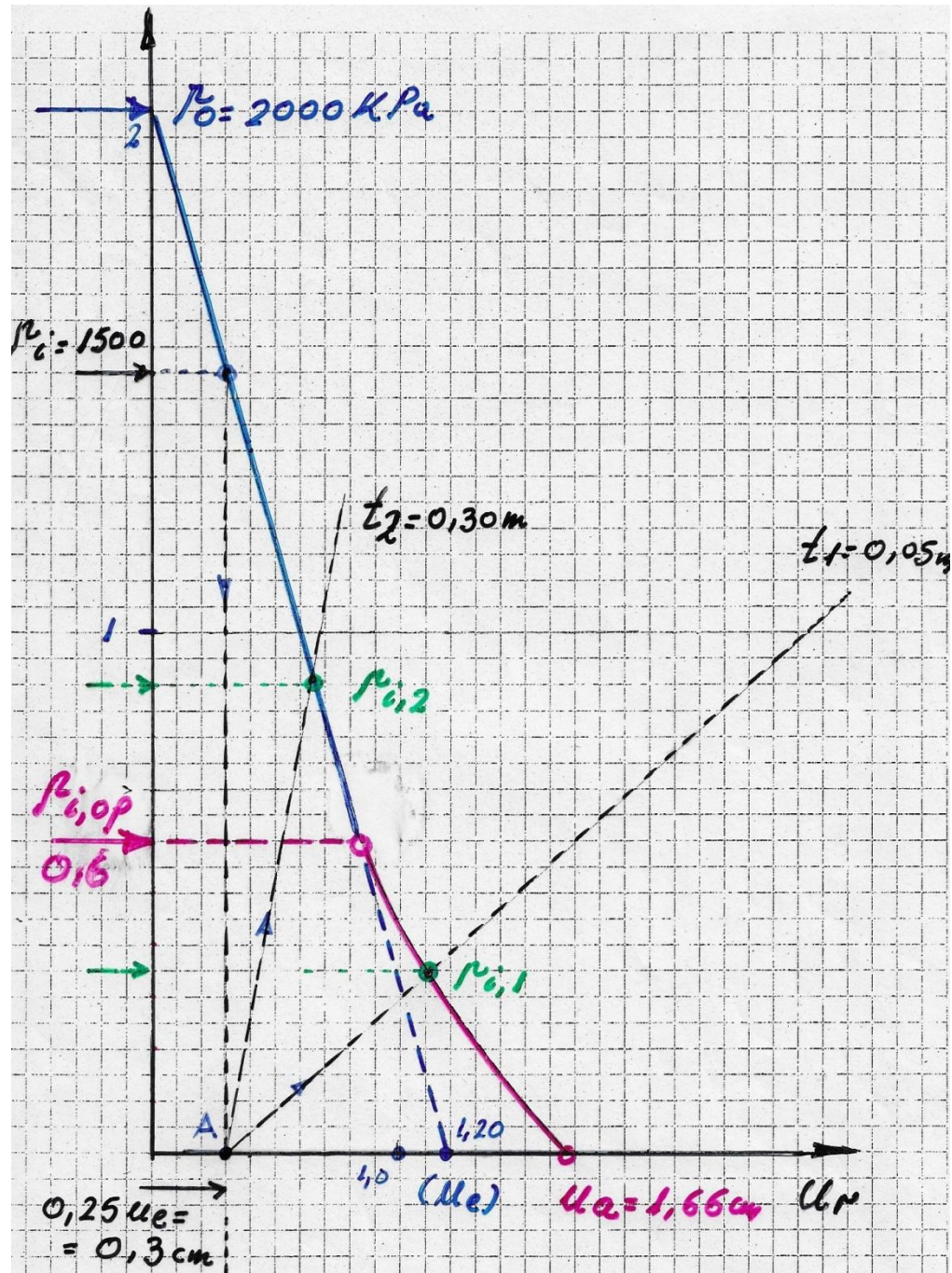
Προσεγγιστική σχέση: $\Delta \frac{u_r}{r_i} = \frac{(1-\nu_b^2) \cdot \alpha^2}{E_b} \cdot \frac{1}{t}$

Προκλήση: $\Delta \frac{u_r}{r_i} = \frac{11,719}{t \text{ (cm)}} \left(\frac{\text{cm}}{\text{MPa}} \right)$

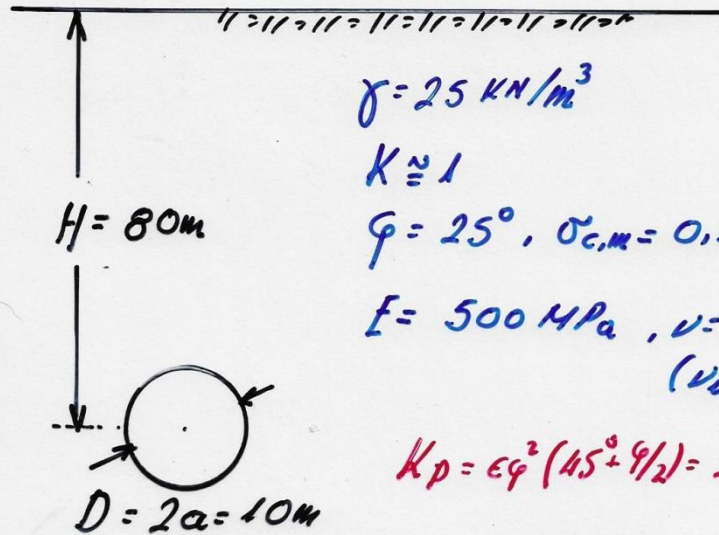
→ Για $t_1 = 0,05 \text{ m} = 5 \text{ cm}$, $\Delta \frac{u_r}{r_i} = 2,34 \frac{\text{cm}}{\text{MPa}}$

→ Για $t_2 = 0,30 \text{ m} = 30 \text{ cm}$, $\Delta \frac{u_r}{r_i} = 0,39 \frac{\text{cm}}{\text{MPa}}$





ΕΦΑΡΜΟΓΗ



- Αρχικό έντατικό πεδίο:

$$P_0 = \gamma H = 25 \times 80 = 2000 \text{ kPa} = 2.0 \text{ MPa}$$

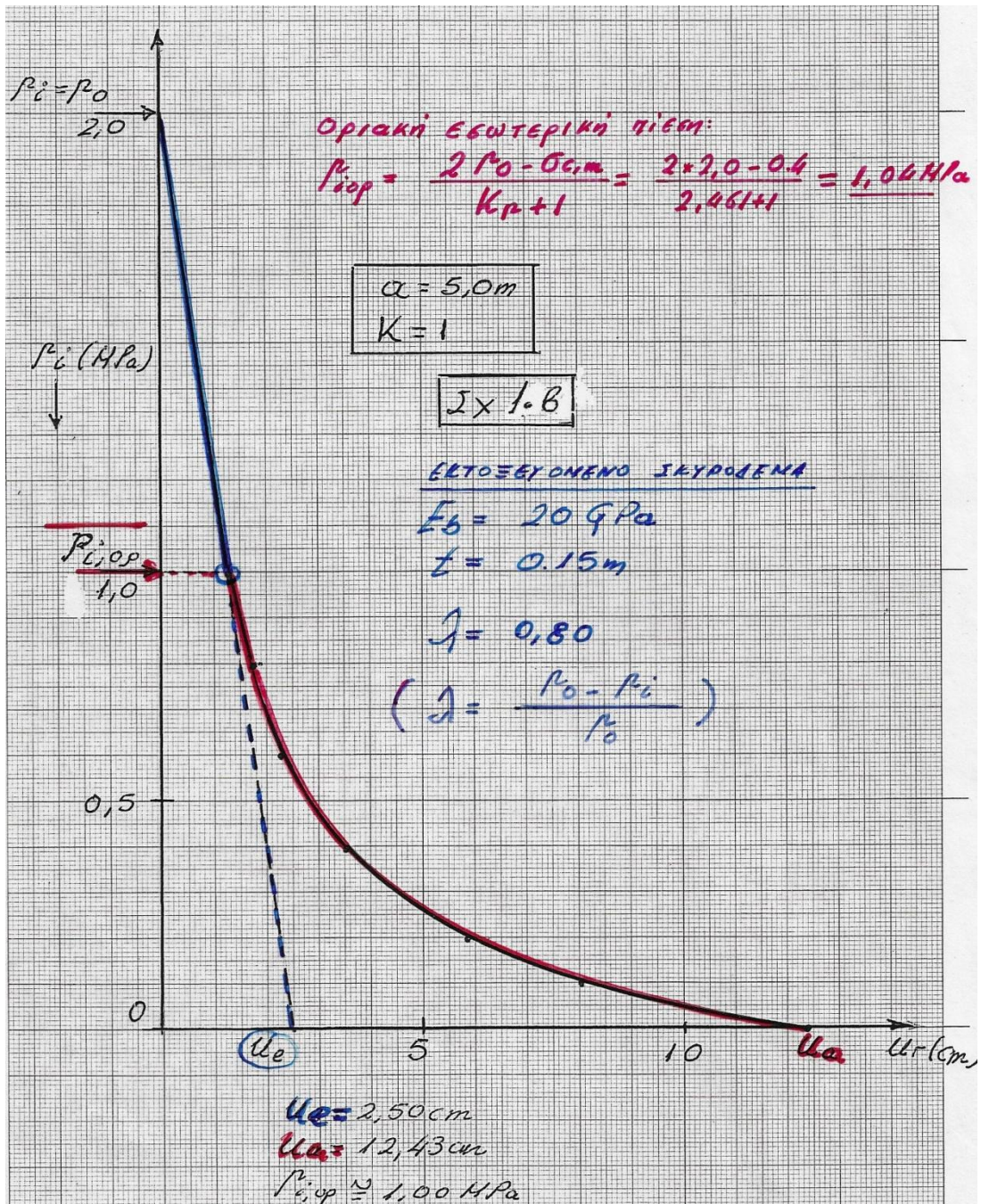
- "Ελαστική" παραμόρφωση (πλήρης αποτόνωση)

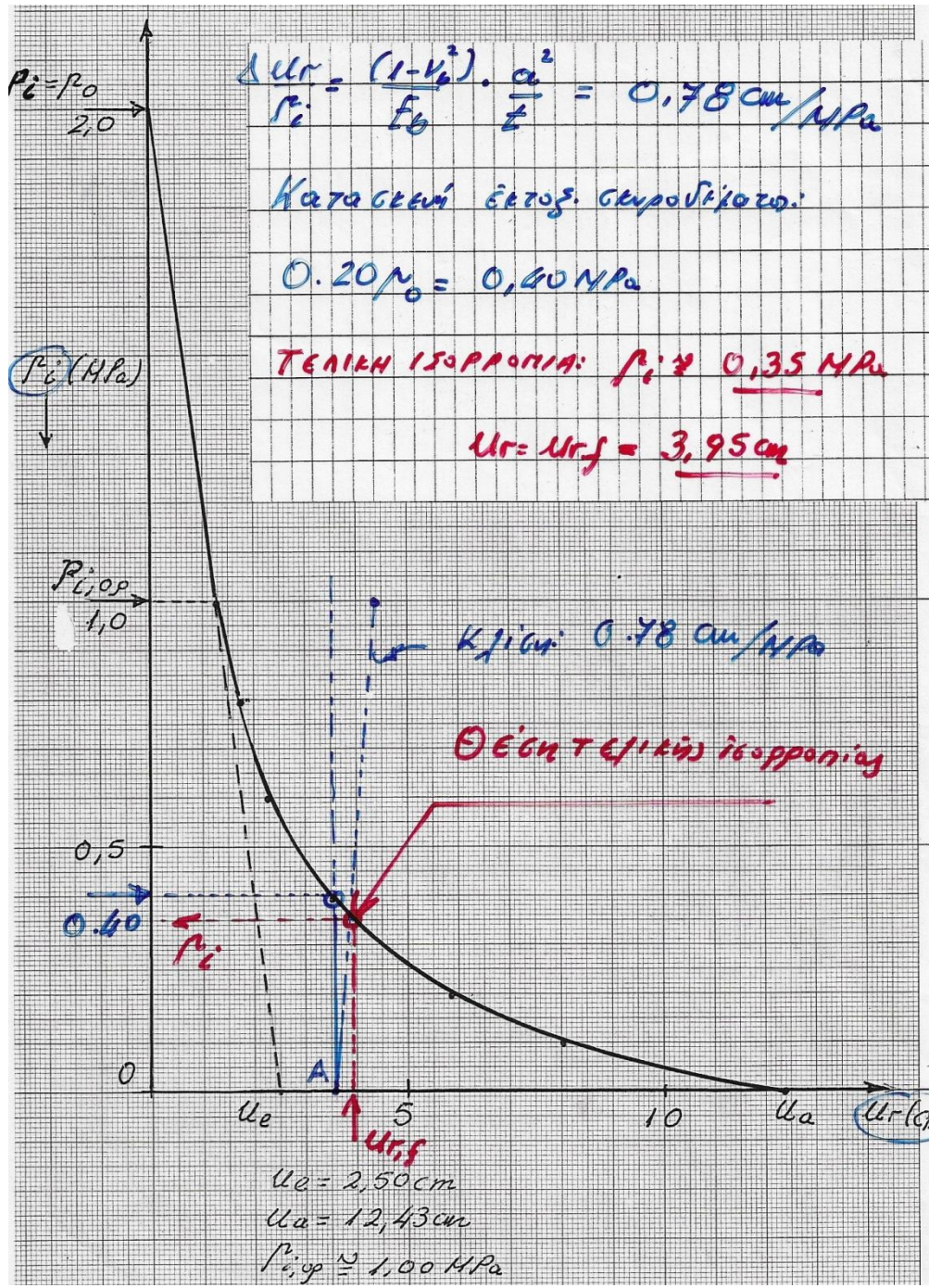
$$u_{r,a} = \frac{(1+\nu) \cdot P_0 a}{E} = \frac{1.25 \times 2.0 \times 500}{500} = \underline{\underline{2.50 \text{ cm}}}$$

- Πλαστική ζώνη για πλήρη αποτόνωση

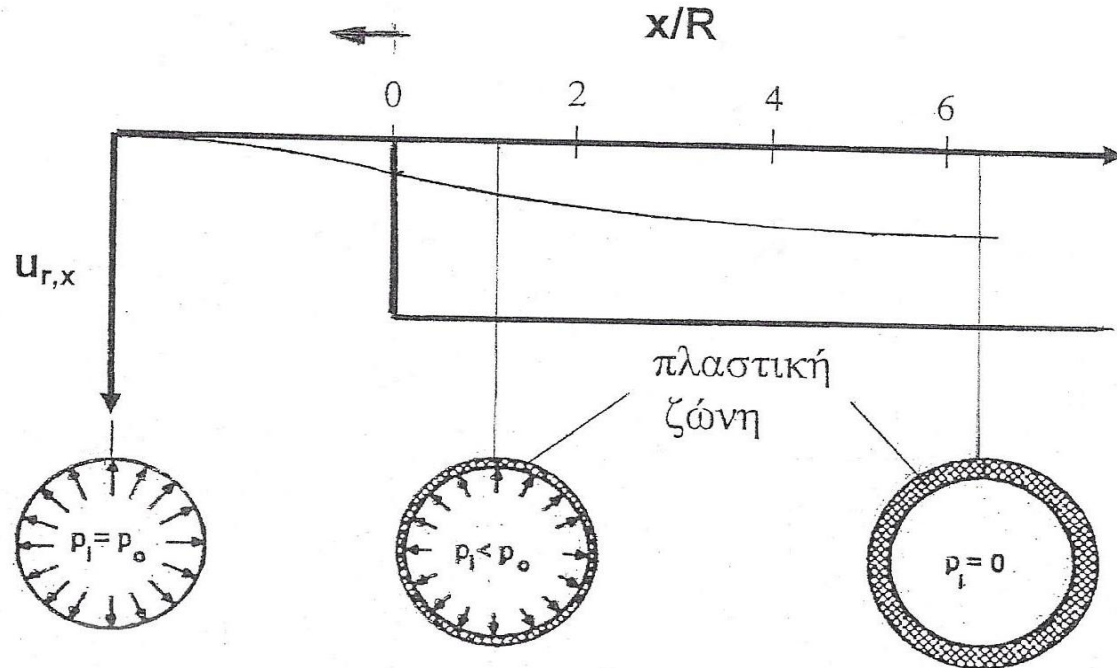
$$r_p/a = \left[\frac{2}{K_p+1} \cdot \frac{\sigma_{c,m} + P_0 (K_p-1)}{\sigma_{c,m}} \right]^{\frac{1}{K_p-1}} = 2.921$$

$$\text{άρα } \underline{\underline{r_p = 14.605 \text{ m}}}$$





ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΙΣ ΥΠΟ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ



Ακτινικές μετατοπίσεις $u_{r,x}$ ως συνάρτηση της ανηγμένης απόστασεως από το μέτωπο.

Κατά Chern et al (1998):

$$\frac{u_{r,x}}{u_{r,\infty}} = \left[1 + \exp\left(-0,91 \cdot \frac{x}{R}\right) \right]^{-1,7}$$

$u_{r,\infty}$ (ή $u_{r,f}$) η τελική ακτινική μετατόπιση σε μεγάλη απόσταση.

- Ο τύπος ισχύει **ανεξαρτήτως** της ελαστικής ή ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς του πετρώματος.
- Εφαρμόζεται σε σήραγγες με **προσωρινή** αντιστήριξη.
- **Προσοχή:** $x > 0$ για θέσεις πίσω από το μέτωπο.

ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΙΣ ΥΠΟ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

