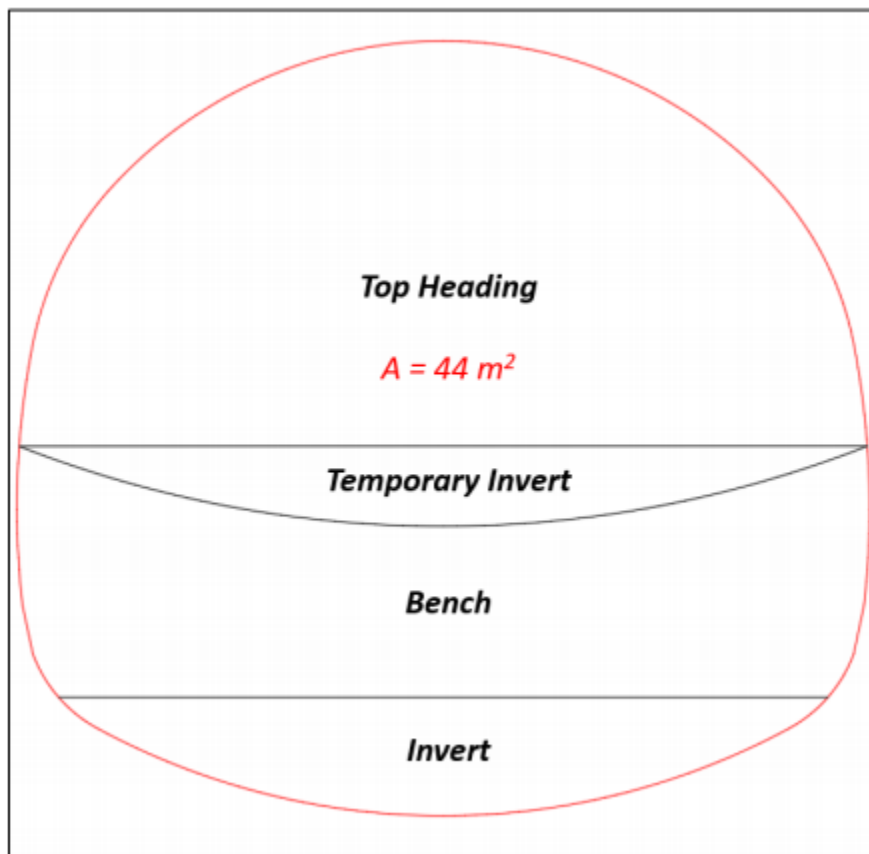


Παράδειγμα υπολογισμού ευστάθειας μετώπου εκσκαφής

Οδική σήραγγα πεταλοειδούς διατομής (**Σχήμα 1**) και ισοδύναμης διαμέτρου **D= 10m**, διανοίγεται σε ιλυολιθικό φλύσχη με την μέθοδο NATM και σε βάθος **H= 150m**. Η διάνοιξη πραγματοποιείται σε τρεις φάσεις:

- Εκσκαφή και υποστήριξη άνω ημιδιατομής με προσωρινό ανάστροφο τόξο
- Εκσκαφή και υποστήριξη βαθμίδας
- Εκσκαφή και υποστήριξη τελικού ανάστροφου τόξου



Σχήμα 1. Διατομή εκσκαφής.

Για την κατασκευή της σήραγγας πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές δοκιμές βραχομηχανικής. Τα αποτελέσματα από τις εργαστηριακές δοκιμές και την γεωτεχνική έρευνα, παρατίθενται στον **Πίνακα 1**.

Ειδικό βάρος (γ)	23 kN/m³
Αντοχή άρρηκτου βράχου σε μονοαξονική θλίψη (σ_{ci})	12 MPa

Μέτρο παραμορφωσιμότητας άρρηκτου (E_i)	5 GPa
Παράμετρος m_i	7
Λόγος Poisson (ν)	0.33
Γωνία τριβής (ϕ)	30°
Συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων (K_o)	0.65
Βαθμονόμηση βραχώμαζας κατά GSI	25

Πίνακας 1. Γεωτεχνικές παράμετροι σχεδιασμού.

Λόγω των ασθενών μηχανικών χαρακτηριστικών της περιβάλλουσας βραχώμαζας, το βήμα προχώρησης της εκσκαφής ορίζεται σε **1.5 m**.

Στην συνέχεια θα πραγματοποιηθεί έλεγχος ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής, με σκοπό την επίτευξη βαθμού ασφάλειας μετώπου εκσκαφής **FS = 1.4**.

Με βάσει τα δεδομένα του **Πίνακα 1**, προκύπτουν οι ακόλουθες βασικοί παράμετροι σχεδιασμού, όπως παρατίθενται στο **Πίνακα 2**:

Γεωστατικό φορτίο (p_o)	2.47 MPa
Αντοχή βραχώμαζας (σ_{cm})	639.7 kPa
Συντελεστής υπερφόρτωσης (N_s)	7.7
Κρίσιμος βαθμός αποτόνωσης (λ_{cr})	56%
Βαθμός αποτόνωσης στο μέτωπο εκσκαφής $x/D=0$ (λ)	76%

Πίνακας 2. Παράμετροι σχεδιασμού.

- **Για ανυποστήρικτο μέτωπο εκσκαφής**

Συντελεστής ασφάλειας μετώπου εκσκαφής:

$$FS_o = \frac{2}{(1 - \lambda) \times N_s} = \frac{2}{(1 - 0.76) \times 7.7} \rightarrow FS_o = 1.08$$

Επειδή **$FS_o = 1.08 < 1.4$** , θα απαιτηθεί προϋποστήριξη του μετώπου εκσκαφής.

- Υποστήριξη μετώπου εκσκαφής με αγκύρια από υαλόνημα (fiberglass nails)

Θεωρούμε αγκύρια μετώπου τύπου fiberglass, με φέρουσα ικανότητα $P = 160 \text{ kN}$. Εάν λάβουμε συντελεστή ασφαλείας υλικού 1.2, τότε η πραγματική φέρουσα ικανότητα έκαστου αγκυρίου, θα είναι:

$$P' = \frac{P}{1.2} = \frac{160 \text{ kN}}{1.2} \rightarrow P' = 133.3 \text{ kN}$$

Για να επιτύχουμε συντελεστή ασφαλείας μετώπου εκσκαφής $SF = 1.4$, θα πρέπει να ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$FS = FS_o + \frac{1}{(1 - \lambda)} \times \left(\frac{\sigma_3}{p_o} \right) \times \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \rightarrow$$

$$\sigma_3 = \frac{(FS - FS_o) \times (1 - \lambda) \times p_o}{\tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)}$$

$$\sigma_3 = \frac{(1.4 - 1.08) \times (1 - 0.76) \times 2470 \text{ kPa}}{\tan^2 \left(45^\circ + \frac{30^\circ}{2} \right)} \rightarrow \sigma_3 = 64 \text{ KPa}$$

Συνεπώς η απαιτούμενη πίεση μετώπου θα πρέπει να είναι **64 KPa**.

Για εμβαδόν μετώπου, βάσει Σχήματος 1, $A = 44 \text{ m}^2$, η ασκούμενη δύναμη (F) στο μέτωπο εκσκαφής θα πρέπει να είναι:

$$F = \sigma_3 \times A = 64 \text{ kN/m}^2 \times 44 \text{ m}^2 = 2816 \text{ kN}$$

Συνεπώς, ο συνολικός αριθμός των αγκυρίων (n) στο μέτωπο εκσκαφής θα είναι:

$$n = \frac{F}{P'} = \frac{2816 \text{ kN}}{133.3 \text{ kN}} = 21.1 \rightarrow 22 \text{ αγκύρια}$$

Τα αγκύρια θα μπουν σε τετραγωνικό κάρναβο στο μέτωπο εκσκαφής, με πυκνότητα (ρ):

$$\rho = \frac{22 \text{ αγκύρια}}{44 \text{ m}^2} = 0.5 \frac{\text{αγκύρια}}{\text{m}^2} \text{ ή } 1 \frac{\text{αγκύριο}}{2 \text{ m}^2}$$

Το μήκος αλληλοεπικάλυψης των αγκυρίων μετώπου (overlap length), θα βασιστεί στο πρίσμα ολίσθησης του μετώπου εκσκαφής, βάσει της θεωρίας Rankine (1857). Συνεπώς το ελάχιστο μήκος αλληλοεπικάλυψης (LFG) των αγκυρίων μετώπου θα είναι:

$$L_{FG} = D' \times \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)$$

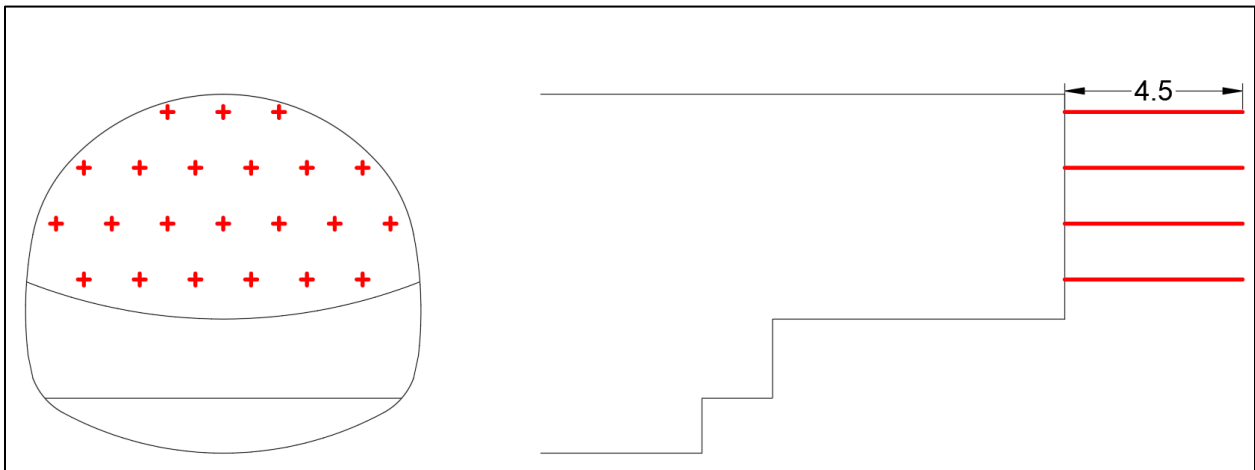
, όπου D' η ισοδύναμη διάμετρος της άνω ημιδιατομής, δηλαδή:

$$D' = 2 \sqrt{\frac{A}{\pi}} = 2 \sqrt{\frac{44 \text{ m}^2}{\pi}} = 7.48 \text{ m}$$

Συνεπώς:

$$L_{FG} = 7.48 \text{ m} \times \tan\left(45^\circ - \frac{30^\circ}{2}\right) = 4.3\text{m} \sim 4.5\text{m}$$

Συνοψίζοντας, εάν θεωρήσουμε ότι τα αγκύρια μετώπου τύπου fiberglass, από τον κατασκευαστή έχουν αρχικό μήκος $L = 12\text{m}$, τότε με το βήμα προχώρησής μας (1.5m) θα πρέπει ανά πέμπτο (5) βήμα εκσκαφής να τοποθετούμε νέα σειρά αγκυρίων μετώπου τύπου fiberglass, ώστε να εξασφαλίζουμε την ελάχιστη αλληλοεπικάλυψη αυτών. Στο **Σχήμα 2**, παρουσιάζεται η προτεινόμενη γεωμετρία της υποστήριξης του μετώπου εκσκαφής με αγκύρια τύπου fiberglass.



Σχήμα 2. Προτεινόμενη διάταξη αγκυρίων μετώπου τύπου fiberglass.

- **Υποστήριξη μετώπου εκσκαφής με δοκούς προπορείας (forepoling umbrella)**

Αρχικά θα υπολογιστεί η μέγιστη πίεση (p_f) που φορτίζονται οι δοκοί:

$$\frac{p_f}{p_o} = (1 - \lambda) \times \left(1 - \frac{FS_o}{FS}\right) \rightarrow p_f = p_o \times (1 - \lambda) \times \left(1 - \frac{FS_o}{FS}\right)$$

$$p_f = 2470 \text{ KPa} \times (1 - 0.76) \times \left(1 - \frac{1.08}{1.4}\right) \rightarrow p_f = 135.5 \text{ KPa}$$

Στην συνέχεια θα υπολογιστεί η μέγιστη καμπτική ροπή (M_{max}) που θα αναπτυχθεί στις δοκούς, σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$M_{max} = \frac{\sqrt{3}}{27} \times p_f \times L^2 \times B$$

Ας θεωρήσουμε την αξονική απόσταση μεταξύ των δοκών $B = 0.3\text{m}$. Το ανυποστήρικτο τμήμα της εκσκαφής (a) μεταξύ των πλαισίων και του μετώπου θα είναι όσο το βήμα προχώρησης, δηλαδή $a = 1.5\text{m}$. Το μήκος της σφήνας (b) εμπροσθεν του μετώπου εκσκαφής, έχει υπολογιστεί στα αγκύρια μετώπου βάσει της θεωρίας Rankine (1857) και είναι 4.3m . Συνεπώς:

$$L = a + b = 1.5\text{m} + 4.3\text{m} = 5.8\text{m}$$

$$M_{max} = \frac{\sqrt{3}}{27} \times 135.5 \text{ kN/m}^2 \times (5.8)^2 \times 0.3\text{m} \rightarrow M_{max} = 87.7 \text{ kNm}$$

Για χάλυβα S355, η πλαστική ροπή αντίστασης (W_{pl}) θα είναι:

$$W_{pl} = \frac{M_{max}}{\sigma_y} = \frac{87.7 \text{ kNm}}{35500 \text{ kN/m}^2} = 247.1 \text{ cm}^3$$

Με βάση τον **Πίνακα 3**, θα απαιτηθούν δοκοί **Φ193.7/173.7**, οι οποίοι εξασφαλίζουν $W_{pl} = 252.1 \text{ cm}^3$.

Το μήκος αλληλοεπικάλυψής τους (overlap length), είναι ίδιο με αυτό των αγκυρίων μετώπου τύπου fiberglass, δηλαδή **$L_{FP} = 4.5\text{m}$** .

**ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΝΤΟΧΩΝ ΣΩΛΗΝΩΝ
TECHNICAL DATA FOR TUBE STRENGTH**

ΣΩΛΗΝΕΣ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΜΙΚΡΟΠΑΣΣΑΛΩΝ MICROPILES REINFORCEMENT							
Εξωτερική Διαμέτρος Outer Dia	Πάχος Thickness	Βόρος Weight	Διατομή Area	J	W	M(adm)	N(adm)
mm	mm	kg/m	cm ²	cm ⁴	cm ³	kgm	kg
						S=1800	S=1600
70	5	8,019	10,21	54,242	15,498	278,96	16336
70	5,9	9,332	11,881	61,539	17,583	316,49	19010
70	7,1	11,02	14,03	70,27	20,077	361,39	22448
70	8	12,24	15,582	76,12	21,748	391,47	24932
70	8,8	13,29	16,919	80,851	23,1	415,81	27071
70	10	14,8	18,85	87,179	24,908	448,35	30159
88,9	5	10,35	13,179	116,37	26,181	471,26	21086
88,9	5,9	12,08	15,384	133,15	29,955	539,18	24615
88,9	7,1	14,33	18,246	153,76	34,591	622,64	29193
88,9	8	15,97	20,332	167,97	37,788	680,18	32532
88,9	8,8	17,39	22,145	179,74	40,437	727,87	35431
88,9	10	19,47	24,787	195,98	44,09	793,62	39660
101,6	5	11,92	15,174	177,47	34,935	628,83	24278
101,6	5,9	13,93	17,738	203,84	40,127	722,28	28381
101,6	7,1	16,56	21,079	236,62	46,58	838,43	33726
101,6	8,8	20,15	25,656	278,66	54,854	987,38	41049
101,6	10	22,6	28,777	305,42	60,121	1082,2	46043
114,3	5	13,48	17,169	256,92	44,956	809,2	27470
114,3	5,9	15,78	20,092	296	51,793	932,27	32148
114,3	7,1	18,78	23,911	344,99	60,365	1086,6	38258
114,3	8,8	22,91	29,167	408,61	71,498	1287	46667
114,3	10	25,74	32,767	449,66	78,681	1416,3	52427
127	5	15,05	19,164	357,14	56,243	1012,4	30662
127	5,9	17,63	22,446	412,45	64,953	1169,2	35914
127	7,1	21	26,744	482,28	75,949	1367,1	42791
127	8,8	25,67	32,678	573,85	90,37	1626,7	52284
127	10	28,87	36,757	633,55	99,771	1795,9	58811
139,7	5	16,62	21,159	480,54	68,796	1238,3	33854
139,7	5,9	19,48	24,8	556,06	79,608	1432,9	39681
139,7	7,1	23,23	29,577	651,92	93,331	1680	47323
139,7	8,8	28,42	36,189	778,61	111,47	2006,4	57902
139,7	10	32	40,747	861,9	123,39	2221,1	65194
168,3	5	20,15	25,651	855,85	101,7	1830,7	41042
168,3	5,9	23,64	30,102	993,67	118,08	2125,5	48162
168,3	7,1	28,24	35,956	1170,2	139,06	2503,1	57530
168,3	8,8	34,63	44,095	1406,5	167,14	3008,6	70553
168,3	10	39,06	49,732	1564	185,86	3345,4	79570
193,7	5	23,28	29,641	1320,2	136,32	2453,7	47426
193,7	5,9	27,34	34,81	1536,1	158,61	2855	55695
193,7	7,1	32,69	41,622	1814,2	187,32	3371,7	66595
193,7	8,8	40,15	51,118	2189,5	226,07	4069,2	81788
193,7	10	45,33	57,711	2441,6	252,1	4537,8	92338

Πίνακας 3. Διατομές δοκών για forepoling.

Συνοψίζοντας, εάν θεωρήσουμε ότι οι δοκοί προπορείας, από τον κατασκευαστή έχουν αρχικό μήκος $L = 12\text{m}$, τότε με το βήμα προχώρησής μας (1.5m) θα πρέπει ανά πέμπτο (5) βήμα εκσκαφής να τοποθετούμε νέα ομπρέλα δοκών προπορείας (forepoling umbrella), ώστε να εξασφαλίζουμε την ελάχιστη αλληλοεπικάλυψη αυτών.

Θα θεωρήσουμε ότι οι δοκοί θα καλύπτουν ένα τόξο $\phi = 120^\circ$ (60° εκατέρωθεν του άξονα της σήραγγας). Συνεπώς το μήκος του τόξου που θα καλύπτουν θα είναι:

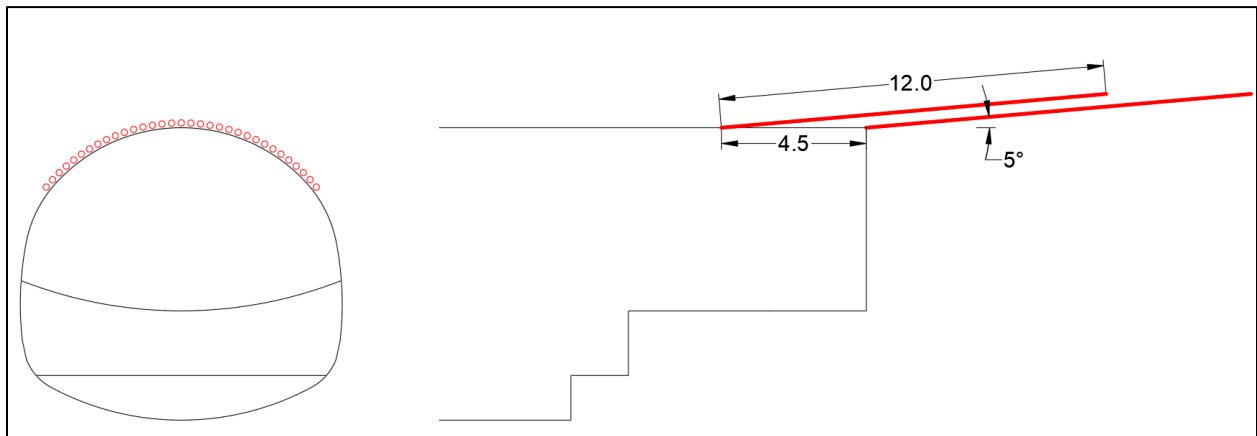
$$l = \pi \times D' \times \frac{\phi}{360^\circ} = \pi \times 7.48 \text{ m} \times \frac{120^\circ}{360^\circ} = 7.8 \text{ m}$$

Ο αριθμός των δοκών (n) που θα τοποθετηθούν περίξ του μετώπου εκσκαφής, είναι:

$$n = \frac{l}{B} + 1 = \frac{7.8 \text{ m}}{0.3 \text{ m}} + 1 = 27 \text{ δοκοί}$$

Να σημειωθεί ότι οι δοκοί θα τοποθετηθούν υπό κλίση στο μέτωπο εκσκαφής, με ελάχιστη κλίση $4 - 5^\circ$.

Στο **Σχήμα 3**, παρουσιάζεται η προτεινόμενη γεωμετρία της υποστήριξης του μετώπου εκσκαφής με ομπρέλα δοκών προπορείας (forepoling umbrella).



Σχήμα 3. Προτεινόμενη διάταξη ομπρέλας δοκών προπορείας (forepoling umbrella).

Προτεινόμενη βιβλιογραφία:

- ✓ Georgiou D., et al. "Investigation of the Influence of Face Support Measures on the Stability of Shallow Tunnels". 8th Hellenic Conference in Geotechnical Engineering, 6 – 8 November 2019, Athens, Greece

https://www.researchgate.net/publication/337217845_Diereunese_tes_Epirroes_ton_Metron_Y_posterixes_sten_Eustatheia_tou_Metopou_Abathon_Serangon_Investiqation_of_the_Influence_of_Face_Support_Measures_on_the_Stability_of_Shallow_Tunnels

- ✓ Διακουμή, Ευσταθία. "Αριθμητική διερεύνηση του βέλτιστου τρόπου εφαρμογής μέτρων ευστάθειας μετώπου σε ρηχές σήραγγες." (2020).

<https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/handle/123456789/52188>

- ✓ Γεωργακόπουλος, Γεώργιος. "Αριθμητική διερεύνηση του βέλτιστου τρόπου εφαρμογής μέτρων ευστάθειας μετώπου σε βαθιές σήραγγες." (2021).

<https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/handle/123456789/52804>