

Ειδικά κεφάλαια δικτύων αποχέτευσης (συναρμογές, προβλήματα μεγάλων και μικρών ταχυτήτων)

Δημήτρης Κουτσογιάννης

Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών & Θαλάσσιων Έργων
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Προβλήματα συναρμογών

- ◆ Σε ποιες περιπτώσεις χρειάζεται συναρμογή;
 - Αλλαγή διεύθυνσης
 - Αλλαγή κλίσης
 - Αλλαγή διαμέτρου
 - (Απότομη) αλλαγή υψομέτρου
 - Συμβολή
- ◆ Πως κατασκευάζεται μια τυπική συναρμογή;
 - Μέσα σε φρεάτιο επίσκεψης, με χυτό σκυρόδεμα (εξαίρεση: επισκέψιμες διατομές)
 - Πρακτικός κανόνας: Μεταξύ δύο φρεατίων υπάρχει ευθυγραμμία με σταθερά χαρακτηριστικά αγωγού (εξαίρεση: επισκέψιμες διατομές)
- ◆ Ποιοι είναι οι κύριοι τύποι των φρεατίων επίσκεψης
 - Σχήμα κάτοψης: Κυκλικά, ορθογωνικά, τρισματικά
 - Σχήμα κατακόρυφης τομής: Με ή χωρίς λαιμό
 - Σχήμα κατακόρυφης τομής κυκλικών φρεατίων: Με ή χωρίς κολουροκωνικό τμήμα
 - Τοπολογία αγωγών: Απλά φρεάτια επίσκεψης ή φρεάτια συμβολής
 - Υψομετρική τοποθέτηση αγωγών: Απλά φρεάτια επίσκεψης ή φρεάτια πτώσης
 - Ύπαρξη ειδικών μηχανισμών: Απλά φρεάτια επίσκεψης ή φρεάτια πλύσης

Προβλήματα συναρμογών 2

- ◆ Εκτός των θέσεων συναρμογής, σε ποιες άλλες θέσεις τοποθετούνται φρεάτια επίσκεψης;
 - Αρχή αγωγού
 - Σε ευθυγραμμίες αγωγών σε τρόπο ώστε το μήκος ανάμεσα σε δύο φρεάτια επίσκεψης να μην υπερβαίνει τα 60-100 m για αγωγούς ακαθάρτων και τα 100-150 m για αγωγούς ομβρίων

Δ. Κουτσογιάννης, Ειδικά κεφάλαια δικτύων αποχέτευσης 3

Προβλήματα συναρμογών 3

- ◆ Πως υπολογίζονται οι τοπικές απώλειες στις συναρμογές;

- Πρακτικός τρόπος: αύξηση του συντελεστή τραχύτητας ($n = 0.015$)
- Λεπτομερής τρόπος: ($n = 0.013$)

- ✦ Αύξηση ταχύτητας προς τα καάντη:
$$h_\tau = k_c \left(\frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} \right)$$

- ✦ Μείωση ταχύτητας προς τα καάντη:
$$h_\tau = k_e \left(\frac{V_1^2}{2g} - \frac{V_2^2}{2g} \right)$$

- ✦ Στροφές αγωγού
$$h_\tau = k_b \frac{V^2}{2g}$$

- ✦ Συμβολές (για συμβολή του δευτερεύοντα αγωγού 3 στον κύριο αγωγό 1-2)
$$h_\tau = k_j \frac{V_1^2}{2g}$$

όπου
$$k_j = 0.5(Q_3 / Q_1)^{0.7}$$

Δ. Κουτσογιάννης, Ειδικά κεφάλαια δικτύων αποχέτευσης 4

Προβλήματα συναρμογών 4

◆ Πώς τοποθετούνται υψομετρικά οι αγωγοί σε θέσεις αλλαγής διαμέτρου;

- Πρακτικοί κανόνες:
 - ✦ Δεν επιτρέπεται η μείωση διαμέτρων προς τα κατάντη
 - ✦ Ταύτιση αντύγων (ή σημείων $0.8 D$)
- Αναλυτικός υπολογισμός
 - ✦ Ομοιόμορφη ροή ανάντη και κατάντη

$$\begin{aligned} \text{✦ } \Delta z &= \left(y_2 + \frac{V_2^2}{2g} \right) - \left(y_1 + \frac{V_1^2}{2g} \right) + h_r \\ \text{✦ } \Delta z &\geq 0 \end{aligned}$$

Δ. Κουτσογιάννης, Ειδικά κεφάλαια δικτύων αποχέτευσης 5

Προβλήματα συναρμογών 5

◆ Εφαρμογή 4.14.α

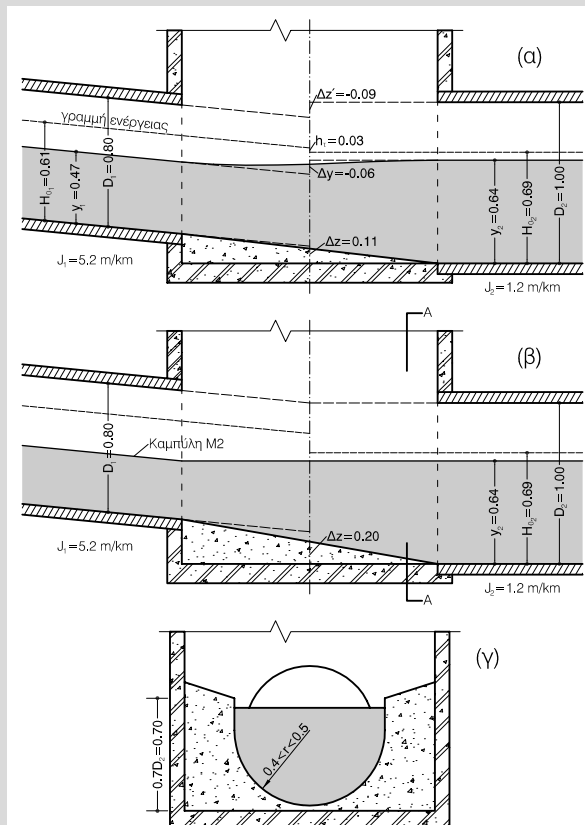
- Να σχεδιαστεί συναρμογή αγωγού ακαθάρτων με παροχή σχεδιασμού 500 L/s για μετάβαση από κλίση 5.2 m/km (ανάντη) σε κλίση 1.2 m/km (κατάντη)

◆ Εφαρμογή 4.14.β

- Τι θα συνέβαινε αν δεν διαμορφώνονταν καμιά πτώση στον πυθμένα του αγωγού;

◆ Εφαρμογή 4.14.γ

- Τι θα συνέβαινε αν η διαδοχή κλίσεων ήταν η αντίστροφη (κλίση ανάντη 1.2 m/km και κατάντη 5 m/km).



Δ. Κουτσογιάννης, Ειδικά κεφάλαια δικτύων αποχέτευσης 6

Προβλήματα μεγάλων ταχυτήτων - υπερκρίσιμων ροών

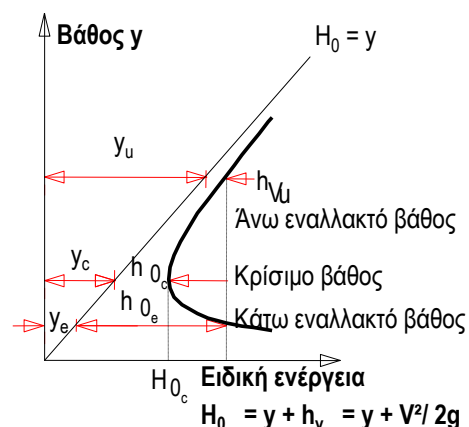
- ◆ Ποια προβλήματα είναι πιθανό να εμφανιστούν στο δίκτυο όταν έχουμε μεγάλη ταχύτητα;
 - Διάβρωση τοιχωμάτων αγωγών και φρεατίων.
 - Μεγάλο ύψος κινητικής ενέργειας \Rightarrow Πιθανότητα γραμμής ενέργειας πάνω από το οδόστρωμα \Rightarrow Πιθανή έξοδος λυμάτων στο δρόμο ή στα υπόγεια.
 - Σε περίπτωση υπερκρίσιμης ροής \Rightarrow Πιθανή εμφάνιση υδραυλικών αλμάτων, ασταθειών ροής, στάσιμων κυμάτων (μη προβλέψιμες συνθήκες ροής).
- ◆ Πώς μπορούμε να μειώσουμε την ταχύτητα ροής κατά τη διαστασιολόγηση ενός αγωγού
 - Με μείωση της κλίσης του αγωγού (+ φρεάτια πτώσης).
- ◆ Εφαρμογή 4.10
 - Να διαστασιολογηθεί αγωγός ακαθάρτων για παροχή $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ και κλίση 5%.
 - Αρχική λύση: $D = 80 \text{ cm}$, $y/D = 0.62 < 0.70$, $V = 4.64 \text{ m/s}$
 - Τελική λύση με μείωση της ταχύτητας στα 3 m/s , η οποία επιτυγχάνεται με μείωση της κλίσης και κατασκευή φρεατίων πτώσης: $J = 1.65\%$, $D = 100 \text{ cm}$, $y/D = 0.608 < 0.70$, $V = 3.00 \text{ m/s}$.

Δ. Κουτσογιάννης, Ειδικά κεφάλαια δικτύων αποχέτευσης 7

Προβλήματα μεγάλων ταχυτήτων - υπερκρίσιμων ροών 2

- ◆ Ποια είναι η βασική ποιοτική διαφορά μεταξύ της υποκρίσιμης και της υπερκρίσιμης ροής;
 - Στην υποκρίσιμη ροή οι διαταραχές μεταδίδονται και προς τα ανάντη και προς τα κατάντη (\Rightarrow βαθμιαία προσαρμογή της ροής στα ανάντη) ενώ στην υπερκρίσιμη μεταδίδονται μόνο προς τα κατάντη.
- ◆ Πώς ορίζεται το κρίσιμο βάθος;
 - Είναι το βάθος ροής που αντιστοιχεί στην ελάχιστη ειδική ενέργεια της ροής για δεδομένη γεωμετρία διατομής και παροχή. Γενικά υπολογίζεται από την εξίσωση

$$\frac{Q^2 B_c}{g A_c^3} = 1$$



Δ. Κουτσογιάννης, Ειδικά κεφάλαια δικτύων αποχέτευσης 8

Προβλήματα μεγάλων ταχυτήτων - υπερκρίσιμων ροών 3

- ◆ Πως υπολογίζεται το κρίσιμο βάθος σε κυκλικές διατομές;

Προσεγγιστική σχέση:

$$\frac{y_c}{D} = \begin{cases} \left(1 - \sqrt{1 - 0.767\xi^{0.247}}\right)/2 & (\xi < 0.001) \\ 0.207\xi^{0.255} & (0.001 \leq \xi \leq 300) \\ \left(1 + \sqrt{1 - 190/\xi^{1.69}}\right)/2 & (\xi > 300) \end{cases}$$

όπου

$$\xi = (512Q^2)/(gD^5)$$

- ◆ Ποιες είναι οι βασικές διαφορές στα χαρακτηριστικά μεταξύ της υποκρίσιμης και της υπερκρίσιμης ροής;

Τύπος ροής	Υποκρίσιμη	Κρίσιμη	Υπερκρίσιμη
Βάθος ροής, y	$> y_c$	$= y_c$	$< y_c$
Ταχύτητα ροής, V	$< V_c$	$= V_c$	$> V_c$
Αριθμός Froude, $Fr = V / \sqrt{gym}$	< 1	$= 1$	> 1
Κλίση	$< J_c$	$= J_c$	$> J_c$

Δ. Κουτσογιάννης, Ειδικά κεφάλαια δικτύων αποχέτευσης 9

Προβλήματα μεγάλων ταχυτήτων - υπερκρίσιμων ροών 4

- ◆ Εφαρμογή 4.15

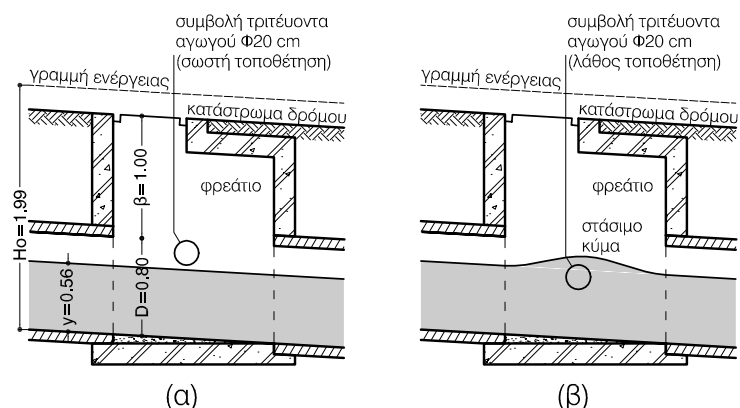
- Αγωγός ακαθάρτων διαμέτρου 80 cm με κλίση 6% μεταφέρει παροχή 2.00 m³/s. Ζητούνται τα υδραυλικά χαρακτηριστικά της ομοιόμορφης και της κρίσιμης ροής.

- Ομοιόμορφη ροή: $y = 0.56$ m, $y/D = 0.70$, $V = 5.3$ m/s, $H_0 = 1.99$ m, $y_m = 0.51$ m, $Fr = 2.37 > 1$.

- Κρίσιμη ροή: $y_c = 0.77$ m, $V_c = 4.03$ m, $J_c = 2.83\%$.

- ◆ Εφαρμογή 4.16

- Ποια προβλήματα μπορεί να υπάρξουν στον αγωγό της εφαρμογής 4.15;



Δ. Κουτσογιάννης, Ειδικά κεφάλαια δικτύων αποχέτευσης 10

Προβλήματα μικρών ταχυτήτων

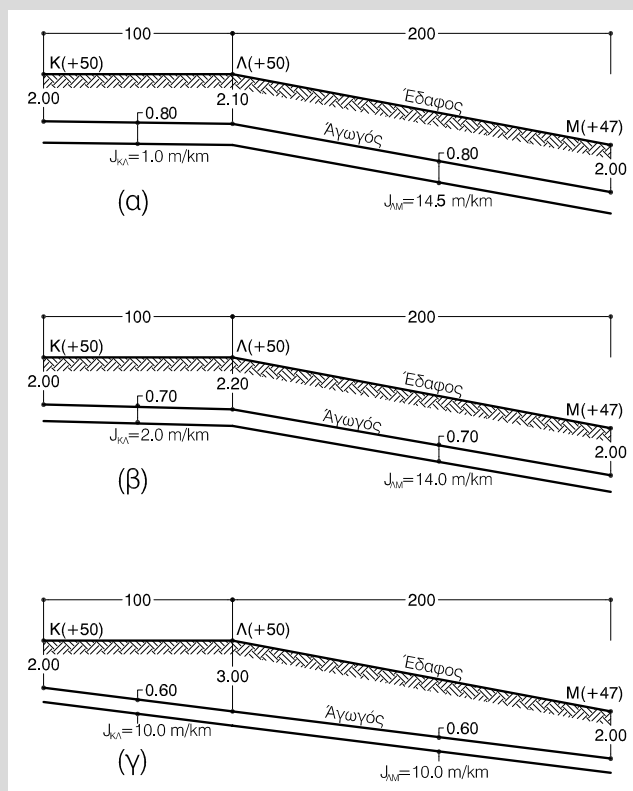
- ◆ Ποια προβλήματα είναι πιθανό να εμφανιστούν στο δίκτυο όταν έχουμε πολύ μικρή ταχύτητα;
 - Αποθέσεις φερτών στους αγωγούς και τα φρεάτια.
 - Κακός αερισμός των λυμάτων \Rightarrow Δημιουργία αναερόβιων συνθηκών \Rightarrow Πιθανότητα παραγωγής υδροθείου \Rightarrow Πιθανή διάβρωση των τοιχωμάτων αγωγών και φρεατίων.
- ◆ Πώς μπορούμε να αυξήσουμε την ταχύτητα ροής κατά τη διαστασιολόγηση ενός αγωγού;
 - Με αύξηση της κλίσης του αγωγού.
- ◆ Πώς αντιμετωπίζονται πολύ μικρές ταχύτητες στα πλέον ανάντη τμήματα τριτευόντων αγωγών;
 - Με κατασκευή φρεατίων πλύσης

Δ. Κουτσογιάννης, Ειδικά κεφάλαια δικτύων αποχέτευσης 11

Προβλήματα μικρών ταχυτήτων 2

◆ Εφαρμογή 4.12.β

Η χάραξη κεντρικού συλλεκτήρα ακαθάρτων περνάει από τα σημεία Κ, Λ, και Μ με αποστάσεις (ΚΛ) = 100 m και (ΛΜ) = 200 m και υψόμετρα εδάφους $z_K = z_\Lambda = 150$ m και $z_M = 147$ m. Η παροχή σχεδιασμού του αγωγού είναι 250 L/s, ενιαία για όλο το μήκος ΚΛΜ. Η διάμετρος του αγωγού ανάντη του Κ είναι 60 cm. Το ελάχιστο βάθος είναι 2 m, μετρούμενο από την άντυγα του αγωγού. Ζητείται η διαστασιολόγηση και σκαρίφημα της μηκοτομής του αγωγού. Ο συντελεστής τραχύτητας n είναι 0.015.



Δ. Κουτσογιάννης, Ειδικά κεφάλαια δικτύων αποχέτευσης 12

Προβλήματα μικρών ταχυτήτων 3

◆ Πως υπολογίζεται η ταχύτητα αυτοκαθαρισμού;

- Κρίσιμη συρτική τάση: $\tau_{mc} = \beta g (\rho_s - \rho) d_s$

όπου d_s η χαρακτηριστική διάσταση του κόκκου, ρ_s η πυκνότητά του, ρ η πυκνότητα του ρευστού, g η επιτάχυνση βαρύτητας και β χαρακτηριστική αδιάστατη παράμετρος του Shields, με τιμή 0.06 για συνθήκες πλήρως τραχείας ροής (δηλαδή για $Re^* > u_* d_s / \nu > 11.6$, όπου $u_* = (\tau_{mc}/\rho)^{1/2}$). Σε προβλήματα ροής σε υπονόμους χρησιμοποιείται η τιμή $\beta = 0.04 - 0.8$.

- Συρτική τάση στον πυθμένα για δεδομένα χαρακτηριστικά ροής R και i

$$\tau_m = \rho g R i$$

- Για την ύπαρξη συνθηκών αυτοκαθαρισμού θα πρέπει: $\tau_m \geq \tau_{mc}$, ή στην οριακή περίπτωση $\tau_m = \tau_{mc}$,

$$Ri = \beta \frac{\rho_s - \rho}{\rho} d_s$$

- Συνδυασμός με τις εξισώσεις Chezy, Manning, Darcy-Weisbach

$$V_{\min} = C \sqrt{\beta \frac{\rho_s - \rho}{\rho} d_s} \quad V_{\min} = \frac{R^{1/6}}{n} \sqrt{\beta \frac{\rho_s - \rho}{\rho} d_s} \quad V_{\min} = \sqrt{\frac{8g}{f} \beta \frac{\rho_s - \rho}{\rho} d_s}$$

Προβλήματα μικρών ταχυτήτων 4

- Εφαρμογή 4.11

- Να υπολογιστούν οι ελάχιστες διαστάσεις κόκκων, (α) άμμου με $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$ και (β) οργανικού υλικού με $\rho_s = 1200 \text{ kg/m}^3$, που μετακινούνται (δεν καθιζάνουν) όταν η ταχύτητα είναι 0.60 m/s. Να θεωρηθεί $f = 0.025$.

✦ Για $\beta = 0.04$ (ξεκίνημα απόπλυσης) $d_s = 1.7 \text{ mm}$ για άμμο και 14.3 mm για οργανικό υλικό.

✦ Για $\beta = 0.8$ (πλήρης απόπλυση) $d_s = 0.09 \text{ mm}$ για άμμο και 0.72 mm για οργανικό υλικό.

Προβλήματα μικρών ταχυτήτων 5

- ◆ Ποια είναι τα κυριότερα προβλήματα που προκαλούνται από το υδρόθειο στους αγωγούς ακαθάρτων;
 - Πρόκληση απεχθών οσμών.
 - Δημιουργία δηλητηριώδους ατμόσφαιρας, επικίνδυνης για τη ζωή όσων εργάζονται στη συντήρηση των υπονόμων.
 - Διάβρωση των οροφών των αγωγών από σκυρόδεμα, αμιαντοσιμέντο ή μέταλλο (στην περιοχή που δεν καλύπτεται από τη ροή). Είναι ενδιαφέρον ότι τα τοιχώματα των σωλήνων που βρέχονται δεν προσβάλλονται σοβαρά από το διαλυμένο υδρόθειο.
 - Προβλήματα στην εφαρμογή αερόβιων διεργασιών στην εγκατάσταση καθαρισμού όταν τα λύματα φτάνουν εκεί. Επίσης αύξηση της απαιτούμενης ποσότητας χλωρίου, όταν εφαρμόζεται χλωρίωση των λυμάτων.
- ◆ Πως προκαλείται η διάβρωση των οροφών των αγωγών;
 - Πρώτο στάδιο, που προκαλείται από λευκοβακτηριοειδή, όπως η θειοθρίξ: οξειδωση του H_2S σε S:
$$2 \text{H}_2\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O} + 2 \text{S}$$
 - Δεύτερο στάδιο, που προκαλείται από πρωτοβακτηρίδια, όπως ο θειοβάκιλος: οξειδωση θείου σε θειικό οξύ:
$$2 \text{S} + 3 \text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{H}_2\text{SO}_4$$

Προβλήματα μικρών ταχυτήτων 6

- ◆ Τι προκαλεί αύξηση της παραγωγής υδροθείου σε αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια;
 - αύξηση του χρόνου παραμονής
 - αύξηση του οργανικού φορτίου
 - αύξηση της θερμοκρασίας
 - αύξηση της βρεχόμενης περιμέτρου του αγωγού
 - μείωση του πλάτους της ελεύθερης επιφάνειας του αγωγού
 - μείωση της τύρβης στη ροή, που έχει συνέπεια τη μείωση του ρυθμού μεταφοράς αέρα (και άρα οξυγόνου) στα λύματα. Η τύρβη συναρτάται με την κλίση του αγωγού και την ταχύτητα.
- ◆ Τι προκαλεί αύξηση του ρυθμού έκλυσης υδροθείου από την ελεύθερη επιφάνεια της ροής;
 - αύξηση της συγκέντρωσης υδροθείου στα λύματα
 - μείωση του pH των λυμάτων
 - έντονη αύξηση της τύρβης στη ροή

Προβλήματα μικρών ταχυτήτων 7

- ◆ Ποια μέτρα μπορούν να λαμβάνονται για τη μείωση της παραγωγής υδροθείου σε αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια;
 - Τήρηση ικανοποιητικών περιθωρίων αερισμού και ελάχιστων ταχυτήτων κατά το σχεδιασμό των αγωγών.
 - Σε δυσμενείς συνθήκες, αύξηση της διαμέτρου του αγωγού, πράγμα που έχει συνέπεια τη μείωση του λόγου βρεχόμενης περιμέτρου προς πλάτος ελεύθερης επιφάνειας (P/B).
 - Ελαχιστοποίηση των περιοχών υψηλής τύρβης στο δίκτυο, για τον περιορισμό της απελευθέρωσης υδροθείου στον αέρα.
 - Εφοδιασμός των αγωγών με κατασκευές αερισμού.
- ◆ Πως εκτιμάται η ελάχιστη ταχύτητα αυτοαερισμού;

- Σχέση του Pomeroy
$$V_{\min,a} = \frac{[\text{EBOD}]}{590} \text{ (m/s)}$$

όπου [EBOD] η συγκέντρωση του ενεργού οργανικού φορτίου στα λύματα σε mg/l, που συνδέεται με την αντίστοιχη συγκέντρωση του BOD_5 με τη σχέση

$$[\text{EBOD}] = [\text{BOD}_5] 1.07^{T-20}$$

στην οποία T είναι η θερμοκρασία σε °C.

Προβλήματα μικρών ταχυτήτων 8

- ◆ Ποια παράμετρος χρησιμοποιείται ως εμπειρικό μέτρο της πιθανότητας παραγωγής υδροθείου;

Ο δείκτης Z του Pomeroy, που ορίζεται από την ακόλουθη σχέση, γνωστή ως “τύπος Z ”

$$Z = \frac{0.3[\text{EBOD}] P}{J^{1/2} Q^{1/3} B}$$

όπου [EBOD] το ενεργό οργανικό φορτίο (mg/L), J η κλίση του αγωγού, Q η παροχή (m^3/s), P η βρεχόμενη περίμετρος και B το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας του αγωγού (μονάδες ίδιες με αυτές του P). Για τιμές του Z μικρότερες από 5000 η πιθανότητα παραγωγής υδροθείου είναι μικρή. Για Z στην περιοχή 5000-10000 αναμένεται σχηματισμός μικρών ποσοτήτων υδροθείου (0.2-0.4 mg/L) χωρίς όμως σοβαρούς κινδύνους. Σοβαρά προβλήματα αναμένονται για Z μεγαλύτερο του 10000 και ιδιαίτερα στην περιοχή 15000-20000. Συνήθως θεωρείται ως όριο του Z , προκειμένου να μην υπάρξουν προβλήματα στον αγωγό η τιμή 7500.