



Πολυτεχνείο Κρήτης
Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος

Φυσικές διεργασίες στην επεξεργασία νερού και υγρών αποβλήτων

Επικ. Καθηγητής Αλέξανδρος Στεφανάκης

Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης

Κτήριο Κ3, Γραφείο Α23,

Τηλ: 28210 06121, email: astefanakis@enveng.tuc.gr

Εργαστήριο Τεχνολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος

<https://www.leem.tuc.gr>

<https://www.facebook.com/LEEMtuc>

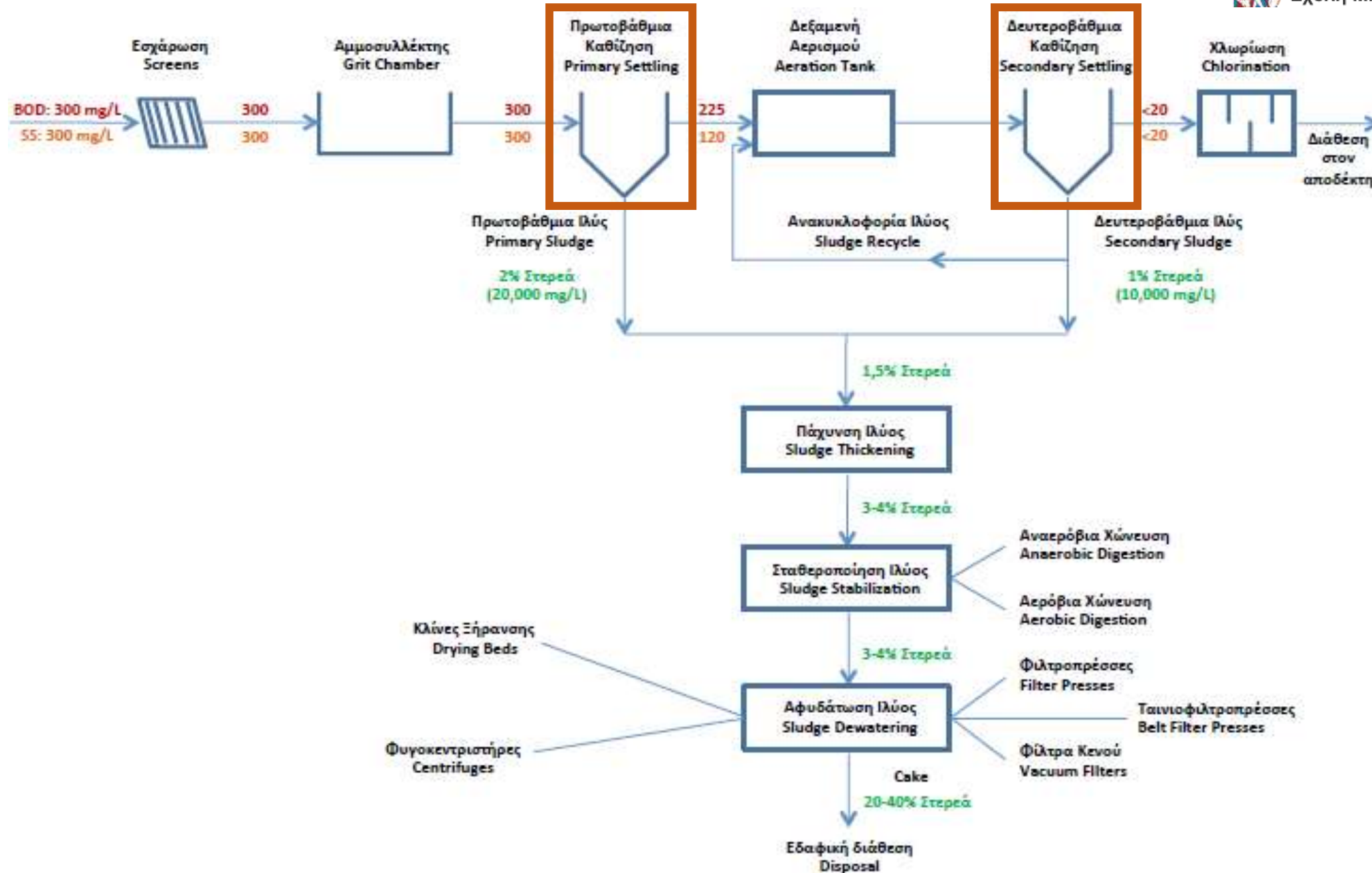
Μάρτιος 2021



Καθίζηση



ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΜΕ ΒΑΡΥΤΗΤΑ / ΚΑΘΙΖΗΣΗ



- Η καθίζηση είναι από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες διεργασίες στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων και στοχεύει στην απομάκρυνση αιωρούμενων σωματιδίων, που είναι βαρύτερα από το νερό, με τη δράση της βαρύτητας.

ΣΕ ΠΟΙΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΥ ΤΡΕΝΟΥ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΕΦΑΡΜΟΖΕΤΑΙ ΚΑΘΙΖΗΣΗ

- 1) Δεξαμενές αμμοσυλλογής: ανόργανο υλικό (άμμος) διαχωρίζεται από το νερό
- 2) Δεξαμενές διαχωρισμού πρωτογενούς ιλύος (κοπρανώδη συστατικά) από το υγρό απόβλητο προς της εισόδου στο σύστημα ενεργού ιλύος (primary clarifier)
- 3) Δεξαμενές διαχωρισμού δευτερογενούς ιλύος (μικροβιακή βιομάζα) κατά τη βιολογική επεξεργασία προς ανακύκλωση στον βιοαντιδραστήρα αερισμού και μερική απόρριψη (secondary clarifiers)

ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙΤΑΙ

- 1) Απομάκρυνση άμμου και TSS σε εγκαταστάσεις πρωτοβάθμιας καθίζησης
- 2) Διαχωρισμός των μικροοργανισμών σε μονάδες βιολογικής επεξεργασίας λυμάτων
- 3) Απομάκρυνση ιζημάτων που σχηματίζονται κατά τη χημική επεξεργασία (κροκίδωση) επιφανειακών νερών που προορίζονται για πόσιμα
- 4) Πάχυνση της λάσπης πριν το βήμα της αφυδάτωσης

ΣΤΟΧΟΣ

- 1) Διαχωρισμός καθιζάνοντων συστατικών από το νερό
- 2) Παραγωγή διαυγασμένης εκροής
- 3) Παραγωγή λάσπης με τέτοια συγκέντρωση στερεών ώστε να μπορεί να γίνει πιο εύκολη η διαχείριση και η επεξεργασία της

Με βάση τη συγκέντρωση των σωματιδίων αλλά και την τάση των σωματιδίων να αλληλεπιδρούν, διακρίνονται 4 βασικές κατηγορίες καθίζησης:

- 1) Καθίζηση διακεκριμένων σωματιδίων (discrete particle settling)
- 2) Συσσωματική καθίζηση (flocculant settling)
- 3) Παρεμποδιζόμενη καθίζηση (hindered settling) ή καθίζηση ζώνης
- 4) Καθίζηση συμπίεσης (compression settling)

Παρατηρείται σε περιπτώσεις μικρών συγκεντρώσεων σωματιδίων, τα οποία καθιζάνουν ως διακεκριμένες οντότητες, δηλαδή χωρίς να σχηματίζουν συσσωματώματα ή άλλου τύπου ενότητες με άλλα σωματίδια, διατηρώντας αναλλοίωτες τις φυσικές τους ιδιότητες κατά τη διεργασία (δεν μεταβάλλεται το μέγεθος, μορφή, πυκνότητα).

Π.χ. Καθίζηση άμμου στους αμμοσυλλέκτες στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων

Καθίζηση μικρών συνήθως συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων τα οποία συσσωματώνονται καθώς καθιζάνουν. Έτσι, αυξάνεται η μάζα τους και συνεπώς παρατηρείται αύξηση του ρυθμού καθίζησης. Δηλαδή μεταβάλλονται τα φυσικά τους χαρακτηριστικά

Π.χ.

Πρωτοβάθμια καθίζηση αστικών ανεπεξέργαστων λυμάτων

Καθίζηση ιζημάτων κατά τη χημική επεξεργασία του νερού

Παρεμποδιζόμενη καθίζηση ή αλλιώς καθίζηση ζώνης, όπου τα σωματίδια συγκεντρώσεων ενδιάμεσου Επιπέδου αλληλεπιδρούν με γειτονικά σωματίδια και καθιζάνουν όλα μαζί ως ενιαίο σύνολο (δημιουργία πλέγματος που καθιζάνει ενιαία), δημιουργώντας μια διεπιφάνεια νερού - ιλύος κατά την καθίζηση.

Π.χ.

Δευτεροβάθμια καθίζηση για διαχωρισμό των μικροοργανισμών της βιολογικής επεξεργασίας από το επεξεργασμένο νερό

Καθίζηση θζημάτων υδροξυπολυμερών Fe και Al κατά την κροκιδωτική επεξεργασία πόσιμου νερού

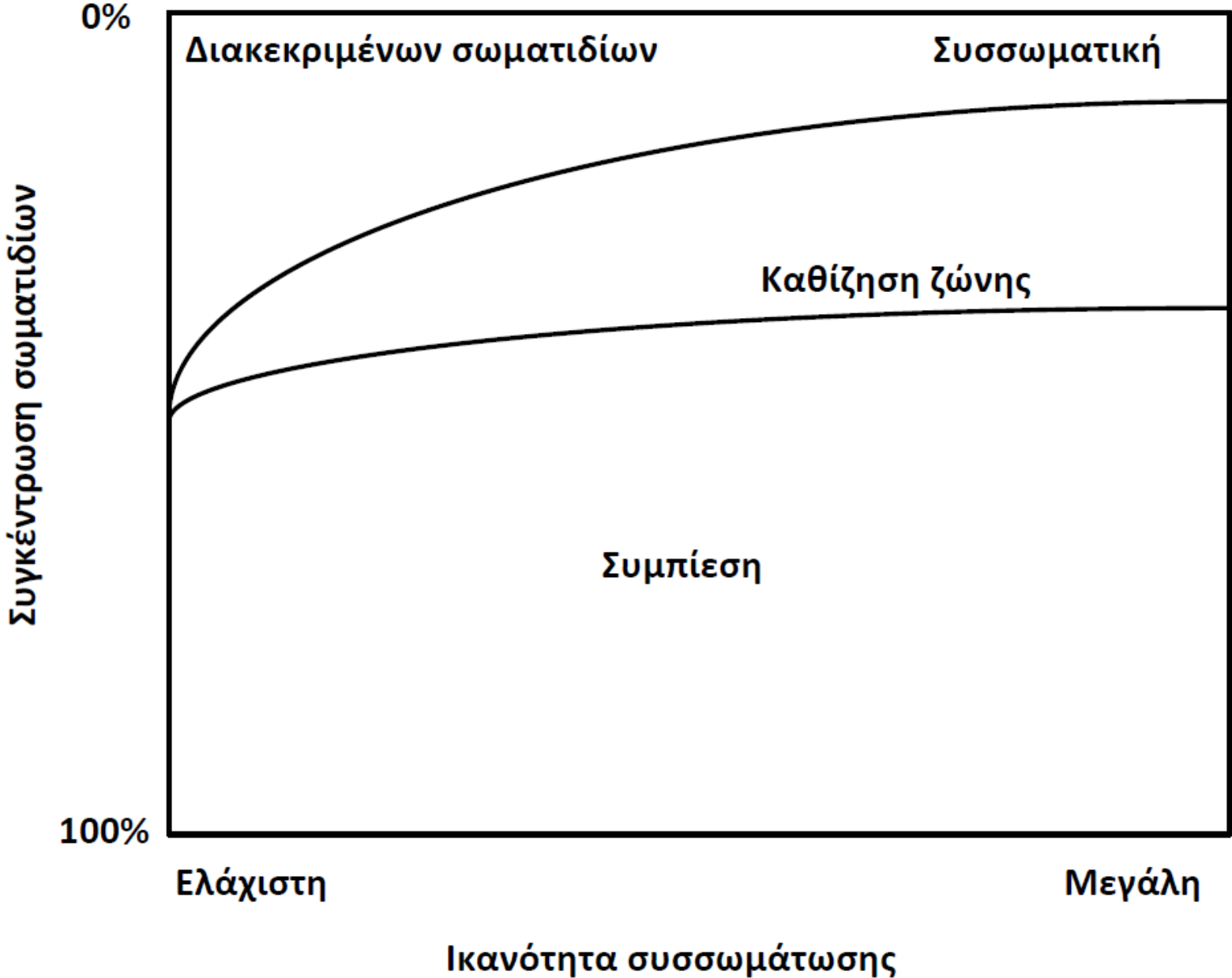
Λαμβάνει χώρα σε περιπτώσεις πολύ μεγάλων συγκεντρώσεων αιωρούμενου υλικού όπου τα σωματίδια βρίσκονται σε επαφή μεταξύ τους. Στην περίπτωση αυτή η καθίζηση δεν γίνεται λόγω βαρύτητας αλλά μόνο λόγω συμπίεσης των σωματιδίων από άλλα καθιζάνοντα σωματίδια.

Π.χ.

Δεξαμενές πάχυνσης της ιλύος

Δεξαμενές δευτεροβάθμιας καθίζησης

ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΚΑΘΙΖΗΣΗΣ



Η βασική σχέση που περιγράφει την καθίζηση διακεκριμένων σωματιδίων είναι ο νόμος του **Newton** → στηρίζεται στην υπόθεση ότι τα σωματίδια είναι σφαιρικά με ενιαία διάμετρο.

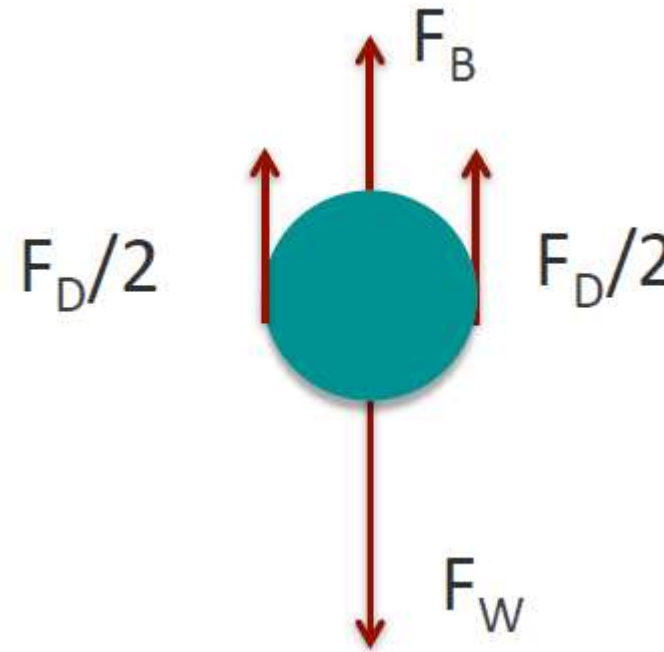
Όταν ένα σωματίδιο καθιζάνει, η πτώση του επιτυγχάνεται μέχρις ότου το ενεργό βάρος του να αντισταθμιστεί από την αντίσταση της τριβής του υγρού.

Σε ισοτιμία δυνάμεων, το σωματίδιο λαμβάνει σταθερή ταχύτητα πτώσης, που ονομάζεται τελική ταχύτητα ή ταχύτητα καθίζησης.

Τότε η δύναμη βαρύτητας (gravitational force) εξισορροπείται με την οπισθέλκουσα δύναμη (drag force)

Σε ένα σωματίδιο που εκτελεί αυτής της κατηγορίας καθίζηση ασκούνται τρεις διαφορετικές κατακόρυφες δυνάμεις:

το βάρος του (F_W),
η άνωση (F_B) και
η οπισθέλκουσα (F_D).



Το **βάρος** του σωματιδίου:

$$F_w = V_p \cdot \rho_s \cdot g$$

F_w = βάρος του σωματιδίου ($\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$)

ρ_s = πυκνότητα του σωματιδίου (kg/m^3)

g = επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s^2)

V_p = όγκος του σωματιδίου (m^3)

Η **άνωση** του σωματιδίου:

$$F_B = V_p \cdot \rho_w \cdot g$$

F_B = η άνωση ($\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$)

ρ_w = πυκνότητα του νερού (kg/m^3)

g = επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s^2)

V_p = όγκος του σωματιδίου (m^3)

Η δύναμη βαρύτητας στο νερό: $B = V_p \cdot (\rho_s - \rho_w) \cdot g$

Η τερματική ταχύτητα με την οποία καθιζάνει το σωματίδιο καλείται ταχύτητα καθίζησης V_s .

Αν $\rho_s < \rho_w$ τότε το σωματίδιο θα ανέρχεται αντί να καθιζάνει.

Η **οπισθέλκουσα** δύναμη του σωματιδίου:

$$F_D = \frac{C_D \cdot A \cdot \rho_w \cdot V_s^2}{2}$$

F_D = οπισθέλκουσα δύναμη του σωματιδίου ($\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$)

C_D = συντελεστής οπισθέκουσας

A = η προβολή της επιφάνειας του σωματιδίου κάθετα στην κατεύθυνση καθίσης
(m^2) (πr^2 για σφαιρικά σωματίδια)

ρ_w = πυκνότητα του νερού (kg/m^3)

V_s = ταχύτητα καθίσης (m/s)

Όταν το βάρος του σωματιδίου αντισταθμιστεί από το άθροισμα της άνωσης και της οπισθέλκουσας δύναμης τότε το σωματίδιο αποκτά σταθερή ταχύτητα (μηδενική επιτάχυνση). Ισχύει:

$$F_W = F_B + F_D \quad \Rightarrow \quad V_p \cdot (\rho_s - \rho_w) \cdot g = \frac{C_D \cdot A \cdot \rho_w \cdot V_s^2}{2}$$

Εφόσον για σφαιρικά σωματίδια: $V_p = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_s}{2}\right)^3$
(d_s = διάμετρος, m)

$$\Rightarrow \quad V_s = \sqrt{\frac{4g \cdot (\rho_s - \rho_w) \cdot d_s}{3C_D \cdot \rho_w}}$$

Νόμος του Newton

Ο συντελεστής οπισθέλκουσας εξαρτάται από το αν η ροή γύρω από το σωματίδιο είναι στρωτή ή τυρβώδης, δηλαδή από το πόσο σφαιρικά είναι, δηλαδή εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds (Re).

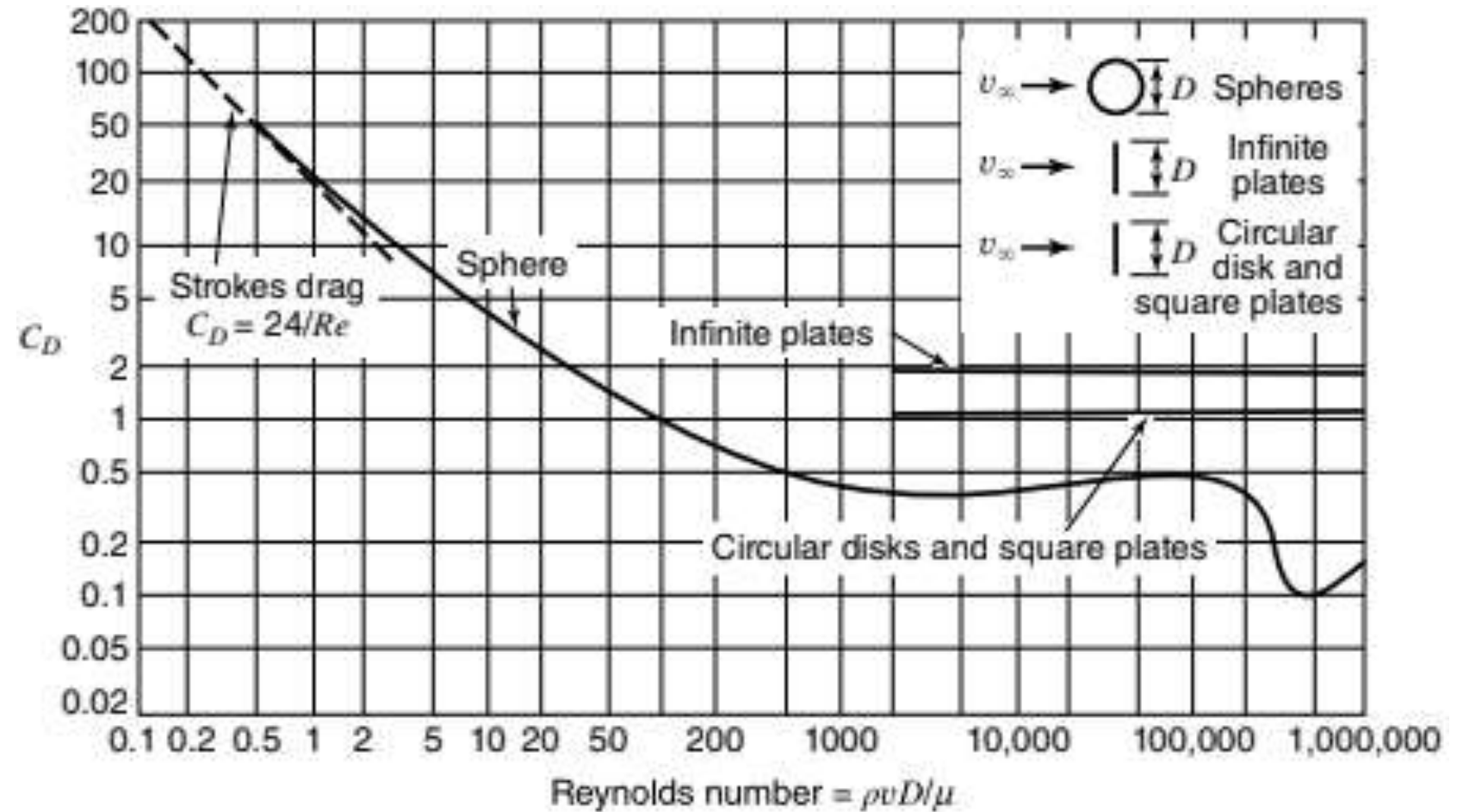
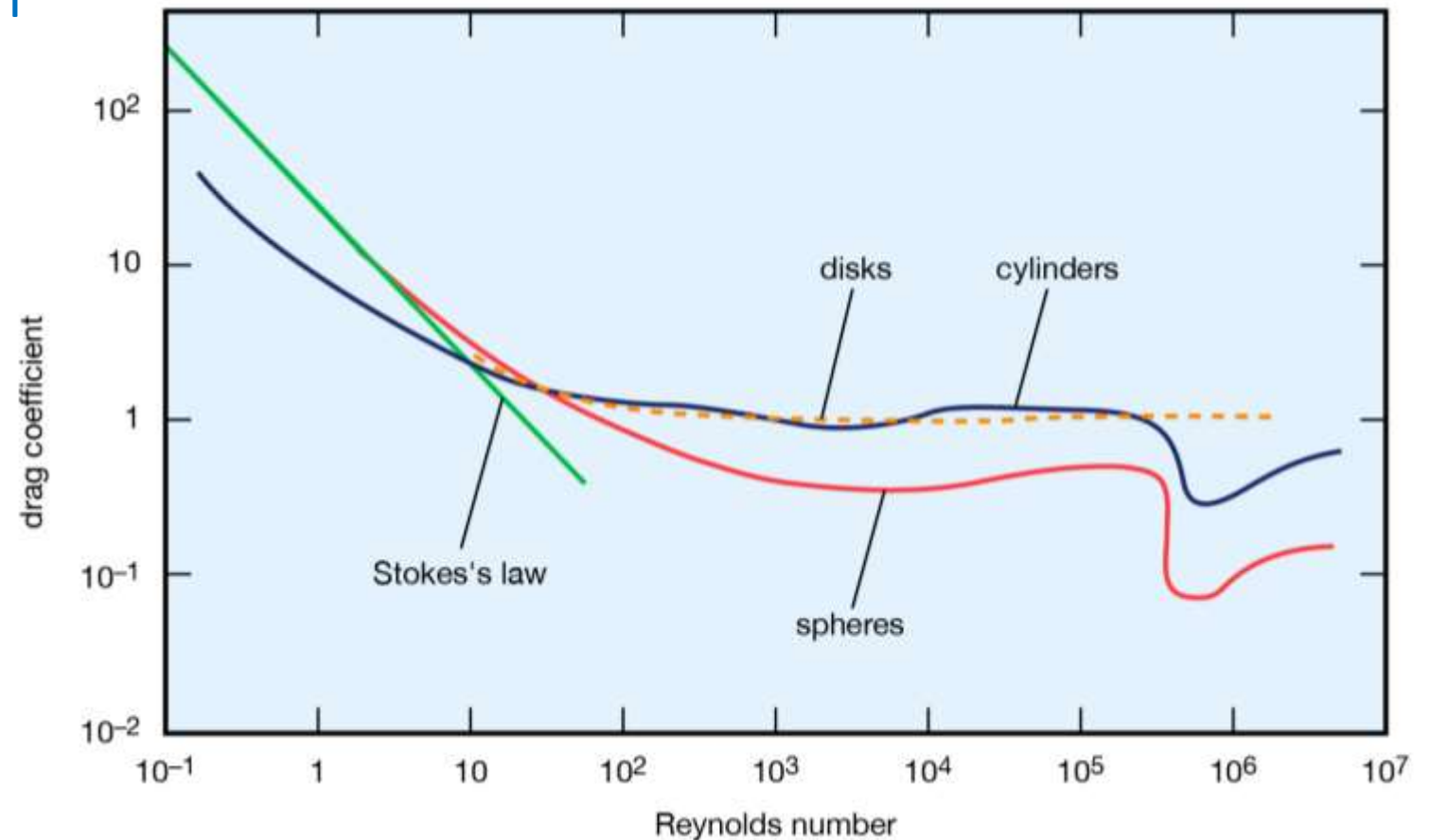


Figure 12.4 Drag coefficient versus Reynolds number for various objects.

Διακρίνονται 3 περίπου περιοχές ~ με τον Re :

1. $Re < 1$ στρωτή ροή (γραμμική περιοχή)
2. $1 = Re < 2000$ μεταβατική περιοχή
3. $Re > 2000$ τυρβώδης ροή



Για σφαιρικά σωματίδια και τιμές του αριθμού $Re < 10^4$, ο συντελεστής οπισθέλκουσας δίνεται από την:

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0,34$$

Ο αριθμός Re δίνεται από την:

$$Re = \frac{V_s \cdot \rho_w \cdot d_p}{\mu}$$

V_s = ταχύτητα ροής

d_p = διάμετρος σωματιδίου

μ = ιξώδες του νερού ($1,002 \times 10^{-3} \text{ Ns/m}^2$ στους 20°C)

α) Καθίσηση στη γραμμική περιοχή ($Re < 1$)

Για $Re < 1$ (στρωτή ροή), το ιξώδες είναι η κύρια δύναμη που καθορίζει την καθίσηση και επικρατεί ο πρώτος όρος στην εξίσωση C_D , δηλαδή:

$$C_D \approx \frac{24}{Re} \approx \frac{24 \cdot \mu}{V_s \cdot \rho_w \cdot d_p} \quad (\text{περιοχή ροής Stokes})$$

Αντικαθιστώντας στη εξίσωση του νόμου του Newton:

$$V_s = \frac{g \cdot (\rho_s - \rho_w) \cdot d_p^2}{18\mu} \quad \text{Νόμος του Stokes}$$

β) Καθίσηση στη μεταβατική περιοχή ($1=Re < 2000$)

Στη μεταβατική περιοχή θα πρέπει να χρησιμοποιείται ο ακριβής τύπος για το συντελεστή οπισθέλκουσας (εξίσωση C_D) και η ταχύτητα υπολογίζεται από το νόμο του Newton.

$$V_s = \sqrt{\frac{4g \cdot (\rho_s - \rho_w) \cdot d_s}{3C_D \cdot \rho_w}}$$

Εξαιτίας της φύσης της εξίσωσης τριβής, ο υπολογισμός της ταχύτητας καθίσησης γίνεται με επαναληπτική διαδικασία.

γ) Καθίζηση στη τυρβώδη περιοχή ($Re > 2000$)

Στην τυρβώδη περιοχή κυριαρχούν οι δυνάμεις αδράνειας και μειώνεται η επίδραση των δύο πρώτων όρων στην εξίσωση υπολογισμού του συντελεστή οπισθέλκουσας. Ο συντελεστής οπισθέλκουσας λαμβάνεται ίσος με:

$$C_D = 0,4$$

Αντικαθιστώντας την τιμή 0,4 στο νόμο του Newton, προκύπτει:

$$V_s = \sqrt{3,33 \cdot g \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right) d_p}$$

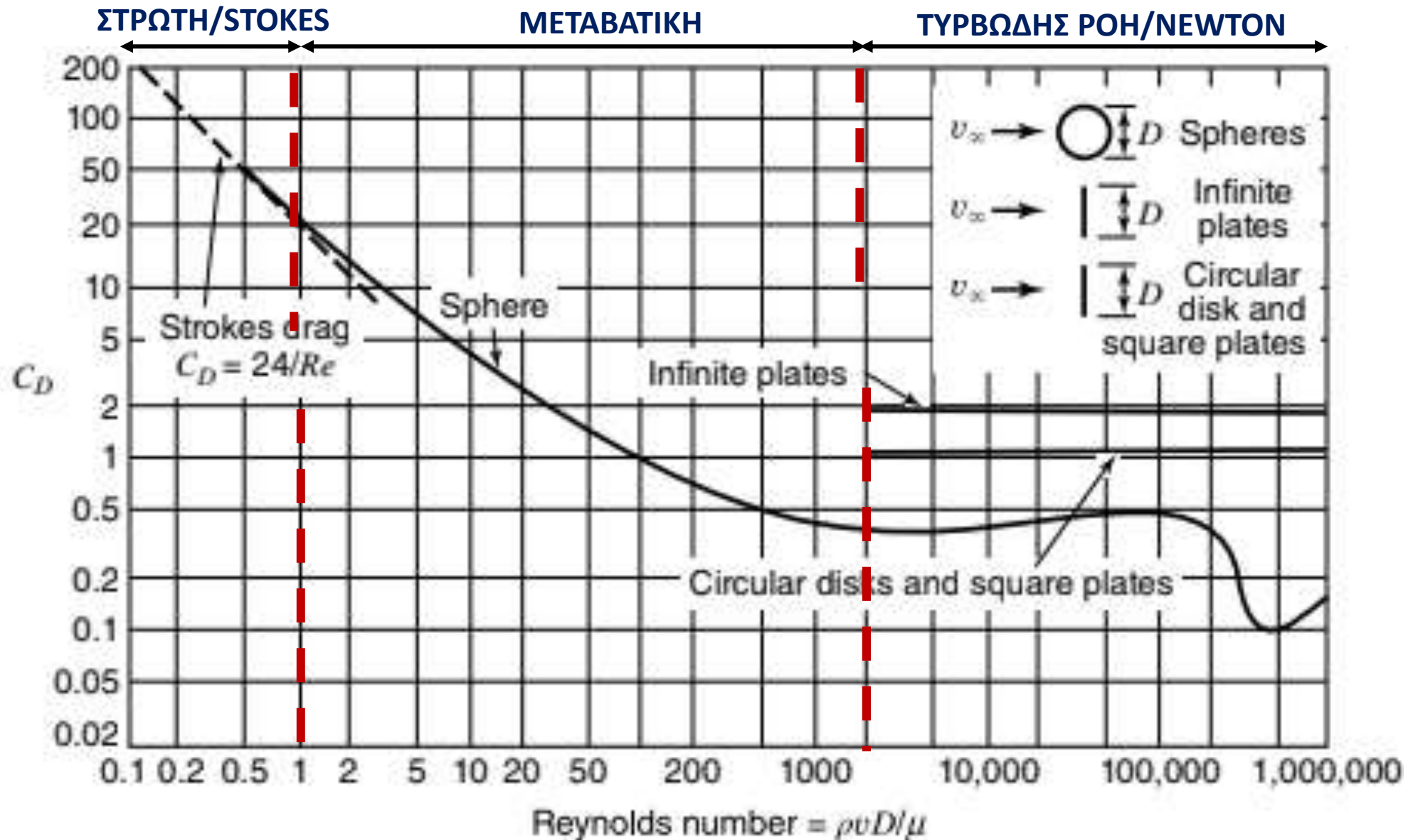


Figure 12.4 Drag coefficient versus Reynolds number for various objects.

ΚΑΘΙΣΗΣΗ ΤΥΠΟΥ Ι: ΚΑΘΙΣΗΣΗ ΔΙΑΚΕΚΡΙΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

Γενικά η σχέση προσεγγίζεται με

$$C_D = \frac{b}{Re^n}$$

όπου b και n είναι συντελεστές για τις διάφορες περιοχές του διαγράμματος και συνοψίζονται στον πίνακα:

ΠΕΡΙΟΧΗ	b	n	$C_D = b/Re^n$
Stokes $Re < 1$	24	1,0	$C_D = 24/Re$
Μεταβατική $1 < Re < 2000$	18,5	0,6	$C_D = 18,5/Re^{0,6}$
Newton $Re > 2000$	0,4	0,0	$C_D = 0,4$

Για τις τρεις περιοχές, η σχέση C_D και Re εκφράζεται λογαριθμικά:

Περιοχή Stokes

$$C_D = 24/Re$$

$$\log C_D = -\log Re + \log 24$$

Μεταβατική περιοχή

$$C_D = 18,5/Re^{0,6}$$

$$\log C_D = -0,6 \log Re + \log 18,5$$

Περιοχή Newton

$$C_D = 0,4$$

$$\log C_D = \log 0,4$$

Έτσι, η καμπύλη στο σχήμα συνίσταται τυπικά από τρία γραμμικά τμήματα με κλίσεις -1, -0,6 και 0 αντιστοίχως.

Παρόλο που οι Νόμοι των Newton και Stokes δίνουν τη δυνατότητα υπολογισμού της ταχύτητας καθίσης διακεκριμένων σωματιδίων, για το σχεδιασμό των δεξαμενών καθίσης η εφαρμογή των εξισώσεων είναι δύσκολη καθώς το σχήμα, το είδος και η κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων δεν είναι πάντα γνωστή.

Να υπολογιστεί η ταχύτητα καθίζησης κόκκων άμμου διαμέτρου $d_p = 0,6 \text{ mm}$ και πυκνότητας $2,6 \text{ g/cm}^3$ σε νερό θερμοκρασίας 20°C .

Το ιξώδες του νερού στους 20°C είναι $1,01 \times 10^{-2} \text{ poises (g/cm.s)}$

Από την εξίσωση Stokes προκύπτει:

$$V_s = \frac{g \cdot (\rho_s - \rho_w) \cdot d_p^2}{18\mu} = \frac{1}{18} \cdot \frac{981}{1,01 \cdot 10^{-2}} (2,65 - 1) \cdot (5 \cdot 10^{-3})^2 = 0,222 \text{ cm/s}$$

$$\text{Re} = \frac{V_s \cdot \rho_w \cdot d_p}{\mu} = 0,11$$

Δηλαδή ισχύει ο νόμος του Stokes

Να υπολογιστεί η ταχύτητα καθίζησης κόκκων άμμου διαμέτρου $d_p = 0,6 \text{ mm}$ και πυκνότητας $2,6 \text{ g/cm}^3$ σε νερό θερμοκρασίας 20°C και 10°C .

Το ιξώδες του νερού στους 10°C είναι $1,31 \times 10^{-2} \text{ poises (g/cm.s)}$

$$V_s = \frac{g \cdot (\rho_s - \rho_w) \cdot d_p^2}{18\mu} = \frac{1}{18} \cdot \frac{981}{1,31 \cdot 10^{-2}} (2,65 - 1) \cdot (5 \cdot 10^{-3})^2 = 0,17 \text{ cm/s}$$

Η ταχύτητα αυτή μπορεί να υπολογιστεί και από την ταχύτητα καθίζησης στους 20°C και τα δύο ιξώδη:

$$V_s = 0,222 \frac{1,01}{1,31} = 0,17 \text{ cm/s}$$