

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

Διάλεξη 7: Απομάκρυνση N & P

Ανέστης Βλυσίδης
Επίκουρος Καθηγητής, ΕΜΠ

Η εκροή δευτεροβάθμιας επεξεργασίας, συνήθως εξακολουθεί να έχει περίπου:

- 30 mg/L αιωρούμενα στερεά
- 300 mg/L ολικά στερεά
- 20-30 mg/L BAO₅
- (παθογόνους) μικροοργανισμούς → απολύμανση

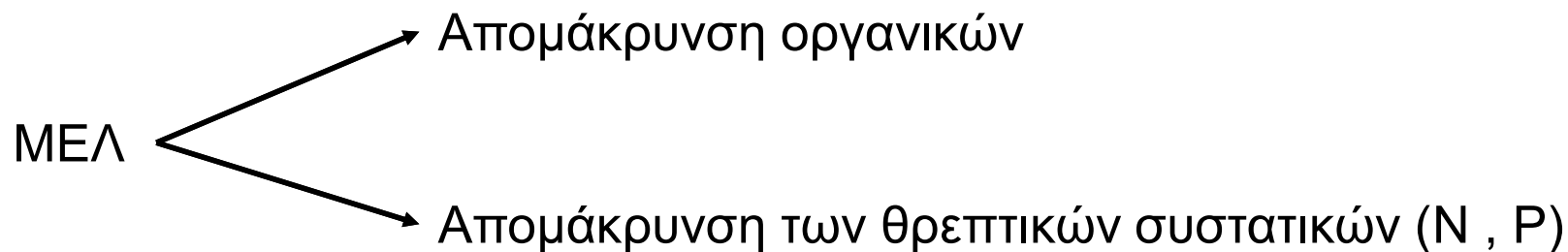
KYA 5673/400		Τυπικές συγκεντρώσεις AYA (mg/L)	Ελάχιστη ποσοστιαία μείωση (%)
Παράμετρος	Συγκέντρωση (mg/L)		
BAO ₅	25	110-400	70-90
ΧΑΟ	125	250-1000	75
Ολικά Αιωρούμενα Στερεά	35	100-350	90

αλλά το **κυριότερο πρόβλημα** είναι η σημαντική παρουσία:

- **Φωσφόρου** (~ 7 mg/L)
- **Αζώτου** (~ 20 mg/L)

Η παρουσία φωσφόρου και αζώτου ευθύνεται για ανάπτυξη μικρο-φυκών (**ευτροφισμός**)





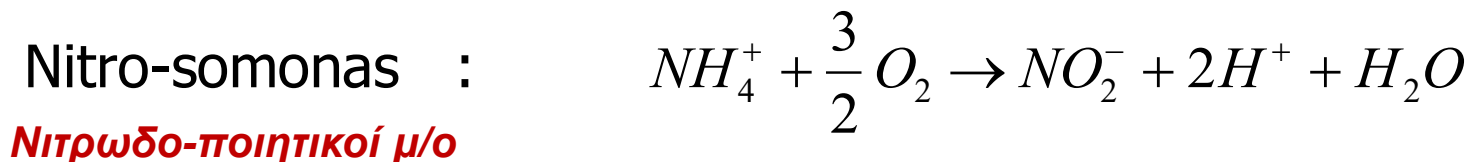
Απαιτήσεις για διάθεση από εγκαταστάσεις επεξεργασίας
αποβλήτων σε **ευαίσθητες** περιοχές ΚΥΑ 5673/400

Παράμετρος	Συγκέντρωση (mg/L)	Τυπικές συγκεντρώσεις ΑΥΑ (mg/L)
Ολικός Φωσφόρος	2 (10.000-100.000 Ι.Κ.) 1 (άνω των 100.000 Ι.Κ.)	4-15
Ολικό Άζωτο (TKN)	15 (1.000-100.000 Ι.Κ.) 10 (άνω των 100.000 Ι.Κ.)	20-85

Απομάκρυνση Αζώτου - Νιτροποίηση

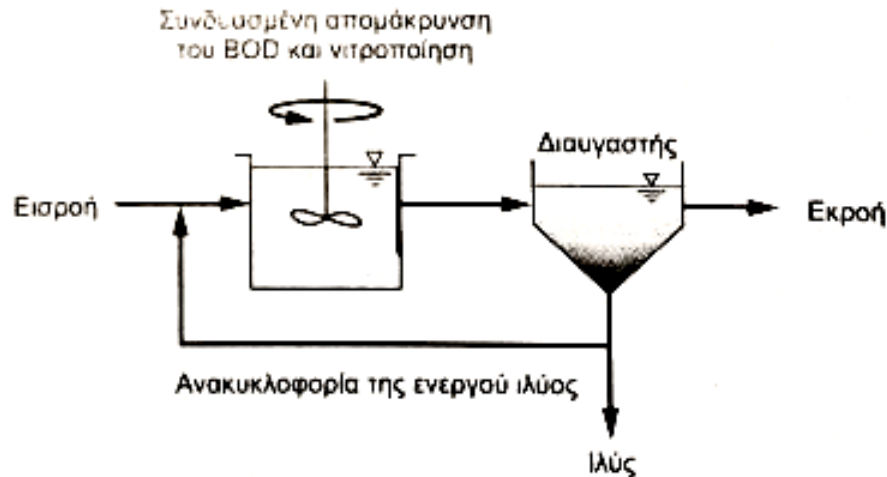
- Στο φυσικό περιβάλλον η **αμμωνία** οξειδώνεται σε **δύο στάδια** (νιτροποίηση) δίνοντας πρώτα **νιτρώδη** και εν συνεχεία **νιτρικά** ιόντα.
- για την **πλήρη οξείδωση** της αμμωνίας απαιτούνται **4,57 g οξυγόνου** ανά g αμμωνιακού αζώτου

Νιτρογενής Απαίτηση
Οξυγόνου (ΝΑΟ)



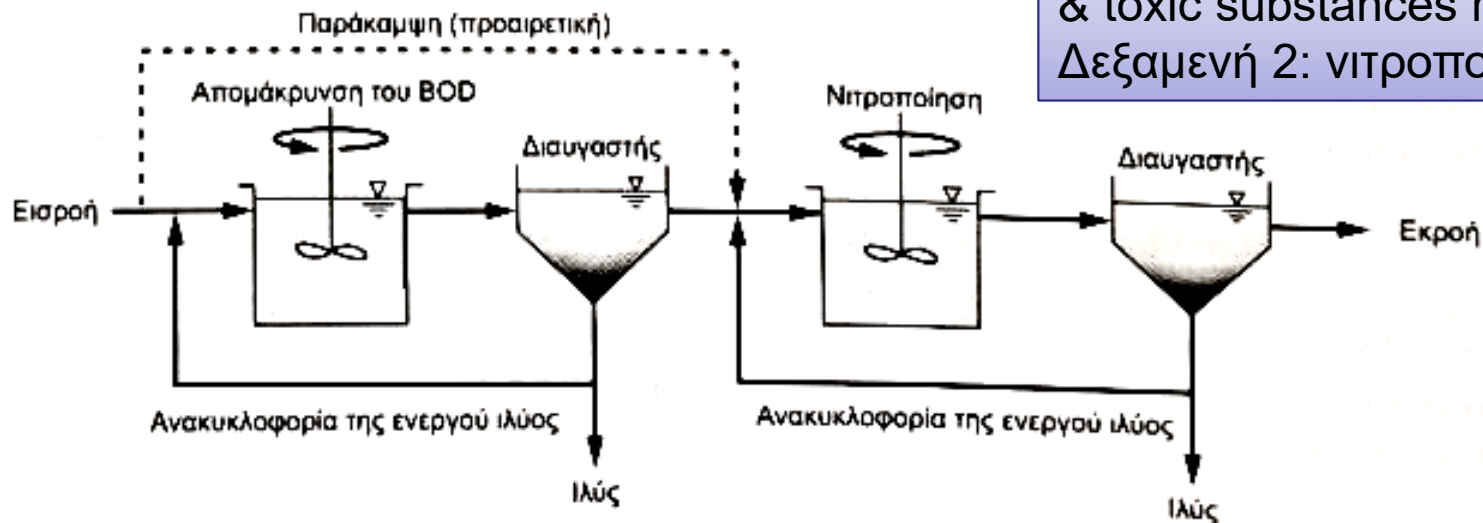
- Και τα δύο είδη είναι **αυτότροφοι** οργανισμοί που χρησιμοποιούν CO_2 ως πηγή άνθρακα (ονομάζονται **νιτροποιητές** και είναι **αερόβιοι** μ/ο)
- Υπάρχουν στην ενεργό ιλύ, όταν η ηλικία της λάσπης είναι **αρκετά μεγάλη**. Ο λόγος είναι ότι χαρακτηρίζονται από **αργή κινητική ανάπτυξης**, ώστε μικρές ηλικίες ιλύος να οδηγούν σε έκπλυσή τους. Οπότε χρειαζόμαστε υψηλότερα **SRT**.
- **Μεγάλες ηλικίες ιλύος** μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε στην ενεργό ιλύ, είτε στο βραδυχαλικοδιυλιστήριο, για να επιτευχθεί η **βιολογική οξείδωση (νιτροποίηση)** της αμμωνίας.
- Στα βραδυχαλικοδιυλιστήρια έχουμε πρώτα κατανάλωση BOD και μετά κατανάλωση αμμωνίας ... ή σε δεύτερο βιόφιλτρο.
- Ετερότροφα βακτήρια → μεγαλύτερη παραγωγή βιομάζας → κυριαρχούν στις επιφάνειες σταθερού φιλμ.

Μονό και διπλό σύστημα αιωρούμενης βιομάζας



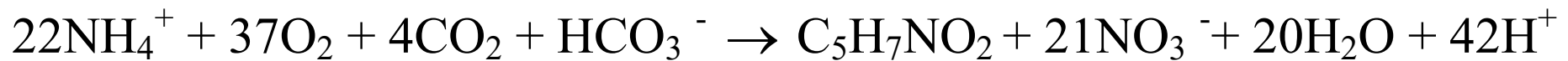
Ταυτόχρονη απομάκρυνση BOD και νιτροποίησης

(α)

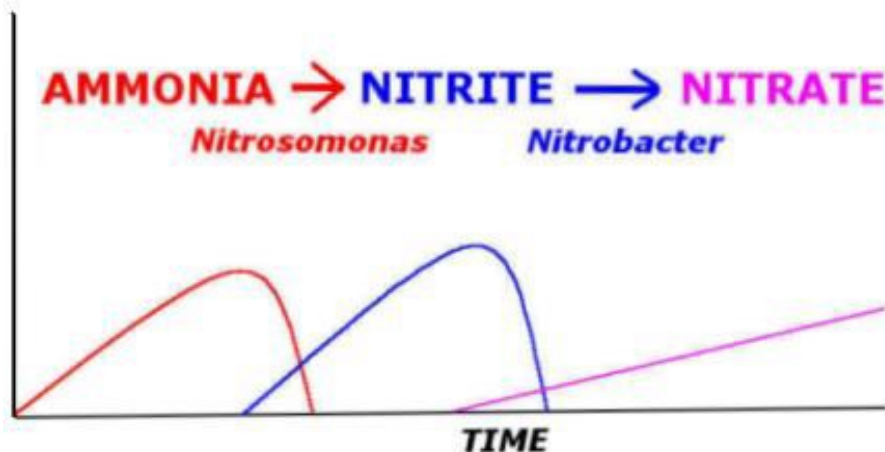


Δεξαμενή 1: Μικρό SRT → BOD & toxic substances removal
Δεξαμενή 2: νιτροποίηση

Η **συνολική αντίδραση** που περιγράφει την χρήση αμμωνίας και διοξειδίου του άνθρακα για την ανάπτυξή τους είναι:



μικροβιακή
μάζα



Είναι δυνατή και η ετεροτροφική νιτροποίηση, ιδιαίτερα σε πολύ αλκαλικές ή όξινες συνθήκες. Οι ρυθμοί Ετ.Νιτρ. << ρυθμοί Αυτ.Νιτρ.

Κινητική Νιτροποίησης (1)

Ο ρυθμός ανάπτυξης των νιτροποιητικών βακτηρίων μπορεί να περιγραφεί από:

$$r_A = \mu_A^{\wedge} \left(\frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \right) \cdot \left(\frac{S_O}{K_{OA} + S_O} \right) X_{BA} - b_A X_{BA}$$

Διπλό περιορισμό Υποστρώματος

- Αμμώνιο
- Οξυγόνο

Όπου:

X_{BA} : συγκέντρωση αυτότροφων (νιτροποιητικών) οργανισμών (g/L)

$\mu_{\max}$: μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης αυτότροφων οργανισμών (g/g d)

S_O : συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου (g/m³)

b_A : ειδικός ρυθμός ενδογενούς αναπνοής αυτότροφων οργανισμών (g/g d)

S_{NH} : συγκέντρωση αμμωνίου (g/m³)

K_{NH}, K_{OA} : συντελεστές κορεσμού (g/m³)

Οι ρυθμοί νιτροποίησης αυξάνουν για DO 3-4 mg/L

Κινητική Νιτροποίησης (2)

$$r_A = \hat{\mu}_A \left(\frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \right) \cdot \left(\frac{S_O}{K_{OA} + S_O} \right) X_{BA} - b_A X_{BA}$$

- Ρυθμός απομάκρυνσης ιόντων αμμωνίου

$$r_{NH} = - \frac{(r_A + b_A X_{BA})}{Y_A} = - \frac{1}{Y_A} \hat{\mu}_A \left(\frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \right) \left(\frac{S_O}{K_{OA} + S_O} \right) X_{BA}$$

Τυπικές τιμές παραμέτρων (18°C)

$$\mu_A = 0,4 \text{ d}^{-1}$$

$$K_{NH} = 0,2 \text{ mg-N L}^{-1}$$

$$Y_A = 0,2 \text{ mgVSS/mgNH}_4\text{-N}$$

$$K_{OA} = 0,4 \text{ mg L}^{-1}$$

$$b_A = 0,1 \text{ d}^{-1}$$

Πίνακας 10.2

- Εξάρτηση του ειδικού ρυθμού ανάπτυξης από την T και το pH

$$\hat{\mu}_A - b_A = \frac{m e^{-c/T}}{1 + \frac{d}{10^{-\text{pH}}} + \frac{10^{-\text{pH}}}{f}}$$

Αύξηση του T → αύξηση του μ
Υπάρχει ένα βέλτιστο pH κοντά στο 7,2

Παράδειγμα 1

Για το παράδειγμα σχεδιασμού διεργασίας Ε.Ι., να βρεθεί η **δυνατότητα νιτροποίησης**. Υποθέσατε ότι η ισχύς των απόνερων σε **αμμωνία είναι 50 mg/L**.

Θεωρήστε τις τυπικές τιμές παραμέτρων για την νιτροποίηση.

Να σχεδιαστεί μια διεργασία ενεργού ιλύος που να δέχεται 21600 m³/d ΑΥΑ με BAO₅ = 250 mg/L.

$$\begin{aligned}\mu_A &= 0,4 \text{ d}^{-1} \\ K_{NH} &= 0,2 \text{ mg-N L}^{-1} \\ Y_A &= 0,2 \text{ mgVSS/mgNH}_4\text{-N} \\ K_{OA} &= 0,4 \text{ mg L}^{-1} \\ b_A &= 0,1 \text{ d}^{-1}\end{aligned}$$

Η διεργασία αυτή είχε σχεδιασθεί με χρόνο παραμονής:

$$\theta=0,2 \text{ d} \quad , \quad \theta_c=10 \text{ d} \quad \& \quad r=1$$

Για την νιτροποίηση **θα ισχύουν πάλι οι ίδιες σχέσεις** αντικαθιστώντας το οργανικό υπόστρωμα S με το αμμώνιο S_{NH} και την ετεροτροφική βιομάζα με την αυτότροφη βιομάζα x_{BA} , υπό τον όρο ότι ο αερισμός είναι επαρκής (δεν υπάρχει περιορισμός οξυγόνου).

Έτσι:

$$S_{\text{NH}} = \frac{\left(\frac{1+r}{\theta + r\theta_c} + b_A \right) K_{\text{NH}}}{\mu_A - b_A - \frac{1+r}{\theta + r\theta_c}}$$

$$S = \frac{\left(\frac{1+r}{\theta + r\theta_c} + k_d \right) K_s}{\mu_{\text{max}} - k_d - \frac{1+r}{\theta + r\theta_c}} \quad X = \frac{Y(S_0 - S)}{\frac{1+r}{\theta + r\theta_c} + k_d} \cdot \frac{1}{\theta}$$

$$x_{\text{BA}} = \frac{Y_A (S_{\text{NHO}} - S_{\text{NH}})}{\frac{1+r}{\theta + r\theta_c} + b_A} \cdot \frac{1}{\theta}$$

$$\begin{aligned} \mu_A &= 0,4 \text{ d}^{-1} \\ K_{\text{NH}} &= 0,2 \text{ mg-N L}^{-1} \\ Y_A &= 0,2 \text{ mgVSS/mgNH}_4\text{-N} \\ K_{\text{OA}} &= 0,4 \text{ mg L}^{-1} \\ b_A &= 0,1 \text{ d}^{-1} \end{aligned}$$

Οπότε:

$$S_{\text{NH}} = \frac{\left(\frac{2}{10,2} + 0,1 \right) 0,2}{0,4 - 0,1 - \frac{2}{10,2}} \approx 0,6 \frac{\text{mg}}{1}$$

Επιτυγχάνεται ουσιαστικά
πλήρης νιτροποίηση

Αποδοτικότητα της διεργασίας

$$E = \frac{S_0 - S}{S_0} \times 100$$

Η νιτροποίηση μπορεί ουσιαστικά να επιτευχθεί σε συμβατικές διεργασίες Ενεργού Ιλύος, αρκεί να εξασφαλιστεί **επαρκής αερισμός και υψηλές ηλικίες λάσπης**.
Συνήθως όμως πραγματοποιείται σε χωριστή διεργασία που έπεται της Ε.Ι.

Πόση είναι η αυτότροφη βιομάζα;

$$X_{\text{BA}} = \frac{Y_A (S_{\text{NHO}} - S_{\text{NH}})}{\frac{1+r}{\theta + r\theta_c} + b_A} \cdot \frac{1}{\theta}$$

- Οπότε λύσαμε το πρόβλημα του N με την Νιτροποίηση; Τι καταφέραμε;

- Μειώσαμε την απαίτηση σε οξυγόνο στον υδάτινο αποδέκτη.

4,57 g οξυγόνου ανά g
αμμωνιακού αζώτου

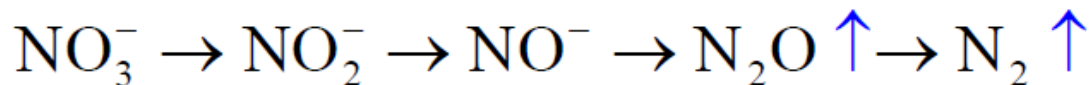
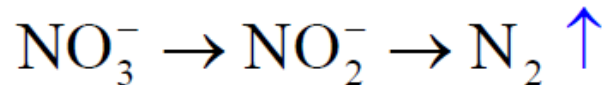
- Αλλά πάλι θρεπτικά (με τη μορφή νιτρικών) καταλήγουν στους αποδέκτες.



Απονιτροποίηση → Απομάκρυνση των νιτρικών (καθώς και νιτρωδών στην περίπτωση ανεπαρκούς νιτροποίησης)

Απονιτροποίηση (1)

- Βιολογική **αναγωγή** των νιτρικών και νιτρωδών προς **αέρια** οξείδια του αζώτου (NO , N_2O) και τελικά προς N_2 .
- N_2 λόγω μικρής διαλυτότητας φεύγει στην **ατμόσφαιρα**.
- Πολλά από τα *ετεροτροφικά βακτήρια* στην ενεργό ιλύ μπορούν να χρησιμοποιούν **είτε οξυγόνο είτε NO_3^- (ανοξικές συνθήκες)** ως τελικό αποδέκτη ηλεκτρονίων κατά την αναπνοή τους.
- Εξασφαλίζοντας **ανοξικές** συνθήκες (low DO) τα βακτήρια αυτά ανάγουν τα νιτρικά, αποδίδοντας αέριο άζωτο.



ΑΠΟΝΙΤΡΟΠΟΙΗΣΗ (2)

- Οι **απονιτροποιητικοί οργανισμοί** πραγματοποιούν την αναγωγή του νιτρικού αζώτου μέσω δύο μεταβολικών οδών.
 - Νιτρικά $\rightarrow$ Νιτρώδη $\rightarrow$ Αμμωνιακά $\rightarrow$ κυτταρικά «στοιχεία»
 - Εάν υπάρχουν ήδη **αμμωνιακά** τότε έχουμε αναγωγή του νιτρικού και του νιτρώδους αζώτου μέσω ενός μηχανισμού που ονομάζεται **καταβολισμός νιτρικών**.
- Για το **δεύτερο μονοπάτι** χρειαζόμαστε **ανοξικές συνθήκες** γιατί αλλιώς θα προτιμηθεί το οξυγόνο ως τελικός ηλεκτρονιοδέκτης (**προαιρετικά αερόβια ετερότροφα βακτήρια**).

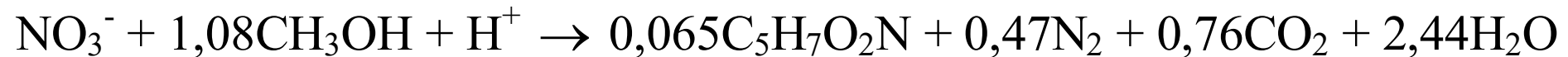
Η χρήση O_2 ως τελικού ηλεκτρονιοδέκτη είναι ενεργειακά προτιμητέα σε σχέση με τη χρήση νιτρικών.

Τι είναι τα απονιτροποιητικά βακτήρια;

Χρειαζόμαστε την ύπαρξη οργανικού άνθρακα (δότης ηλεκτρονίων) $\rightarrow$ μεθανόλη οξειδώνεται προς CO_2

Ενώ τα νιτρικά σαν αποδέκτης ηλεκτρονίων (ανάγονται προς αέριο άζωτο).

Η **συνολική αντίδραση** μπορεί να γραφεί ως εξής
(αν χρησιμοποιηθεί μεθανόλη ως πηγή άνθρακα):



Θεωρητικά : 1,9 mg-μεθανόλης/ mg νιτρικού αζώτου

Με κυτταρική βιομάζα: 2,47 mg-μεθανόλης/ mg νιτρικού αζώτου

Πρακτικά: 2,5 – 3,0 mg-μεθανόλης/ mg νιτρικού αζώτου συνυπολογίζοντας το **υπολειπόμενο DO** και την **αναγωγή των νιτρωδών** οι οποίες όμως είναι σχετικά μικρές σε σχέση με την απαίτηση για αναγωγή των νιτρικών.

Κινητική Απονιτροποίησης

Η ανάπτυξη των απονιτροποιητικών βακτηρίων περιγράφεται από την σχέση:

$$r_H = \mu_H' \cdot \frac{S}{K_S + S} \cdot \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \cdot x_{BH} - b_H x_{BH}$$

ενώ η απομάκρυνση των νιτρικών δίνεται από:

$$r_{NO} = - \frac{1}{Y'} (r_H + b_H x_{BH})$$

η δε απομάκρυνση οργανικών:

$$r_S = - \frac{1}{Y_H} (r_H + b_H x_{BH})$$

Διπλό περιορισμό Υποστρώματος

- Οργανικού Άνθρακα (π.χ. COD)
- Νιτρικών (NO)

μ_H' : μέγιστος ειδικός ρυθμός ανοξικής ανάπτυξης
 K_S, K_{NO} : συντελεστές κορεσμού
 b_H : ειδικός ρυθμός ενδογενούς αναπνοής ($0,5 \text{ d}^{-1}$)
 S_{NO} : συγκέντρωση NO_3^- (mg-N/L)
 S : συγκέντρωση οργανικών (mg-COD/L)
 Y' : συντελεστής αποδοτικότητας
 Y_H : συντελεστής αποδοτικότητας

Τυπικές τιμές παραμέτρων

$\mu_H' = 4.2 \text{ d}^{-1}$, $K_S = 20 \text{ mgCOD/L}$, $K_{NO} = 0.5 \text{ mg-N/L}$, $Y' = 5.8 \text{ mgCOD}_{\text{κυτ}}/\text{mgN}$,
 $Y_H = 0.67 \text{ mgCOD}_{\text{κυτ}}/\text{mgCOD}$, $b_H = 0.5 \text{ d}^{-1}$

Παράδειγμα 2

Μία δεξαμενή **απονιτροποίησης** πρόκειται να σχεδιαστεί με σκοπό την απομάκρυνση νιτρικών σε απόβλητο παροχής $3000 \text{ m}^3/\text{d}$ που περιέχει 20 mg-COD/L οργανικά και 50 mg-N/L νιτρικά.

Να υπολογισθεί ο **απαιτούμενος όγκος** καθώς και η **απαιτούμενη προσθήκη μεθανόλης** σε COD (αν απαιτείται) προκειμένου τα νιτρικά να μειώνονται σε 5 mg-N/L .

$r_H = \mu_H' \cdot \frac{S}{K_S + S} \cdot \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \cdot x_{BH} - b_H x_{BH}$	$r_S = -\frac{1}{Y_H} (r_H + b_H x_{BH})$	$r_{NO} = -\frac{1}{Y'} (r_H + b_H x_{BH})$
---	---	---

Τα ισοζύγια μάζας σε μόνιμη κατάσταση δίνουν:

$$0 = \mu_H' \cdot \frac{S}{K_s + S} \cdot \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} x_{BH} - b_H x_{BH} - \frac{x_{BH}}{\theta}$$

$$0 = -\frac{1}{Y_H} \mu_H' \cdot \frac{S}{K_s + S} \cdot \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} x_{BH} + \frac{S^0 - S}{\theta}$$

$$0 = -\frac{1}{Y'} \mu_H' \cdot \frac{S}{K_s + S} \cdot \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} x_{BH} + \frac{S_{NO}^0 - S_{NO}}{\theta}$$

Από τις δύο τελευταίες σχέσεις έχουμε:

$$Y'(S_{NO}^0 - S_{NO}) = Y_H (S^0 - S)$$

Τι ξέρουμε από εδώ;

$$Y'(S_{NO}^0 - S_{NO}) = Y_H (S^0 - S) \Leftrightarrow S = S^0 - 389,55$$

Αντικαθιστώντας στο ισοζύγιο της βιομάζας, έχουμε (για $x_{BH} \neq 0$):

$$0 = \mu_H' \frac{S}{K_s + S} \cdot \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} x_{BH} - b_H x_{BH} - \frac{x_{BH}}{\theta}$$

$$4,2 \frac{S_O - 389,55}{S_O - 369,55} \cdot \frac{5}{5,5} = 0,5 + \frac{1}{\theta}$$

Άρα βλέπουμε ότι υπάρχει ένας βαθμός ελευθερίας.

Τυπικές τιμές παραμέτρων

$\mu_H' = 4.2 d^{-1}$, $K_S = 20 \text{ mgCOD/L}$, $K_{NO} = 0.5 \text{ mg-N/L}$, $Y' = 5.8 \text{ mgCOD}_{\text{κυτ}}/\text{mgN}$,
 $Y_H = 0.67 \text{ mgCOD}_{\text{κυτ}}/\text{mgCOD}$, $b_H = 0.5 d^{-1}$

- Για κάποιο θ προσδιορίζεται το S_0 **(η απαιτούμενη φόρτιση σε οργανικά)** και αντικαθιστώντας βρίσκεται το **S** και το **x_{BH}** .
- Αν θέσουμε $\theta=0,5$ d βρίσκουμε ότι η απαιτούμενη συγκέντρωση οργανικών στην είσοδο είναι $S_0 \sim 428$ mg-COD/L.
- Το COD στην απορροή τότε θα είναι:

$$S = S_0 - 389,55 = 38,45 \text{ mgCOD/L.}$$
- **Μεγαλύτερος χρόνος παραμονής θ απαιτεί μικρότερη συγκέντρωση S_0 , και θα οδηγούσε σε μεγαλύτερη απομάκρυνση οργανικών.**

$$4,2 \frac{S_0 - 389,55}{S_0 - 369,55} \cdot \frac{5}{5,5} = 0,5 + \frac{1}{\theta}$$

Δεδομένα: Απόβλητο παροχής 3000 m³/d
που περιέχει 20 mg-COD/L οργανικά

- Ο όγκος που απαιτείται για $\theta=0,5$ d είναι $V=Q*\theta=1.500$ m³
- Για $\theta=0,5$ d η **απαιτούμενη παροχή οργανικών** είναι:

$$Q*S_0 = 428 \text{ (g-COD/m}^3\text{)} * 3000 \text{ (m}^3\text{/d)} = 1284 \text{ kg-COD/d,}$$

Άρα **πρέπει να προσθέσουμε $1284 - 60 = 1224$ kg-COD μεθανόλης /d**

Πόση μεθανόλη είναι αυτό;

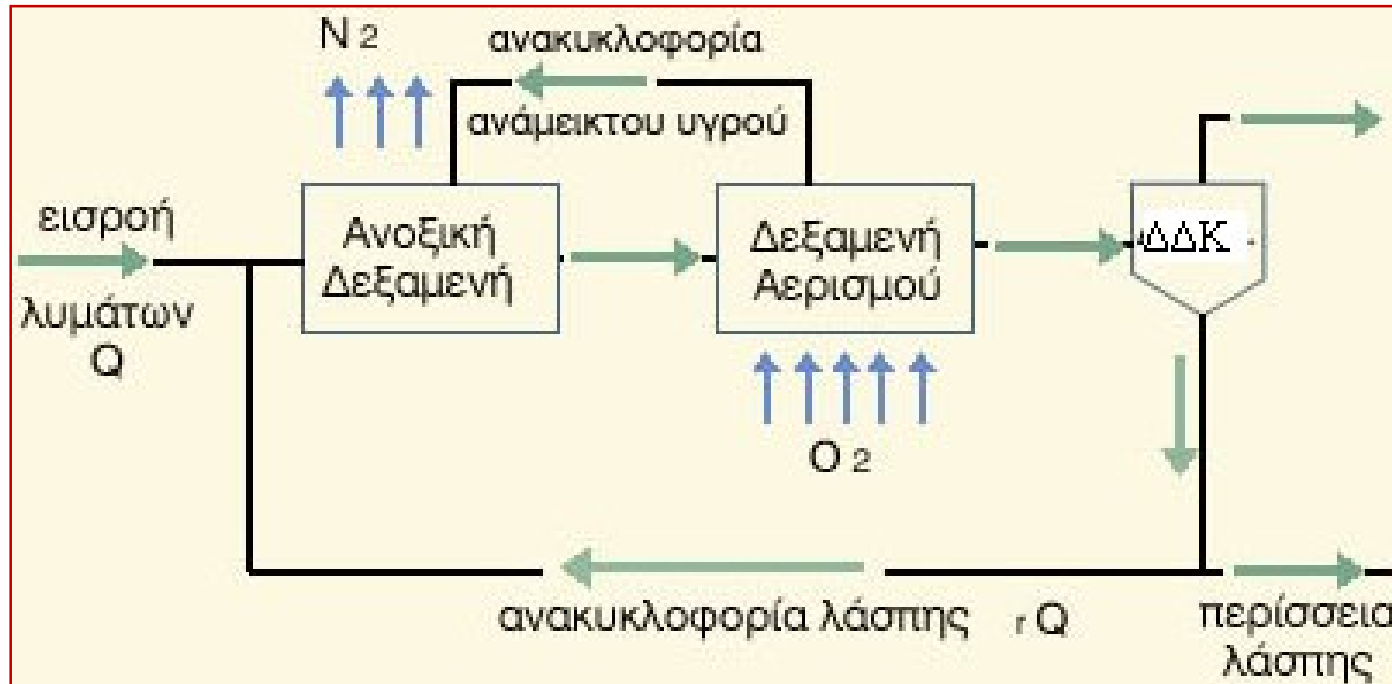


Πόσο είναι τα α και β ;

$$0 = -\frac{1}{Y_H} \mu_H' \cdot \frac{S}{K_s + S} \cdot \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} x_{BH} + \frac{S^0 - S}{\theta}$$

Πόση είναι η βιομάζα;

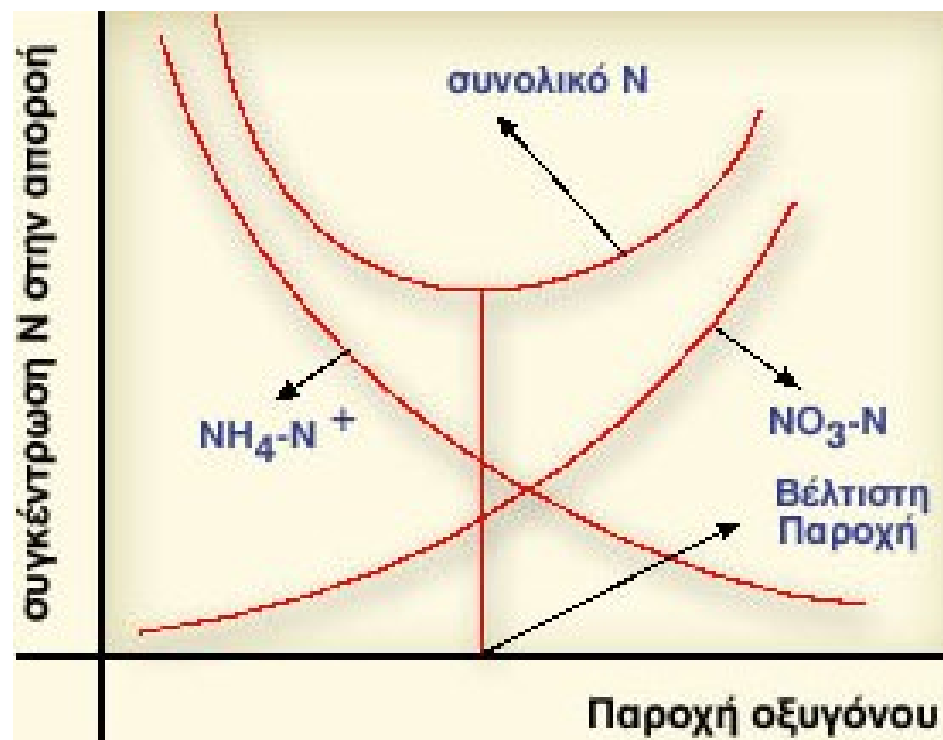
Προαπονιτροποίηση



Προκειμένου να αποφευχθεί η ανάγκη προσθήκης εξωτερικής πηγής άνθρακα, είναι δυνατόν να διατάξουμε την απονιτροποίηση πριν από τη νιτροποίηση/οξείδωση εκμεταλλευόμενοι έτσι, το πλούσιο σε **οργανικό φορτίο των αποβλήτων** που προέρχονται από την πρωτοβάθμια επεξεργασία.

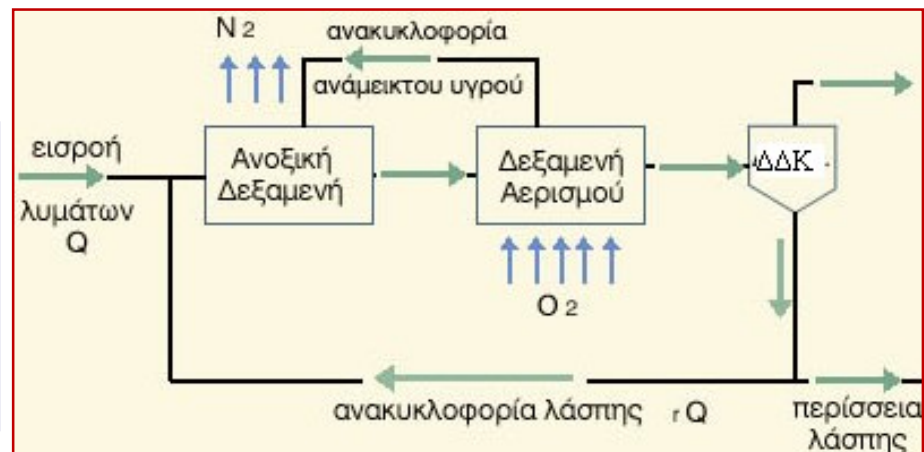
Εξάρτηση της συγκέντρωσης του αζώτου, που παραμένει σε ένα απόβλητο μετά από διεργασία προαπονιτροποίησης ως **συνολικό, αμμωνιακό** και **νιτρικό** N, από την **παροχή οξυγόνου** στη δεξαμενή αερισμού.

- ❑ Μεγάλη παροχή οξυγόνου οδηγεί σε ικανοποιητική **νιτροποίηση**
- ❑ Ωστόσο εξαιτίας της ανακυκλοφορίας του ανάμικτου υγρού, υπερβολικός αερισμός οδηγεί σε υψηλές συγκεντρώσεις DO στην ανοξική δεξαμενή και **παρεμπόδιση** της απονιτροποίησης.
- ❑ Επομένως υπάρχει μία βέλτιστη παροχή οξυγόνου.



Δύο βασικές παράμετροι καθορίζουν την επιτυχή απομάκρυνση του N στη διεργασία της προαπονιτροποίησης

- Η παροχή οξυγόνου
- Ο λόγος ανακυκλοφορίας ανάμικτου υγρού

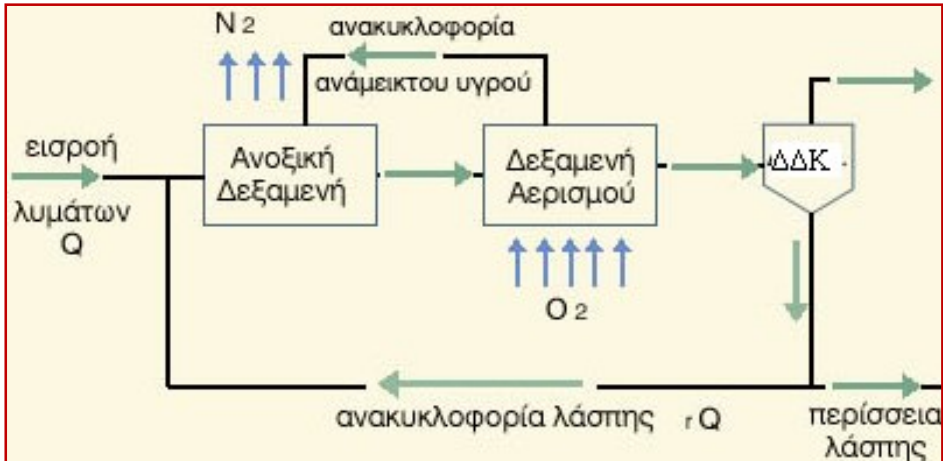
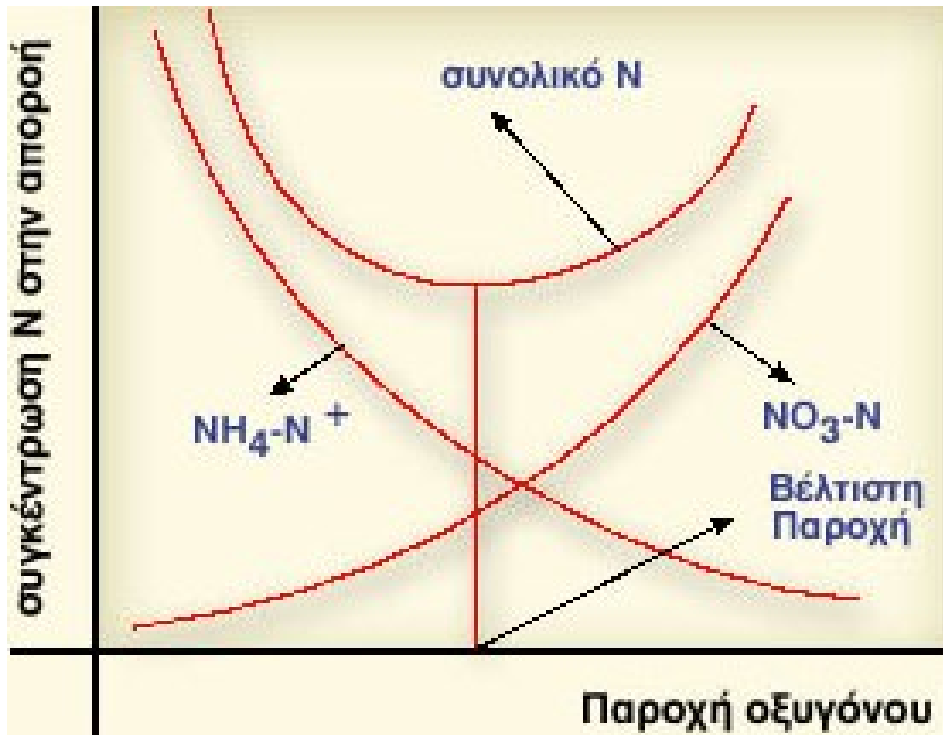


Ανακυκλοφορία (ανάμεικτου) υγρού

- Χαμηλή → περιορισμένη απονιτροποίηση
- Πολύ υψηλή → οδηγεί ουσιαστικά σε παρόμοιες συνθήκες στις δύο δεξαμενές (σαν να ήταν ένας καλώς CSTR) και επομένως μικρή απομάκρυνση αζώτου.
- Ο βέλτιστος λόγος ανακυκλοφορίας είναι περίπου $r = 4$

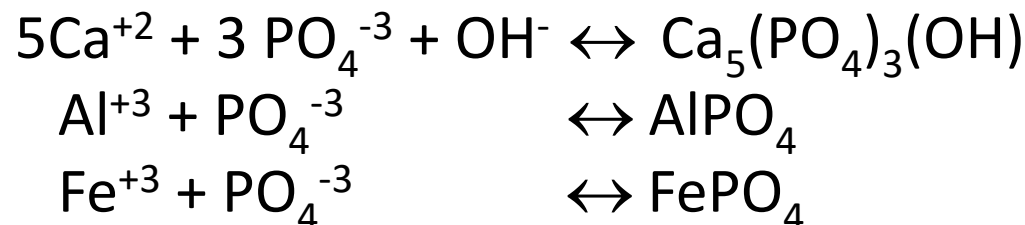
Πλεονεκτήματα διάταξης προαπονιτροποίησης

- Δεν απαιτεί εξωτερική πηγή C
- Μειώνει τον απαιτούμενο όγκο αέρα για νιτροποίηση
- Αποφεύγει την ανάγκη ενδιάμεσων δεξαμενών καθίζησης που θα απαιτούσε μία σειρά από δεξαμενές νιτροποίησης και απονιτροποίησης.



Απομάκρυνση Φωσφόρου (1)

- Φώσφορος στα λύματα
 - Συνολικά 4 – 15 mg/L
 - Ορθοφωσφορικά – πολυφωσφορικά 3 – 10, οργανικός 1 – 5 mg/L
 - Περίπου 10% απομακρύνεται στην πρωτοβάθμια καθίζηση
 - Μικρό ποσοστό δεσμεύεται στη δευτεροβάθμια επεξεργασία
 - **Το μεγαλύτερο ποσοστό είναι διαλυμένο και απαιτεί προχωρημένη επεξεργασία.**
- Μέχρι πρόσφατα ο συνηθέστερος τρόπος απομάκρυνσης φωσφόρου ήταν η **χημική κατακρήμνιση με χρήση αλάτων** του ασβεστίου, του αργιλίου (συνήθως υδροξείδια), ή του σίδηρου (συνήθως θειϊκός ή χλωριούχος):



Απομάκρυνση Φωσφόρου (2)

Τα χημικά μπορούν να προστεθούν:

(α) Πριν από την πρωτοβάθμια καθίζηση.

Πρόβλημα ότι επιδρά αρνητικά στον σχηματισμό βιοκροκίδων και μπορεί να χρειασθεί προσθήκη πολυμερών για την κροκίδωση

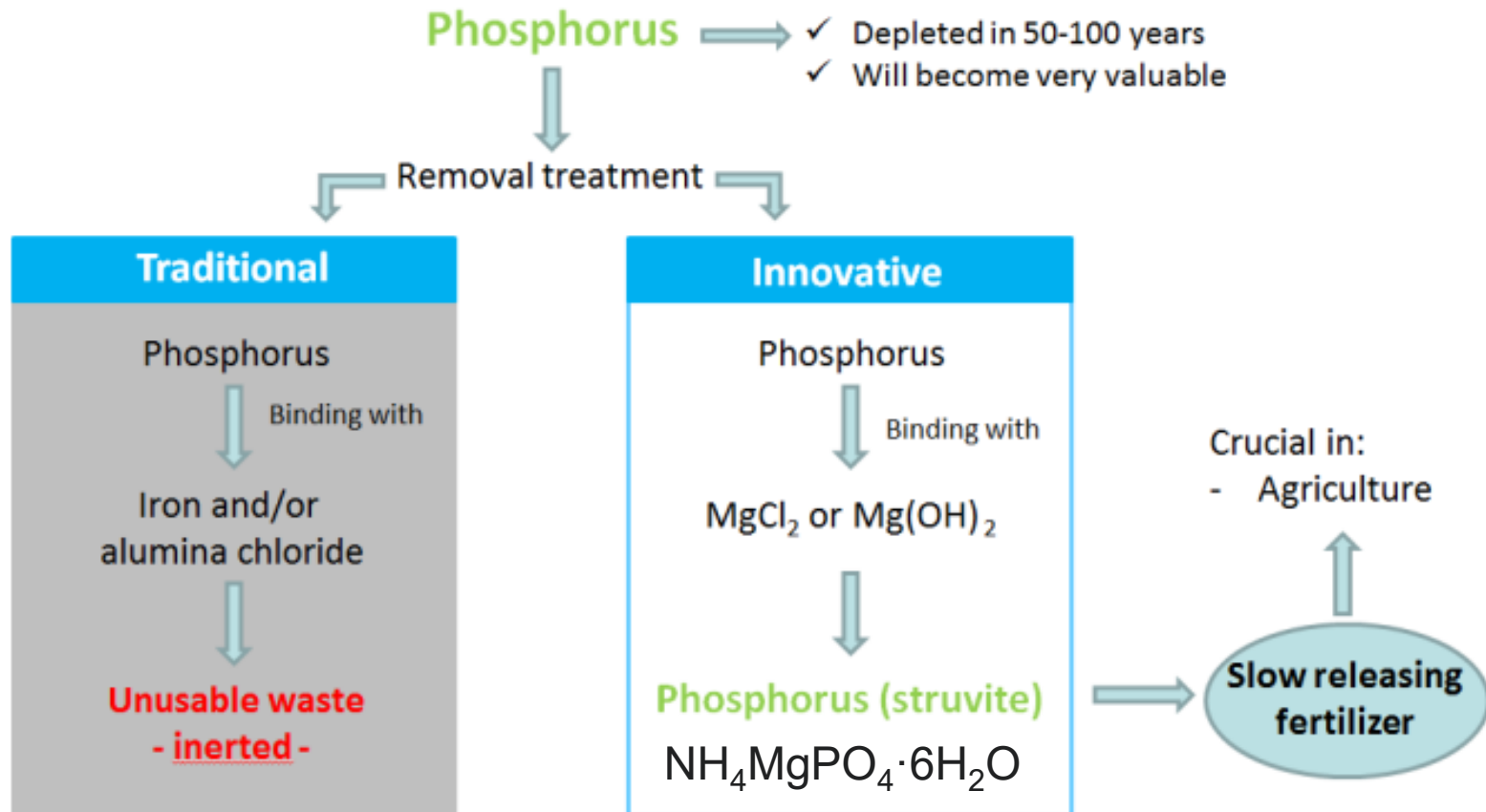
(β) Κατά τη δευτεροβάθμια βιολογική επεξεργασία

Μειονέκτημα αυτής της επιλογής είναι ότι μπορεί να χρειασθεί ρύθμιση του pH

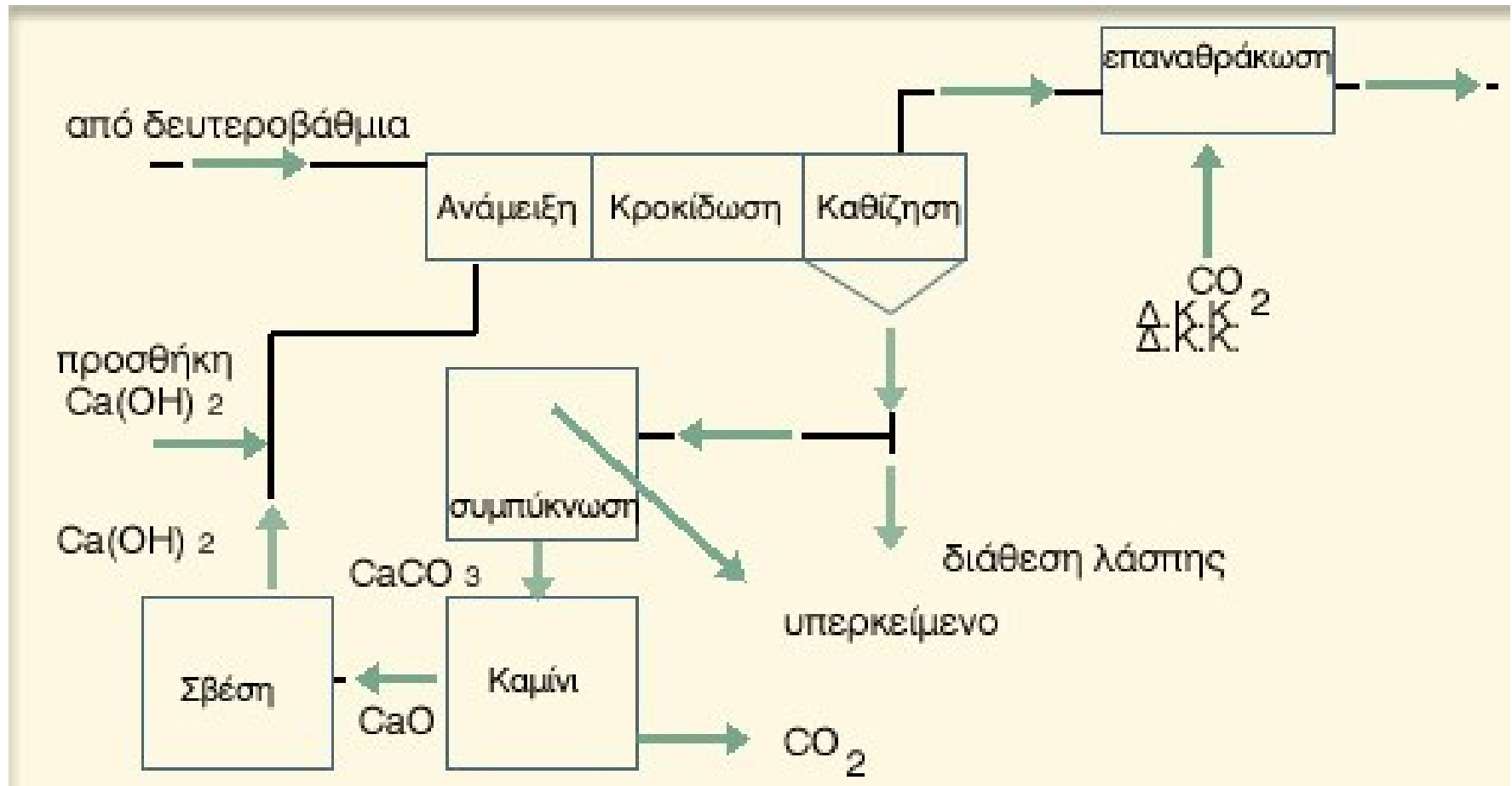
(γ) Μετά τη δευτεροβάθμια επεξεργασία (σε ειδική τριτοβάθμια επεξ.)

- Αν χρησιμοποιηθεί $\text{Ca}(\text{OH})_2$, απαιτείται γενικά προσθήκη CO_2 για μείωση του pH και της περισσειας των διαλυμένων ιόντων ασβεστίου.
- Το CaCO_3 που καθιζάνει συνήθως περνάει από φούρνο για διάσπαση.
- Έτσι, αποδίδεται CaO που μπορεί να χρησιμοποιηθεί εκ νέου ως πηγή ασβεστίου και CO_2 , που ανακυκλώνεται όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

Απομάκρυνση Φωσφόρου (3)



Φυσικοχημική Απομάκρυνση Φωσφόρου



Βιολογική απομάκρυνση φωσφόρου (1)

- Επιτυγχάνεται απομάκρυνση φωσφόρου κατά 70-90%.
- Οι βιολογικές μέθοδοι σήμερα προτιμούνται γιατί επιτυγχάνουν **υψηλό ποσοστό αφαίρεσης φωσφόρου με χαμηλό κόστος λειτουργίας**, ενώ ταυτόχρονα **αποφεύγεται η προσθήκη χημικών**.
- Η βιολογική απομάκρυνση φωσφόρου βασίζεται στην **ικανότητα ορισμένων μ/ο (φωσφοροβακτηρίων)** να προσροφούν και να συσσωρεύουν ενδοκυτταρικά περισσότερο φωσφόρο απ' όσο απαιτείται συνήθως για την κυτταρική ανάπτυξη και συντήρηση.

Βιολογική απομάκρυνση φωσφόρου (2)

- Ο εμπλουτισμός των μονάδων επεξεργασίας αποβλήτων με φωσφοροβακτήρια πραγματοποιείται με έκθεση της ενεργού ιλύος σε **εναλλασσόμενες αναερόβιες και αερόβιες συνθήκες**.
- Οι Fuhs & Chen (1975) αναγνώρισαν είδη του γένους *Acinetobacter* sp. και ειδικά το είδος *Lwoffii* ως τον μικροοργανισμό, που είναι υπεύθυνος για τη **συσσώρευση περίσσειας φωσφορικών** στα κύτταρά του όταν έχει ως **υπόστρωμα μικρής αλυσίδας λιπαρά οξέα**, όπως είναι το **οξικό οξύ**.
- Η αποθήκευση φωσφορικών και άνθρακα από τα φωσφοροβακτήρια κατά την **περιοδική έκθεσή τους σε αναερόβιες και αερόβιες συνθήκες**, **δεν είναι τυχαίο γεγονός** αλλά αποτελεί **μηχανισμό επιβίωσης** για τα βακτήρια αυτά, έναντι των υπολοίπων ετερότροφων, που δεν έχουν την ικανότητα της αποθήκευσης.

Βιολογική απομάκρυνση φωσφόρου (3)

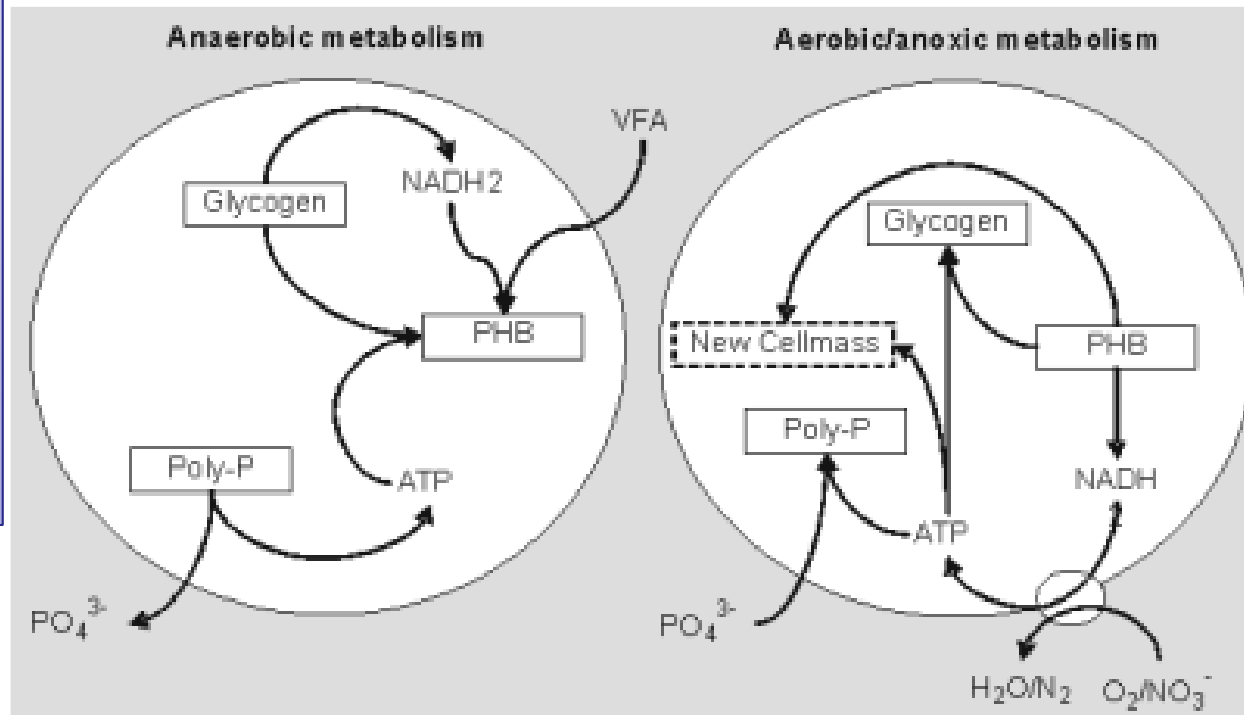
Αναερόβιο στάδιο

Σε αναερόβιες συνθήκες η υδρόλυση των αποθηκευμένων (αερόβια) **πολυφωσφορικών**, παρέχει την απαιτούμενη ενέργεια για ενδοκυτταρική συσσώρευση και αποθήκευση άνθρακα υπό την μορφή **PHB**.
– Λιπαρά οξέα από το υγρό μέσο + πολυφωσφορικά κυττάρου (PP) → ενέργεια + PHB + φωσφορικά στο υγρό (PO_4^{3-})

Αερόβιο στάδιο

Τα αποθέματα αυτά του άνθρακα μπορούν να χρησιμοποιηθούν αερόβια, σε συνθήκες περιορισμού ή έλλειψης διαλυτού οργανικού άνθρακα, ως πηγή άνθρακα και ενέργειας.

– PHB → ενέργεια για την πρόσληψη φωσφορικών και σχηματισμό πολυφωσφορικών – για τα νέα κύτταρα

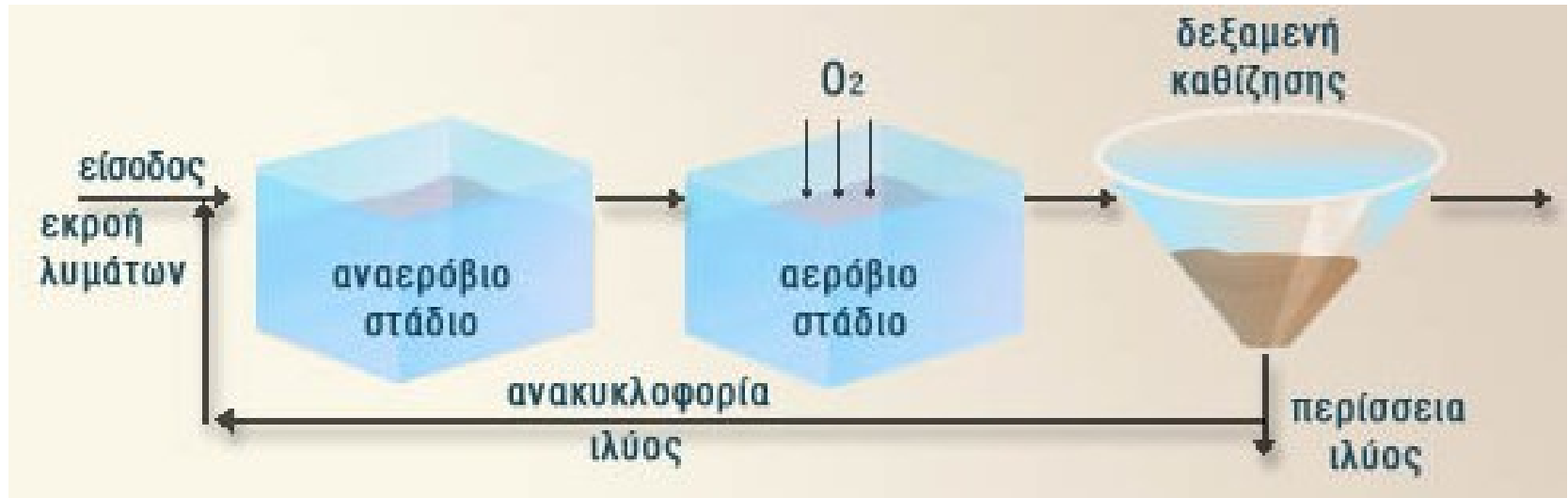


Βιολογική απομάκρυνση φωσφόρου (4)

- Τα φωσφορικά αποθηκεύονται στη μορφή πολυφωσφορικών αλυσίδων τόσο μικρού μοριακού βάρους (μήκος αλυσίδας μέχρι 20 μονομερή), όσο και μεγάλου μοριακού βάρους.
- Τα πολυφωσφορικά και τα PHB σχηματίζονται στο εσωτερικό των κυττάρων υπό τη μορφή κοκκοειδών συσσωματωμάτων
- Η παρουσία πολυφωσφορικών μπορεί να ανιχνευτεί σε μικροσκόπιο μετά από βαφή με **methylene blue** ενώ του PHB με **Sudan black B**

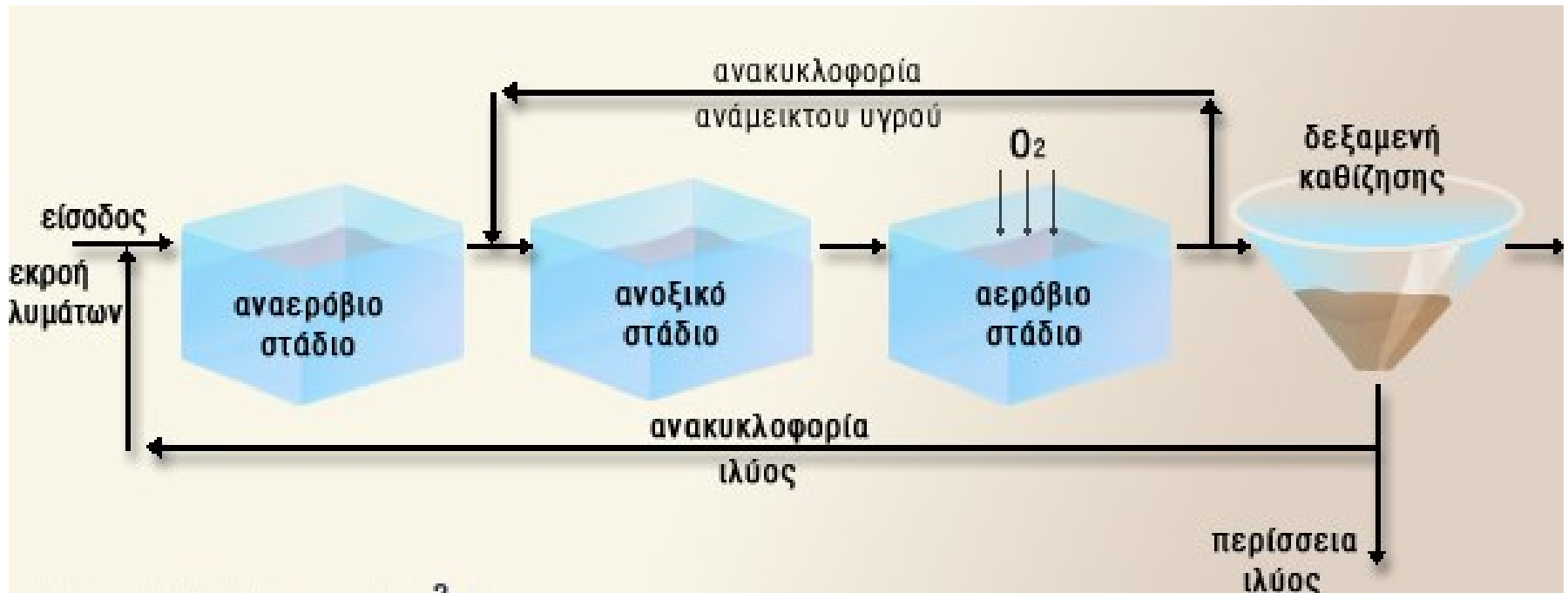
Διατάξεις βιολογικής απομάκρυνσης φωσφόρου (A/O)

- Συνδυασμένη οξείδωση **C** και απομάκρυνση **P** από τα απόβλητα
- Αναερόβιο / αερόβιο στάδιο σε σειρά.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για **νιτροποίηση** παρέχοντας τον απαραίτητο χρόνο παραμονής στην ΔΑ.
- Η ανακυκλοφορία εξασφαλίζει ικανοποιητικό **χρόνο παραμονής των φωσφοροβακτηρίων**
- **Αναερόβιο στάδιο:** απελευθέρωση του ενδοκυτταρικού P με ταυτόχρονη μερική μείωση του BOD
- **Αερόβιο στάδιο:** ο P προσλαμβάνεται από τα φωσφοροβακτήρια και απομακρύνεται με την απομάκρυνση της λάσπης.

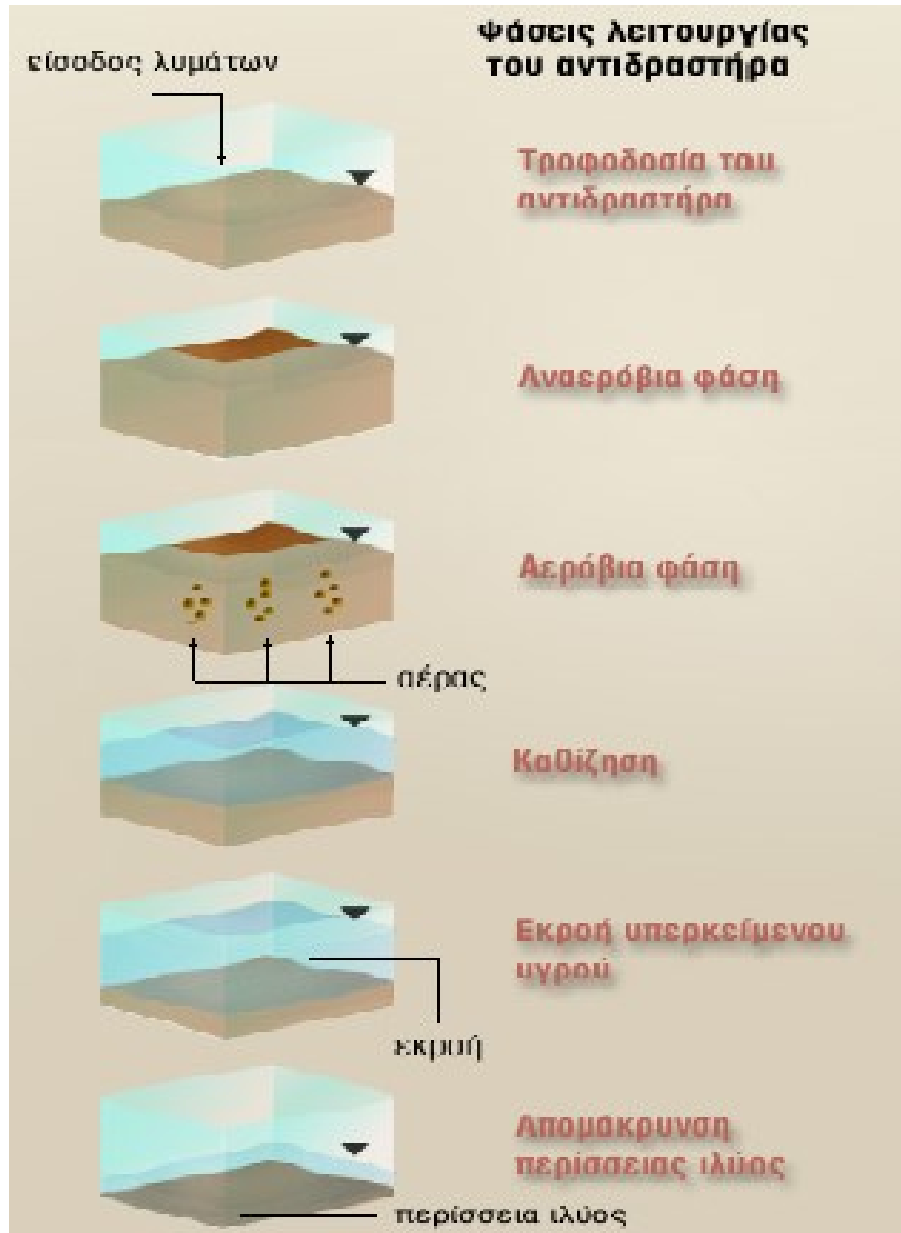


Βιολογικές Διεργασίες για την Ταυτόχρονη Απομάκρυνση Οργανικών, Αζώτου και Φωσφόρου: **διεργασία A²/O**

- Με κατάλληλο συνδυασμό Αερόβιων , Ανοξικών και Αναερόβιων συνθηκών
- Τροποποίηση της A/O με προσθήκη ενός ανοξικού σταδίου για **απονιτροποίηση**
- HRT in anoxic stage ~ 1 hour
- Ανοξική δεξαμενή: Δεν υπάρχει DO αλλά μόνο NO_3^- και NO_2^- τα οποία εισέρχονται με την **ανακυκλοφορία του ανάμεικτου υγρού** από την αερόβια στην ανοξική.



Αντιδραστήρας διαλείποντος έργου περιοδικής λειτουργίας (SBR)



Μπορεί να λειτουργήσει με τέτοιο τρόπο, ώστε να επιτύχει κάθε επιθυμητό συνδυασμό οξείδωσης C, μείωσης N και απομάκρυνσης P. (με ή χωρίς προσθήκη χημικών)

Μοντέλα Ενεργού Ιλύος (1)

- ❑ Τα μαθηματικά μοντέλα αποτελούν το **βασικό εργαλείο** του μηχανικού για τον **Σχεδιασμό** και την **Πρόβλεψη** της λειτουργίας μιας Μονάδας Επεξεργασίας λυμάτων.
- ❑ Μέσω της προσομοίωσης μπορούν να ελεγχθούν **εναλλακτικές διατάξεις, βέλτιστες στρατηγικές λειτουργίας** και η **συμπεριφορά της μονάδας σε ακραίες καταστάσεις**.
- ❑ Πολλαπλά φαινόμενα – αντιδράσεις και άρα παράμετροι
 - ❑ Οξείδωση οργανικών
 - ❑ Νιτροποίηση – Απονιτροποίηση
 - ❑ Βιολογική απομάκρυνση φωσφόρου
 - ❑ Ανάπτυξη και αποσύνθεση κυτταρικής βιομάζας
- ❑ Για αξιόπιστα και ρεαλιστικά αποτελέσματα οι αντιδράσεις πρέπει να είναι **αντιπροσωπευτικές** των πιο **βασικών διεργασιών** που συμβαίνουν στο εσωτερικό του συστήματος.

Μοντέλα Ενεργού Ιλύος (2)

- ✓ International **A**ssociation **W**ater **P**ollution **R**esearch **C**ontrol
- ✓ ASM1 (1987)
 - ✓ 13 βασικές μεταβλητές και 8 βιοχημικές διεργασίες
 - ✓ Σύνθεση και αποσύνθεση ετερότροφων μ/ο
 - ✓ Σύνθεση και αποσύνθεση αυτότροφων μ/ο
 - ✓ Υδρόλυση οργανικού άνθρακα και αζώτου
- ✓ ASM2 (1995, 1999)
 - ✓ Προσθήκη για φωσφορικά ιόντα
 - ✓ Πρόβλεψη για λιπαρά φωσφορικού οξέος και πολυφωσφορικά
 - ✓ Ταυτόχρονη αφομοίωση αζώτου και φωσφόρου
 - ✓ Καταβύθιση φωσφορικών – προσθήκη επίδρασης αλκαλικότητας
- ✓ ASM3 (2000)
 - ✓ Εκτεταμένο μοντέλου ASM1
 - ✓ Αναγνωρίζει ότι το κύτταρο των ετερότροφων βακτηρίων έχει εσωτερική δομή το οποίο δεσμεύει και αποθηκεύει οργανικό υλικό στο εσωτερικό του κυττάρου.

Το Μοντέλο IAWPRC

