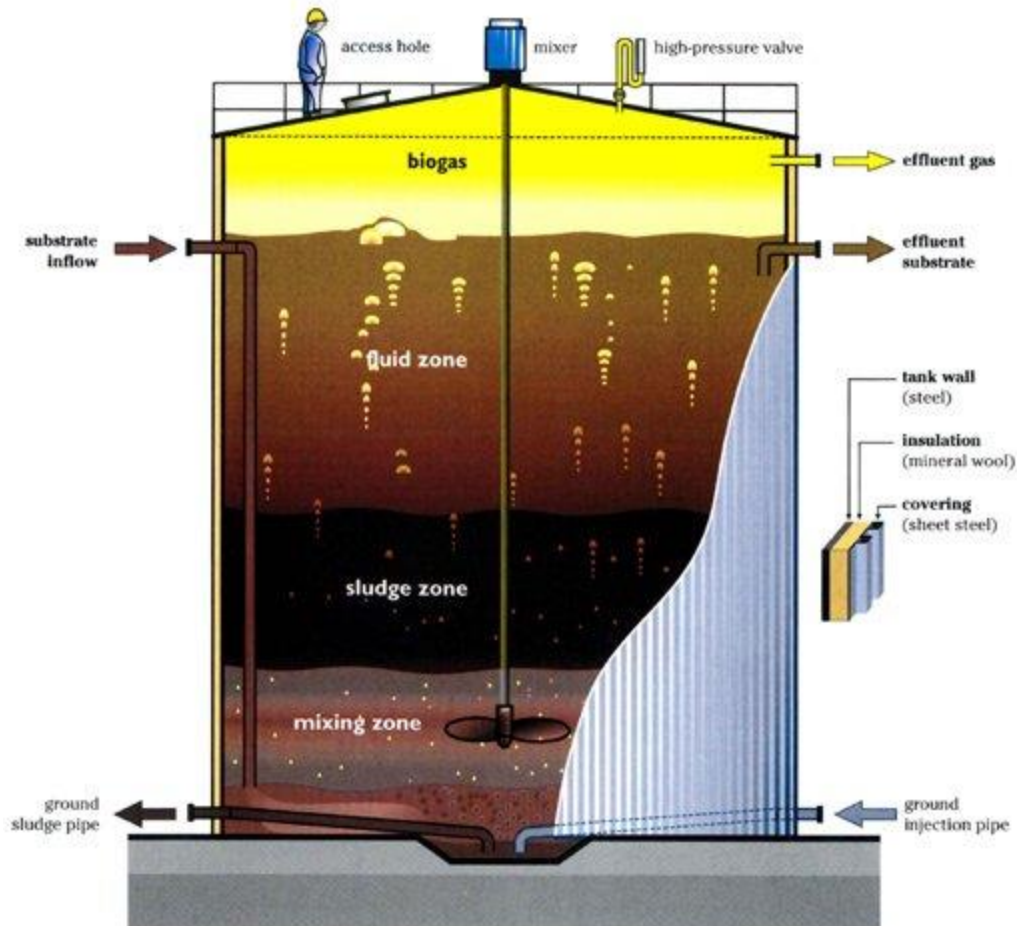


# Αναερόβια χώνευση



# Εισαγωγή

Η αναερόβια χώνευση συμπεριλαμβάνεται μεταξύ των παλαιότερων διεργασιών που χρησιμοποιούνται για τη σταθεροποίηση των στερεών και βιοστερεών.

Περιλαμβάνει την αποσύνθεση της οργανικής και ανόργανης ύλης (κυρίως των θεικών) απουσία μοριακού οξυγόνου.

Κύριες εφαρμογές είναι η σταθεροποίηση των συμπυκνωμένων ιλύων που παράγονται από την επεξεργασία των αστικών και βιομηχανικών υγρών αποβλήτων.

# Εισαγωγή

Έχει γίνει μεγάλη πρόοδος στην ουσιαστική **κατανόηση και τον έλεγχο της διεργασίας**, **το μέγεθος των δεξαμενών** και **στο σχεδιασμό και την εφαρμογή** του εξοπλισμού.

Λόγω της έμφασης στη **διατήρηση της ενέργειας** και την **ανάκτηση** της καθώς και της επιθυμίας να υπάρξει επικερδής χρήση των βιοστερεών των υγρών αποβλήτων, η αναερόβια χώνευση συνεχίζει να είναι η κυρίαρχη διεργασία για τη σταθεροποίηση της ιλύος.

# Εισαγωγή

Επιπλέον, η αναερόβια χώνευση των αστικών υγρών αποβλήτων, σε πολλές περιπτώσεις, μπορεί να παράγει **επαρκές αέριο** που θα καλύψει τις περισσότερες ενεργειακές ανάγκες της λειτουργίας της εγκατάστασης.

# Βασικά στοιχεία της διεργασίας

οι τρεις τύποι των **χημικών** και **βιοχημικών** αντιδράσεων που συμβαίνουν στην αναερόβια χώνευση είναι

- η υδρόλυση,
- η ζύμωση, (ο σχηματισμός διαλυτών οργανικών ενώσεων και οργανικών οξέων με μικρές αλυσίδες)
- η μεθανογένεση (η βακτηριακή μετατροπή των οργανικών οξέων σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα)

## Βασικά στοιχεία της διεργασίας

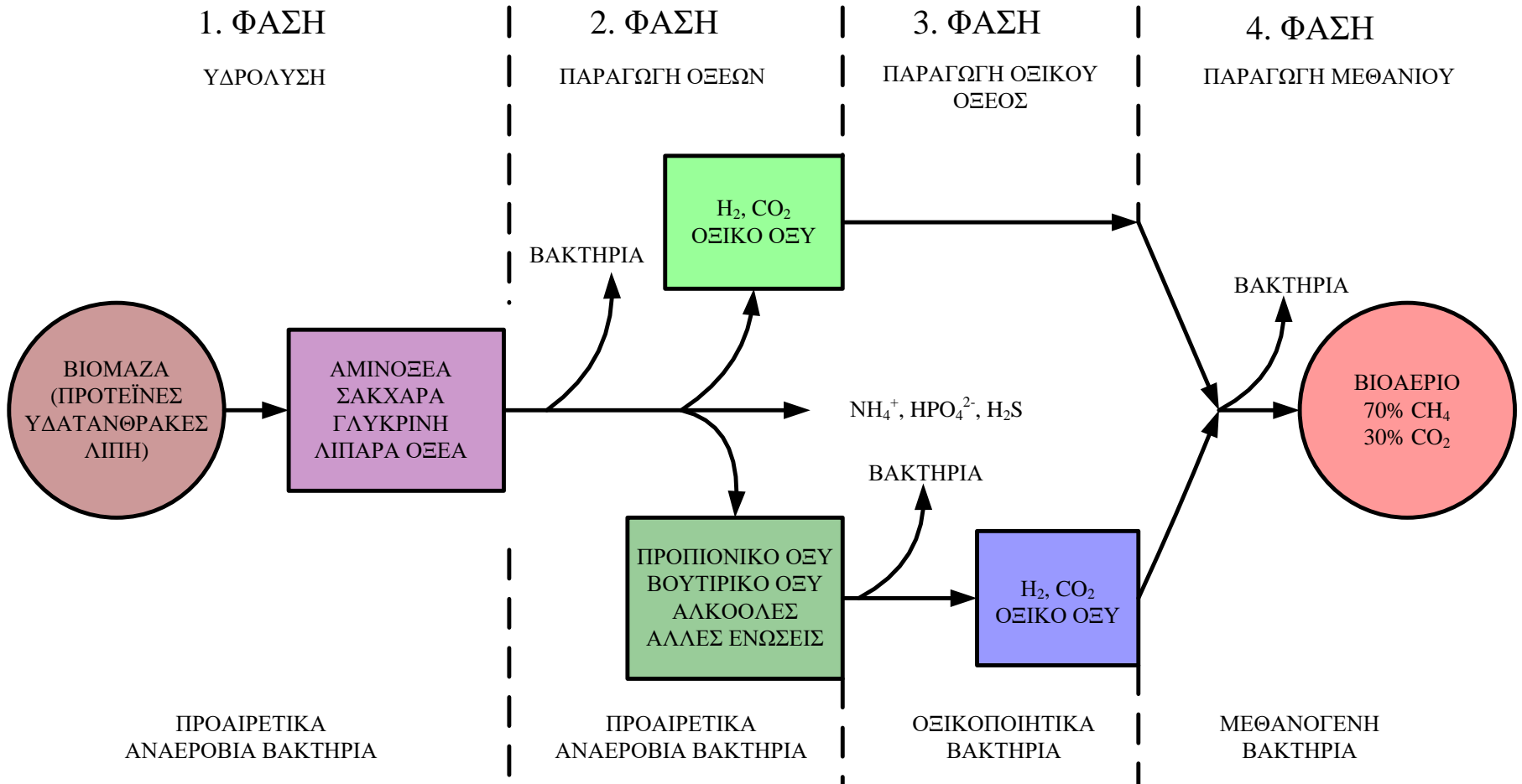
Το τρίτο στάδιο, η μεθανογένεση, πραγματοποιείται από μια ομάδα οργανισμών που είναι γνωστοί ως μεθανογενετικοί.

Δύο ομάδες μεθανογενετικών οργανισμών εμπλέκονται στην παραγωγή μεθανίου.

Η μια ομάδα, που καλούνται μεθανογενετικοί οξυκλάστες, διασπών το οξικό οξύ σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα.

Η δεύτερη ομάδα οργανισμών, που καλούνται μεθανογενετικοί υδρογονοχρήστες, χρησιμοποιούν το υδρογόνο ως δότη ηλεκτρονίων και το CO<sub>2</sub> ως δέκτη ηλεκτρονίων για την παραγωγή μεθανίου.

# Βασικά στοιχεία της διεργασίας



# Βασικά στοιχεία της διεργασίας

Θέλοντας να αυξήσουμε την απόδοση ως προς τον χώρο και τον χρόνο θα πρέπει να απεξαρτήσουμε την **καταλυτική βιομάζα** από τον **χρόνο παραμονής** του υποστρώματος  
(διότι ο χρόνος αναπαραγωγής των μικροοργανισμών είναι συγκριτικά μεγάλος)

**Σημαντικό:** απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών από το ρεύμα εισόδου



# Βασικά στοιχεία της διεργασίας

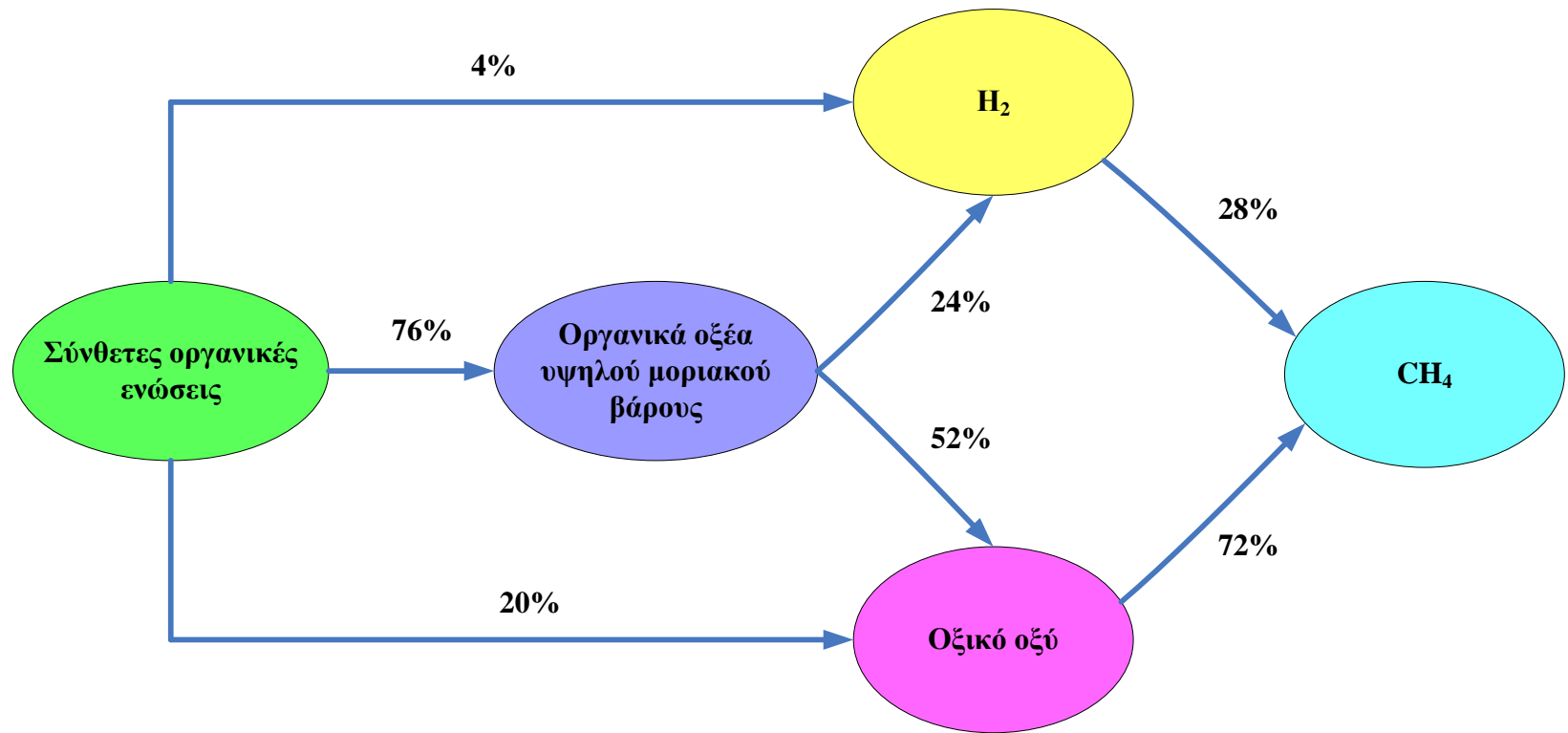
Τα βακτήρια στις αναερόβιες διεργασίες είναι **οξυγενετικά**. Είναι ικανά να χρησιμοποιήσουν το  $\text{CO}_2$  για την οξείδωση του υδρογόνου προς το σχηματισμό οξικού οξέος.

Το οξικό οξύ θα μετατραπεί σε μεθάνιο και έτσι η επίδραση από αυτή την αντίδραση είναι αμελητέα.

Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα περίπου 72% του μεθανίου που παράγεται στην ανάεροβια χώνευση είναι προϊόν μετασχηματισμού του οξικού οξέος.

# Βασικά στοιχεία της διεργασίας

Διάγραμμα ροής άνθρακα και υδρογόνου κατά την αναερόβια χώνευση



# Βασικά στοιχεία της διεργασίας Μικροβιολογία

Η ομάδα των μη μεθανογενών βακτηρίων που είναι υπεύθυνα για την υδρόλυση και την χώνευση αποτελείται από προαιρετικά και υποχρεωτικά αναερόβια βακτήρια.

Οι μικροοργανισμοί που απομονώθηκαν από ιλύ αναερόβιου χωνευτήρα περιλαμβάνουν το

*Peptococcus anaerobus*, *Bifidobacterium spp.*, *Desulfovibrio spp.*,  
*Corrynebacterium spp.*, *Lactobacillus*, *Actinomyces*,  
*Staphylococcus* και *Escherichia coli*.

# Βασικά στοιχεία της διεργασίας Μικροβιολογία

Οι μικροοργανισμοί που είναι υπεύθυνοι για την παραγωγή μεθανίου ταξινομούνται ως *archaea* και είναι αυστηρώς υποχρεωτικά αναερόβια. Συναντώνται επίσης και στα στομάχια των μηρυκαστικών ζώων και στις ιλύς από λίμνες και ποτάμια.

Οι βασικές ομάδες που ανιχνεύθηκαν σε μεσόφιλες συνθήκες είναι τα ραβδοειδή *Methanobacterium*, και *Methanobacillus*, και τα σφαιροειδή *Methanococcus*, *Methanothrix*, και *Methanosarcina*

# Βασικά στοιχεία της διεργασίας Μικροβιολογία

Τα *Methanosarcina* και *Methanotherix* (επίσης ονομαζόμενα και *Methanosaeta*) είναι οι μοναδικοί οργανισμοί που είναι ικανοί να χρησιμοποιήσουν το οξικό οξύ για την παραγωγή μεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα.

Οι άλλοι οργανισμοί οξειδώνουν το υδρογόνο μαζί με διοξείδιο του άνθρακα ως δέκτη των ηλεκτρονίων για την παραγωγή μεθανίου.

Τα βακτήρια που διασπών το οξικό οξύ απομονώθηκαν επίσης και σε θερμοφίλους χωνευτές

# Βασικά στοιχεία της διεργασίας Μικροβιολογία

Μερικά είδη του *Methanosarcina* παρμποδίζονται πάνω από τους 65 °C, ενώ άλλα όχι, αλλά δεν ανιχνεύθηκε καμία παρεμπόδιση του *Methanotherix*.

Για βακτηρία που καταναλώνουν το υδρογόνο σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 60 °C, το *Methanobacterium* ανιχνεύθηκε σε μεγάλες ποσότητες.

# Βασικά στοιχεία της διεργασίας

Η ανάπτυξη των αναερόβιων μ/ο είναι μια συνάρτηση διαφόρων συντελεστών όπως:

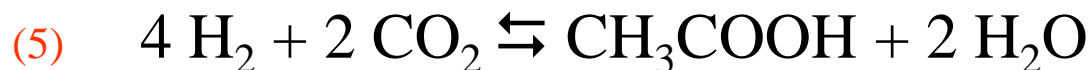
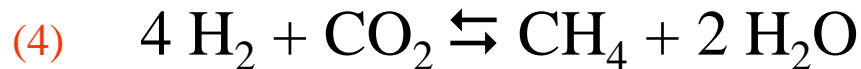
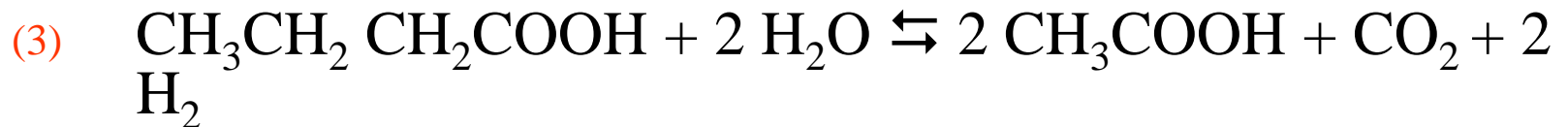
- HRT
- T
- ORP
- pH και
- είδος των οργανικών συστατικών

Θερμοδυναμική: H<sub>2</sub> σημαντικό ενδιάμεσο προϊόν

Μη ουσιαστική κατανάλωση του H<sub>2</sub> → διαταραχή της ισορροπίας

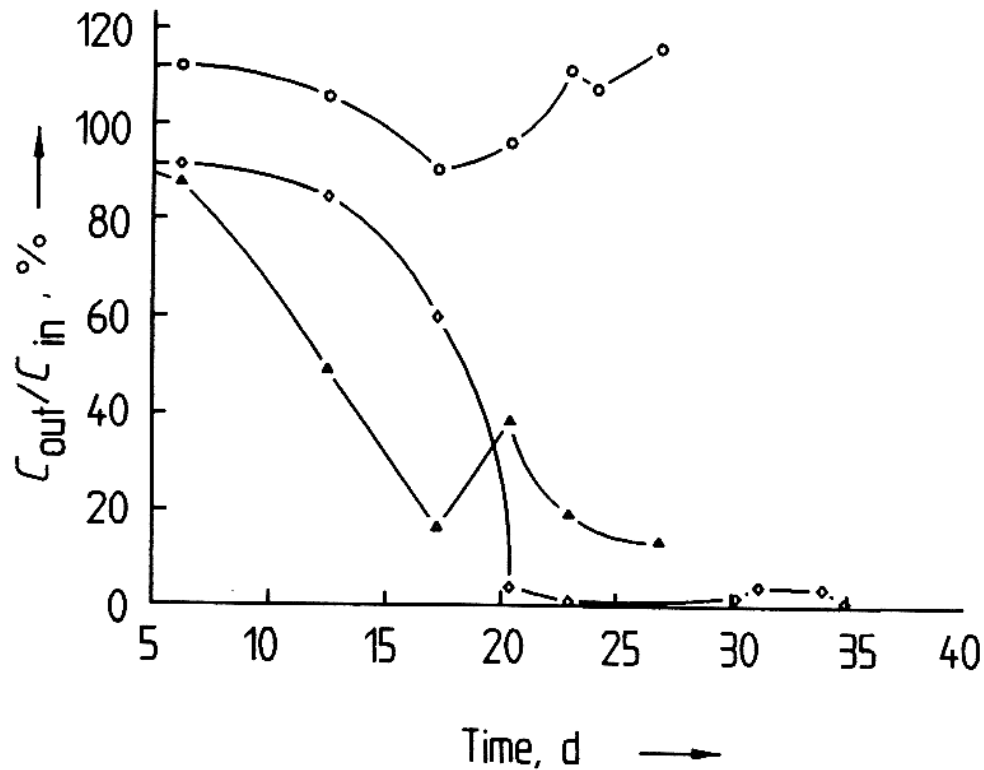
# Βασικά στοιχεία της διεργασίας

Το φαινόμενο αυτό γίνεται εμφανές από τις εξισώσεις που περιλαμβάνουν τα προϊόντα της οξικογένεσης (οξικό οξύ, προπιονικό οξύ, και βουτυρικό οξύ) και το υδρογόνο που παράγεται από αυτά:





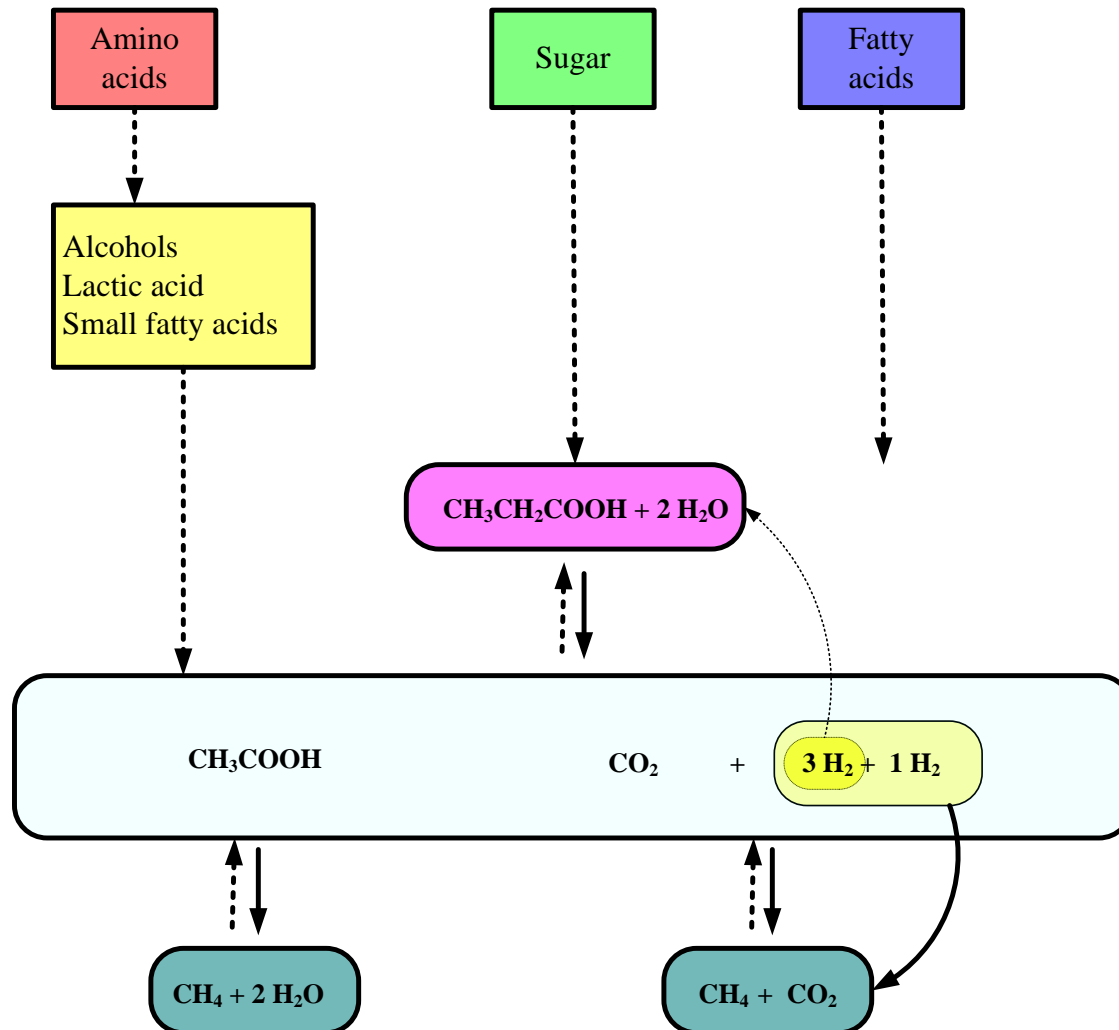
# Βασικά στοιχεία της διεργασίας



**Figure 2.69.** Relative distribution of lower fatty acids after startup of an anaerobic fermenter (based on [2.111])  
triangles = acetic acid; circles = propionic acid; diamonds = butyric acid

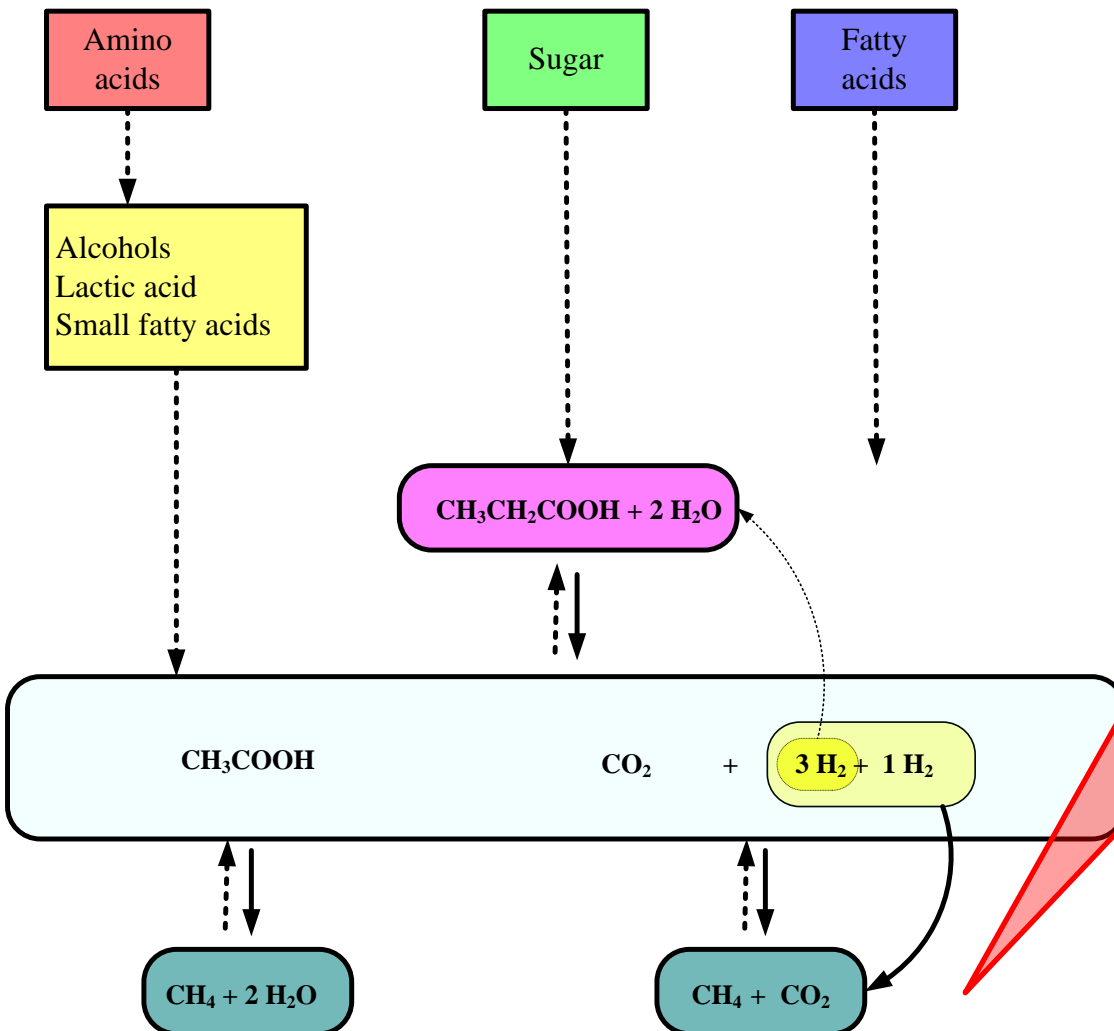
# Σχηματισμός μεθανίου από το οξικό οξύ και ο συνδυασμός του υδρογόνου με το διοξείδιο του άνθρακα

(επίδραση του υδρογόνου στην διάσπαση του προπιονικού οξέος)



# Σχηματισμός μεθανίου από το οξικό οξύ και ο συνδυασμός του υδρογόνου με το διοξείδιο του άνθρακα

## Μεθανογενετικά/οξυγενετικά - Συντροφικές σχέσεις στη ζύμωση



Τα μεθανογενετικά μετατρέπουν τα τελικά προϊόντα της ζύμωσης όπως το υδρογόνο, το μυρμηκικό οξύ και το οξικό οξύ σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα.  
→ Διατήρηση εξαιρετικά χαμηλής μερικής πίεσης  $\text{H}_2$



Η ισορροπία των αντιδράσεων ζύμωσης μετατοπίζεται προς το σχηματισμό περισσότερων οξειδωμένων τελικών προϊόντων (π.χ. μυρμηκικό και οξικό οξύ).

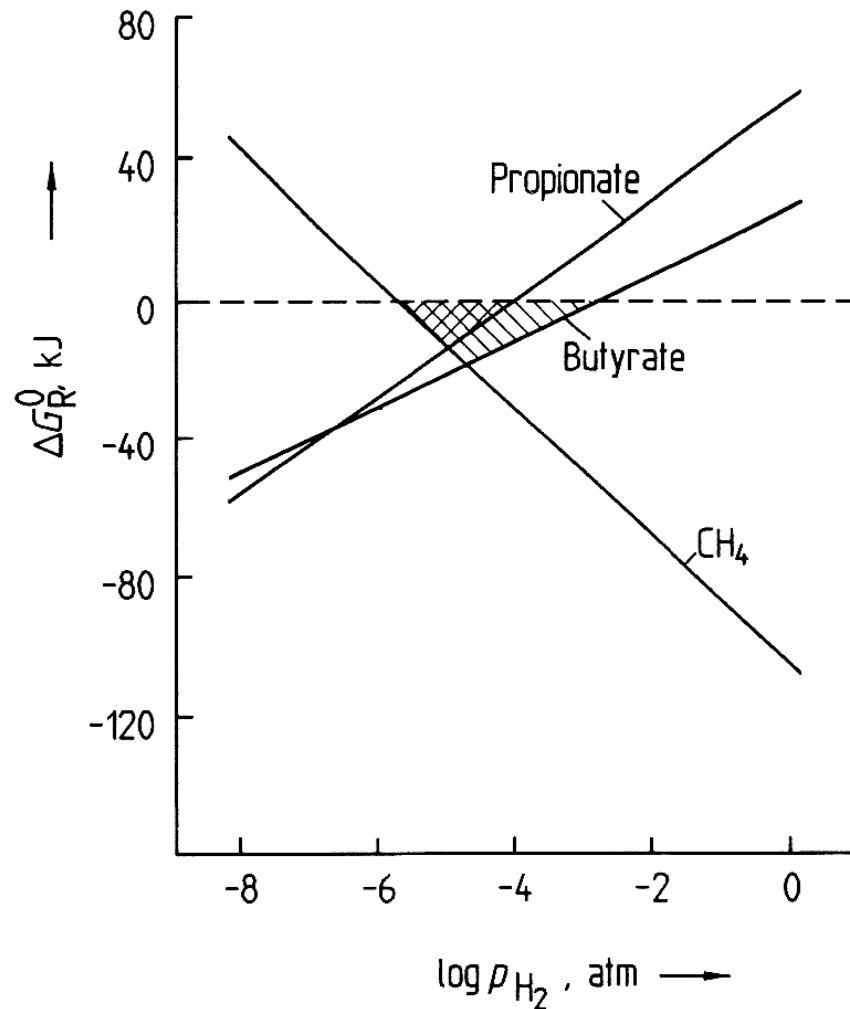
# Συντροφικές σχέσεις στη ζύμωση

Η κατανάλωση του υδρογόνου καλείται μεταφορά υδρογόνου μέσω των ειδών

Στην πραγματικότητα, οι μεθανογενετικοί οργανισμοί δρουν ως μια δεξαμενή υδρογόνου, που επιτρέπει να προχωρήσουν οι αντιδράσεις ζύμωσης.

- διαταραχές στη διεργασία
- αργή κατανάλωση  $H_2$
- επιβράδυνση της ζύμωσης του  $CH_3CH_2COOH$  &  $CH_3(CH_2)_2COOH$
- συσσώρευση των VFA
- μείωση του pH

# Θερμοδυναμικό παράθυρο αντιδράσεις είναι ικανές να προχωρήσουν ταυτόχρονα



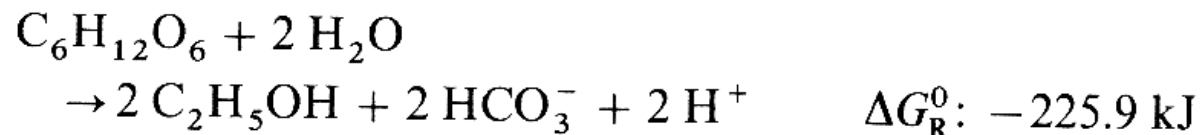
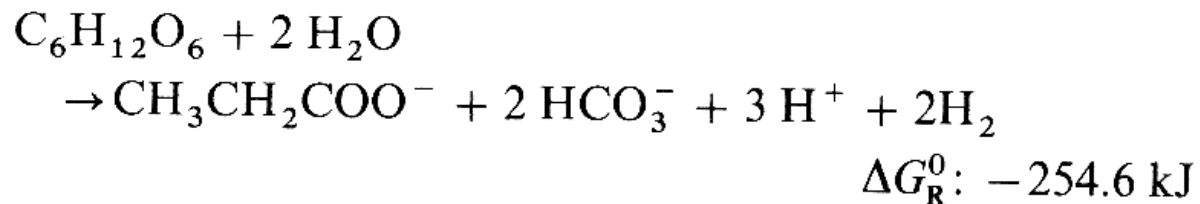
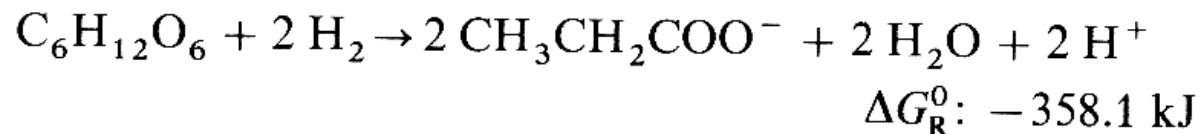
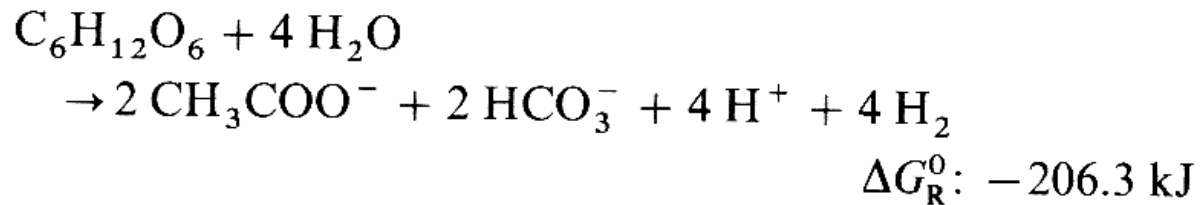
Η διάσπαση του  $CH_3COOH$  είναι ανεξάρτητη από τη  $pH_2$

Η διάσπαση του  $CH_3CH_2COOH$  &  $CH_3(CH_2)_2COOH$  θα περιορισθεί από μία υψηλή  $pH_2$

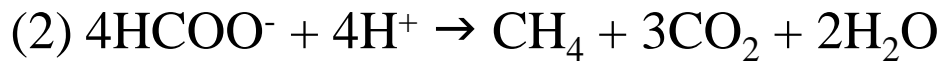
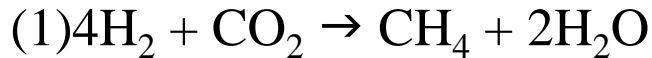
Την ίδια στιγμή μια επαρκής ποσότητα  $H_2$  είναι αναγκαία για τον σχηματισμό του  $CH_4$  από  $H_2/CO_2$   
(είτε απ' ευθείας είτε μέσω του οξικού οξέος)

**Figure 2.68.** “Thermodynamic window” for simultaneous methane formation from propionic acid, butyric acid, and  $H_2/CO_2$  as a function of hydrogen partial pressure ( $T = 25^\circ C$ ,  $pH = 7.0$ )

Οι αντιδράσεις μας εξηγούν τον λόγο για τον οποίο η ζύμωση υδρογονανθράκων, υπό την παρουσία υδρογόνου, οδηγείται κυρίως στην παραγωγή προπιονικού οξέος (μεγαλύτερη απελευθέρωση ενέργειας,  $-\Delta G_R^0$ : -358 kJ/mole



# Στοιχειομετρία της αναερόβιας χώνευσης και οξείδωσης



Οι μεθανογενετικοί οργανισμοί χρησιμοποιούν έναν περιορισμένο αριθμό υποστρωμάτων

Οι αντιδράσεις ( $\text{CO}_2$  και μεθυλομάδας) περιλαμβάνουν την οξείδωση

- του υδρογόνου,
- του μυρμηκικού οξέος,
- του μονοξειδίου του άνθρακα,
- της μεθανόλης,
- της μεθυλαμίνης και
- του οξικού οξέος

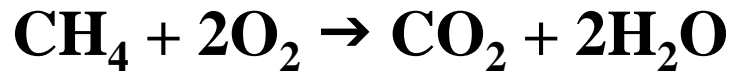
# Στοιχειομετρία της αναερόβιας χώνευσης και οξείδωσης

- Στην αντίδραση για τα οξυκλαστικά μεθανογενετικά όπως δίνεται στην εξίσωση (6), το οξικό οξύ διασπάται για να σχηματισθεί μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα.
- Για τον υπολογισμό των μεταβολών στο COD κατά τη διάρκεια της ζύμωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα ισοζύγιο για το COD
- Η απώλεια του COD στον αναερόβιο αντιδραστήρα, αντί του οξυγόνου που είναι υπεύθυνο για την μεταβολή του COD, υπολογίζεται από την παραγωγή μεθανίου.



# Στοιχειομετρία της αναερόβιας χώνευσης και οξείδωσης

- Στοιχειομετρικά μπορεί να προσδιοριστεί το ισοδύναμο του μεθανίου σε COD.
- Το COD του μεθανίου είναι το ποσό του οξυγόνου που απαιτείται για να οξειδωθεί το μεθάνιο σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό.



# Στοιχειομετρία της αναερόβιας χώνευσης και οξείδωσης

Από τα παραπάνω, το COD ανά γραμμομόριο (mole) του μεθανίου είναι  $2(32) \text{ g O}_2/\text{mole CH}_4 = 64 \text{ g O}_2/\text{mole CH}_4$

Ο όγκος του μεθανίου ανά γραμμομόριο σε πρότυπες συνθήκες ( $0^\circ \text{ C}$  και  $1 \text{ atm}$ ) είναι  $22,4 \text{ L}$ ,

έτσι το ισοδύναμο  $\text{CH}_4$  του COD που μετατρέπεται υπό αναερόβιες συνθήκες είναι  $22,4/64 = 0,35 \text{ L CH}_4/\text{g COD}$

Παράδειγμα παραγωγής μεθανίου

# Κινητική της Ανάπτυξης

Στις αναερόβιες διεργασίες είναι σημαντικοί δύο περιοριστικοί παράγοντες του ρυθμού:

- (1) ο ρυθμός της υδρολυτικής μετατροπής και
- (2) ο ρυθμός κατανάλωσης του διαλυτού υποστρώματος για τη ζύμωση και τη μεθανογένεση.

## Κινητική της Ανάπτυξης

- Η υδρόλυση των κολλοειδών και στερεών σωματιδίων
- δεν επηρεάζει τη λειτουργία και τη σταθερότητα της διεργασίας
  - Επηρεάζει όμως τη συνολική ποσότητα των στερεών που μετατρέπονται.

Στην επεξεργασία ιλύος από αστικά λύματα απαιτείται  $HRT > 30$  d για τη πλήρη μετατροπή των στερεών.

## Κινητική της Ανάπτυξης

Η κινητική της κατανάλωσης διαλυτού υποστρώματος έχει μεγάλη σημασία για την ανάπτυξη μιας σταθερής αναερόβιας διεργασίας.

Επειδή η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας στις αναερόβιες αντιδράσεις είναι σχετικά χαμηλή, οι συντελεστές ανάπτυξης είναι αρκετά χαμηλότεροι από τις αντίστοιχες τιμές των συντελεστών στις αερόβιες διεργασίες.

## Κινητική της Ανάπτυξης

Τυπικές τιμές για συντελεστές ανάπτυξης και ενδογενούς αποσύνθεσης για την ζύμωση και για αναερόβιες αντιδράσεις μεθανογένεσης είναι  $Y = 0.1$  και  $0.04$  gVSS/g COD και  $k_d = 0.04$  και  $0.02$  g VSS/g VSS.d αντίστοιχα.

## Κινητική της Ανάπτυξης

Η διεργασία είναι πιο σταθερή όταν οι συγκεντρώσεις των **πτητικών λιπαρών οξέων** πλησιάζουν σε ένα ελάχιστο επίπεδο, το οποίο μπορεί να ληφθεί ως ένδειξη ότι υπάρχει ένας **ικανοποιητικός μεθανογενετικός πληθυσμός** και είναι διαθέσιμος αρκετός χρόνος για την **ελαχιστοποίηση των συγκεντρώσεων του υδρογόνου και των VFA.**

# Κινητική της Ανάπτυξης

Το **περιοριστικό** στάδιο είναι η **μετατροπή των VFA** από τους μεθανογενετικούς οργανισμούς και όχι η **ζύμωση του διαλυτού** υποστρώματος από τα βακτήρια ζύμωσης.

Έτσι, η κινητική της ανάπτυξης των μεθανογενετικών οργανισμών παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον στο σχεδιασμό της αναερόβιας διεργασίας.

Οι **κατάλληλοι SRT** των συστημάτων επιλέγονται σύμφωνα με την **κινητική** και τους **στόχους** της επεξεργασίας.



## Κινητική της Ανάπτυξης

Στους 20, 25 και 35 °C, η έκπλυση ή η τιμή των  $SRT_{min}$  για τη μεθανογένεση είναι 7.8, 5.9 και 3.2 d, αντίστοιχα.

Συνεπώς, λαμβάνοντας ένα **συντελεστή ασφαλείας 5**, οι σχεδιαστικές τιμές SRT θα πρέπει να είναι περίπου 40, 30 και 15 ημέρες αντίστοιχα, για μια διεργασία αιωρούμενης βιομάζας.

Σε πιο σταθερές διεργασίες έχουν χρησιμοποιηθεί συντελεστές ασφαλείας μεγαλύτεροι από 5.

# Περιβαλλοντικοί Παράγοντες

- Οι αναερόβιες διεργασίες είναι ευαίσθητες στο pH και σε ανασταλτικές ουσίες.
- Τιμές του pH κοντά στο ουδέτερο είναι επιθυμητές, ενώ σε τιμές κάτω του 6.8 αναστέλλεται η μεθανογενετική δραστηριότητα.
- Εξαιτίας της υψηλής συγκέντρωσης CO<sub>2</sub> στα αέρια που παράγονται σε αναερόβιες διεργασίες (30 με 35% CO<sub>2</sub>), απαιτείται υψηλή αλκαλικότητα για να εξασφαλιστεί ουδέτερο pH.

# Περιβαλλοντικοί Παράγοντες - αλκαλικότητα

- Συχνά παρατηρείται αλκαλικότητα σε συγκέντρωση που κυμαίνεται από 3000 ως 5000 mg/l ως  $\text{CaCO}_3$ .
- Στη χώνευση της ιλύος παράγεται επαρκής ποσότητα αλκαλικότητας από τη διάσπαση πρωτεϊνών και αμινοξέων προς  $\text{NH}_3$ , η οποία αντιδρά με  $\text{CO}_2$  και  $\text{H}_2\text{O}$  προς σχηματισμό αλκαλικότητας ως  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ .

# Περιβαλλοντικοί Παράγοντες

- Σε εφαρμογές με βιομηχανικά απόβλητα, ειδικά σε απόβλητα που περιέχουν υδρογονάνθρακες, είναι απαραίτητο να προστίθεται αλκαλικότητα για τη ρύθμιση του pH.
- Οι ανασταλτικές ουσίες στις αναερόβιες επεξεργασίες (π.χ.  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  και άλλες ανόργανες και οργανικές ενώσεις).

# Βασικά στοιχεία της διεργασίας - Παράγοντες

Σημαντικοί παράγοντες είναι

- (1) ο χρόνος παρακράτησης των στερεών,
- (2) ο υδραυλικός χρόνος παρακράτησης,
- (3) η θερμοκρασία,
- (4) η αλκαλικότητα,
- (5) το pH,
- (6) η παρουσία ουσιών παρεμπόδισης, π.χ. τοξικών υλικών
- (7) η βιοδιαθεσιμότητα θρεπτικών και ιχνών μετάλλων.

# Βασικά στοιχεία της διεργασίας

Οι τρεις πρώτοι παράγοντες είναι σημαντικοί στην επιλογή της διεργασίας

Η αλκαλικότητα είναι συνάρτηση της τροφοδοσίας των στερεών και είναι σημαντική στον έλεγχο της διεργασίας της χώνευσης, όπως και το pH και οι ουσίες παρεμπόδισης

Η παρουσία των απαραίτητων θρεπτικών και ιχνώνστοιχείων είναι αναγκαία για τη βιολογική ανάπτυξη

# Χρόνος παρακράτησης των στερεών και υδραυλικός χρόνος παρακράτησης

Το μέγεθος του αναερόβιου χωνευτήρα βασίζεται στην παροχή αρκετού χρόνου παρακράτησης σε καλά αναμιγμένους αντιδραστήρες για να συμβεί σημαντική καταστροφή των πτητικών αιωρούμενων στερεών (VSS).

Τα κριτήρια που έχουν χρησιμοποιηθεί και αφορούν το μέγεθος είναι

(1) ο χρόνος παρακράτησης των στερεών **SRT**, που είναι ο μέσος χρόνος που συγκρατούνται τα στερεά στη διεργασία της χώνευσης

(2) ο υδραυλικός χρόνος παρακράτησης  $\tau$ , που είναι ο μέσος χρόνος που συγκρατείται το υγρό στη διεργασία της χώνευσης.

# Χρόνος παρακράτησης των στερεών και υδραυλικός χρόνος παρακράτησης

Για διαλυτά υποστρώματα, το SRT μπορεί να προσδιορισθεί διαιρώντας τη μάζα των στερεών στον αντιδραστήρα ( $M$ ) με τη μάζα των στερεών που απομακρύνονται ημερησίως ( $M/d$ ).

Ο υδραυλικός χρόνος παρακράτησης  $\tau$  είναι ίσος με τον όγκο του υγρού στον αντιδραστήρα ( $L^3$ ) δια την ποσότητα των βιοστερεών που απομακρύνονται ( $L^3/d$ )

Για τα συστήματα χώνευσης χωρίς ανακυκλοφορία, το  $SRT = \tau$



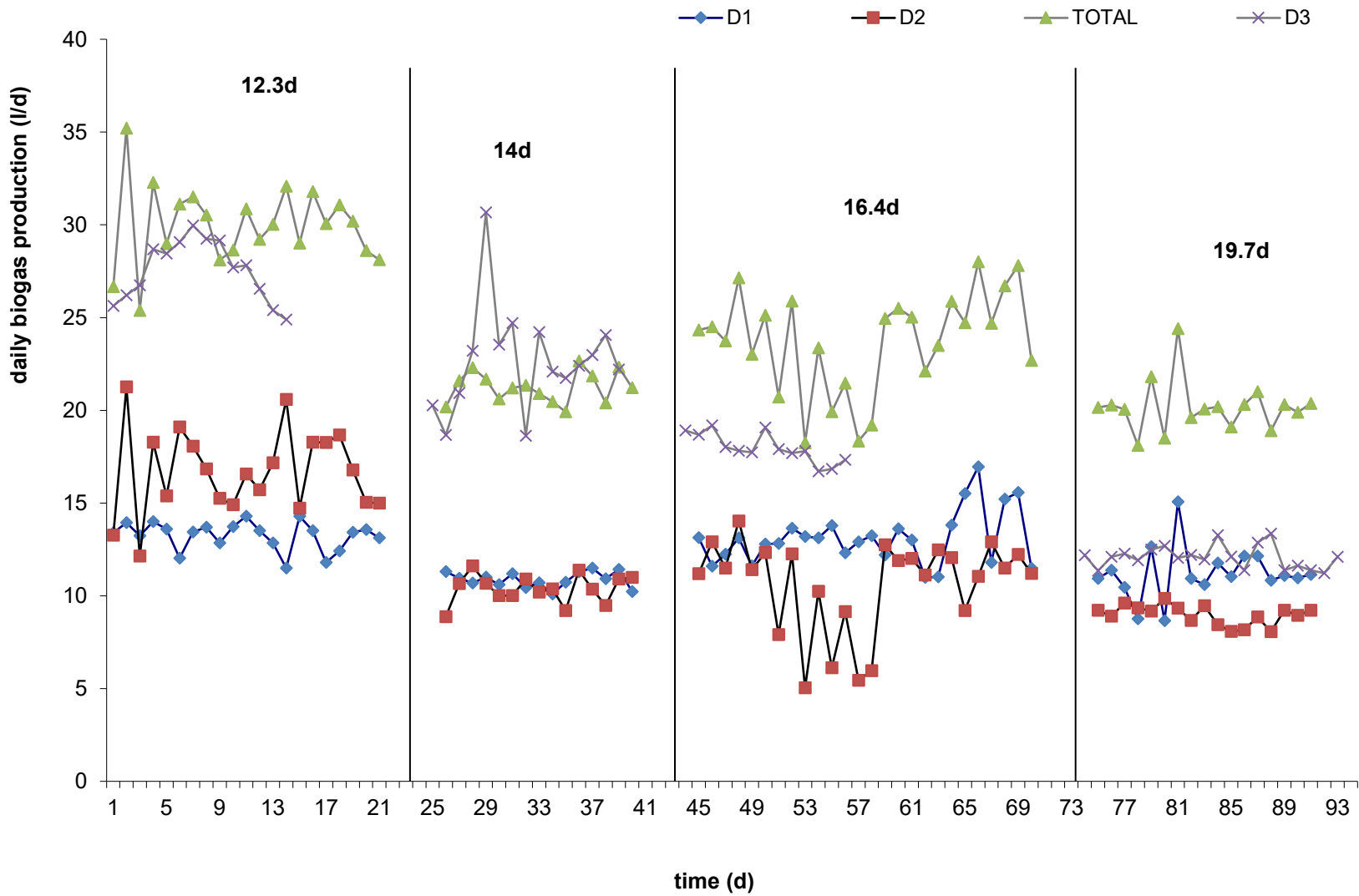
# Χρόνος παρακράτησης των στερεών και υδραυλικός χρόνος παρακράτησης

Οι τρεις αντιδράσεις (υδρόλυση, σταθεροποίηση και μεθανογένεση) σχετίζονται άμεσα με το SRT (ή το  $\tau$ ).

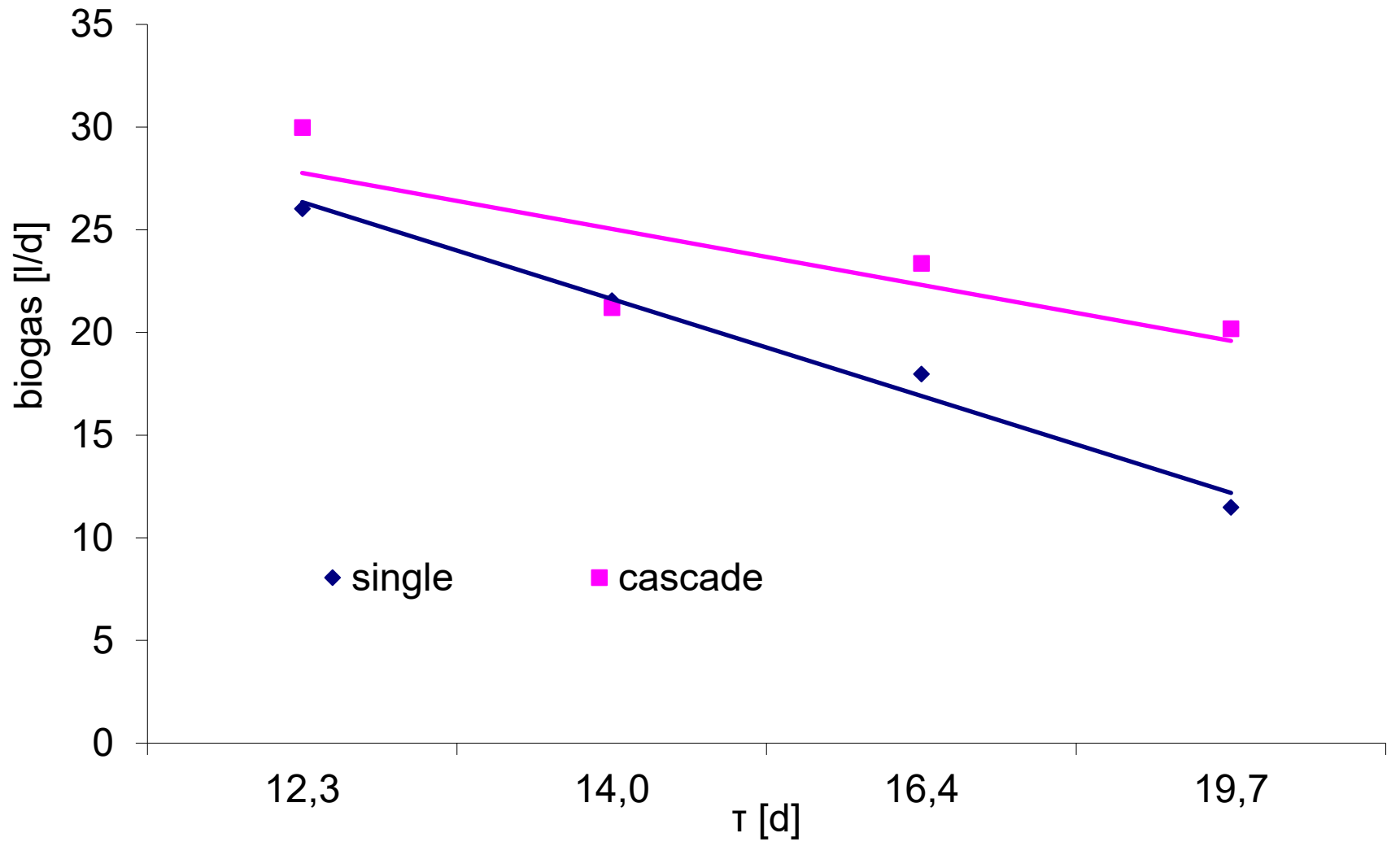
Μια αύξηση ή μείωση του SRT έχει ως αποτέλεσμα μια αύξηση ή μείωση στην έκταση της κάθε αντίδρασης.

Υπάρχει ένας ελάχιστος SRT για κάθε αντίδραση.

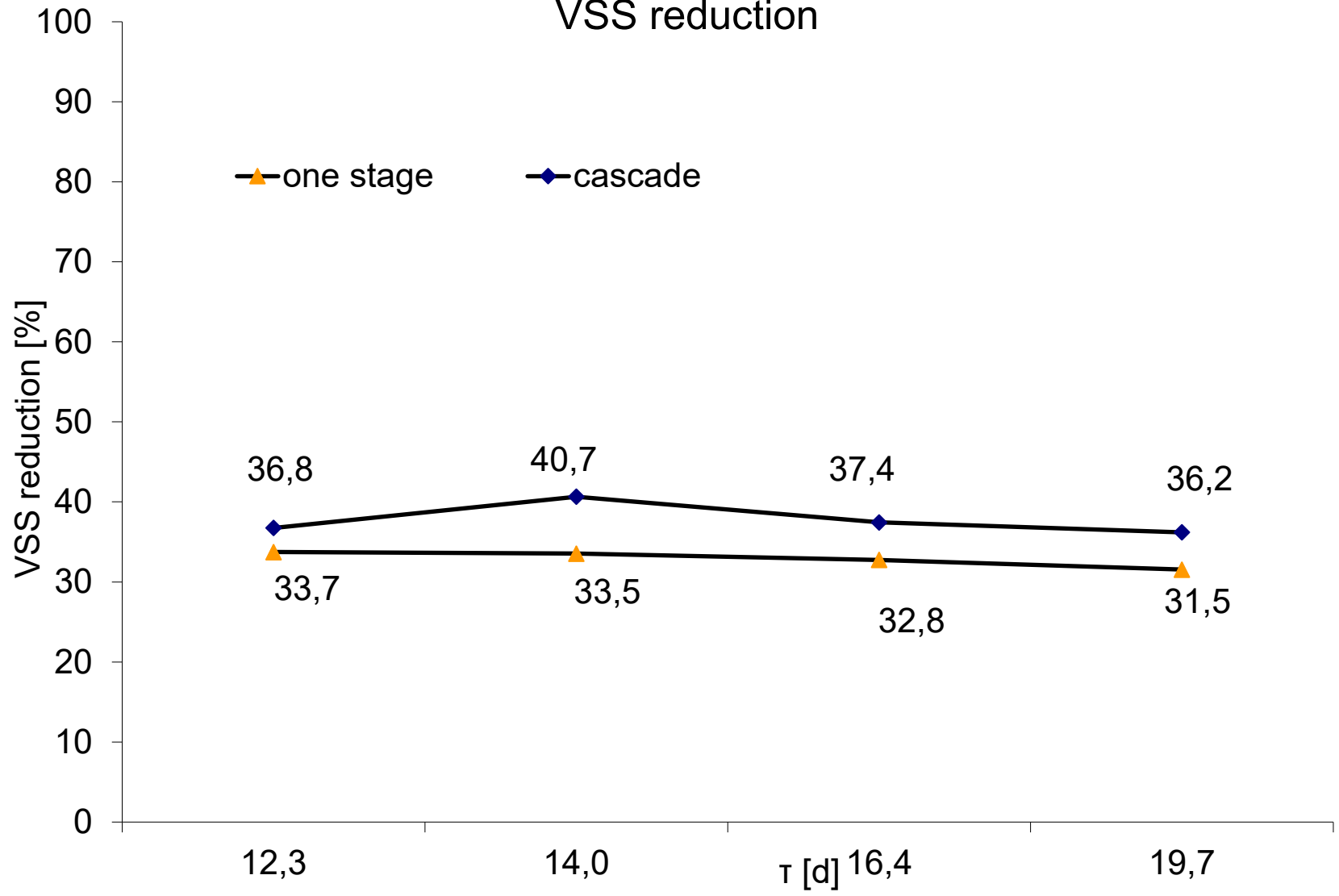
Εάν ο SRT είναι λιγότερος από τον ελάχιστο SRT, τα βακτήρια δεν μπορούν να αναπτυχθούν αρκετά γρήγορα και τελικά η διεργασία της χώνευσης θα αστοχήσει

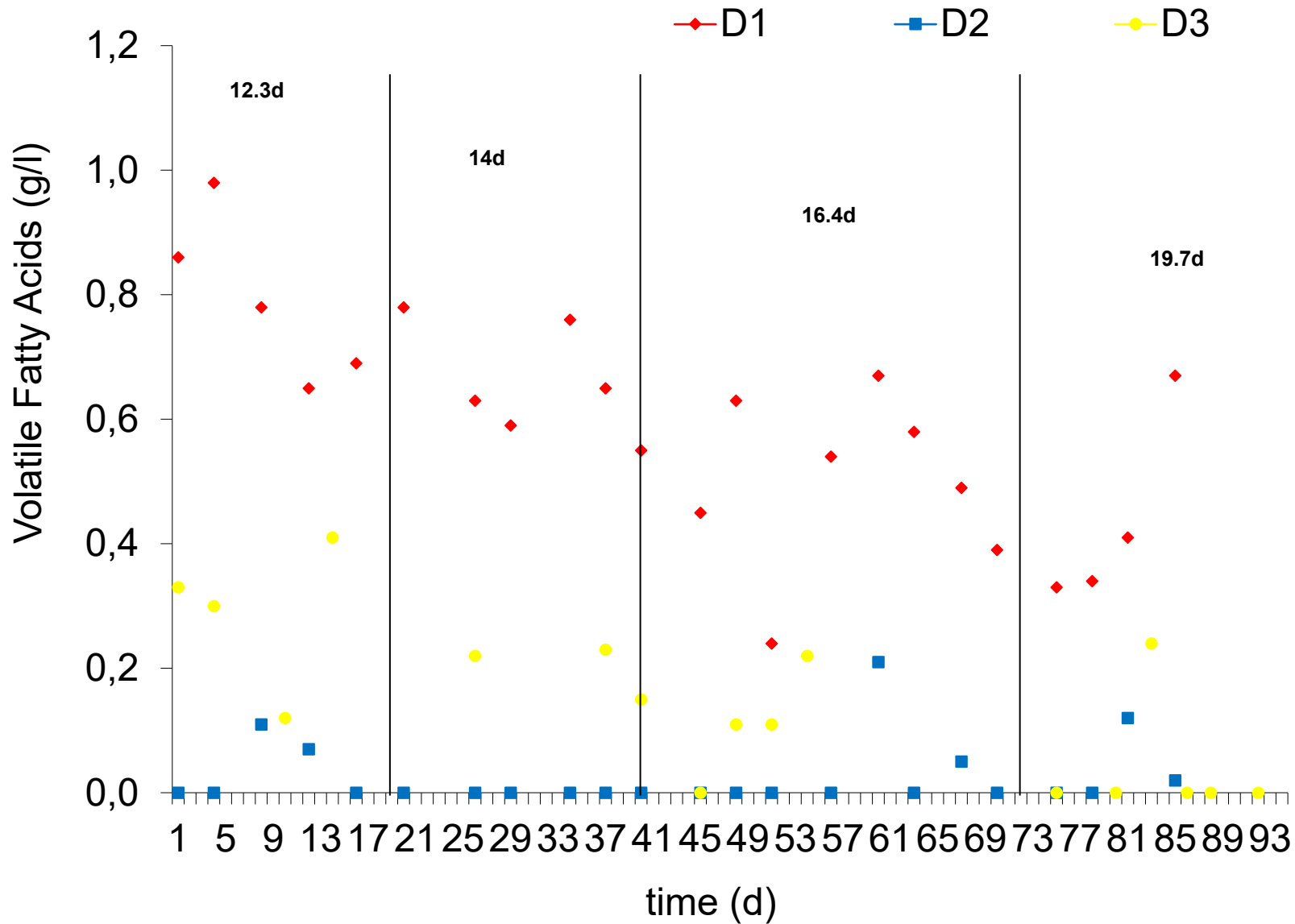


# biogas



# VSS reduction





# Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία δεν επηρεάζει μόνο τις μεταβολικές δραστηριότητες των μικροβιακών πληθυσμών αλλά επίσης

- τον ρυθμό μεταφοράς των αερίων και
- τα χαρακτηριστικά καθίζησης των βιολογικών στερεών.

Στην αναερόβια χώνευση είναι σημαντική η θερμοκρασία για τον προσδιορισμό του ρυθμού της χώνευσης, συγκεκριμένα των ρυθμών της υδρόλυσης και του σχηματισμού του μεθανίου.

# Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία λειτουργίας από το σχεδιασμό καθιερώνει τον ελάχιστο SRT που απαιτείται για να επιτευχθεί ένα δεδομένο ποσό καταστροφής των VSS.

Τα περισσότερα συστήματα αναερόβιας χώνευσης σχεδιάζονται για να λειτουργούν σε θερμοκρασίες του **μεσόφιλου** με εύρος μεταξύ των 30 και 38 °C.

Άλλα συστήματα σχεδιάζονται να λειτουργούν σε θερμοκρασίες του **θερμόφιλου** με εύρος από 50 έως 57 °C.

Νεότερα συστήματα χρησιμοποιούν ένα **συνδυασμό** μεσόφιλης και θερμόφιλης χώνευσης σε ξεχωριστές βαθμίδες.

# Θερμοκρασία

Σημαντική είναι η διατήρηση μιας σταθερής θερμοκρασίας λειτουργίας λόγω των βακτηρίων, ειδικά αυτών που σχηματίζουν το μεθάνιο, που είναι ευαίσθητα σε αλλαγές της θερμοκρασίας.

Γενικά, αλλαγές της θερμοκρασίας μεγαλύτερες από  $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$  επηρεάζουν την απόδοση της διεργασίας με συνέπεια να συνιστώνται αλλαγές λιγότερες από  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$



# Αλκαλικότητα

Τα όξινα ανθρακικά άλατα του ασβεστίου, του μαγνησίου και του αμμωνίου είναι παραδείγματα ρυθμιστικών ουσιών, που βρίσκονται σε ένα χωνευτήρα.

Η διεργασία της χώνευσης παράγει όξινο ανθρακικό νάτριο από τη διάσπαση της πρωτεΐνης στην τροφοδοσία της ανεπεξέργαστης ιλύος, ενώ τα άλλα βρίσκονται στην τροφοδοσία της ιλύος.

Η συγκέντρωση της αλκαλικότητας σε ένα χωνευτήρα είναι, έως ένα μεγάλο σημείο, ανάλογη με τη συγκέντρωση τροφοδοσίας των στερεών. Ένας καλά κατασκευασμένος χωνευτήρας έχει μια ολική αλκαλικότητα από 2 000 έως 5 000 mg/l (WEF, 1996).

# Αλκαλικότητα

Ο κύριος καταναλωτής της αλκαλικότητας σε ένα χωνευτήρα είναι το διοξείδιο του άνθρακα και όχι τα πτητικά λιπαρά οξέα όπως πιστεύεται συνήθως.

Το διοξείδιο του άνθρακα παράγεται στις φάσεις της σταθεροποίησης και της μεθανογένεσης της διεργασίας της χώνευσης.

Λόγω της μερικής πίεσης του αερίου στον χωνευτήρα το διοξείδιο του άνθρακα διαλυτοποιείται και παράγει ανθρακικά οξέα, που καταναλώνουν την αλκαλικότητα.

# Αλκαλικότητα

Η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα στο αέριο του χωνευτήρα είναι συνεπώς αντιπροσωπευτική των απαιτήσεων της αλκαλικότητας.

Συμπληρωματική αλκαλικότητα μπορεί να παρασχεθεί με την προσθήκη όξινου ανθρακικού νατρίου, υδράσβεστου, ή ανθρακικού νατρίου.

# Περιγραφή των διεργασιών της μεσόφιλης αναερόβιας χώνευσης

Η μεσόφιλη αναερόβια χώνευση για την πρωτοβάθμια ιλύ και την περίσσεια της ενεργού ιλύος διεξάγεται συνήθως

- σε μονοβάθμιους υψηλού ρυθμού,
- διβάθμιους και ξεχωριστούς χωνευτήρες.

Σπάνια χρησιμοποιείται η χώνευση χαμηλού ρυθμού, για το σχεδιασμό του χωνευτήρα (λόγω του μεγάλου απαιτούμενου όγκου της δεξαμενής και της έλλειψης επαρκούς ανάμιξης)

# Μονοβάθμια χώνευση υψηλού ρυθμού

Τη διεργασία της μονοβάθμιας χώνευσης υψηλού ρυθμού χαρακτηρίζουν:

η θέρμανση,

η βοηθητική ανάμιξη,

η ομοιόμορφη τροφοδοσία και

η πάχυνση του ρεύματος της τροφοδοσίας

# Μονοβάθμια χώνευση υψηλού ρυθμού

Η ιλύς αναμιγνύεται με

- την επανακυκλοφορία του αερίου,
- την άντληση, ή
- με αναδευτήρες αξονικών σωλήνων

(δε λαμβάνει χώρα ο διαχωρισμός των ακαθαρσιών και του υπερκείμενου)

και θερμαίνεται για να επιτευχθούν οι βέλτιστοι ρυθμοί χώνευσης.

# Μονοβάθμια χώνευση υψηλού ρυθμού

Για να διατηρηθούν οι σταθερές συνθήκες στον αντιδραστήρα

- η ομοιόμορφη τροφοδοσία είναι πολύ σημαντική
- η ιλύς θα πρέπει να αντλείται συνεχώς στο χωνευτήρα ή με κύκλους των 30 λεπτών έως 2 ωρών.

# Μονοβάθμια χώνευση υψηλού ρυθμού

Στην τροφοδοσία των χωνευτήρων σε ημερήσιους κύκλους των 8 ή 24 ωρών, είναι σημαντικό να αποσύρεται η χωνεμένη ιλύς από τον χωνευτήρα πριν προστεθεί η τροφοδοσία της ιλύος, (λόγο της εξουδετέρωσης των παθογόνων)



# Μονοβάθμια χώνευση υψηλού ρυθμού

Η χωνεμένη ίλύς είναι σχεδόν η μισή επειδή

- δεν υπάρχει διαχωρισμός του υπερκείμενου στον χωνευτήρα υψηλού ρυθμού και
- μειώνονται τα ολικά στερεά από 45 έως 50 τοις εκατό και αποδίδονται ως αέριο

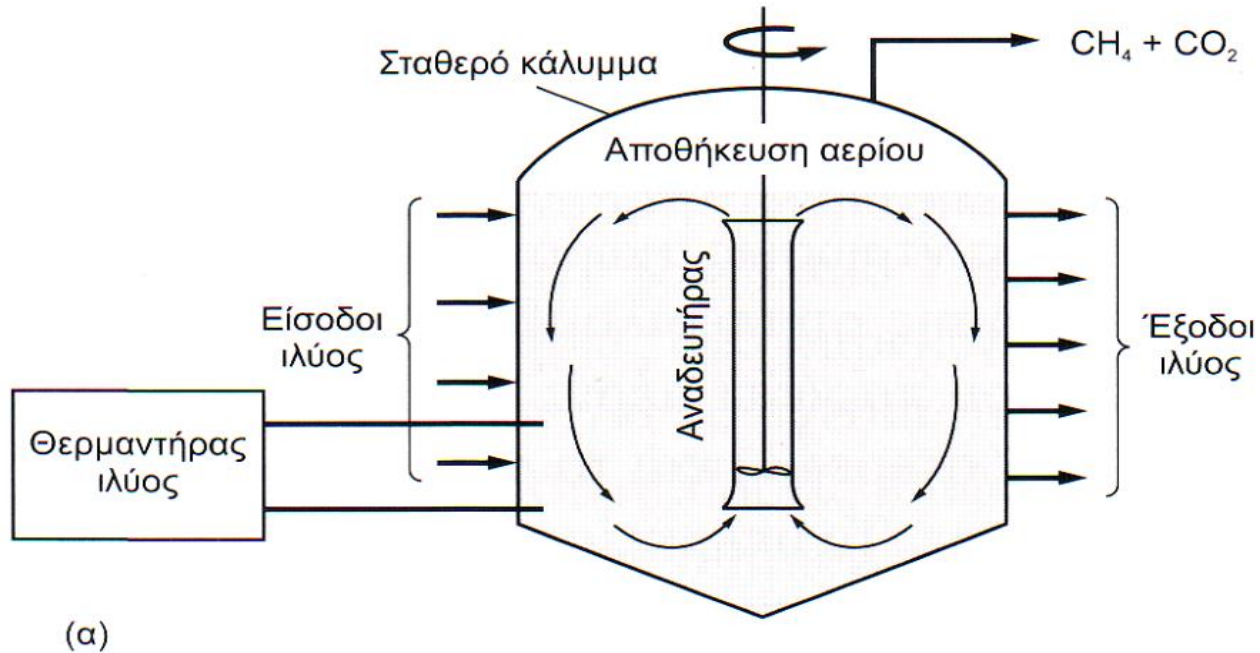
# Μονοβάθμια χώνευση υψηλού ρυθμού

Οι δεξαμενές χώνευσης μπορούν να έχουν  
σταθερές οροφές  
ή πλωτά καλύμματα

Τα πλωτά καλύμματα μπορεί να είναι τύπου αεριοφυλακίου, το οποίο παρέχει μια επιπλέον δυνατότητα αποθήκευσης αερίου

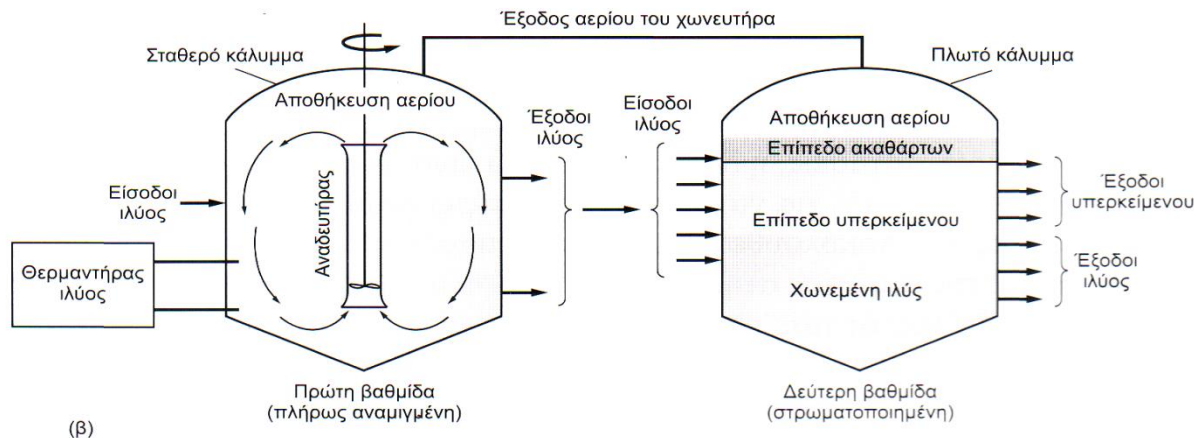
Εναλλακτικά, το αέριο μπορεί να αποθηκευθεί σε ένα ξεχωριστό αεριοφυλάκιο χαμηλής πίεσης ή να συμπιεσθεί και να αποθηκευθεί υπό πίεση

# Σχηματικό διάγραμμα αναερόβιων χωνευτήρων



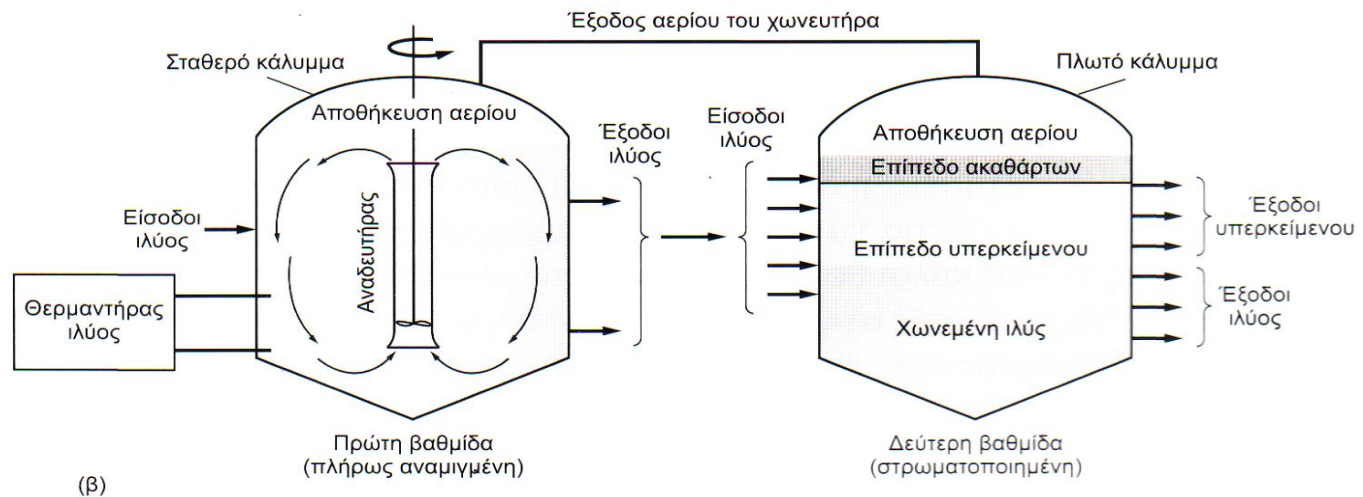
# Σχηματικό διάγραμμα αναερόβιων χωνευτήρων

- Στη διβάθμια χώνευση, ένας χωνευτήρας υψηλού ρυθμού είναι συνδεδεμένος σε σειρά με μια δεύτερη δεξαμενή.
- Η πρώτη δεξαμενή χρησιμοποιείται για τη χώνευση, θερμαίνεται και είναι εξοπλισμένη με διατάξεις ανάμιξης.



# Διβάθμια χώνευση

Η δεύτερη βαθμίδα είναι επίσης ένα θερμαινόμενος αντιδραστήρας που αναμιγνύεται για να επιτύχει περαιτέρω σταθεροποίηση πριν την αφυδάτωση ή άλλες συνεπακόλουθες διεργασίες.



# Ξεχωριστή χώνευση της ιλύος

Οι λόγοι για την ξεχωριστή χώνευση περιλαμβάνουν

- (1) τη διατήρηση των εξαιρετικών χαρακτηριστικών αφυδάτωσης της πρωτοβάθμιας ιλύος που έχει υποστεί χώνευση
- (2) το γεγονός ότι η διεργασία της χώνευσης έχει σχεδιασθεί ειδικά για την ιλύ που θα υποστεί επεξεργασία, και
- (3) το ότι με ξεχωριστή χώνευση μπορούν να διατηρηθούν βέλτιστες συνθήκες ελέγχου

# Ξεχωριστή χώνευση της ιλύος

Σε μερικές περιπτώσεις ειδικά όπου εφαρμόζεται βιολογική απομάκρυνση του φωσφόρου, η βιολογική ιλύς χωνεύεται αερόβια αντί για αναερόβια για την παρεμπόδιση της επαναδιαλυτοποίησης του φωσφόρου κάτω από αναερόβιες συνθήκες

# Σχεδιασμός της διεργασίας της μεσόφιλης αναερόβιας χώνευσης

Ο σχεδιασμός βασίζεται

- στο χρόνο παρακράτησης των στερεών,
- στη χρήση των συντελεστών του ογκομετρικού φορτίου,
- στην καταστροφή των πτητικών στερεών,
- στην παρατηρημένη μείωση του όγκου και
- στους συντελεστές των φορτίων με βάση τον πληθυσμό



# Σχεδιασμός της διεργασίας της μεσόφιλης αναερόβιας χώνευσης

Χρόνος παρακράτησης των στερεών

Ο σχεδιασμός του χωνευτήρα βασίζεται στο SRT

Μια σύντομη επισκόπηση των τελικών προϊόντων της αναπνοής και της οξείδωσης της αναερόβιας χώνευσης είναι το αέριο μεθάνιο και το διοξείδιο του άνθρακα.

# Σχεδιασμός της διεργασίας της μεσόφιλης αναερόβιας χώνευσης Χρόνος παρακράτησης των στερεών

**Η ποσότητα του μεθανίου μπορεί να υπολογισθεί  
χρησιμοποιώντας την εξίσωση:**

$$V_{CH_4} = (0.35) \left[ (S_0 - S)(Q)(10^3 \text{ g / kg})^{-1} - 1.42 P_x \right]$$

$V_{CH_4}$  = ο όγκος του μεθανίου που παράγεται σε σταθερές συνθήκες  
0.35 = ο θεωρητικός συντελεστής μετατροπής για το ποσό του  
μεθανίου που παράγεται,  $m^3$ , από τη μετατροπή του 1kg του bCOD  
στους 0 °C

$Q$  = η παροχή,  $m^3/d$

$S_0$  = το bCOD στην εισροή, mg/l     $S$  = το bCOD στην εκροή, mg/l

$P_x$  = η καθαρή μάζα των κυττάρων που παράγονται ανά ημέρα

# Σχεδιασμός της διεργασίας της μεσόφιλης αναερόβιας χώνευσης Χρόνος παρακράτησης των στερεών

Για ένα χωνευτήρα υψηλού ρυθμού πλήρους ανάμιξης χωρίς ανακυκλοφορία, η μάζα των βιολογικών στερεών που συνθέτονται ημερήσια,  $P_x$ , μπορεί να εκτιμηθεί από:

$$P_x = \frac{YQ(S_0 - S)x((10^3 \text{ g / kg})^{-1})}{1 + k_d (SRT)}$$

όπου  $Y$  = ο συντελεστής απόδοσης,

$k_d$  = ο ενδογενής συντελεστής,  $d^{-1}$ , (τυπικές τιμές κυμαίνονται από 0.02 έως 0.04)

$SRT$  = ο χρόνος παρακράτησης των στερεών,  $d$

# Σχεδιασμός της διεργασίας της μεσόφιλης αναερόβιας χώνευσης Χρόνος παρακράτησης των στερεών

Τυπικές τιμές των αναερόβιων αντιδράσεων για το  $Y$  και το  $k_d$  κυμαίνονται από 0.05 έως 0.10 και 0.02 έως 0.04, αντίστοιχα.

Τυπικές τιμές για το SRT στην πράξη για τη χώνευση υψηλού ρυθμού έχουν εύρος από 10 έως 20 ημέρες.

Θερμοκρασίες λειτουργίας, °C	SRT (ελάχιστο)	SRT <sub>σχεδιασμου</sub>
18	11	28
24	8	20
30	6	14
35	4	10
40	4	10

# Σχεδιασμός της διεργασίας της μεσόφιλης αναερόβιας χώνευσης Χρόνος παρακράτησης των στερεών

## Συνήθως

- είναι επαρκές ένα κατώτερο όριο του SRT των 10 ημερών στη θερμοκρασία των 35 °C για να διασφαλισθεί ένας επαρκής συντελεστής ασφαλείας έναντι της έκπλυσης του μεθανογενετικού πληθυσμού και
- οι επιπρόσθετες αλλαγές στην καταστροφή των πτητικών στερεών είναι σχετικά μικρές για τιμές SRT πάνω από 15 ημέρες στους 35 °C.

# Σχεδιασμός της διεργασίας της μεσόφιλης αναερόβιας χώνευσης Χρόνος παρακράτησης των στερεών

Στην επιλογή του SRT σχεδιασμού για την αναερόβια χώνευση, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα υδραυλικά φορτία αιχμής.

Το υδραυλικό φορτίο αιχμής μπορεί να εκτιμηθεί με την φτωχή απόδοση του παχυντήρα με το μέγιστο διατηρούμενο φορτίο της εγκατάστασης που είναι αναμενόμενο κατά τη διάρκεια εφτά συνεχόμενων ημερών.

# Σχεδιασμός της διεργασίας της μεσόφιλης αναερόβιας χώνευσης Συντελεστές φορτίων

Μια από τις πιο χρησιμοποιούμενες μεθόδους για την εκτίμηση του μεγέθους των χωνευτήρων είναι ο προσδιορισμός του απαιτούμενου όγκου **βάσει του συντελεστή φορτίου**.

Οι δυο πιο δημοφιλείς παράγοντες βασίζονται

- (1) στη μάζα των πτητικών στερεών που προσθέτονται ανά ημέρα ανά μονάδα όγκου χωρητικότητας του χωνευτήρα (προτιμάται) και
- (2) στη μάζα των πτητικών στερεών που προσθέτονται στο χωνευτήρα κάθε ημέρα ανά μάζα των πτητικών στερεών στο χωνευτήρα.

# Σχεδιασμός της διεργασίας της μεσόφιλης αναερόβιας χώνευσης Συντελεστές φορτίων

Τα κριτήρια των φορτίων βασίζονται στις διατηρούμενες συνθήκες φορτίων, **συνήθως των 2 εβδομάδων αιχμής** ή της μηνιαίας αιχμής της παραγωγής των στερεών με πρόβλεψη για να αποφεύγονται τα υπερβολικά φορτία σε συντομότερες περιόδους.

Το ανώτερο όριο των ρυθμών των φορτίων των πτητικών στερεών συνήθως προσδιορίζεται από το **ρυθμό συσσώρευσης των τοξικών υλικών** ή από το **ξέπλυμα** αυτών που σχηματίζουν μεθάνιο



# Σχεδιασμός της διεργασίας της μεσόφιλης αναερόβιας χώνευσης Συντελεστές φορτίων

Παράμετρος	Μονάδες SI	
	Μονάδες	Τιμή
Ογκομετρικά κριτήρια:		
Πρωτοβάθμια ιλύς	m <sup>3</sup> /ατομο	003-0.06
Πρωτοβάθμια + χουμοποιημένη ιλύς	m <sup>3</sup> /ατομο	0.07-0.09
Πρωτοβάθμια + ενεργός ιλύς	m <sup>3</sup> /ατομο	0.07-0.11
Ρυθμός φόρτισης στερεών	kg/VSS/10 <sup>3</sup> .d	1.6-4.8
Χρόνος παρακράτησης στερεών	d	15-20

# Σχεδιασμός της διεργασίας της μεσόφιλης αναερόβιας χώνευσης Συντελεστές φορτίων

Υπερβολικά χαμηλοί ρυθμοί φορτίων των πτητικών στερεών μπορούν να έχουν ως αποτέλεσμα σχεδιασμούς, που η κατασκευή τους κοστίζει και έχουν δύσκολη λειτουργία.

Πρόβλημα αποτελεί πολλές φορές το σχετικά χαμηλό περιεχόμενο των στερεών στην ιλύ που τροφοδοτείται στους χωνευτήρες (π.χ. μέσο ποσοστό των TSS  $4.7 \pm 1.6$  με VSS 70%).

# Σχεδιασμός της διεργασίας της μεσόφιλης αναερόβιας χώνευσης Συντελεστές φορτίων

Η αραιωμένη ιλύς παρουσιάζει δυσμενείς επιπτώσεις στη λειτουργία του χωνευτήρα:

- (1) μειωμένο  $\tau$ ,
- (2) μειωμένη καταστροφή VS,
- (3) μειωμένη παραγωγή μεθανίου,
- (4) μειωμένη αλκαλικότητα,
- (5) αυξημένοι όγκοι βιοστερεών και υπερκείμενου,
- (6) αυξημένες απαιτήσεις θέρμανσης,
- (7) αυξημένη ικανότητα αφυδάτωσης και
- (8) αυξημένο κόστος άντλησης για τα βιοστερεά του υγρού

## Επίδραση της συγκέντρωσης της ιλύος και του υδραυλικού χρόνου παραμονής στους συντελεστές φόρτισης

Συγκεντρώσ εις ιλύος %	Συντελεστές Φόρτισης πτητικών στερεών			
	Kg/m <sup>3</sup> .d			
	10d	12d	15d	20d
2	1.4	1.2	0.95	0.7
3	2.1	1.8	1.4	1.1
4	2.9	2.4	1.9	1.4
5	3.6	3.0	2.4	1.8
6	4.3	3.6	2.9	2.1
7	5.0	4.2	3.3	2.5
8	5.7	4.8	3.8	2.9

# Σχεδιασμός της διεργασίας της μεσόφιλης αναερόβιας χώνευσης

Εκτίμηση της καταστροφής των πτητικών στερεών

Ο βαθμός σταθεροποίησης μετράται από το ποσοστό μείωσης των VSS

Η μείωση μπορεί να συσχετισθεί με το SRT ή με το χρόνο παρακράτησης βάσει της τροφοδοσίας της ανεπεξέργαστης ιλύος

Εμπειρικά μπορούμε να υπολογίσουμε το ποσοστό μείωσης βάσει της ακόλουθης εξίσωσης:

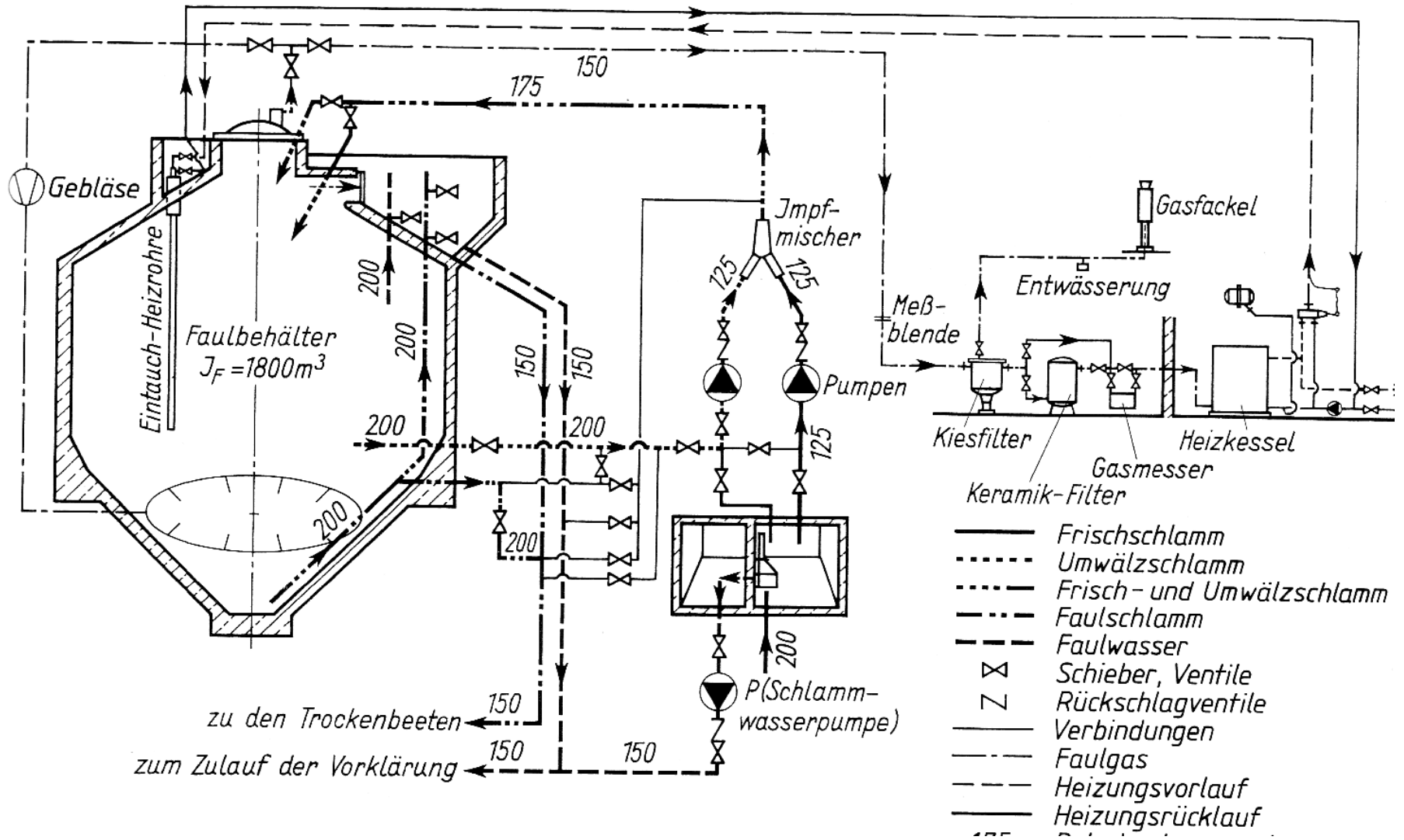
$$V_d = 13.7 \ln(\text{SRT}) + 18.9$$

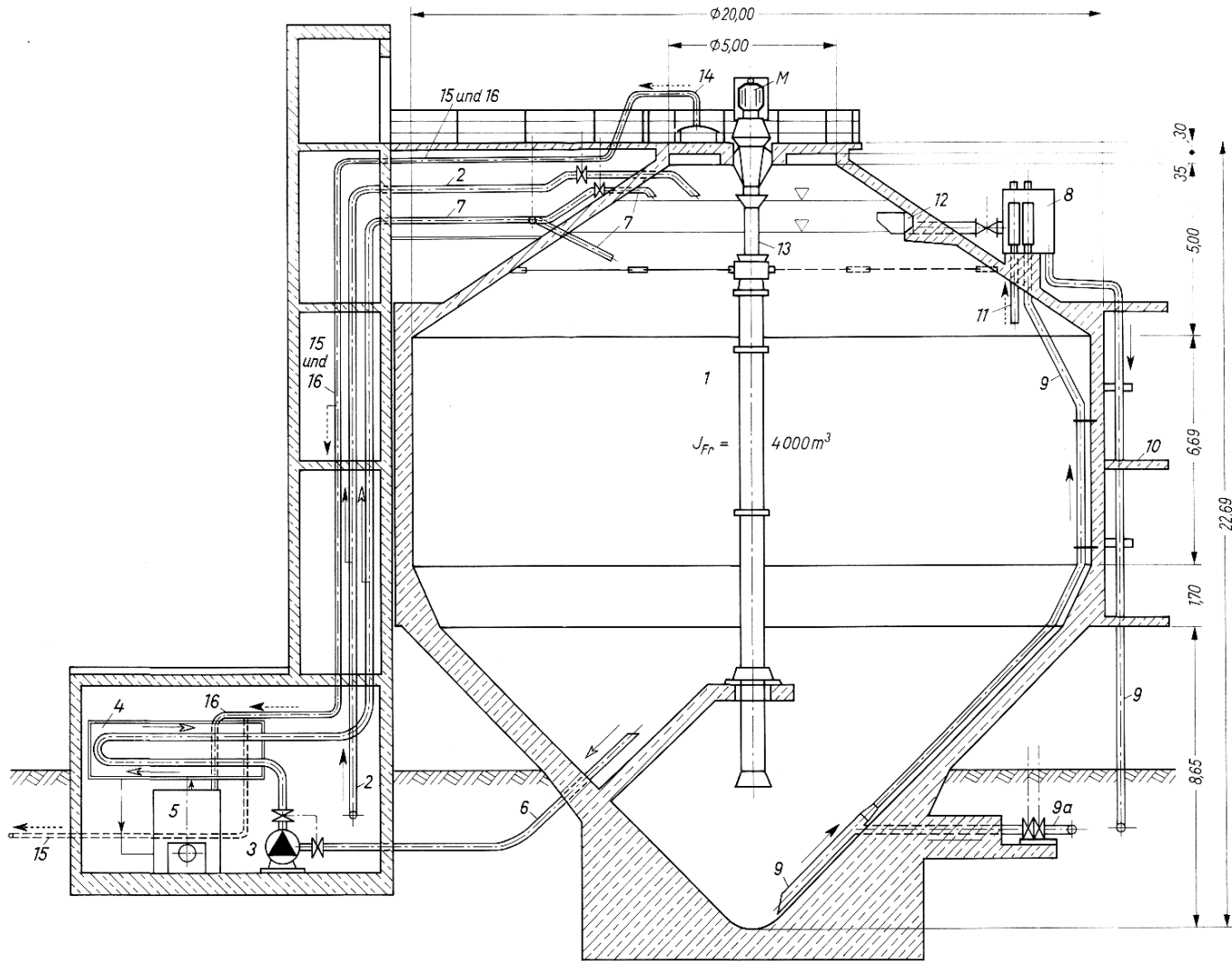
$V_d$  = η καταστροφή των πτητικών στερεών %

SRT = ο χρόνος της χώνευσης, d (15 – 20)

Εκτίμηση της καταστροφής των πτητικών στερεών σε μεσόφιλους αναερόβιους χωνευτές υψηλής απόδοσης

Χρόνος χώνευσης, d	Καταστροφή πτητικών στερεών, %
30	65.5
20	60.0
15	56





**519.1 Schlammfaltungsturm**

1 Faulraum

2 Frischschlammeingabe ←

3 Schlammpumpe für Umwälzschlamm

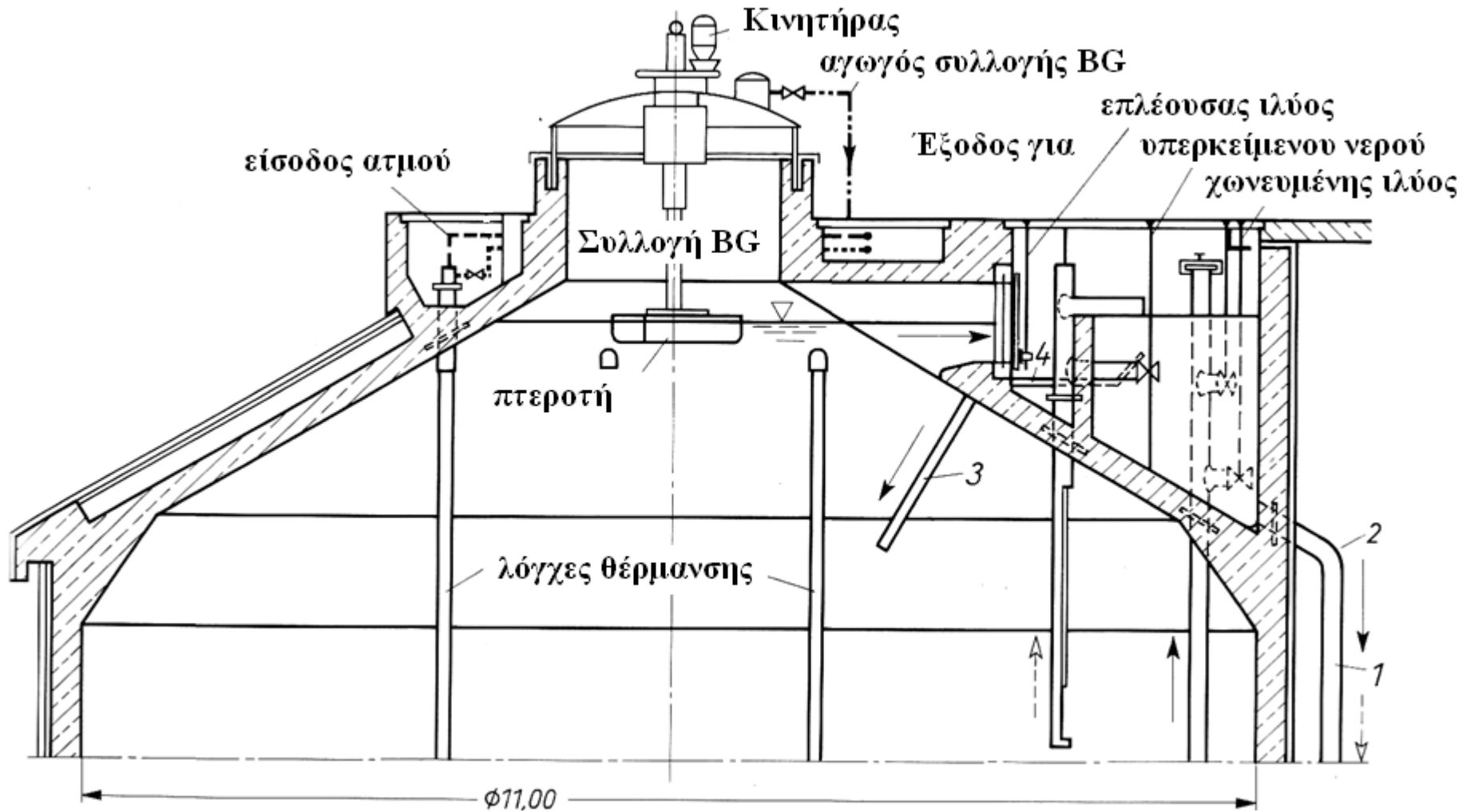
9 Faulschlammentnahme

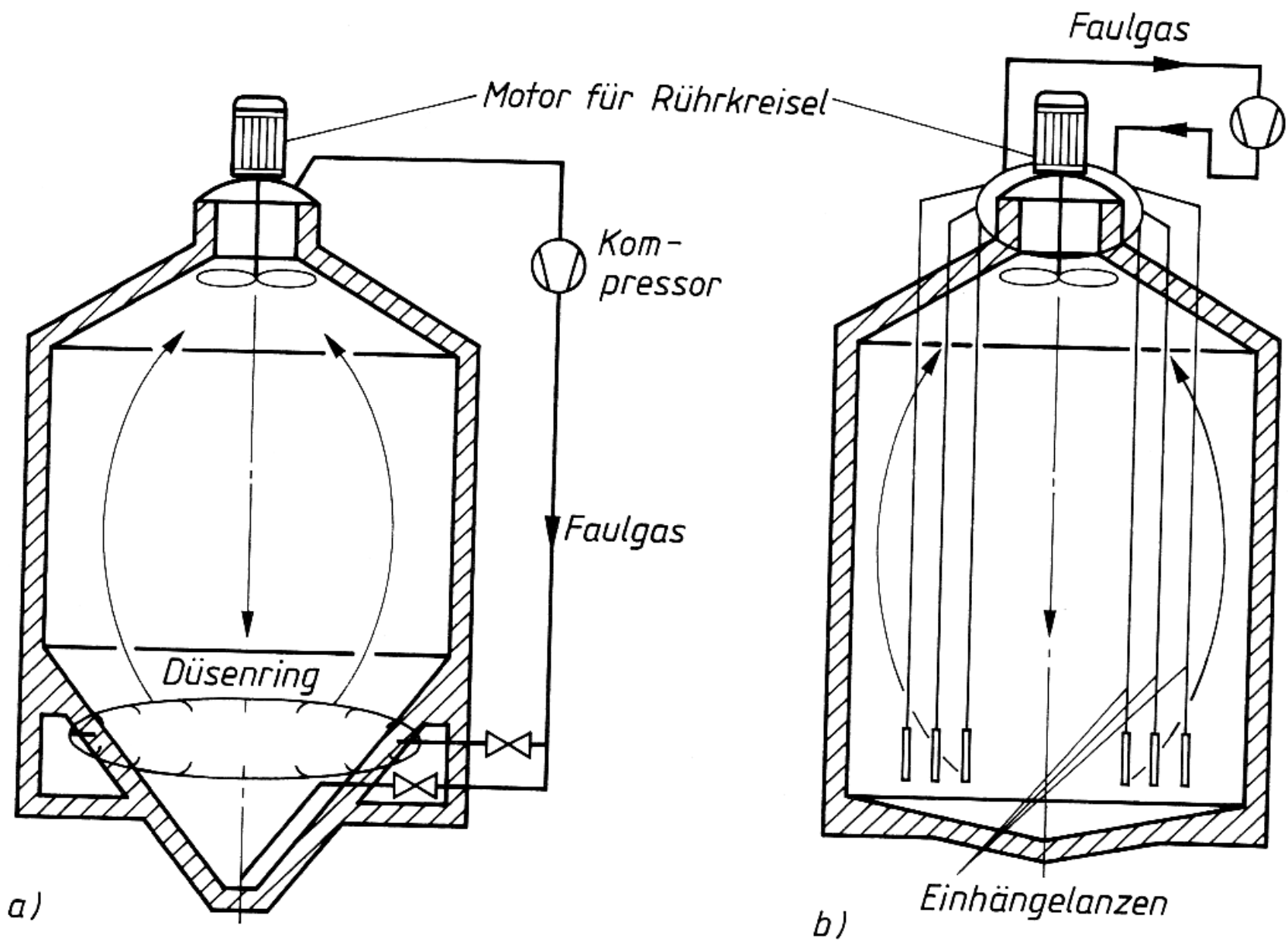
9a Faulschlammentnahmeweg 2

10 Trenne



# Τομή του πάνω τμήματος χωνευτή





# Θέρμανση του χωνευτή

- a) Εμβαπτιζόμενοι αγωγοί
- b) Εναλλάκτης θερμότητας
- c) Εισαγωγή ατμού

1. BG

2. Επιπλέοντα

3. Επεξεργ. νερά

4. Επεξ. αραιωμένα νερά

5. Ιλύς

6. Ανακυκλοφορία

7. Ακατέργαστη ιλύς

8. Υπερκείμενο του 7

9. Jet ατμού

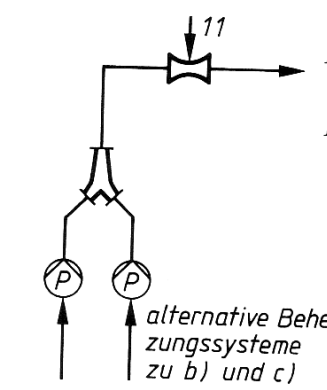
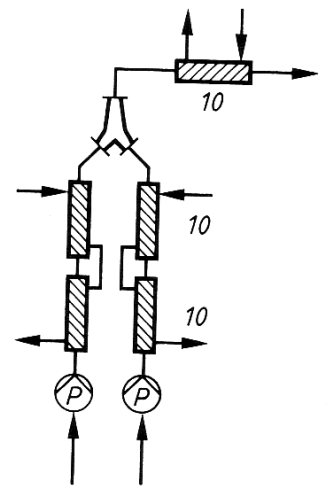
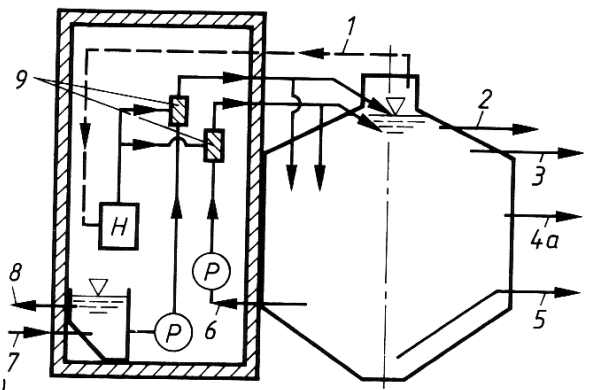
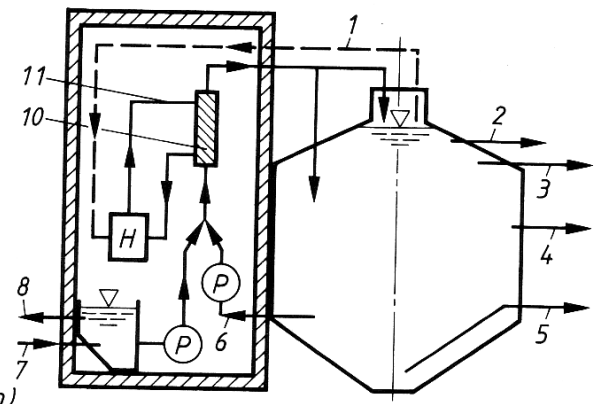
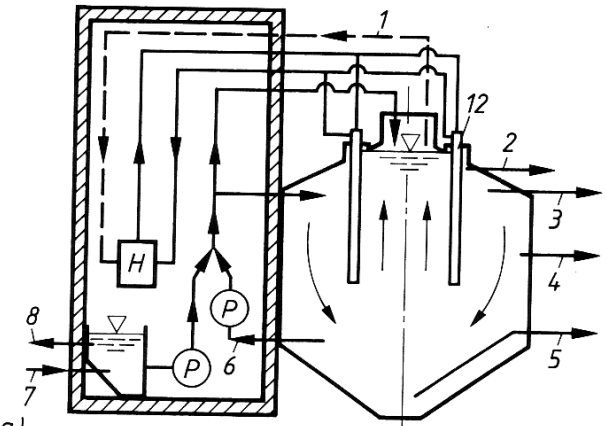
10. Εναλλάκτης αγωγών

11. Επιστροφές

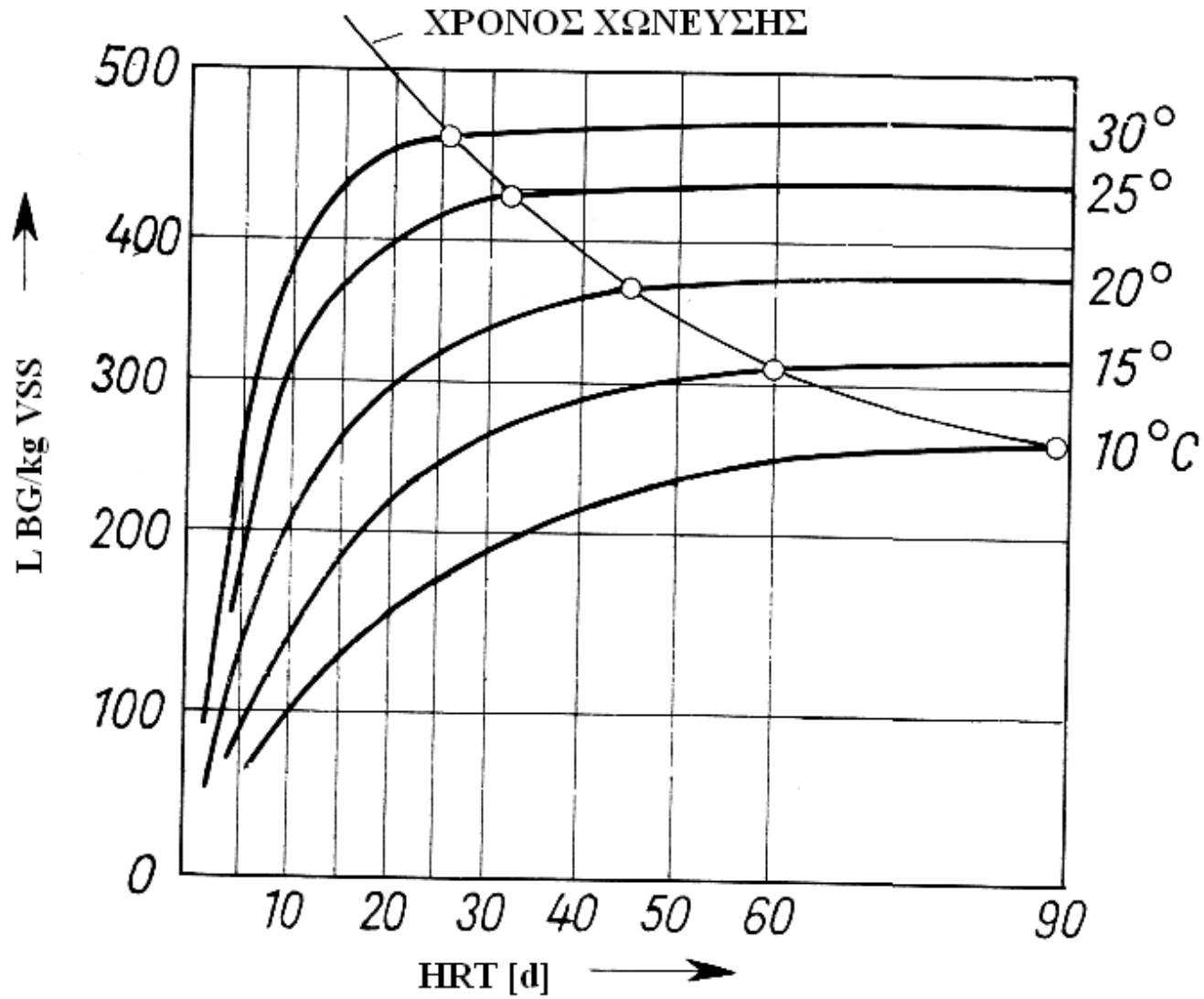
12. 4-12 Λόγχες ατμού

H Λέβητας

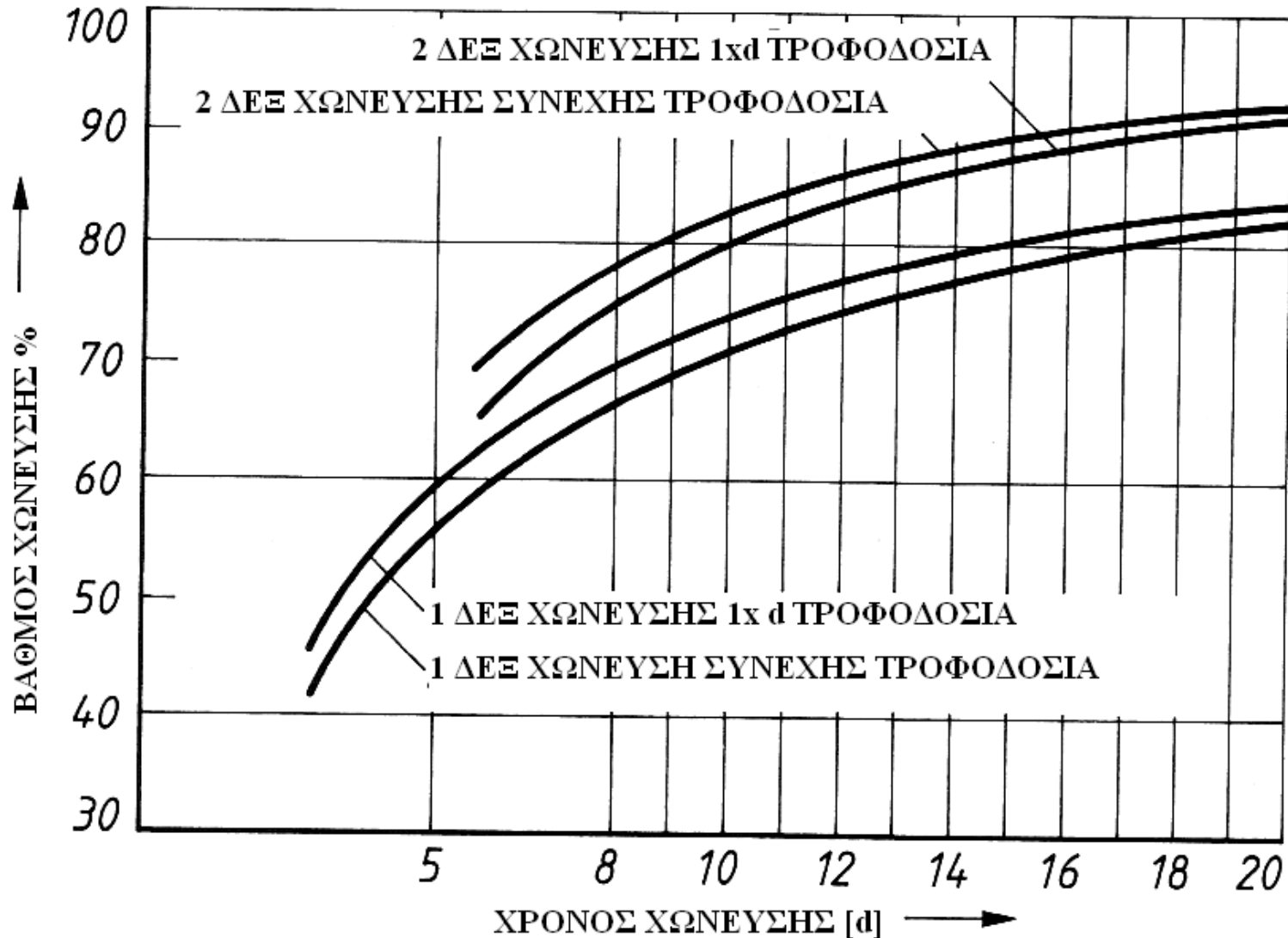
P Αντλία



# Παραγωγή βιοαερίου σε εξάρτηση από τον χρόνο και την θερμοκρασία χώνευσης



# Ο βαθμός σταθεροποίησης των VSS σε σχέση με το χρόνο για μονοβάθμια και διβάθμια συστήματα



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΩΝ ΠΗΗΤΙΚΩΝ ΟΞΕΩΝ ΣΕ ΑΝΑΕΡΟΒΙΟ ΧΩΝΕΥΤΗ

