



Βιοαντιδραστήρες μεμβρανών: που βρισκόμαστε σήμερα και ποιες οι προοπτικές για το μέλλον;

Νέες διεργασίες για την αντιμετώπιση της ρύπανσης
σε βιοαντιδραστήρες μεμβρανών

Θεσσαλονίκη, 2 Ιουνίου 2015

Σίμος Μαλαμής, Λέκτορας ΕΜΠ



- Διείσδυση τεχνολογιών MBR

- Πως μπορούν τα MBR να αποκτήσουν ανταγωνιστικό πλεονέκτημα;

- Εφαρμογές για επεξεργασία αστικών και βιομηχανικών υγρών αποβλήτων

- Καινοτόμες εφαρμογές που μπορούν να δώσουν ώθηση στα συστήματα MBR

Θα αντικαταστήσουν τα MBR το σύστημα της ενεργού ιλύος;

- ❖ Παρότι παρουσιάζουν σημαντική ανάπτυξη, τα MBR **δεν** πρόκειται να αντικαταστήσουν ευρέως τα συστήματα ενεργού ιλύος τα επόμενα 30-40 χρόνια
- ❖ Το 2009, **0,5%** του Ευρωπαϊκού πληθυσμού εξυπηρετείτο από συστήματα MBR, ενώ το 2019 αυτό υπολογίζεται σε **0,6-0,7%**.
- ❖ Ωστόσο τα MBR έχουν το δικό τους σημαντικό μερίδιο στην αγορά και αποτελούν πλέον μια ώριμη τεχνολογία

Πως μπορούν να αποκτήσουν τα MBR ανταγωνιστικό πλεονέκτημα?

- ❖ Αυστηρότερα όρια διάθεσης/επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων λυμάτων
- ❖ Ειδικές/καινοτόμες εφαρμογές
- ❖ Επιδοτήσεις
- ❖ Περαιτέρω μείωση του κόστους
 - ❖ Φθηνότερες μεμβράνες
 - ❖ Μείωση της έμφραξης
 - ❖ Μείωση του αερισμού

Αυστηρότερα όρια διάθεσης/επαναχρησιμοποίησης

- ❖ Παράδειγμα 1^ο: Λιμνοθάλασσα Βενετίας
 - ❖ Θέσπιση αυστηρών κριτηρίων για τη διάθεση αστικών και βιομηχανικών υγρών αποβλήτων
- ❖ Παράδειγμα 2^ο: Επαναχρησιμοποίηση υγρών αποβλήτων στον Ελλαδικό χώρο (ΚΥΑ 145447/2011) και διάθεση υγρών αποβλήτων στον Ασωπό ποταμό (ΚΥΑ 100079/2015)

Προστασία της λιμνοθάλασσας της Βενετίας



Λιμνοθάλασσα Βενετίας:

- ❖ Αποτελεί σημαντικό υγροβιότοπο της Μεσογείου και ένα ευαίσθητο οικοσύστημα
- ❖ Ιστορικό κέντρο της Βενετίας

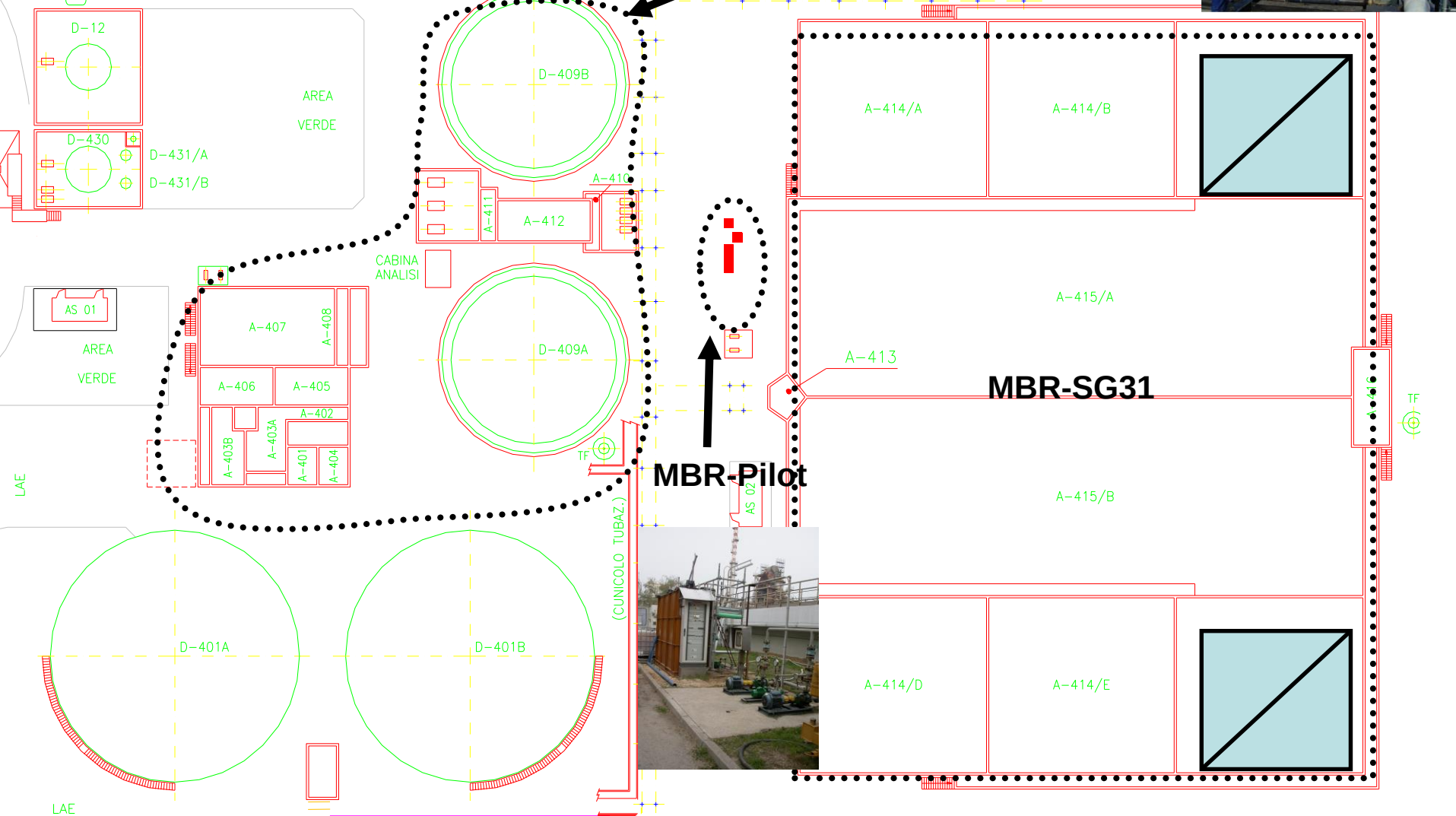
Στη λεκάνη απορροής:

- ❖ Λειτουργούν μεγάλες βιομηχανίες
- ❖ Υψηλή πυκνότητα πληθυσμού με πολλές εμπορικές δραστηριότητες
- ❖ Αυστηρά όρια για τα υγρά απόβλητα η διάθεση των οποίων πραγματοποιείται στη λιμνοθάλασσα

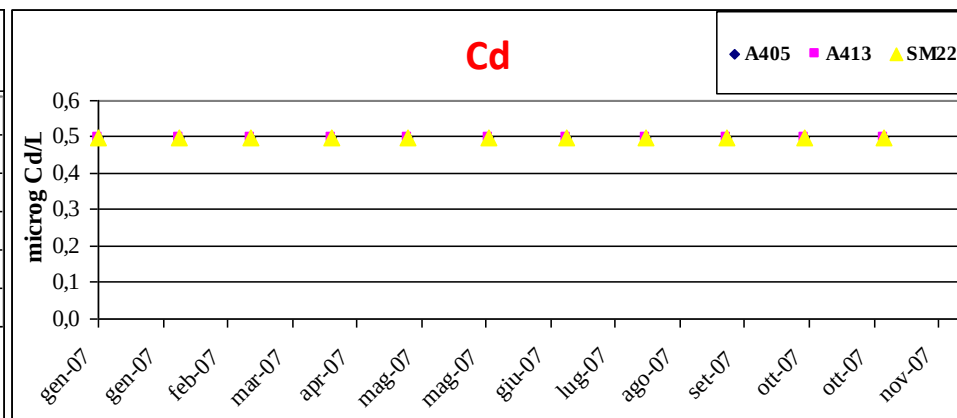
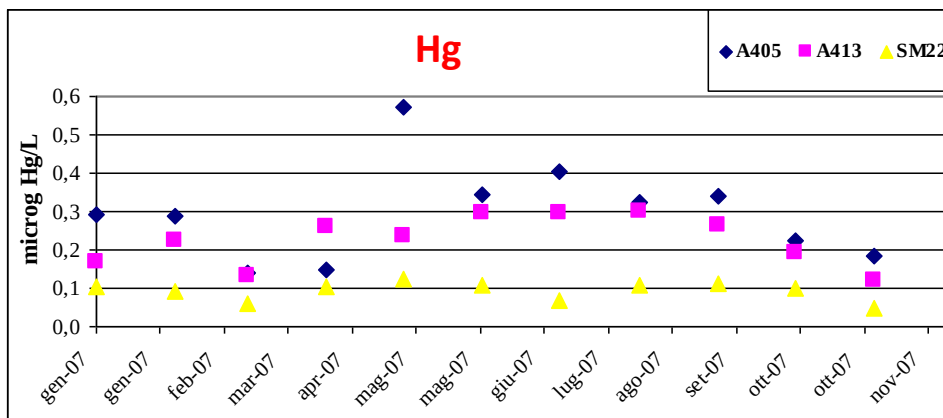
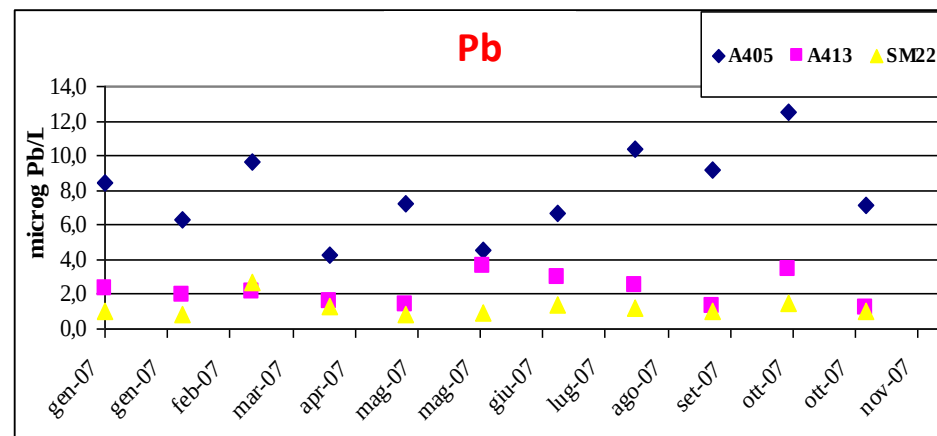
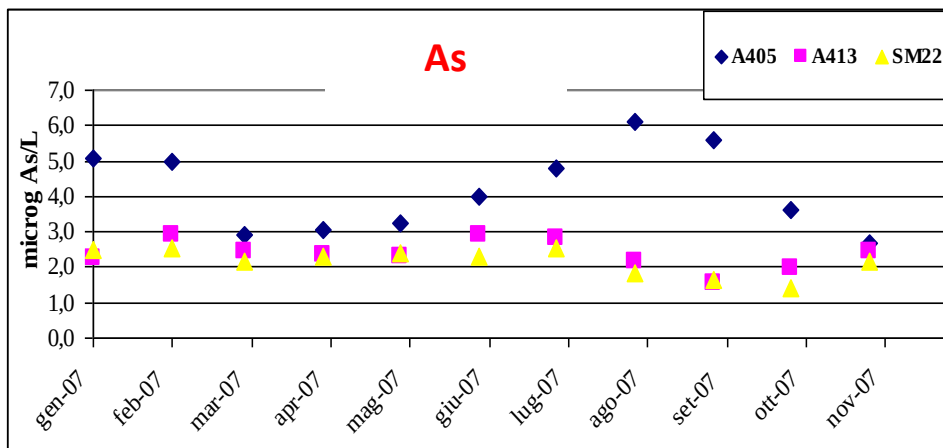
Η αυστηρή νομοθεσία υπήρξε οδηγός για την υιοθέτηση συστημάτων MBR



43 αποκεντρωμένα MBRs στο ιστορικό κέντρο και ένα μεγάλο βιομηχανικό MBR στη βιομηχανική περιοχή του Porto-Marghera ($Q_{\text{σχεδιασμού}} = 45720 \text{ m}^3/\text{d}$)



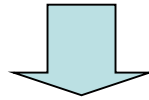
45 720 m³/d



Di Fabio et al., 2013
Malamis et al., 2015

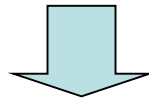
Μπορούν τα MBR να επιτύχουν υψηλότερη απομάκρυνση μικρορύπων σε σχέση με τα συστήματα EI;

1. Στα MBR δεν χρειάζεται η βιομάζα να έχει ευνοϊκά χαρακτηριστικά καθίζησης



Ευελιξία στη λειτουργία της εγκατάστασης (διατήρηση υψηλού χρόνου παραμονής στερεών) και δυνατότητα λειτουργίας με μικρές κροκίδες

2. Κατακράτηση όλων των αιωρούμενων στερεών από την επεξεργασμένη εκροή

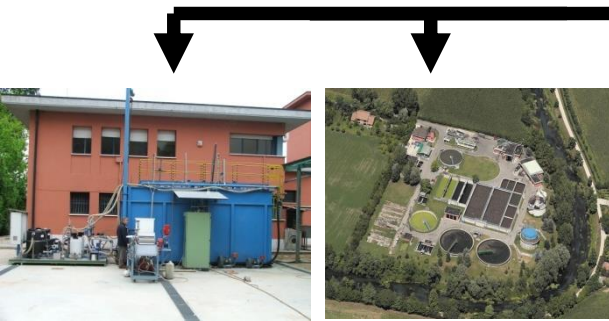


Πλήρης απομάκρυνση των ρύπων που βρίσκονται στη στερεή φάση



MBR και EI

Ίδιο SRT, 4 μήνες λειτουργία



μg/L		μg/L
2,0	As	2,5
0,6	Hg	8,6
13,5	Cu	56,4
9,5	Pb	10
3,9	Ni	2
6,9	Cr	2,4



Δ (MBR-CASP)

	MBR	EI
	Απομάκρυνση (%)	Απομάκρυνση (%)
Cu	95	79
Pb	74	62
Cr	75	66
Ni	86	79
Hg	95	98
As	20	9

	MBR	EI
	Απομάκρυνση (%)	Απομάκρυνση (%)
Cu	90	72
Cr	72	62
Ni	72	67
Pb	51	48
Hg	92	95

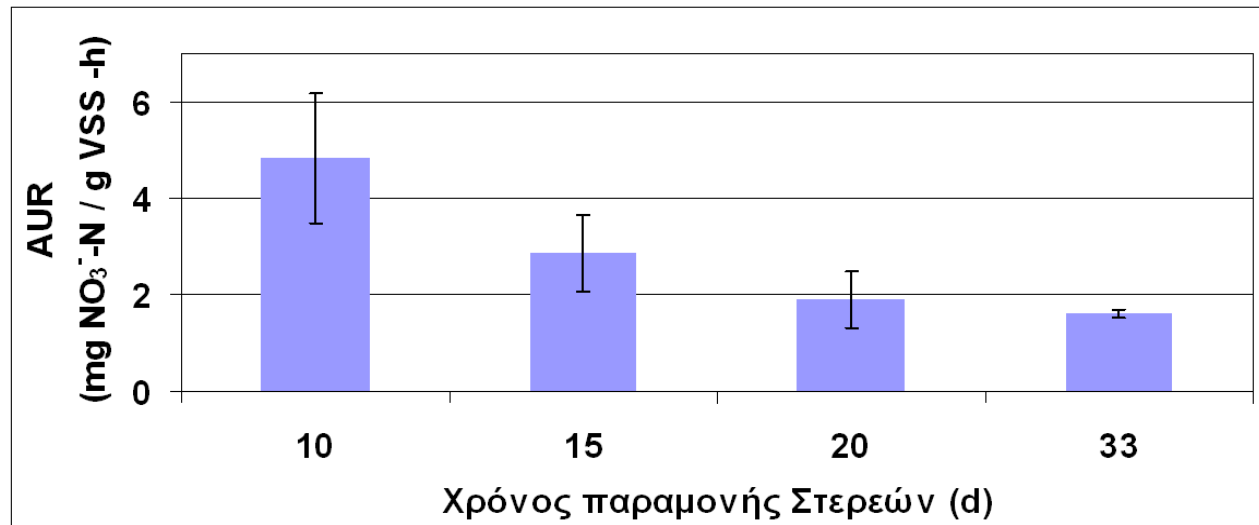
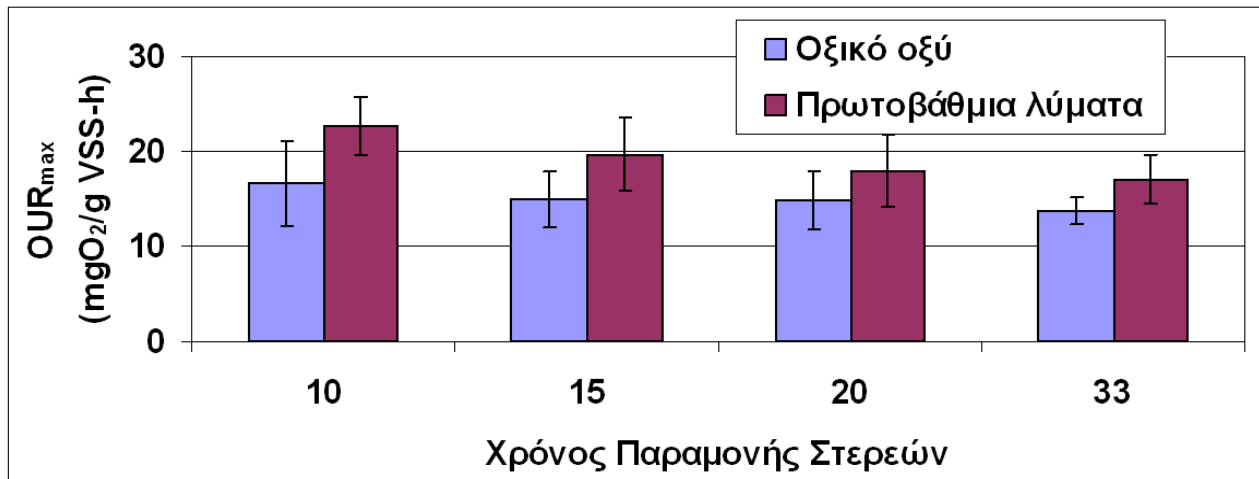
PAHs: MBR και EI



	MBR Απομάκρυνση (%)	EI Απομάκρυνση (%)
Naphthalene	72.9	66.5
Acenaphthylene	>81.5	>81.5
Acenaphthene	80.1	82.0
Fluorene	>80.0	>80.0
Fenanthrene	65.5	62.4
Anthracene	81.6	>86.8
Fluoranthene	65	>95.8
Pyrene	58	75.6
Chrysene	>78	>78.3

**Απομάκρυνση των PAHs σε εγκαταστάσεις EI
και MBRs ήταν παρόμοιες**

Το MBR αποτελεί σύστημα βιολογικής επεξεργασίας!



Επιτυγχάνει υψηλή δραστηριότητα βιομάζας **αλλά** όπως όλα τα βιολογικά συστήματα επεξεργασίας λυμάτων **δεν έχει σχεδιασθεί για την απομάκρυνση μικρορύπων**

Πιλοτικό MBR για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων κλωστοϋφαντουργίας σε βιομηχανία στον Ασωπό



Παράμετρος	Είσοδος	Έξοδος	Όριο (ΚΥΑ 100079/2015)
pH	8.05 ± 0.9	8.27 ± 0.06	6,5-8,5
TSS (mg/L)	196 ± 109	< 1	25
VSS (mg/L)	146 ± 101	-	
COD (mg/L)	2966 ± 438	179 ± 35	120
Soluble COD (mg/L)	1218 ± 351	179 ± 35	
BOD ₅ (mg/L)	655 ± 247	14.1 ± 5.6	25
TP (mg/L)	2.9 ± 1.3	1.96 ± 1.38	5
PO ₄ -P (mg P/L)	1.73 ± 1.3	0.23 ± 0.42	
NH ₄ -N (mg N/L)	2.24 ± 1.00	1.81 ± 0.78	4
NO ₃ -N (mg N/L)	2.08 ± 1.47	6.48 ± 0.38	11
N (mg N/L)	32.1 ± 18.5	11.8 ± 3.8	15

Ποιότητα τελικής εκροής,
Damala et al., 2015



Τα όρια για την επαναχρησιμοποίηση υγρών αποβλήτων στην Ελλάδα μπορούν να δώσουν ώθηση στα συστήματα MBR

Παράμετρος	Απεριόριστη άρδευση και βιομηχανικές εφαρμογές	Αστική χρήση, περιαστικό πράσινο, εμπλουτισμός υπόγειου υδροφορέα
E. Coli (EC/100 mL)	≤ 5 για το 80% των δειγμάτων ≤ 50 για το 95% των δειγμάτων	-
T. Coli (TC/100 mL)	-	≤ 2 για το 80% των δειγμάτων ≤ 20 για το 95% των δειγμάτων
BOD ₅ (mg/L)	≤ 10 για το 80% των δειγμάτων	≤ 10 για το 80% των δειγμάτων
Θολότητα (NTU)	≤ 2 μέσο	≤ 2 μέσο
TSS (mg/L)	≤ 10 για το 80% των δειγμάτων	≤ 2 για το 80% των δειγμάτων
Απαιτούμενη ελάχιστη επεξεργασία	Βιολογική επεξεργασία, τριτοβάθμια (διύλιση) + απολύμανση	Βιολογική επεξεργασία, προχωρημένη επεξεργασία (π.χ. υπερδιύλιση) + απολύμανση

MBR

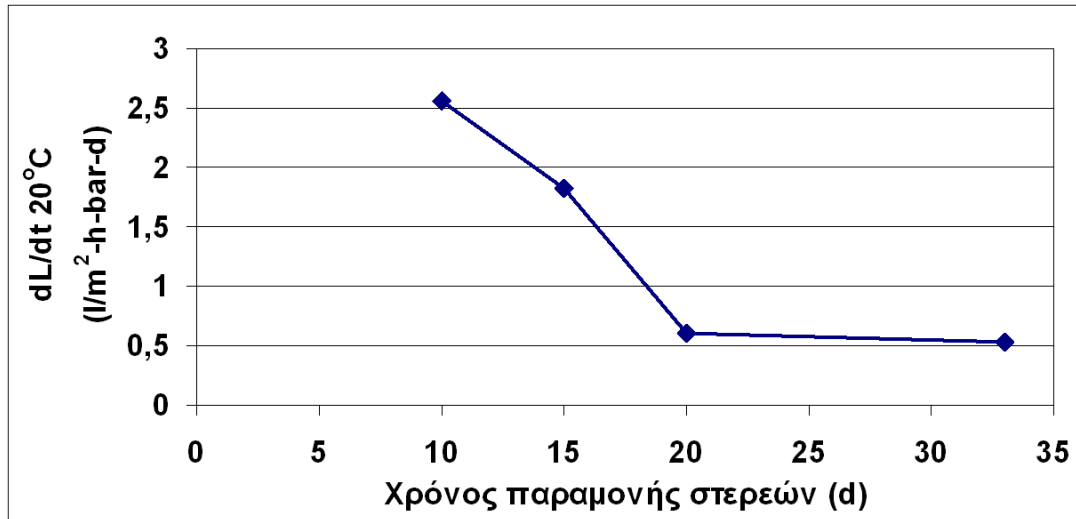


Απολύμανση σε εκροή από MBR

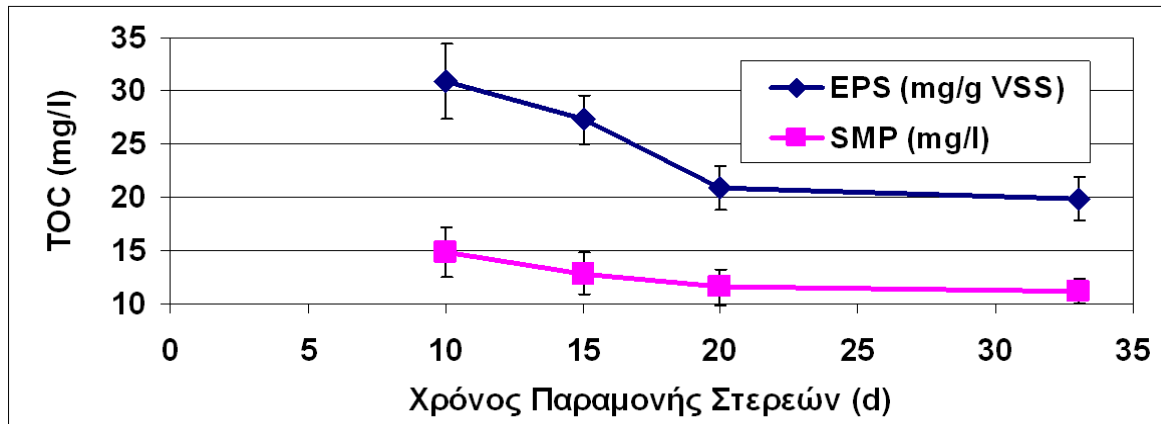
Ποσοστό δειγμάτων (%)	UV Δόση (mW·sec/cm ²)	0	3	5	10	20	30	40
50	TC/100 mL	475	76	48	17	3	0	0
80	TC/100 mL	820	140	92	44	6	0	0
95	TC/100 mL	2050	480	360	200	84	16	4
Ποσοστό δειγμάτων (%)	Δόση Cl ₂ (mg·min/L)	0	5	10	25	50	75	100
50	TC/100 mL	530	190	12	0	0	0	0
80	TC/100 mL	1410	605	180	23	1	0	0
95	TC/100 mL	2900	800	420	45	6	0	0

- Δόσεις **30 mW sec/cm²** και **50 mg·min/L** ικανοποιούν τα όρια των 2 TC/100 mL για το 80% των δειγμάτων και 20 TC/100 mL για το 95% των δειγμάτων.
- Δευτεροβάθμια εκροή από σύστημα EI δεν πληρεί τα όρια ακόμη και για δόσεις μέχρι **600 mg·min/L**

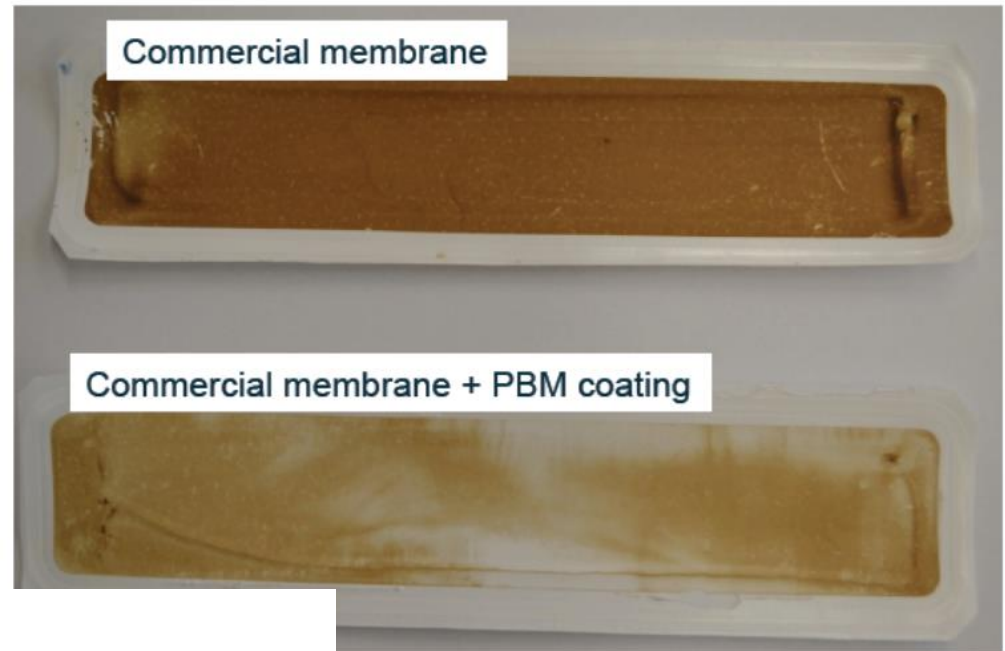
Μείωση λειτουργικού κόστους



- ❖ Προσαρμογή λειτουργικών συνθηκών για τη μείωση των εξωκυτταρικών πολυμερών
- ❖ Διακοπτόμενος αερισμός χονδρής φυσαλίδας



Καινοτόμες μεμβράνες για MBR - BioNexGen

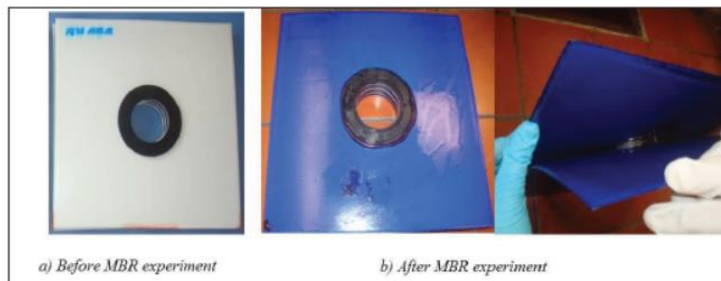


Commercial module



Δημιουργία στρώματος από νανουλικά

PBM coated module



Ειδικές/καινοτόμες εφαρμογές

- ❖ Αναερόβιο MBR
- ❖ Συνδυασμένο αναερόβιο σύστημα upflow anaerobic sludge blanket (UASB) με αερόβιο/ανοξικό MBR
- ❖ MBR με αντιδραστήρα διαλείποντος έργου (SBR) για επεξεργασία στραγγιδίων με διεργασίες νιτρωδοποίησης/απονιτροδωποίησης και αυτοτροφικής απομάκρυνσης αζώτου (μερική νιτρωδοποίηση / αναερόβια οξείδωση αμμωνιακών)
- ❖ Εφαρμογές προσκολλημένης βιομάζας
 - ❖ Membrane aerated biofilm reactor (MABR)
 - ❖ Moving bed biofilm reactor (MBBR)-MBR
- ❖ Εφαρμογές MBR σε κοκκώδη βιομάζα



Αναερόβια MBR για επεξεργασία υγρών αποβλήτων

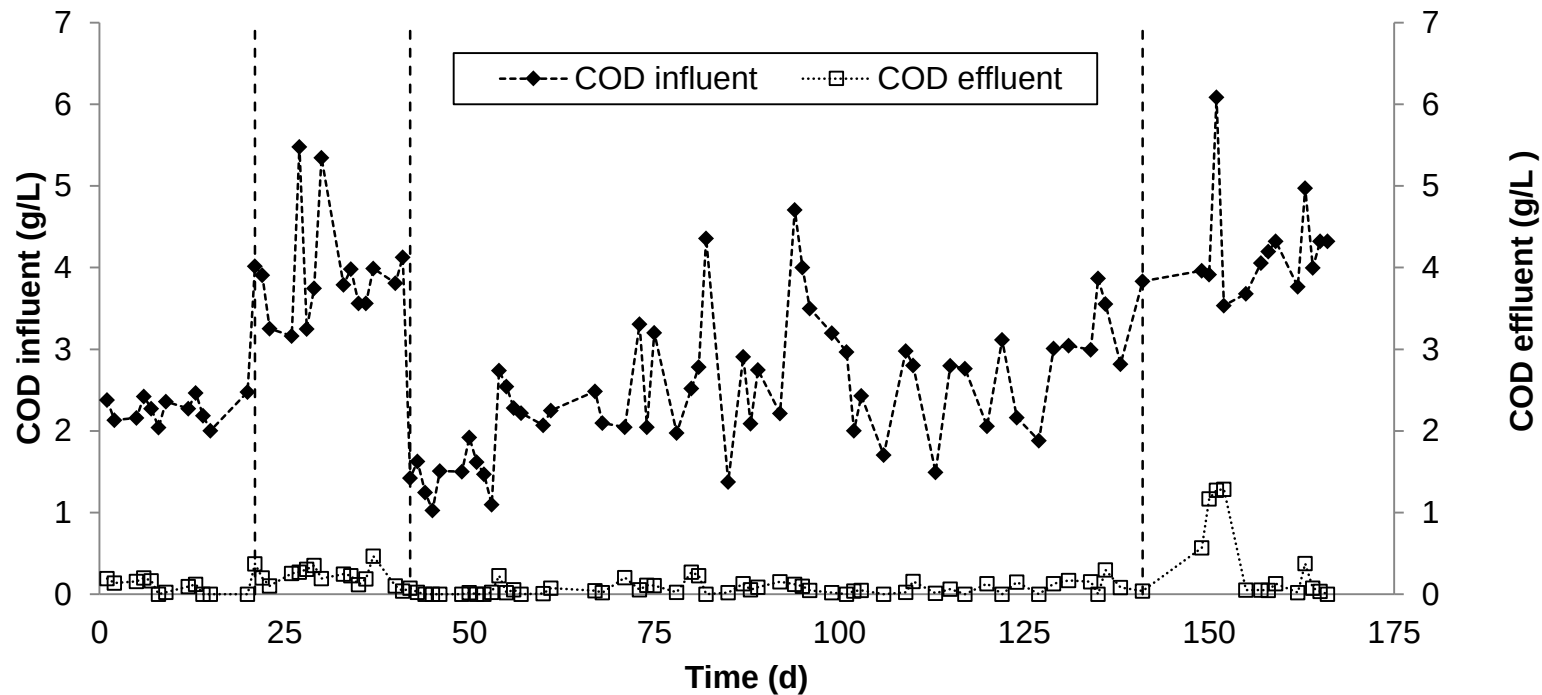
Ανάκτηση ενέργειας

1 kg COD παράγει 0.35 m³ CH₄ (STP) που αντιστοιχεί σε 3.7 kWh

1 m³ βιοαέριο = 2.2 kWh (35% απόδοση, 60% μεθάνιο)

Απόβλητα	Βιβλιογραφία	T (°C)	Configuration	OLR (kg / (m ³ d))	HRT (d)	SRT (d)	Απόδοση (%)
Σφαγείων	Saddoud and Sayadi, 2007	37	External MBR	8,23 ± 2,5 (COD)	1,66	-	94 ± 2 (COD _s)
Σφαγείων	Saddoud and Sayadi, 2007	37	External MBR	12,7 ± 1,7(COD)	1,25	-	98,8 ± 0,4 (COD _s)
Κοπριά χοίρων	Padmasiri et al., 2007	37	External MBR (tubular)	1 (VS)	6	-	96 (COD _t)
Κοπριά αγελάδας	Wong et al., 2009	33	External MBR (tubular)	3,3 (VS)	9	28	92 ± 2 (COD) 81,7 ± 5,3 (TS)
Τυρόγαλα	Saddoud et al., 2007	37	External MBR	19.8 (COD)	4	30-79	98.5
Ελαιοτριβείο	Stamatelatou et al., 2009	35	External MBR tubular		16.7 h		95% (COD)
Φαγητά	He et al., 2005	37	External MBR	4.5 (COD)			

Αναερόβιο MBR για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων από οиноποιείο



Παράμετρος

Τιμή

Εισερχόμενο COD (g/L)

1.0 - 6.0

Εξερχόμενο COD (mg/L)

4 – 128

HRT (d)

2.2 ± 0.5

VSS αντιδραστήρα (g/L)

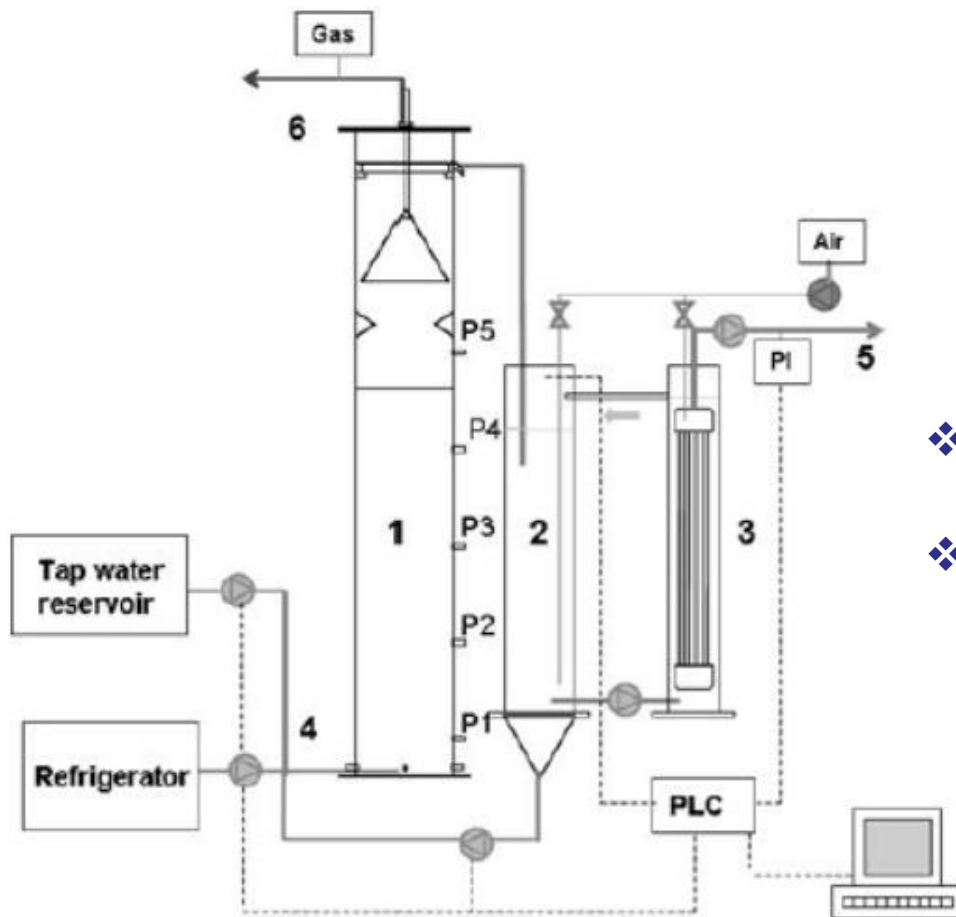
5.7 ± 1.3

sOLR (kgCOD/gVSS d)

0.24 ± 0.1

University of Barcelona
Basset et al., 2015

Συνδυασμένο σύστημα UASB-SBR για αστικά και βιομηχανικά υγρά απόβλητα

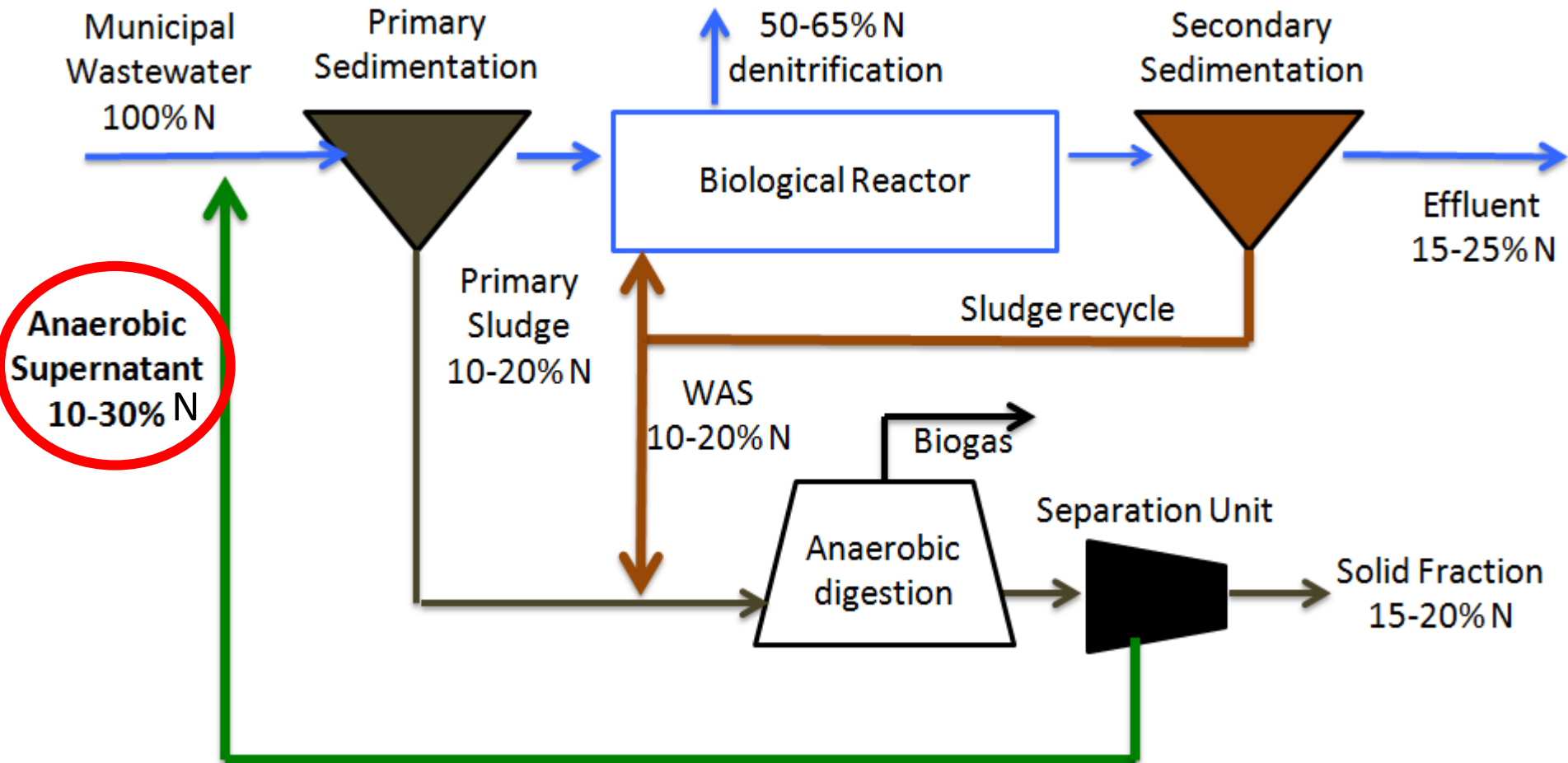


1. Σύστημα UASB
2. Ανοξικός/αερόβιος αντιδραστήρας
3. Αντιδραστήρας MBR

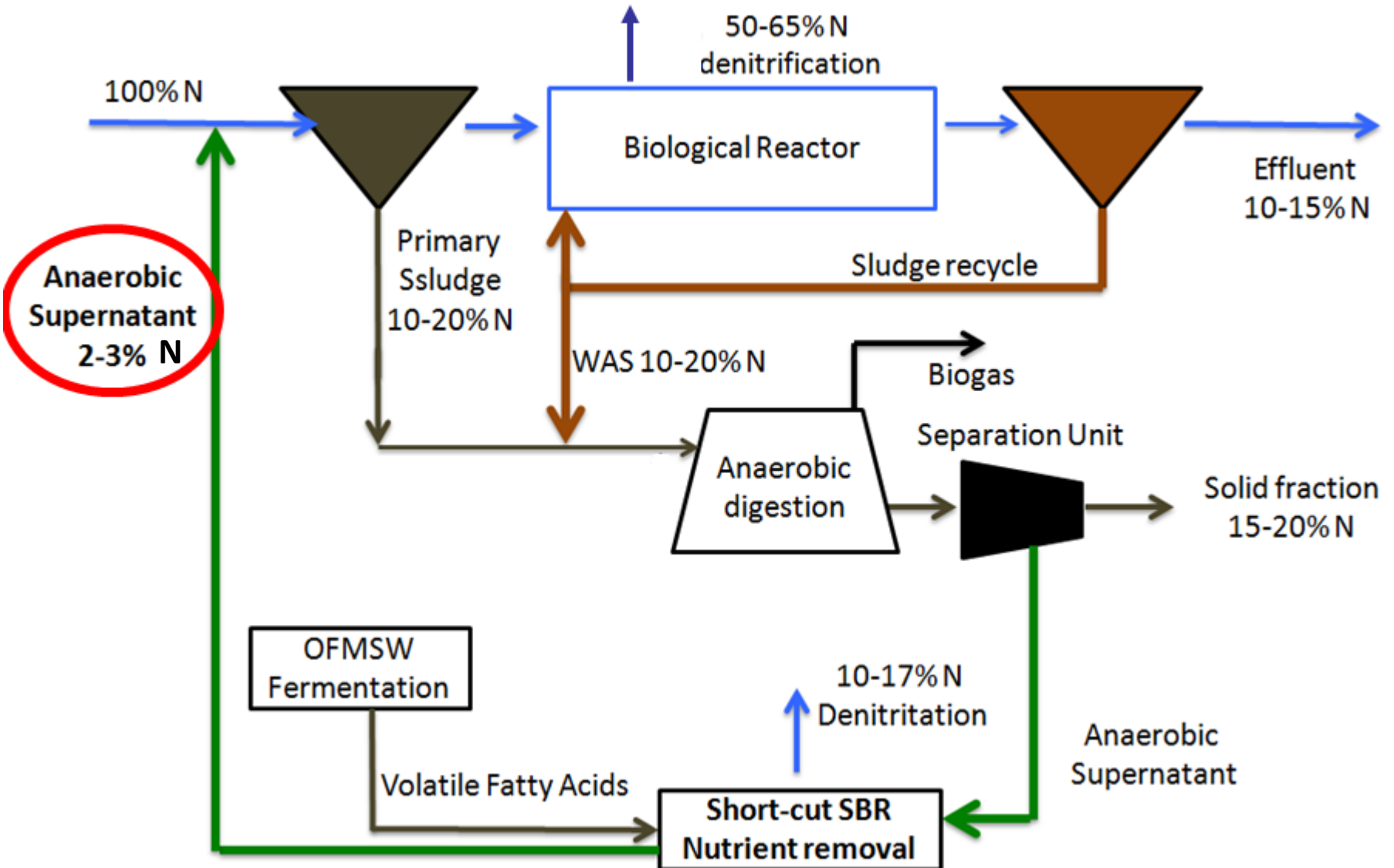
Πρότυπο σύστημα UASB-MBR
University of Santiago de Compostela
Buntner, 2013

- ❖ MBR λύνει το πρόβλημα της μετεπεξεργασίας των εκροών από UASB
- ❖ Εκμετάλλευση διαλυμένου μεθανίου για απονιτροποίηση

Συμβατική ΕΕΛ

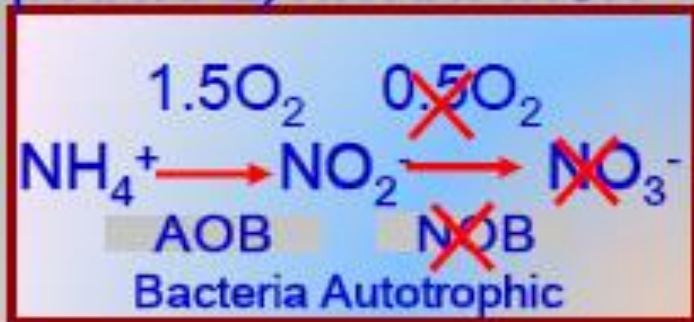


Αναβάθμιση βιολογικού με τη χωριστή επεξεργασία των στραγγιδίων



Απομάκρυνση αζώτου μέσω νιτρωδών

(PARTIAL) NITRITATION



DENITRIFICATION

$$1,71/(1-Y_H) \text{ mgCOD/mgN}$$



Bacteria Heterotrophic

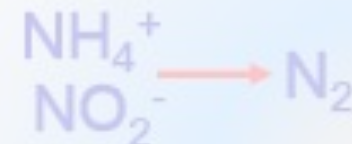
Νιτρωδοποίηση / απονιτρωδοποίηση

AOB=Ammonium oxidizing bacteria

NOB=Nitrite oxidizing bacteria

Απονιτροποιητές

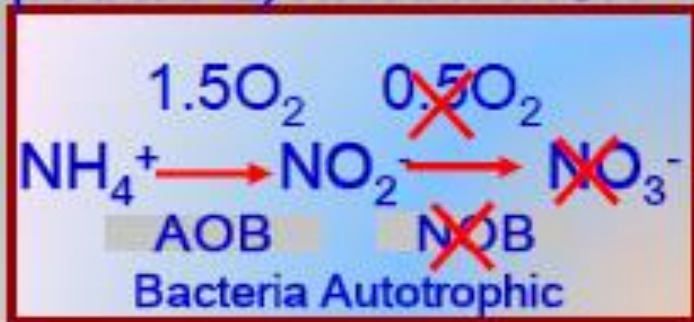
ANAMMOX



Bacteria Autotrophic

Απομάκρυνση αζώτου μέσω νιτρωδών

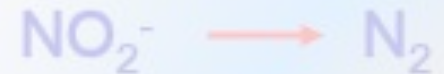
(PARTIAL) NITRITATION



Μερική νιτρωδοποίηση /
αναερόβια οξείδωση αμμωνιακών
AOB=Ammonium oxidizing bacteria
anammox

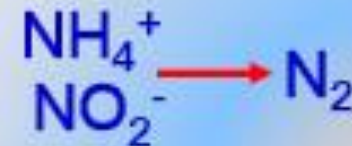
DENITRIFICATION

$1,71/(1-Y_H)$ mgCOD/mgN



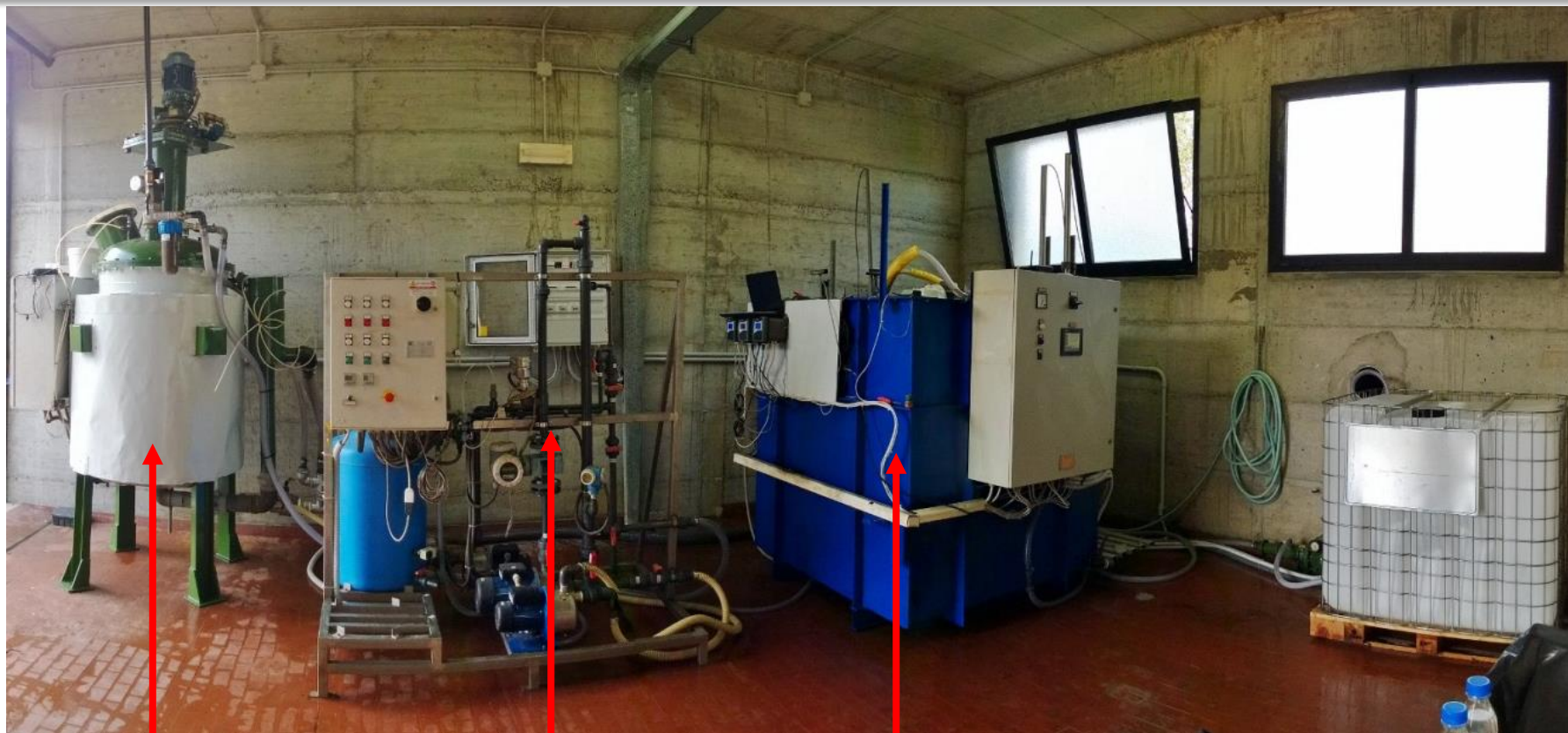
Bacteria Heterotrophic

ANAMMOX



Bacteria Autotrophic

Καινοτόμο σύστημα επεξεργασίας στραγγιδίων βιολογικών



Υδρόλυση/Ζύμωση
ιλύος

Διαχωρισμός
Στερεού/υγρού
ζυμωμένης ιλύος με
υπερδιύλιση

Σύστημα SBR για
επεξεργασία
στραγγιδίων μέσω
νιτροδωποίησης/
απονιτροδωποίησης

Ενσωμάτωση MBR σε SBR λύνει
προβλήματα καθίζησης

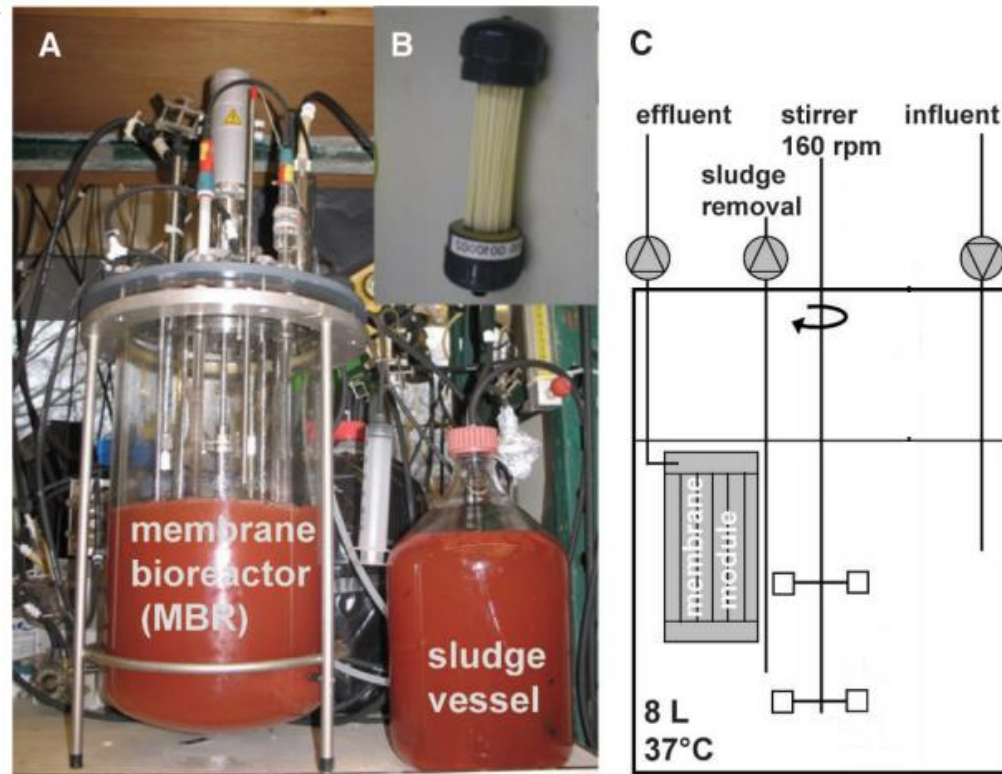


The Membrane Bioreactor: A Novel Tool to Grow Anammox Bacteria as Free Cells

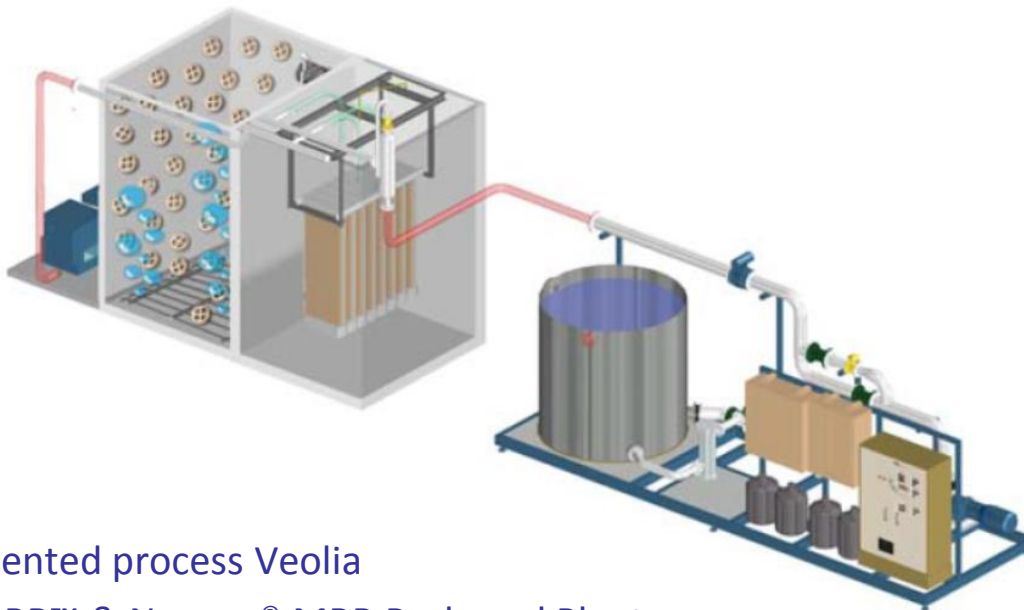
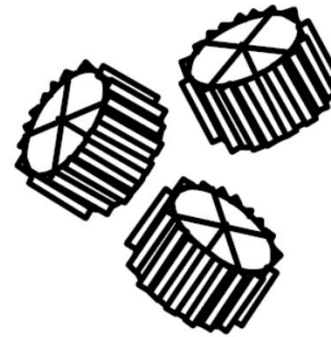
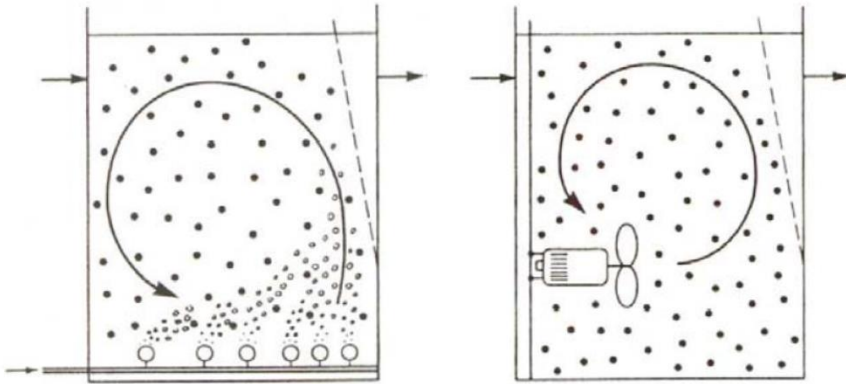
Wouter R.L. van der Star,¹ Andreea I. Miclea,^{1,2} Udo G.J.M. van Dongen,¹
Gerard Muyzer,¹ Cristian Picioreanu,¹ Mark C.M. van Loosdrecht¹

¹Department of Biotechnology, Delft University of Technology, Jul
2628BC Delft, The Netherlands; telephone: +31-15-2781618; fax:
e-mail: m.c.m.vanloosdrecht@tudelft.nl

- ❖ Τα anammox είναι πολύ αργά αναπτυσσόμενα βακτήρια (χρόνος διπλασιασμού = 11 ημέρες σε 32-33°C)
- ❖ Η απόλυση κατακράτηση στερεών που επιτυγχάνει το MBR είναι ευνοϊκή για την ανάπτυξή τους

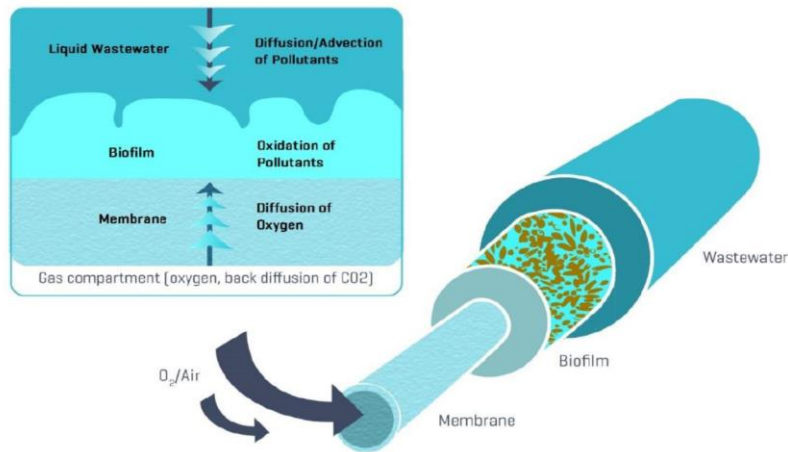


Συνδυασμένο σύστημα moving bed biofilm reactor MBBR-MBR

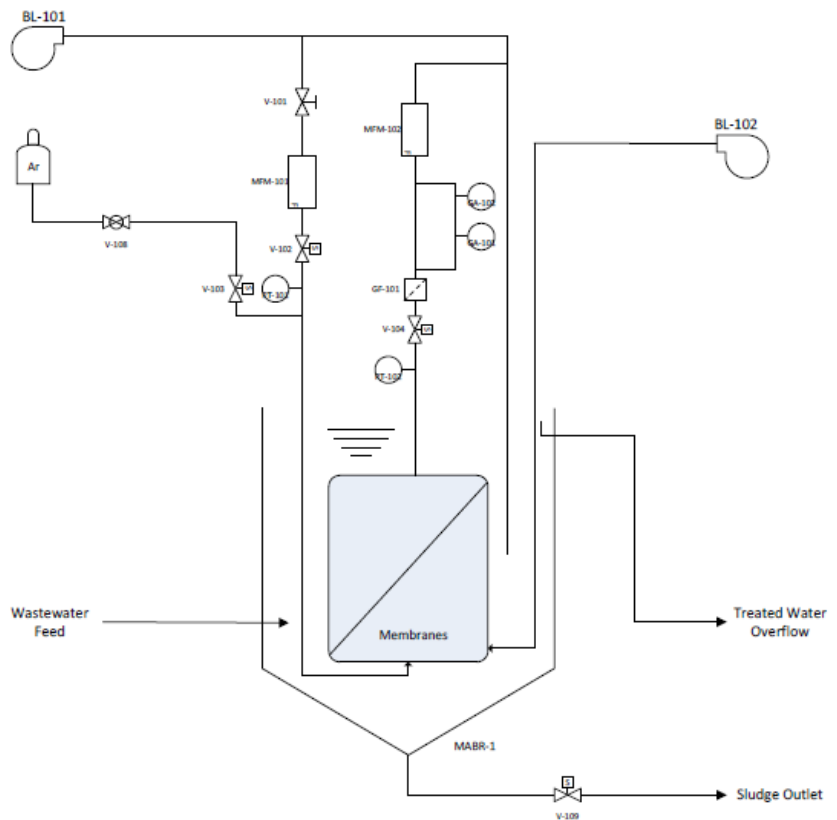


Patented process Veolia
MBBR™ & Neosep® MBR Packaged Plant

Σύστημα προσκολλημένης αεριζόμενης βιομάζας MABR

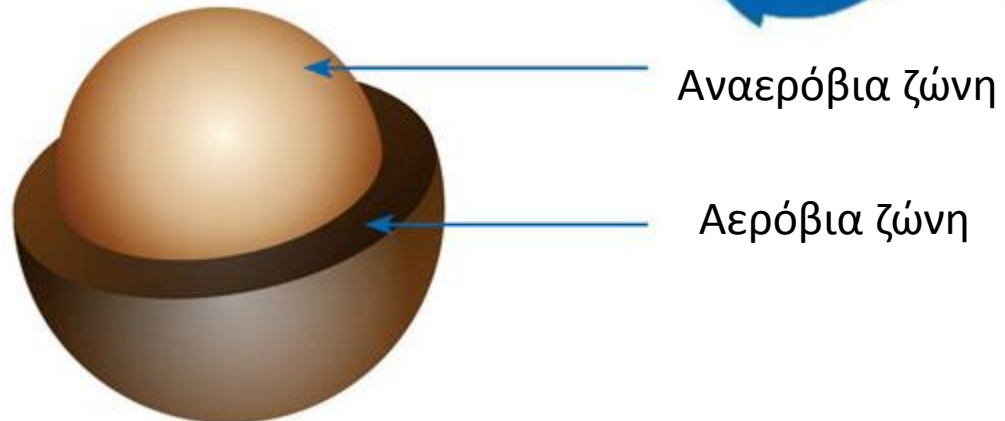
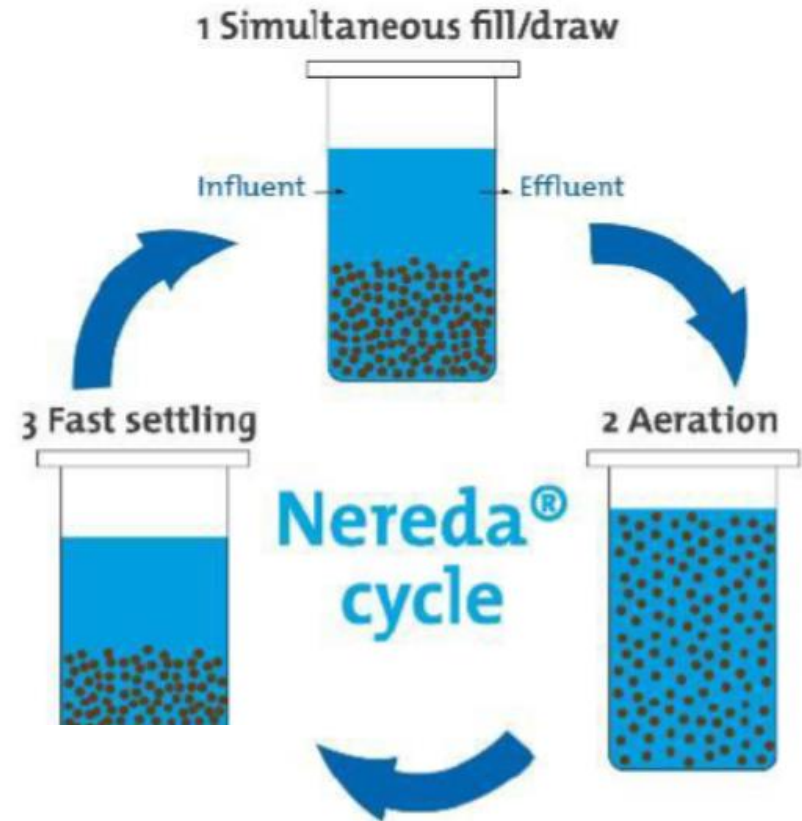


- ❖ Βιοφίλμ αναπτύσσεται πάνω στην επιφάνεια των μεμβρανών
- ❖ Πραγματοποιείται διάχυση του αέρα μέσα από τις μεμβράνες
- ❖ Πολύ αποδοτική διάχυση οξυγόνου στη βιομάζα
- ❖ **ΟΤΕ > 80%!**
- ❖ Καλή επιλογή για δύσκολα βιομηχανικά υγρά απόβλητα



Σύστημα αερόβιας κοκκώδους βιομάζας

- ❖ Πολύ καλή καθίζηση ακόμη και σε MLSS = 15g/L
- ❖ Βασικό μειονέκτημα σε αυτές τις διεργασίες είναι η ανάπτυξη της κοκκώδους βιομάζας
- ❖ Η προσθήκη μεμβρανών στο σύστημα δυσχαιρένει την επιλογή της κοκκώδους βιομάζας σε σχέση με τις κροκίδες καθώς συγκρατούνται πλήρως οι μικροκροκίδες



13th Specialized Conference on Small Water and Wastewater Systems (SWWS_13) & 5th Specialized Conference on Resources-Oriented Sanitation (ROS_5)

Οργανωτές



Εθνικό Μετσόβιο
Πολυτεχνείο



Ελληνικός Υδατικός
Σύνδεσμος

Αθήνα, 15-17 Ιουνίου 2016

**Σας ευχαριστώ για
την προσοχή σας**

