

# Ειδικά Συστήματα Ελέγχου Πλοίου 2017

## Συστήματα Μείωσης Ρύπων Μέρος Α

Γ. Παπαλάμπρου

ΣΝΜΜ-ΕΜΠ

2/5/2017

# Περιεχόμενα Μέρους Α

1. Μέθοδοι μείωσης ρύπων σε κινητήρες Diesel
2. SCR: αρχή λειτουργίας
3. EGR: αρχή λειτουργίας
4. Scrubber: αρχή λειτουργίας
5. Αισθητήρια PM, NOx

# Περιεχόμενα Μέρους Β

1. Μαθηματικά μοντέλα
2. Σχεδιασμός ελεγκτών
3. Homework HW4

# Μέρος Α

1. Μέθοδοι μείωσης ρύπων σε κινητήρες Diesel
2. SCR: αρχή λειτουργίας
3. EGR: αρχή λειτουργίας
4. Scrubber: αρχή λειτουργίας
5. Αισθητήρια PM, NOx

# 1. Μέθοδοι μείωσης ρύπων σε κινητήρες Diesel

- Βασικές μέθοδοι μείωσης ρύπων σε κινητήρες Diesel:
  - Φίλτρα Σωματιδίων (Diesel Particulate Filter-DPF)
  - Επιλεκτική Καταλυτική Μείωση (Selective Catalytic Reduction-SCR)
  - Ανακυκλοφορία καυσαερίων (Exhaust Gas Recirculation-EGR)
  - Πλυντηρίδες (Scrubbers) (Αφαίρεση SO<sub>x</sub>)

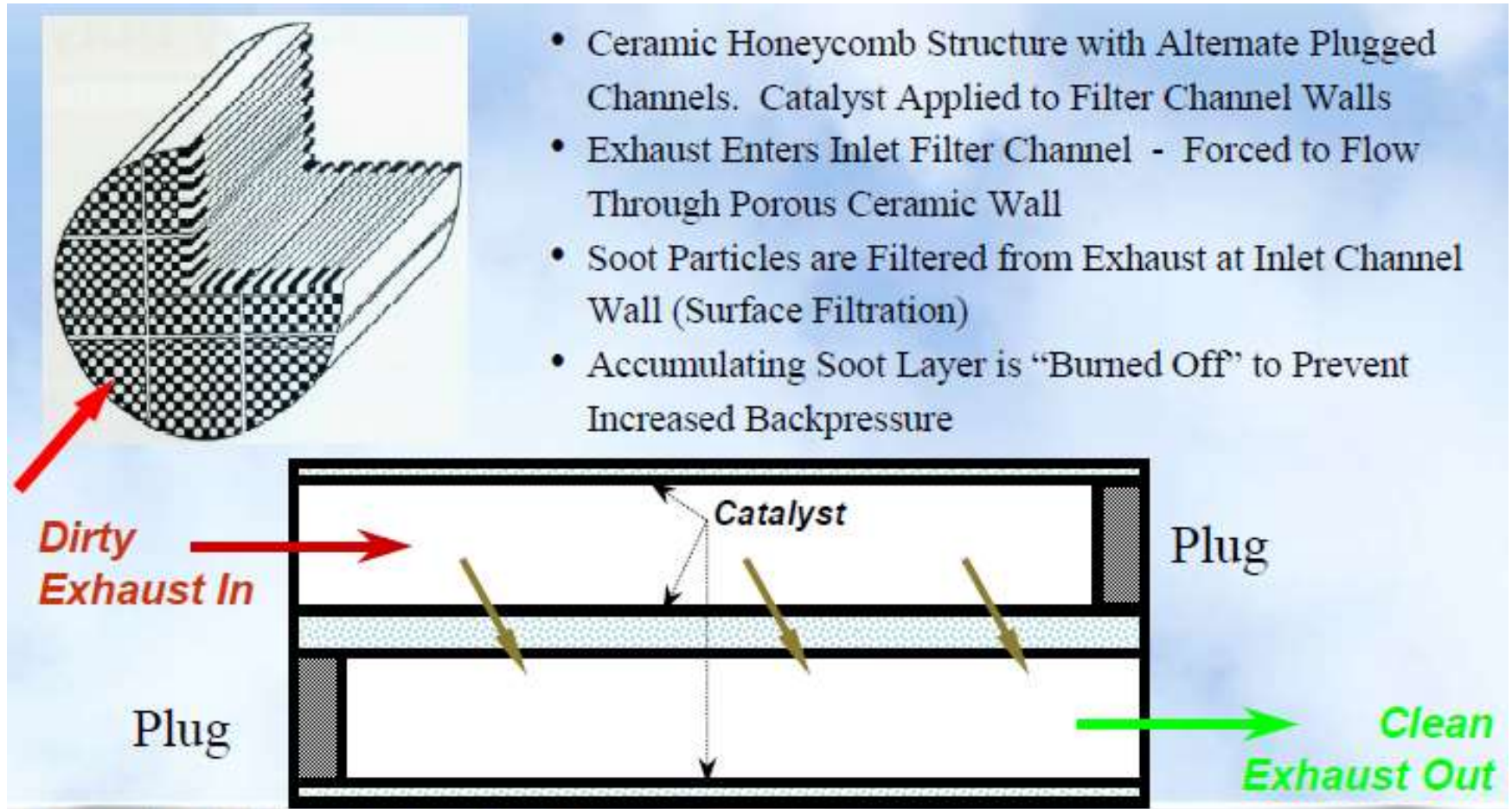
# Φίλτρα Σωματιδίων (DPF)



- Πορώδες υλικό φίλτρου που επιτρέπει ροή καυσαερίων ενώ συλλέγει τα σωματίδια
- Πλεονεκτήματα:
  - Μεγάλη μείωση σωματιδίων
- Μειονεκτήματα:
  - Κόστος
  - Απαιτεί καθαρισμό με αναγέννηση (regeneration)

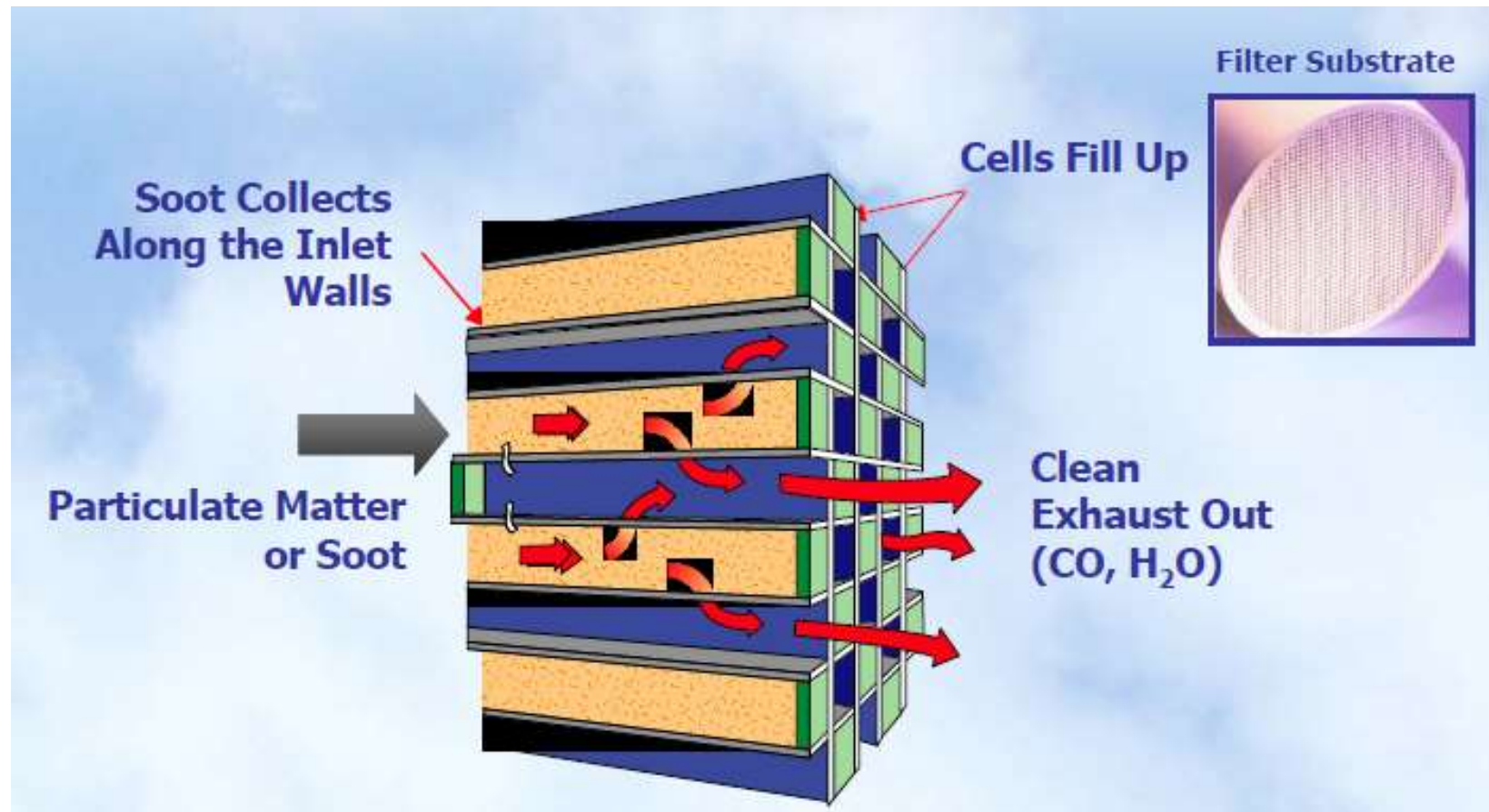
# Φίλτρα Σωματιδίων (DPF)

- Παθητικά στοιχεία φίλτρου-1/2



# Φίλτρα Σωματιδίων (DPF)

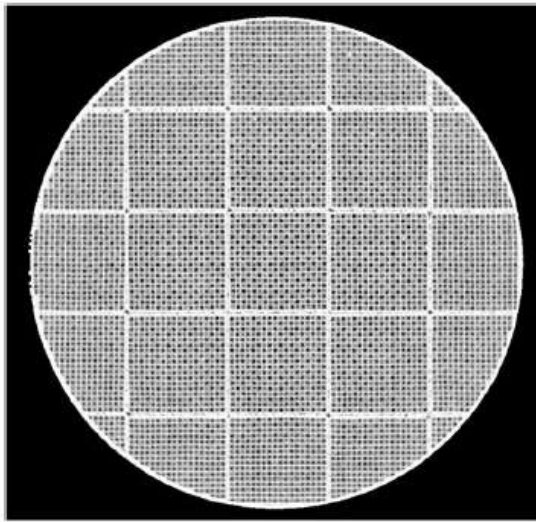
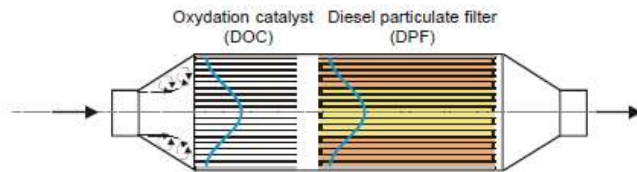
- Παθητικά στοιχεία φίλτρου-2/2





# Φίλτρα Σωματιδίων (DPF)

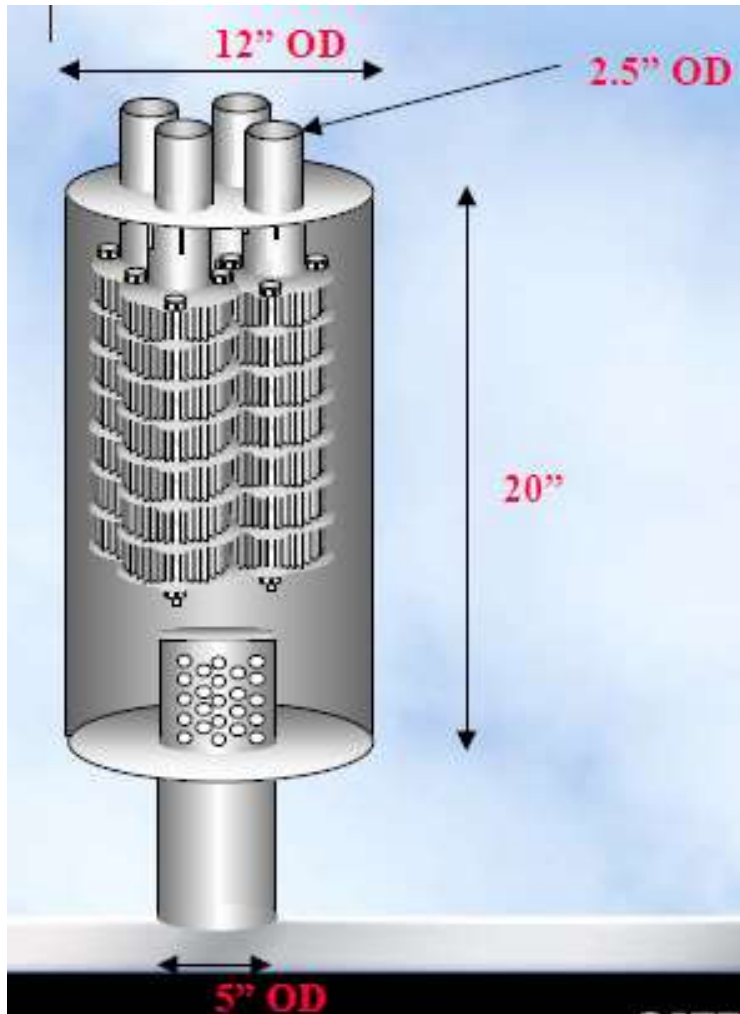
DPF: SiC, uncoated and segmented (no monolith)



SiC: silicon carbide filter

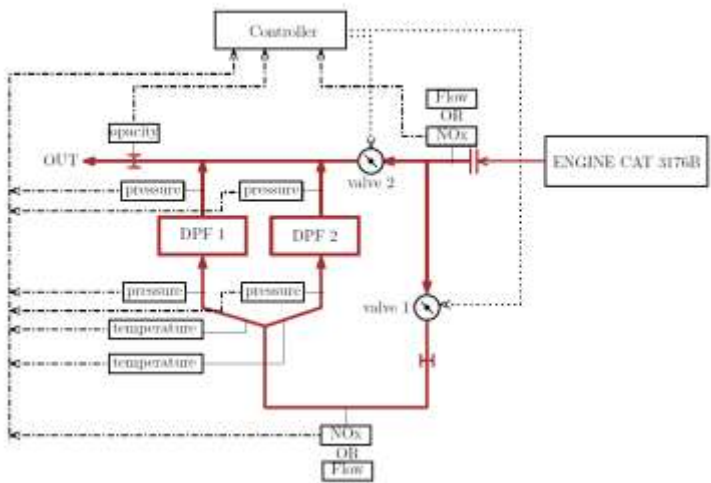
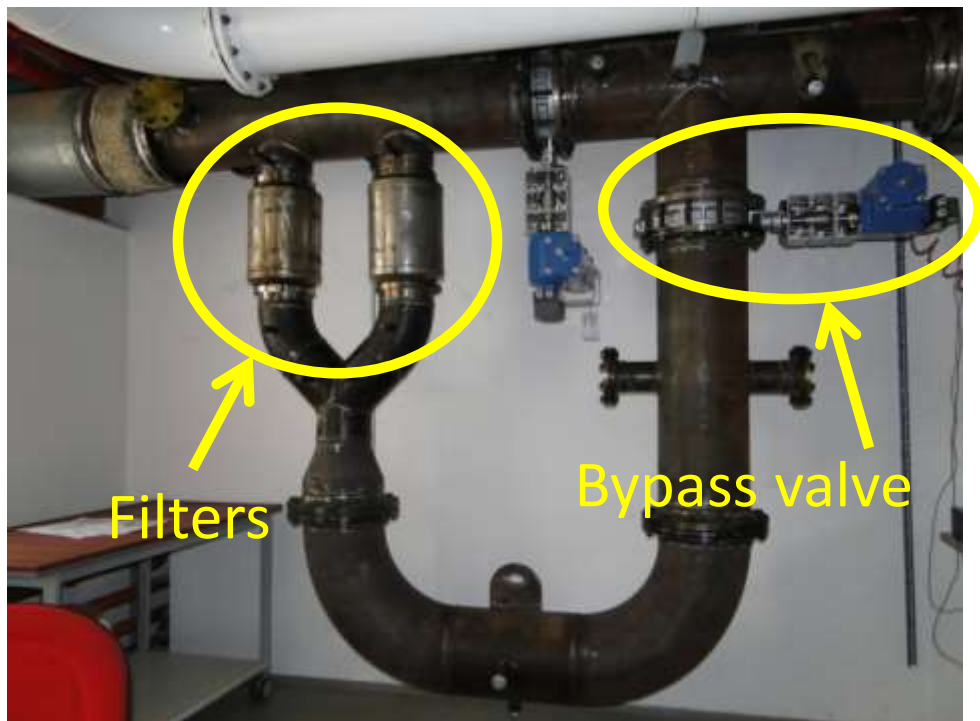
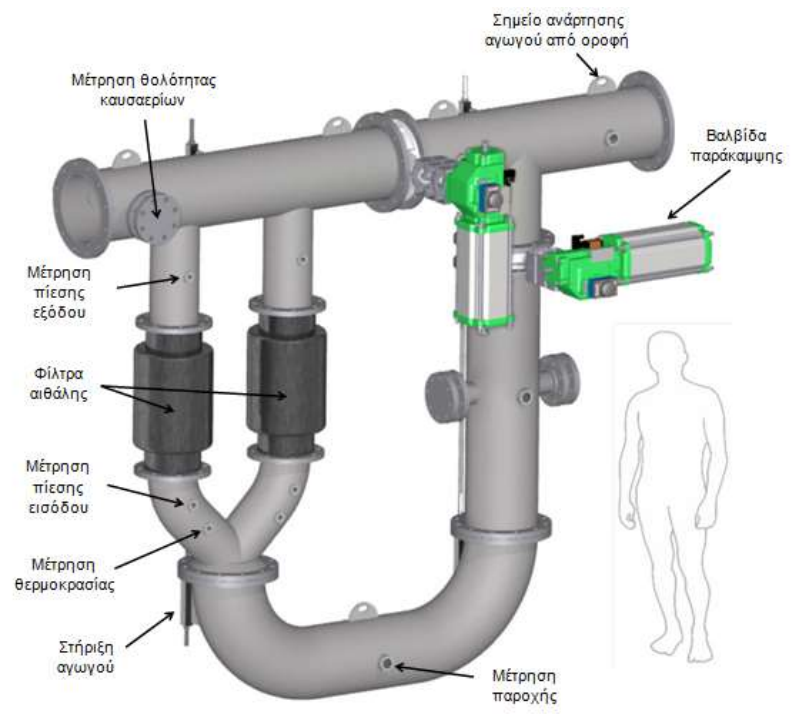
# Φίλτρα Σωματιδίων (DPF)

- Ενεργητικά στοιχεία φίλτρου



- Μεταλλικό υλικό φίλτρου που συλλέγει τα σωματίδια
- Καθαρισμός με ηλεκτρική αναγέννηση ή με καύση (τοπικός καυστήρας με diesel)

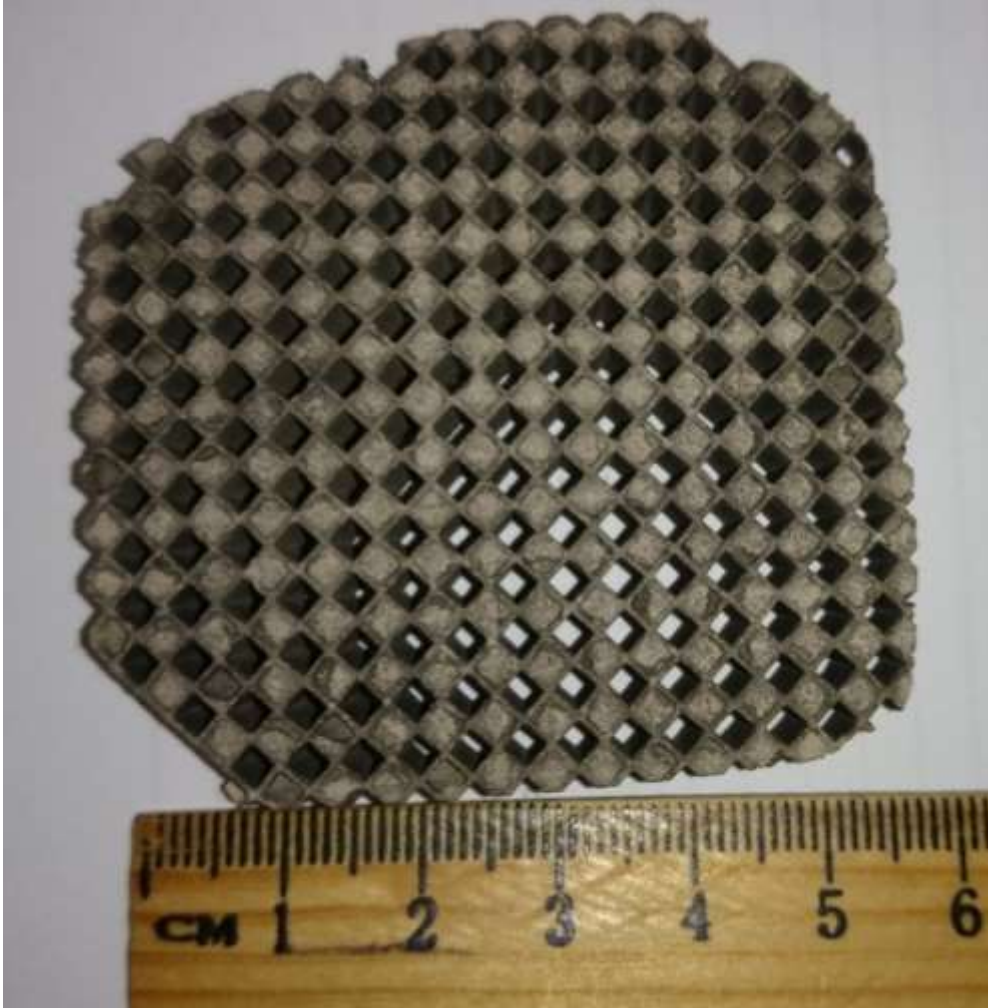
# Μονάδα Παράκαμψης Καυσαερίων στο ENM



**Στόχος:**  
 διερεύνηση απομάκρυνσης μαύρου καπνού μέσω φίλτρων σε μεταβατική λειτουργία, με χρήση βαλβίδων

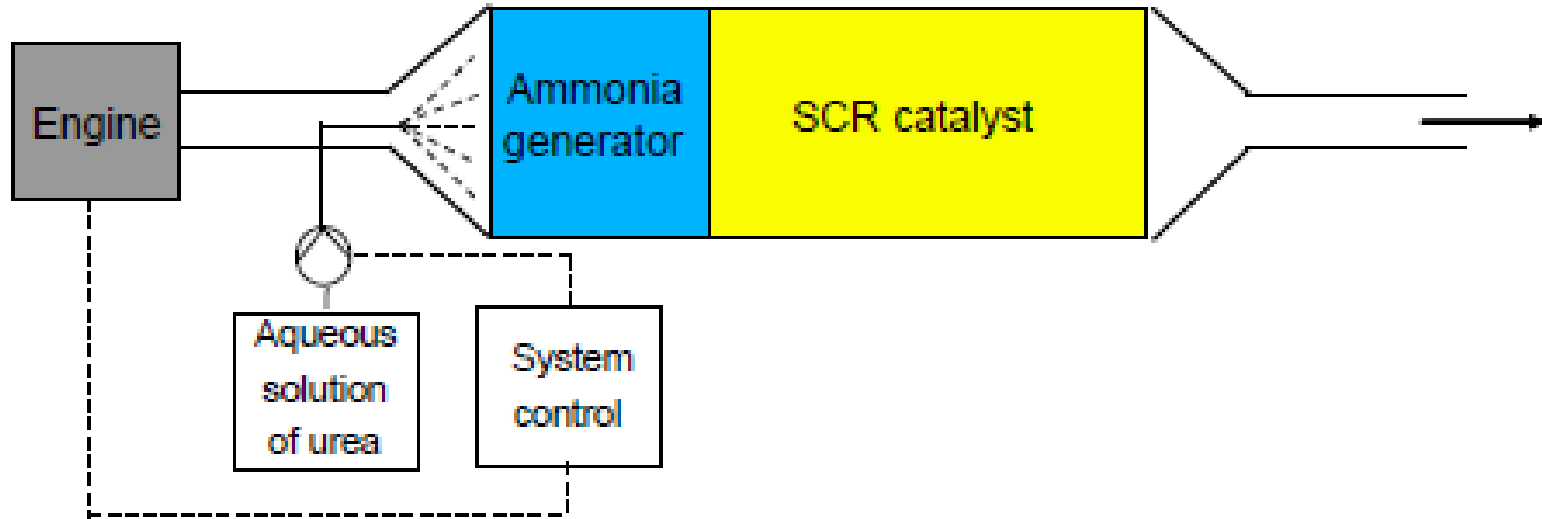
# Φίλτρα Σωματιδίων (DPF)

- Στοιχείο φίλτρου στο ENM



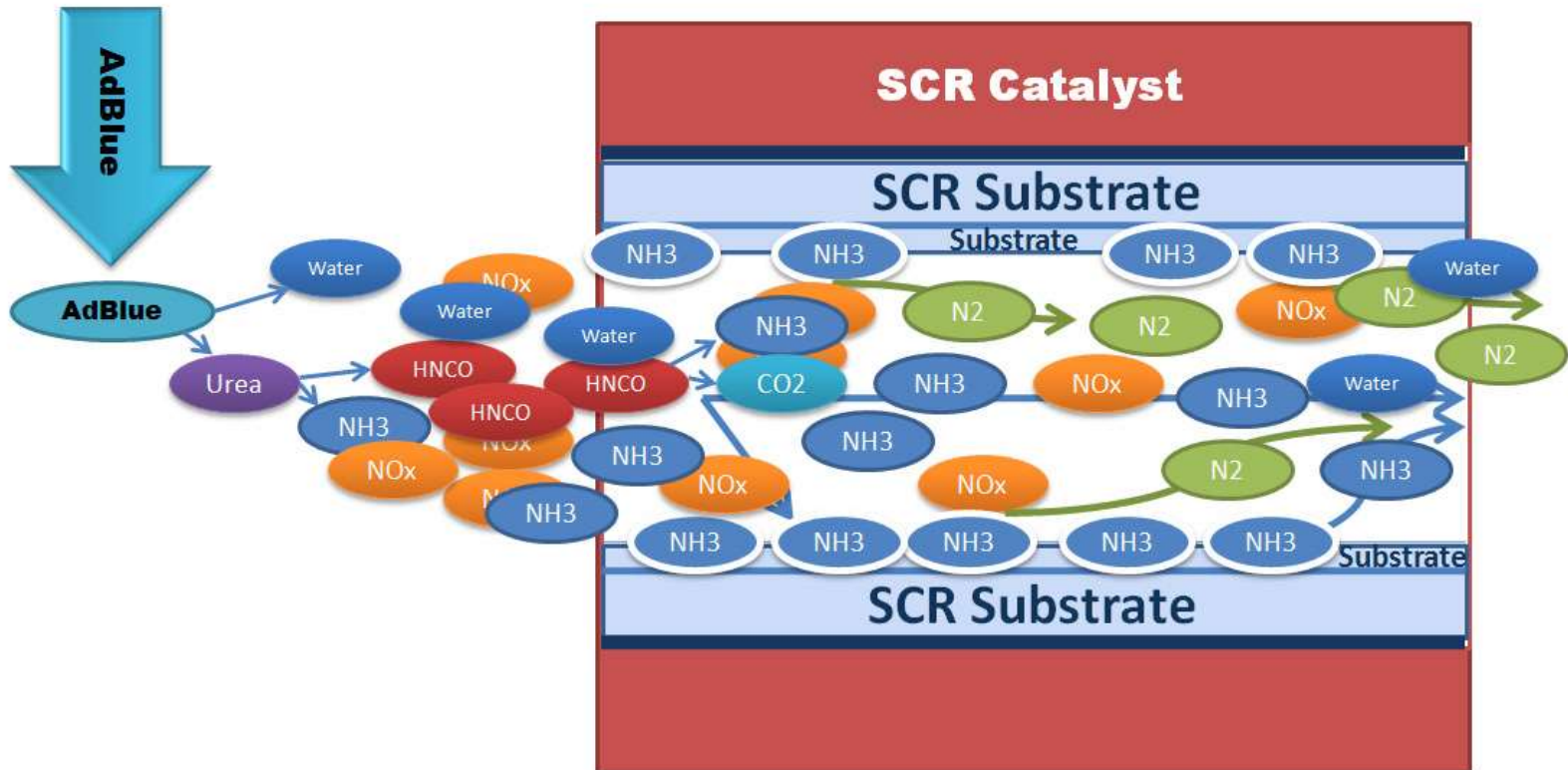
- Υλικό: κορδιερίτης

## 2. Επιλεκτική Καταλυτική Μείωση - SCR



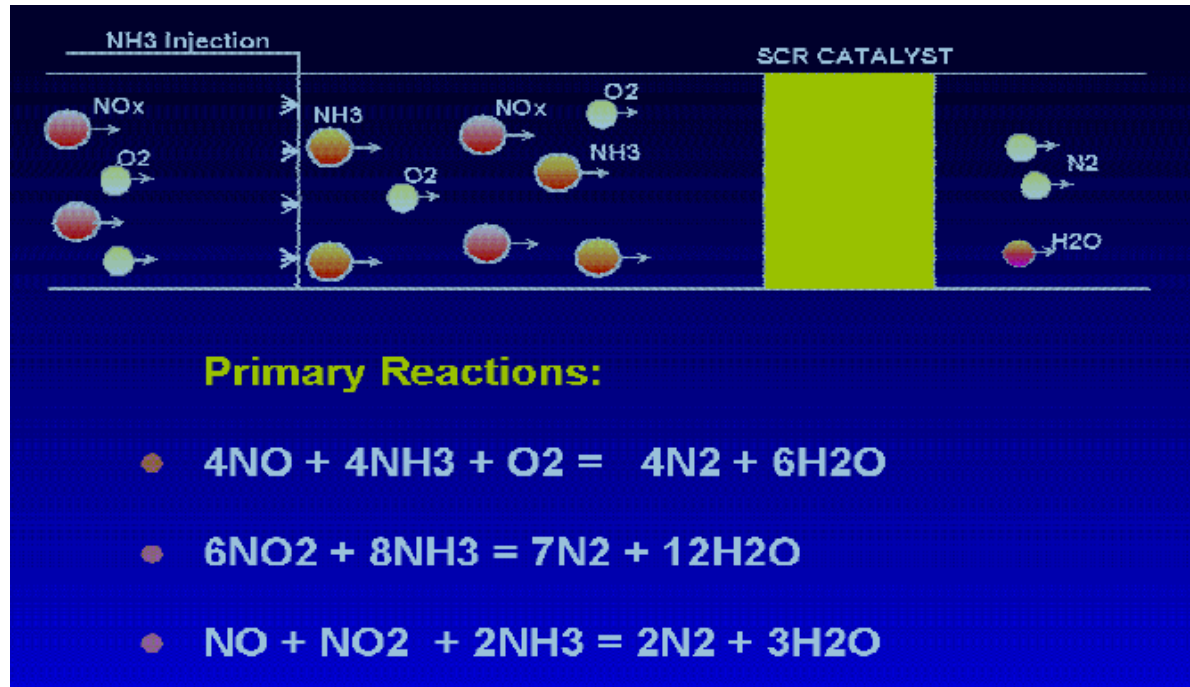
- Στόχος: η μείωση αέριων ρύπων NO<sub>x</sub>
- Ένα σύστημα SCR (SELECTIVE CATALYTIC REDUCTION) αποτελείται από τα εξής υποσυστήματα:
  - Καταλυτικός μετατροπέας
  - Σύστημα ελέγχου
  - Παροχή ουρίας

# Αρχή λειτουργίας SCR



Πηγή: Ming-Feng Hsieh, "CONTROL OF DIESEL ENGINE UREA SELECTIVE CATALYTIC REDUCTION SYSTEMS", PhD, 2010, Ohio State

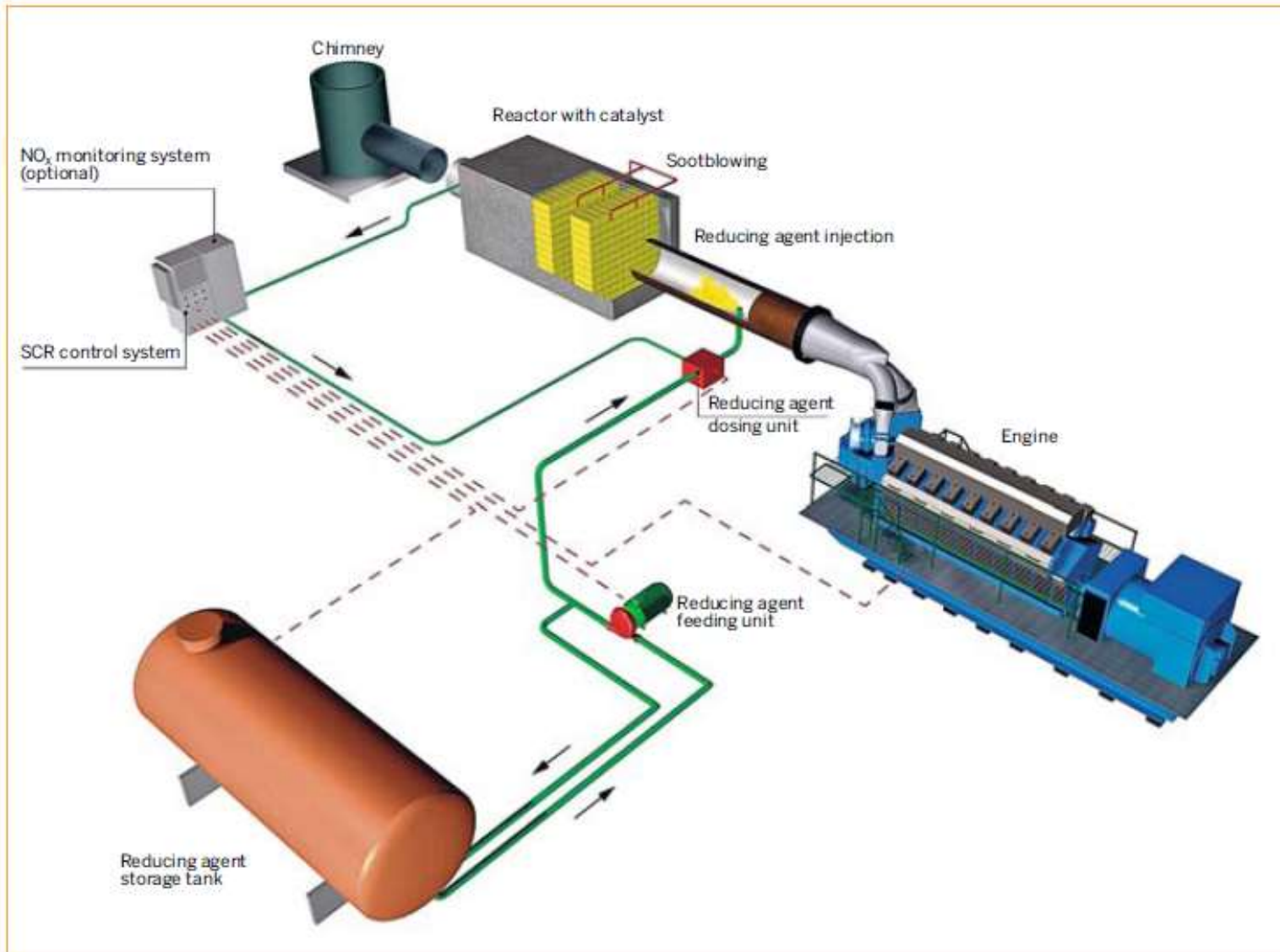
# Η διεργασία SCR



- Χρήση ουρίας (μέσω ψεκασμού)
- Η ουρία μετασχηματίζεται σε αμμωνία (NH<sub>3</sub>) και αντιδρά με τα καυσαέρια
- Τα NO<sub>x</sub> στα καυσαέρια γίνονται N<sub>2</sub> και νερό

# Διάταξη SCR

Πηγή: WARTSILA TECHNICAL JOURNAL,  
01.2011





# Εφαρμογή SCR σε πλοία

Πηγή: AVL

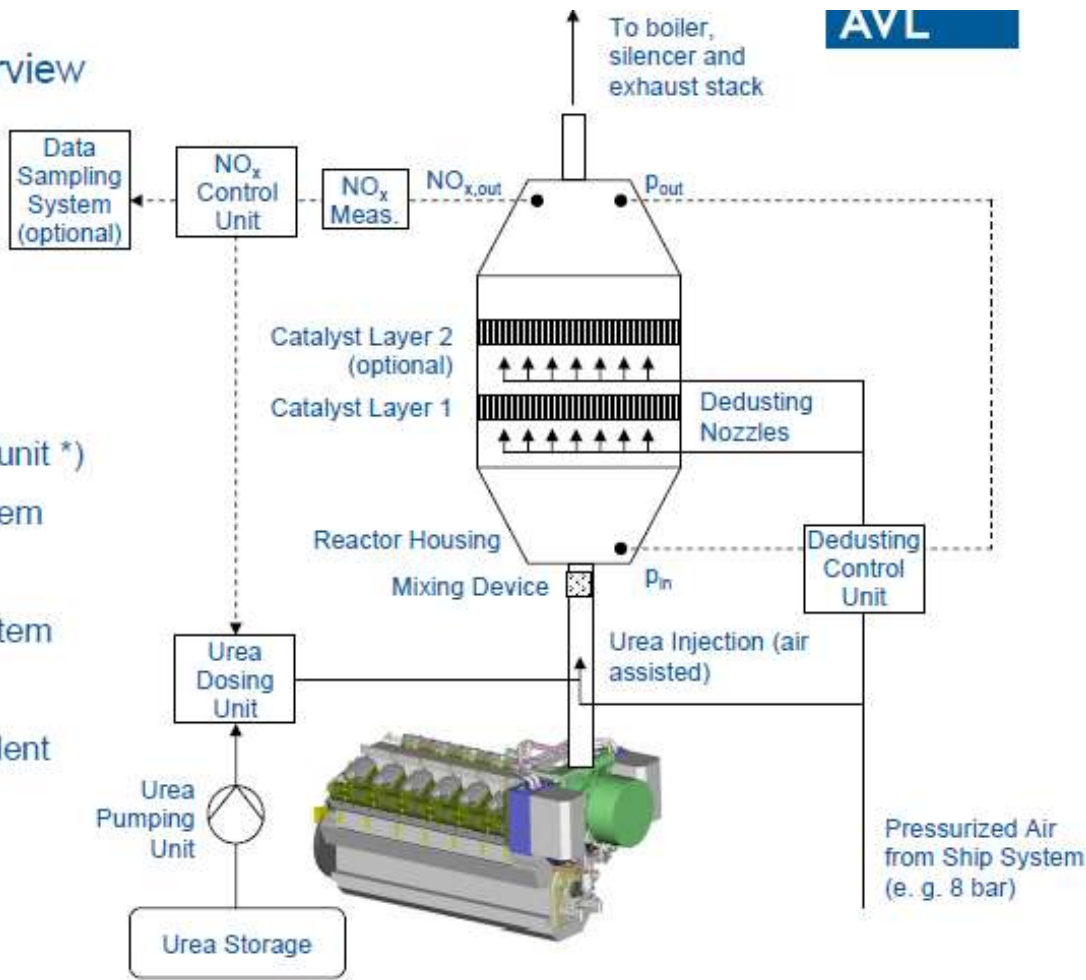


## SCR-System Overview

### Main Components:

- Catalyst
- Reactor housing
- Dust/soot blowing unit \*)
- Urea injection system
- NO<sub>x</sub> control unit
- Data sampling system

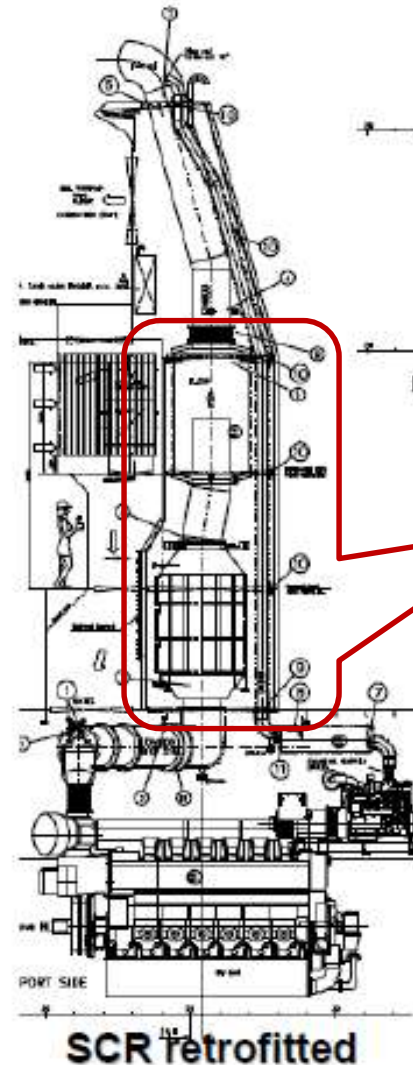
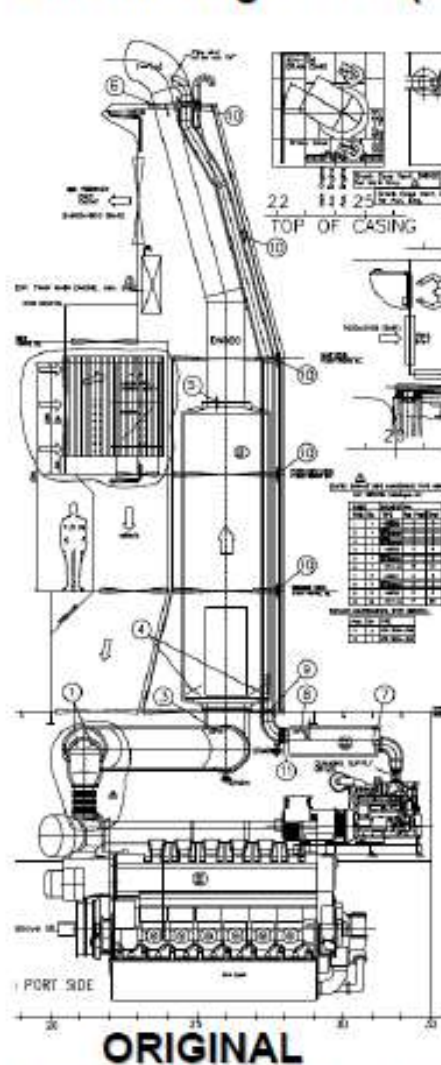
\*) fuel quality dependent



# Διάταξη SCR σε μετεφαρμογή

Πηγή: WARTSILA

Retrofit SCR on a fishing vessel (GA-drawing):



SCR

# Διάταξη SCR σε μετεφαρμογή

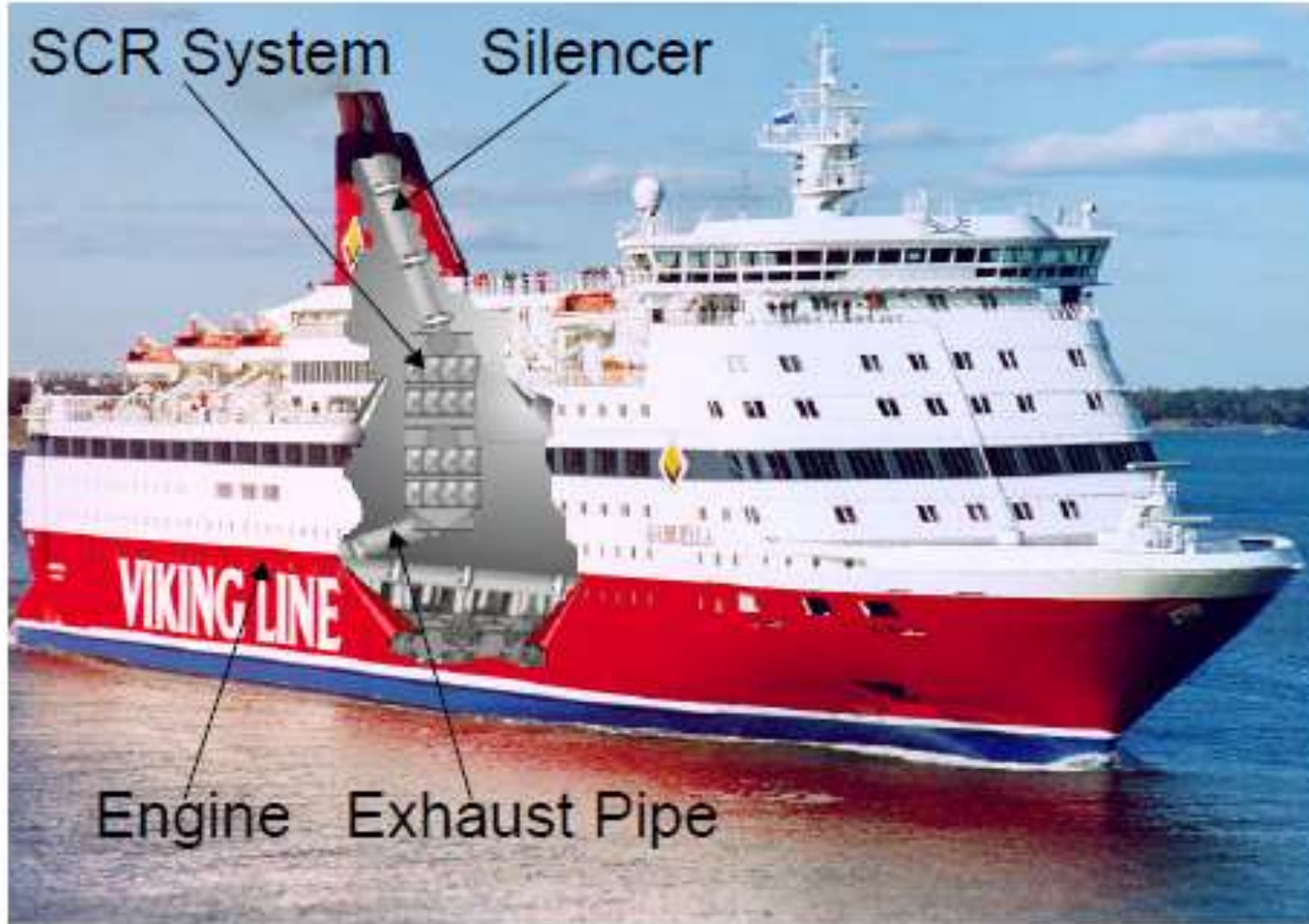
Πηγή: WARTSILA



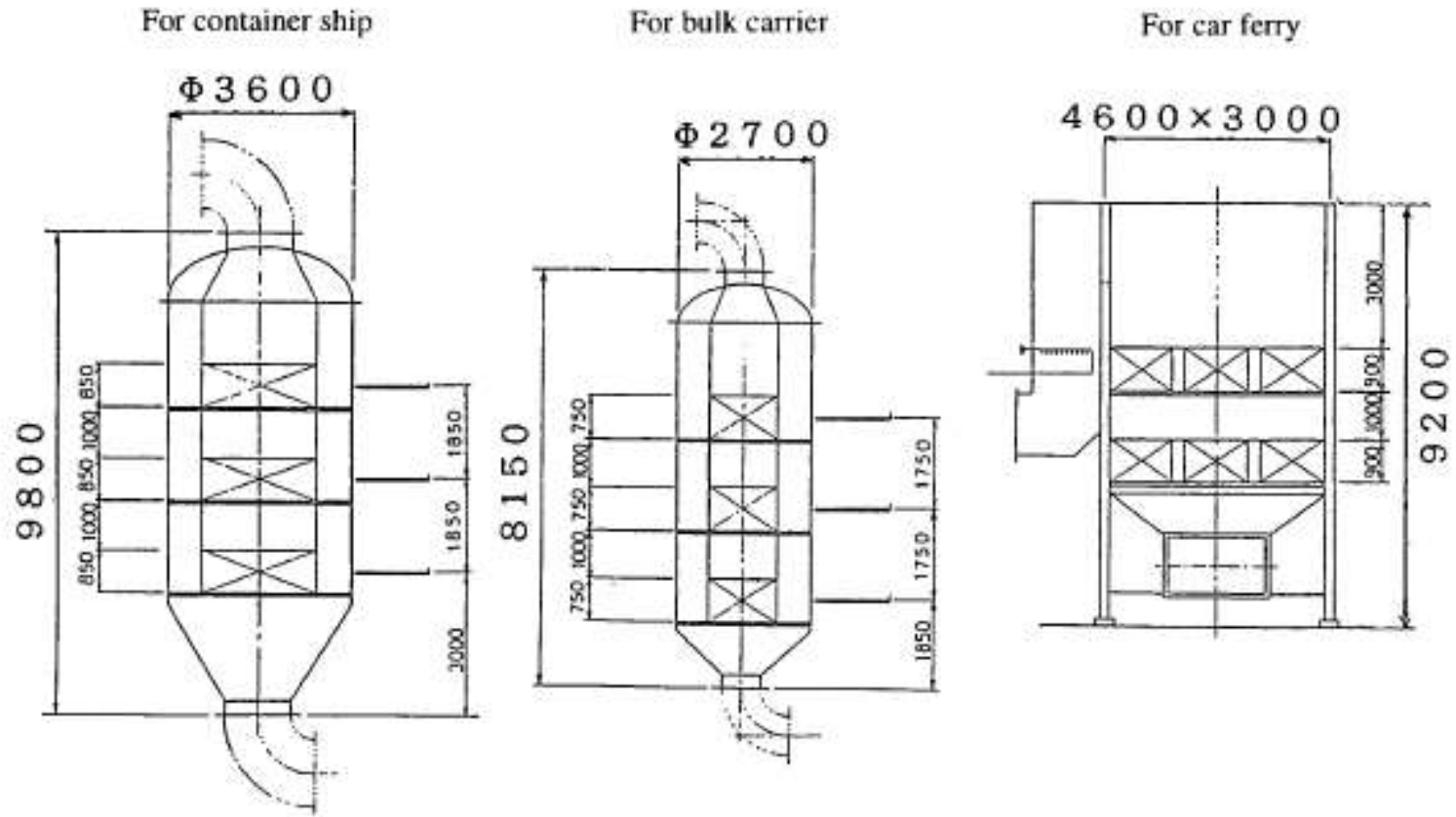
# Διάταξη SCR σε πλοίο

Πηγή: Ceramics  
GmbH

M/S Gabriella

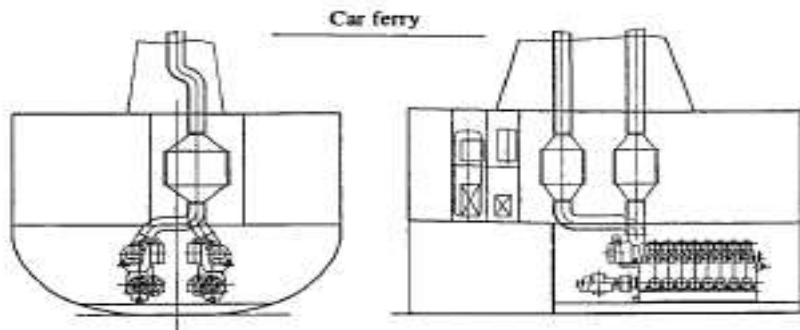
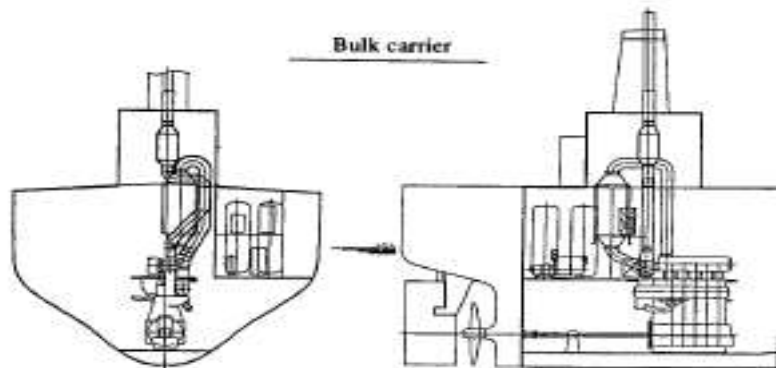
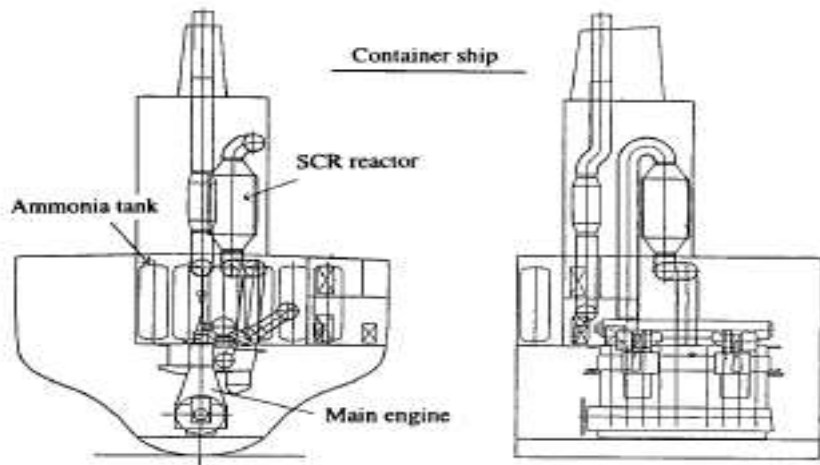


# Τυπικές μορφές SCR σε πλοία



Πηγή Design Study and Analysis of a Shipboard NO<sub>x</sub> Reduction Plant,  
K.Sonoda, H. Yamashita, N.Nakayana et al. , 12/1995

# Τυπικές μορφές SCR σε πλοία



Πηγή Design Study and Analysis of a  
Shipboard NO<sub>x</sub> Reduction Plant,  
K.Sonoda, H. Yamashita, N.Nakayana et al.  
12/1995

# Στοιχεία για SCR

Πηγή: WARTSILA

## 4-stroke engines - SCR State-of-the-Art

- NO<sub>x</sub> reduction: 85-95%
- Combined silencer and catalyst; Noise reduction: 25 to 30 dB(A)
- Space requirement: 2 to 5 m<sup>3</sup> / MW
- Location: after the turbine of the turbocharger
- Pressure drop: 10 - 20 mbar
- Temperature increase over the catalyst: ≈ 0-10 °C
- Operating temperature range: 340 - 480 °C
- Typical SCR system costs:
  - Investment costs (including installation and commissioning): ≈ 35-85 k€EUR / MW
  - Running costs: ≈ 3.0 EUR €/ MWh (urea cons. ≈15-20 liter / MWh)
  - Maintenance costs: ≈ 1.0 EUR €/ MWh
  - Catalyst replacement costs (after ~20000h): ≈ 1.7 EUR €/ MWh

# SCR+DPF

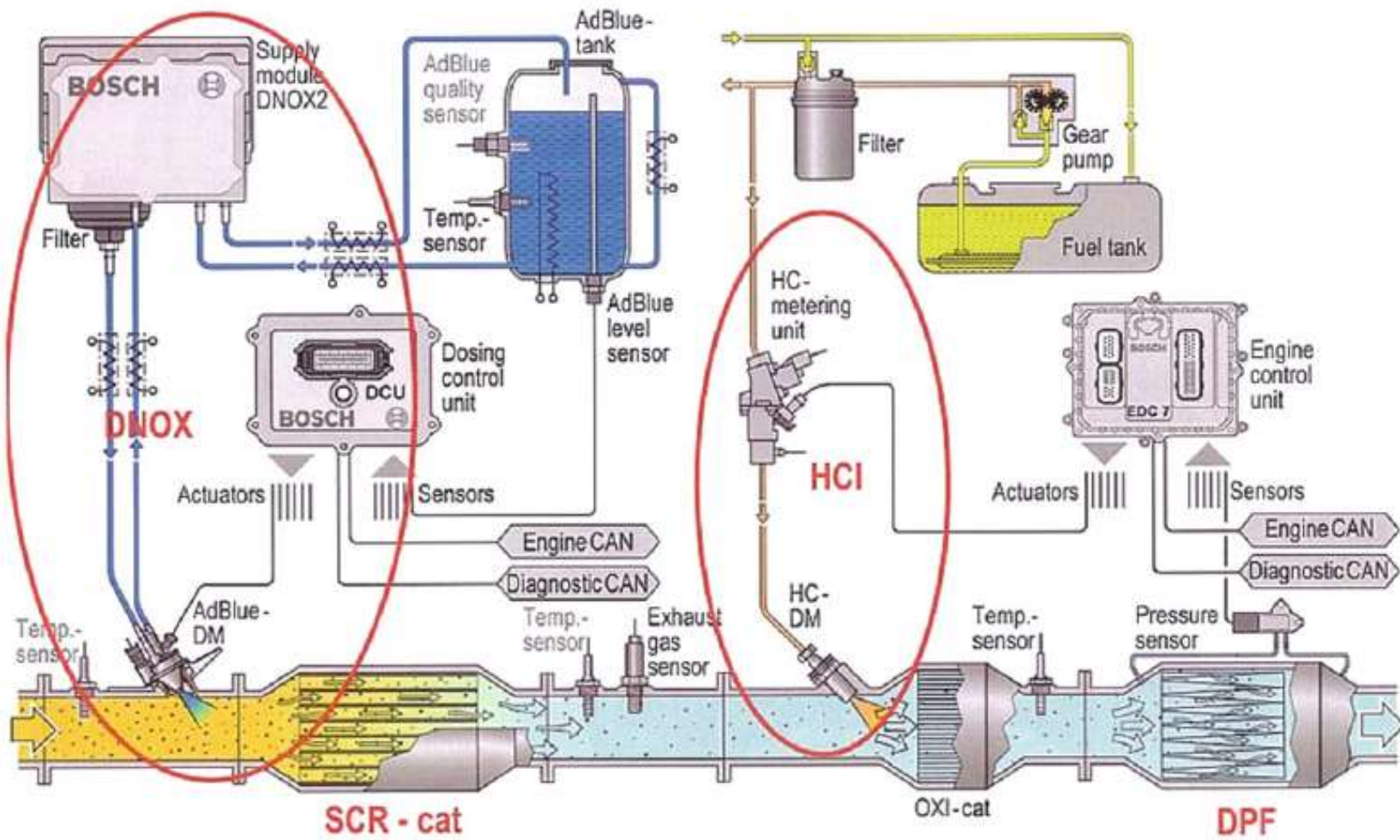


Fig. 15-43 SCR system for commercial vehicles (Bosch)



# 3. EGR

- Μέθοδος: Exhaust Gas Recirculation (EGR), λαμβάνοντας καυσαέριο από την εξαγωγή, μέσω βαλβίδας EGR
- Γίνεται έτσι ανακυκλοφορία καυσαερίων με σκοπό τη μείωση του οξυγόνου και συνεπώς μείωση και των NOx

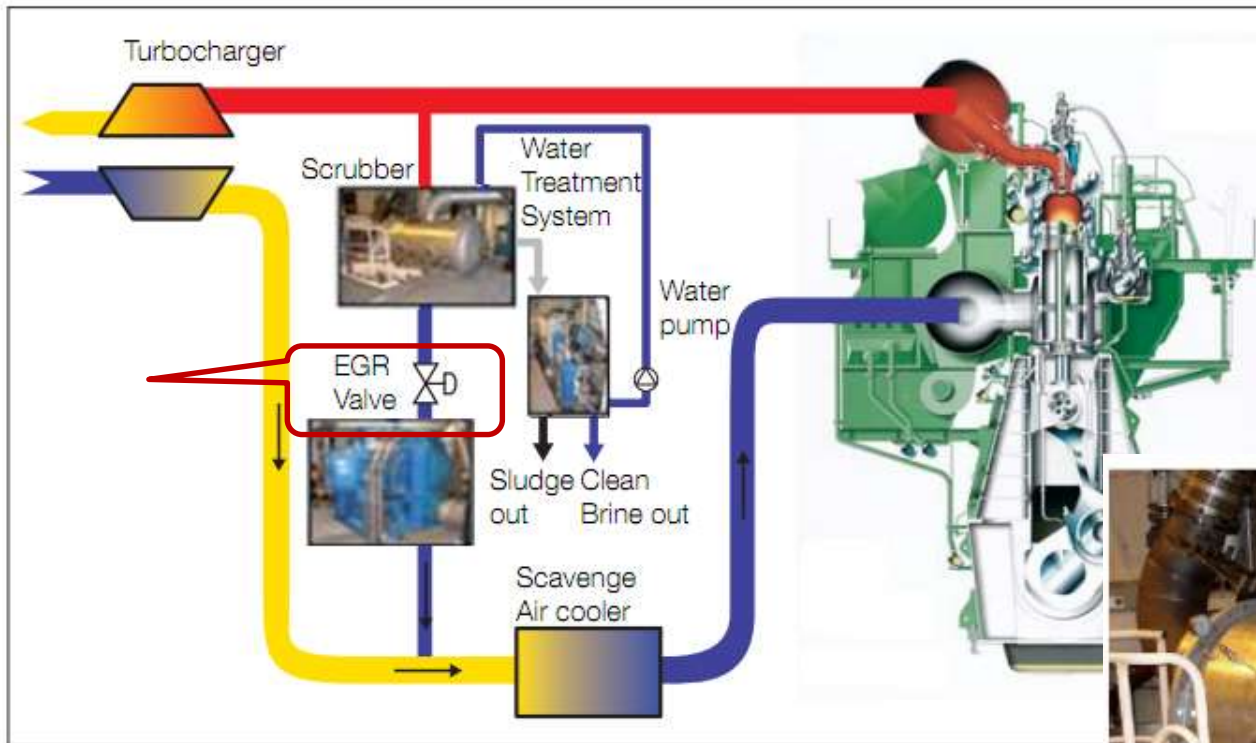
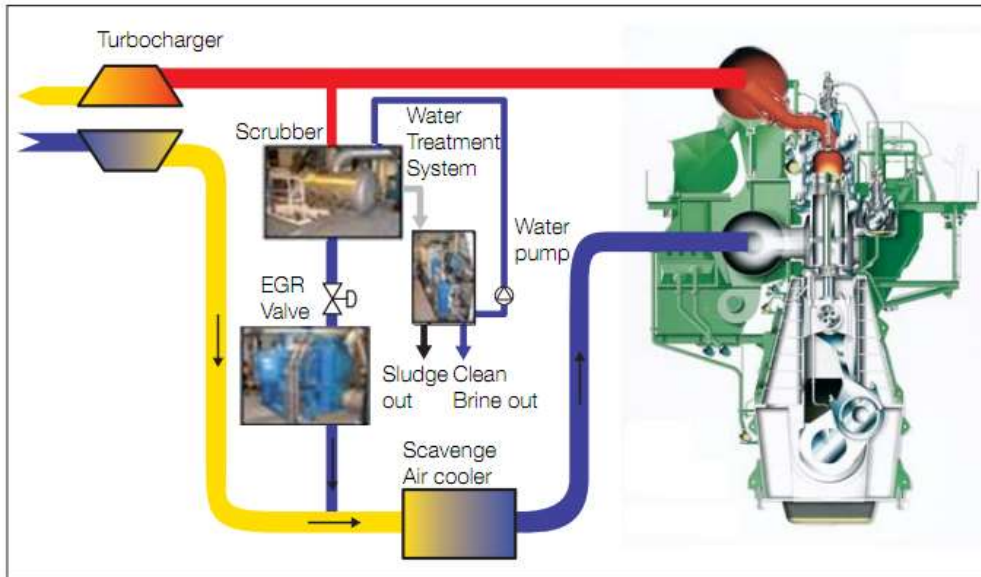


Fig. 16: The newly developed EGR scrubber applied to the test engine

Πηγή: MAN

# 3. EGR



- Μέρος του καυσαερίου παρακάμπτεται από τον θάλαμο καυσαερίων στο σύστημα απόπλυσης, μετά την πλευρά του στροβίλου υπερπληρωτή, και έτσι επανακυκλοφορεί.
- Ένας ηλεκτρικός φυσητήρας υψηλής πίεσης ωθεί τα καυσαέρια (3.3 bar) μέσω ενός scrubber στην εισαγωγή υπό υψηλότερη πίεση (3.7 bar).
- Η συσκευή καθαρισμού (scrubber) καθαρίζει τα καυσαέρια αφαιρώντας SOx και PM (σωματίδια) και ψύχει το αέριο με ύγρανση πριν από την επανεισαγωγή στο θάλαμο καύσης.
- Οι ψύκτες του αέρα τροφοδοσίας ψύχουν το μείγμα των ανακυκλούμενων καυσαερίων και τον αέρα καθαρισμού μέχρι το επιθυμητό σημείο θερμοκρασίας αέρα.

# EGR

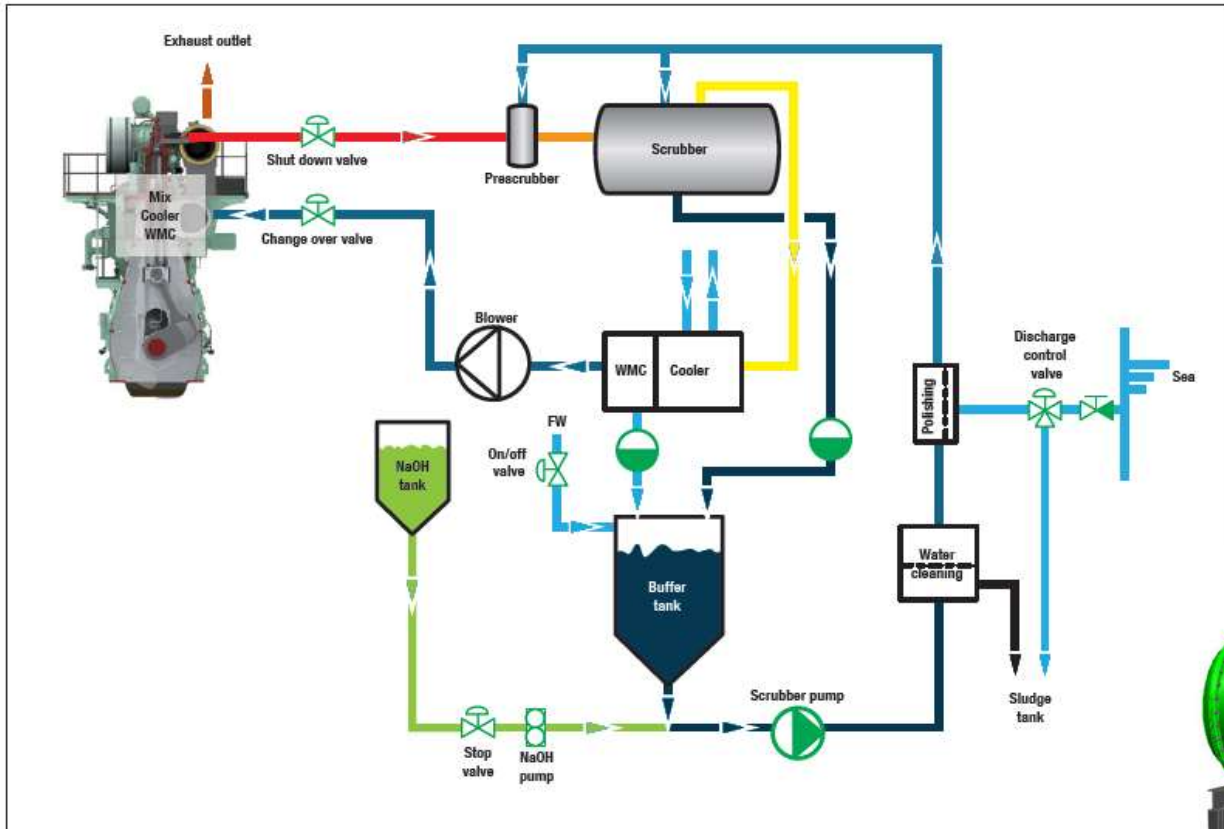
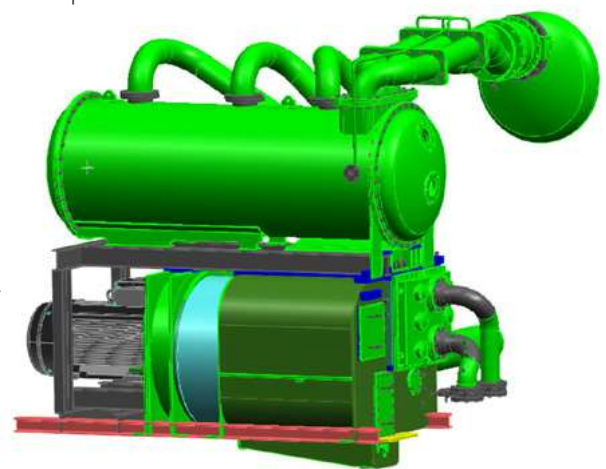


Fig. 9: EGR system layout on Alexander Maersk



Μονάδα EGR

# EGR

EGR inlet pipe & pre-scrubber (not seen)

Distribution chamber

EGR cooler

EGR blower

EGR scrubber

Water Mist Catcher

EGR mixing

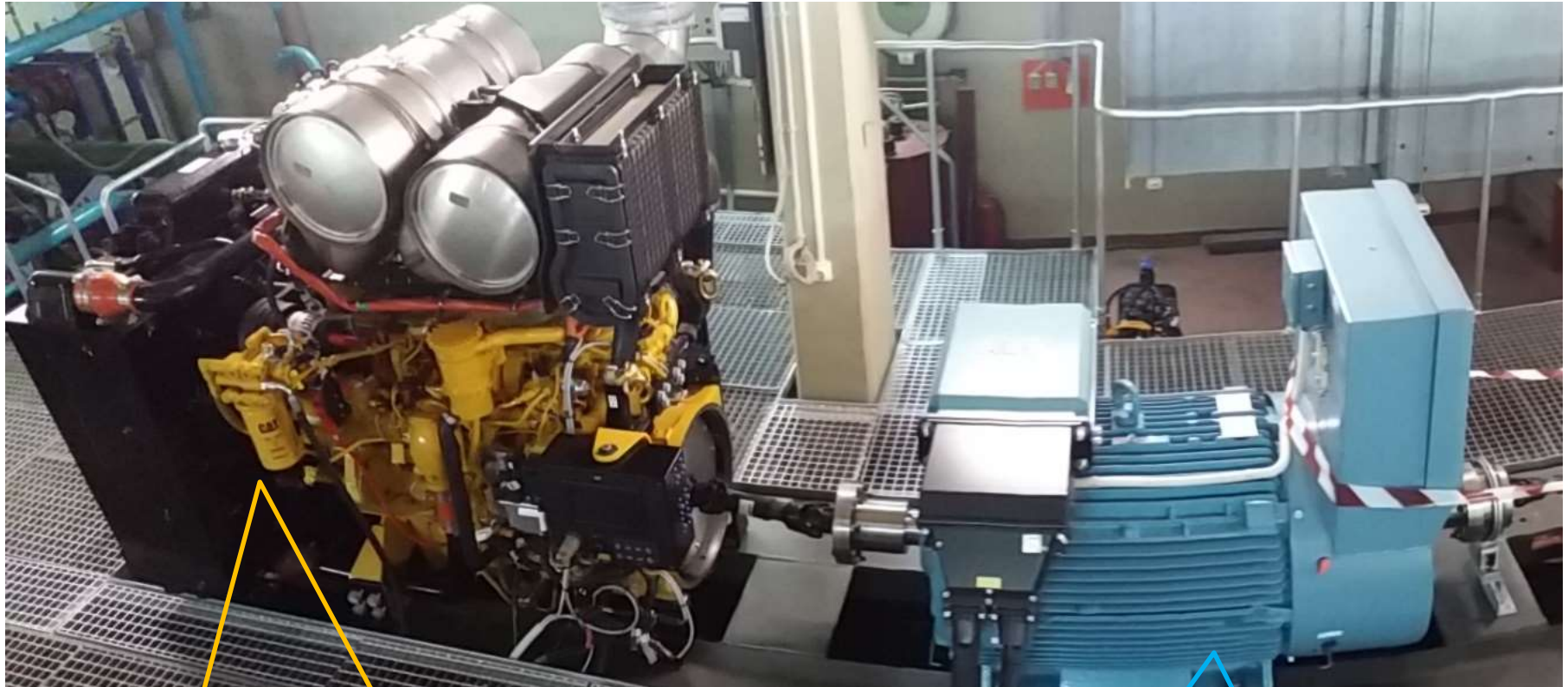


# EGR



Πηγή: MAN

# Συστήματα Μείωσης Ρύπων στο ENM HIPP02



## Diesel engine

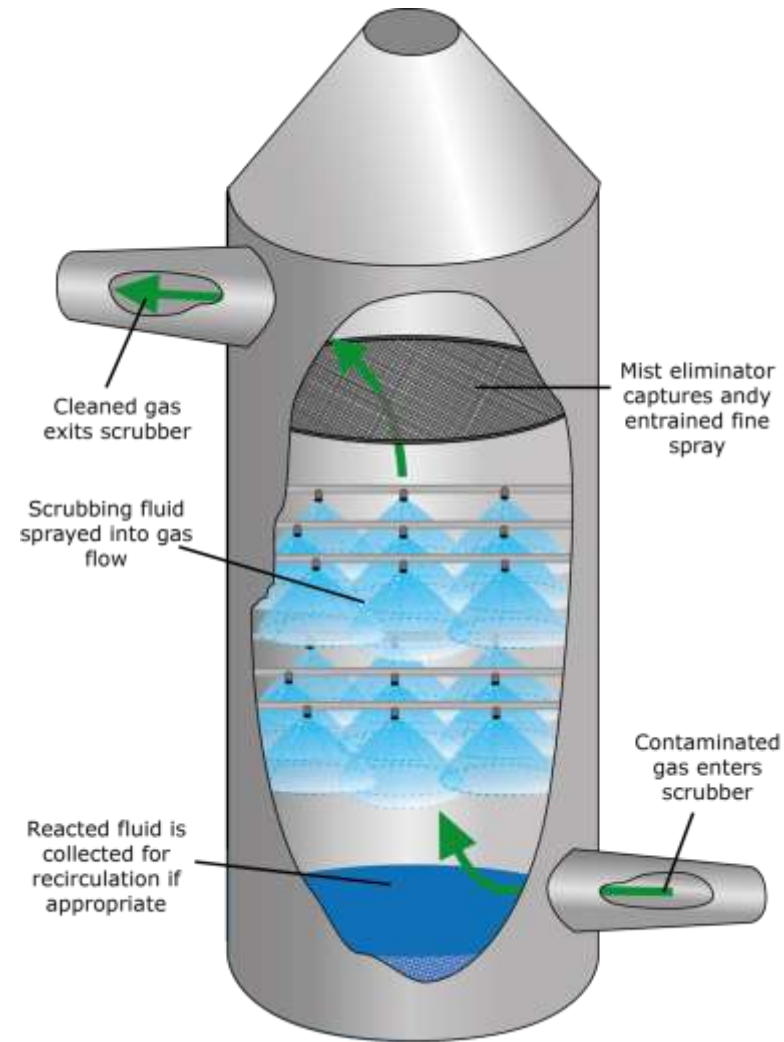
- Caterpillar C9.3 , 261 kW @ 2200 rpm
- U.S. EPA Tier 4 and EU Stage IV emissions
- ECU + CAN bus
- Common Rail Fuel System
- Exhaust gas recirculation system (EGR)
- Oxid. Catalyst + Partic. Filter + SCR

## Dynamometer

ABB 315 kW AC motor + ABB ACS800 4-Q regenerative drive  
390 kW w. Direct Torque Control (DTC) + CAN bus

# 4. Μονάδες Scrubber

- Στόχος: αφαίρεση SOx από τα καυσαέρια
- Χρήση μονάδας **πλυντηρίδας** (scrubber) για καθαρισμό σωματιδίων σε αντιστροφή
- Κατά την διεργασία, οξείδια του θείου στα καυσαέρια συλλέγονται και εξουδετερώνονται με διάλυμα καθαρισμού.
- Το διάλυμα καθαρισμού βασίζεται σε γλυκό νερό ενισχυμένο με αλκάλια, τυπικά υδροξείδιο του νατρίου (NaOH).



# Κανονισμοί ρύπων SOx

## Emission Control Areas (ECA)

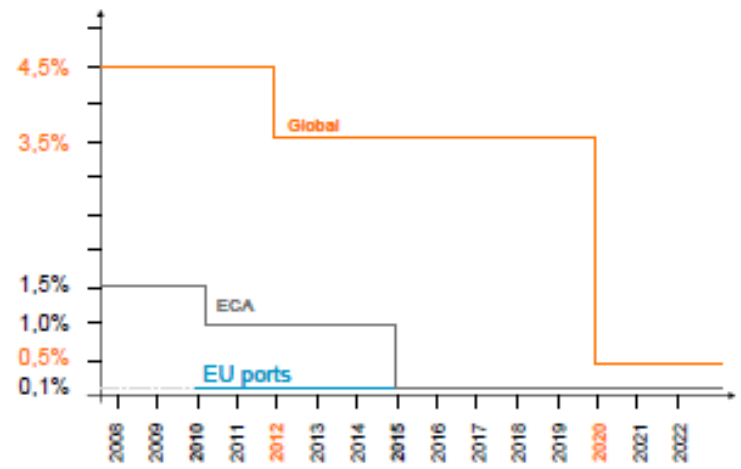


Figure: Future sulphur limits in marine fuels

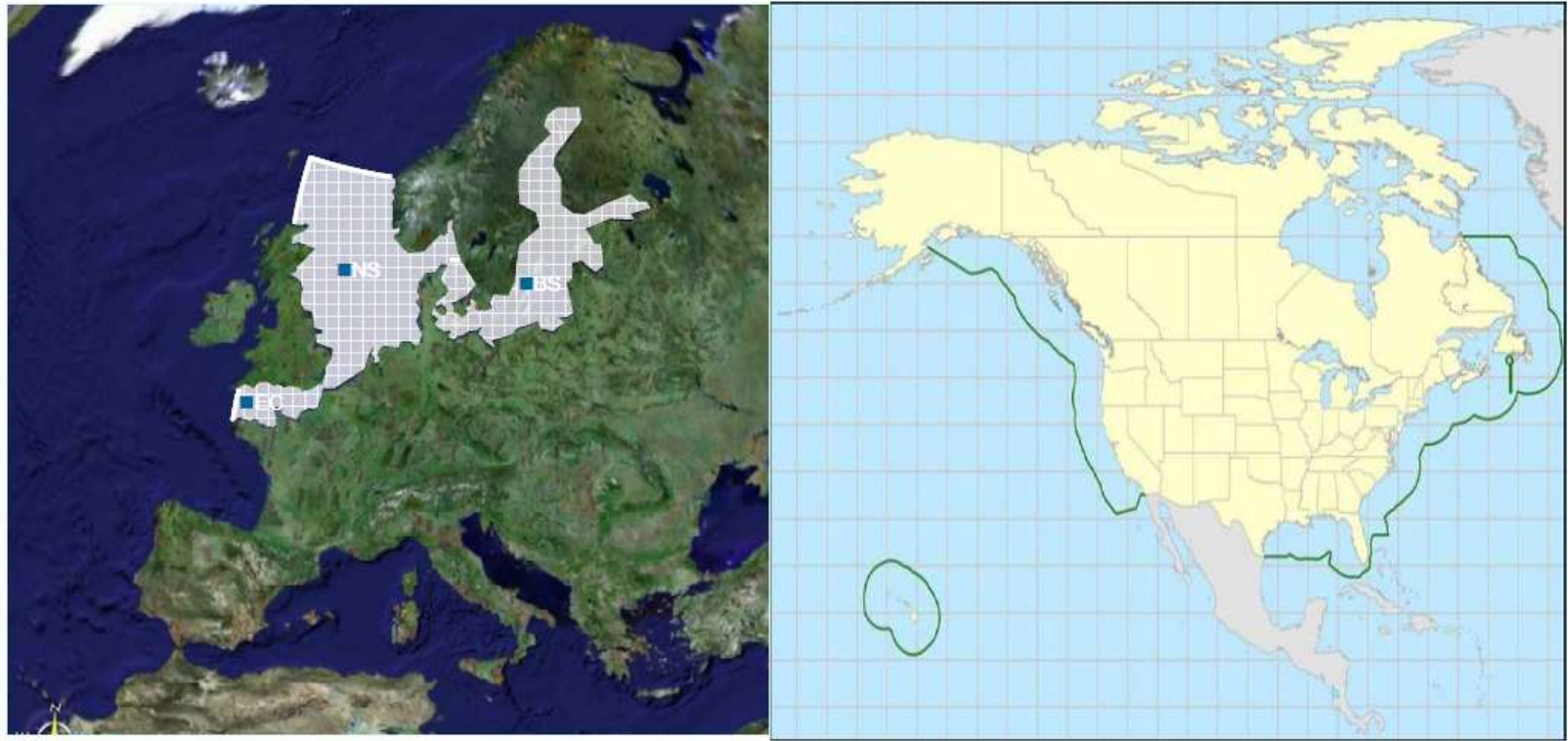
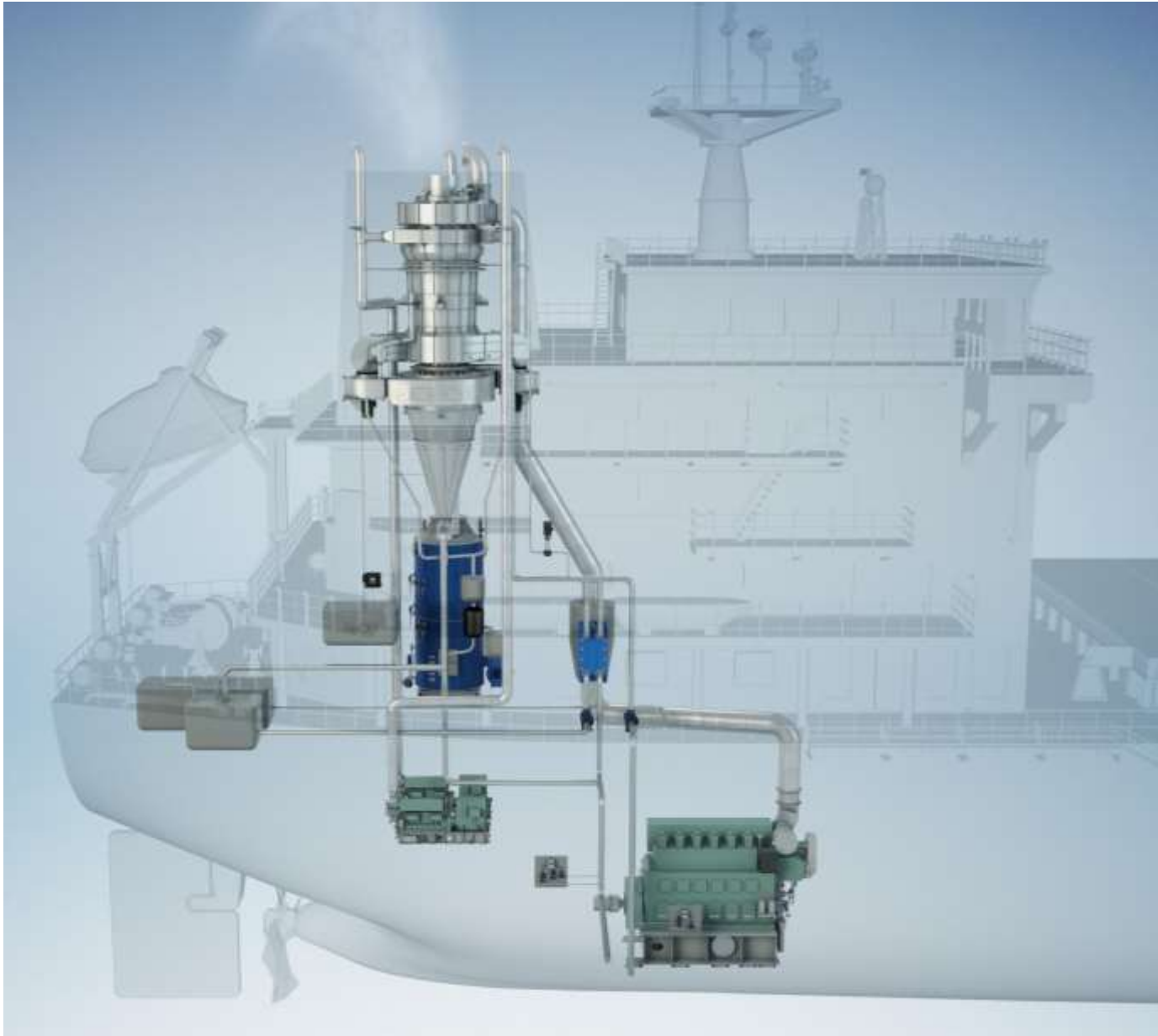


Figure: Existing SOx ECA's in Europe and proposed ECA in North America.



# Scrubber Units: on board



# Διάταξη Μονάδων Scrubber

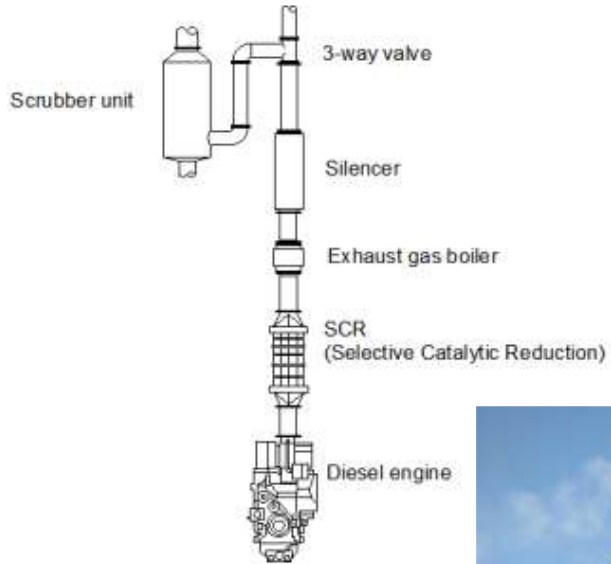


Figure 1: - Main Stream Scrubber



standard

In-line

Wärtsilä scrubber system onboard MT Suula

# Scrubber Units: open/closed loop

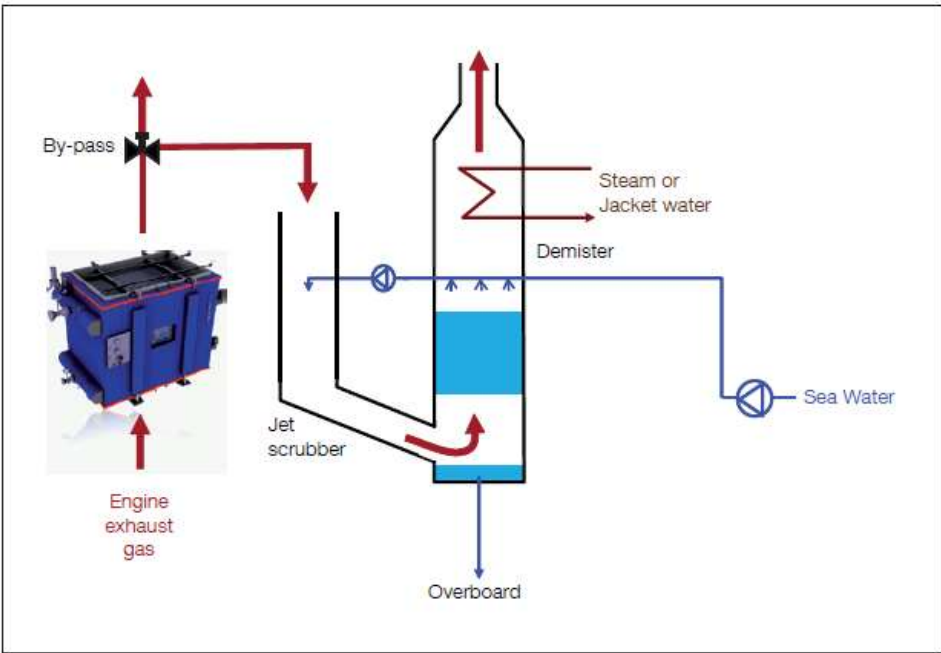


Fig. 28: Running in Sea Water mode

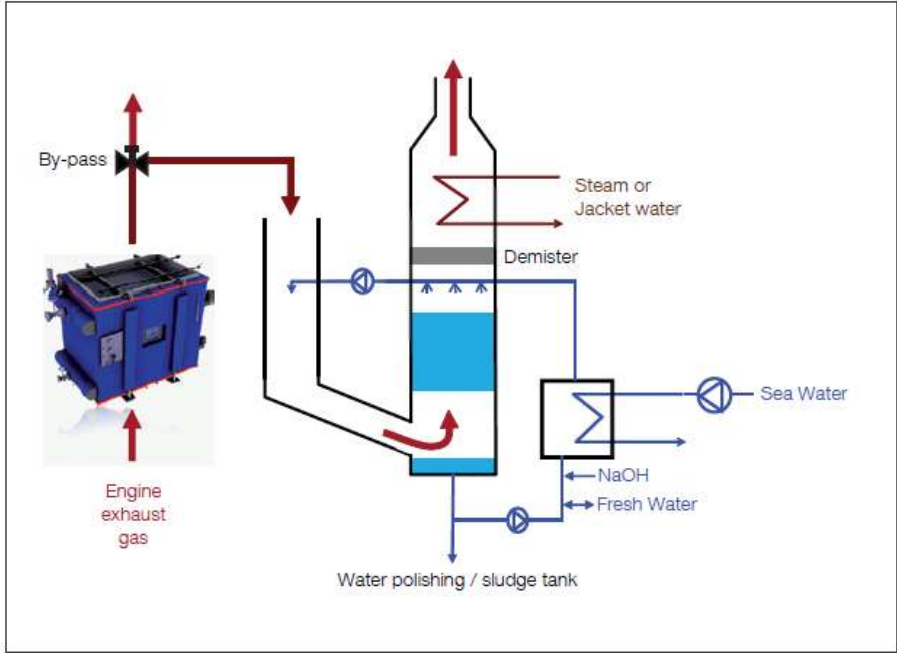
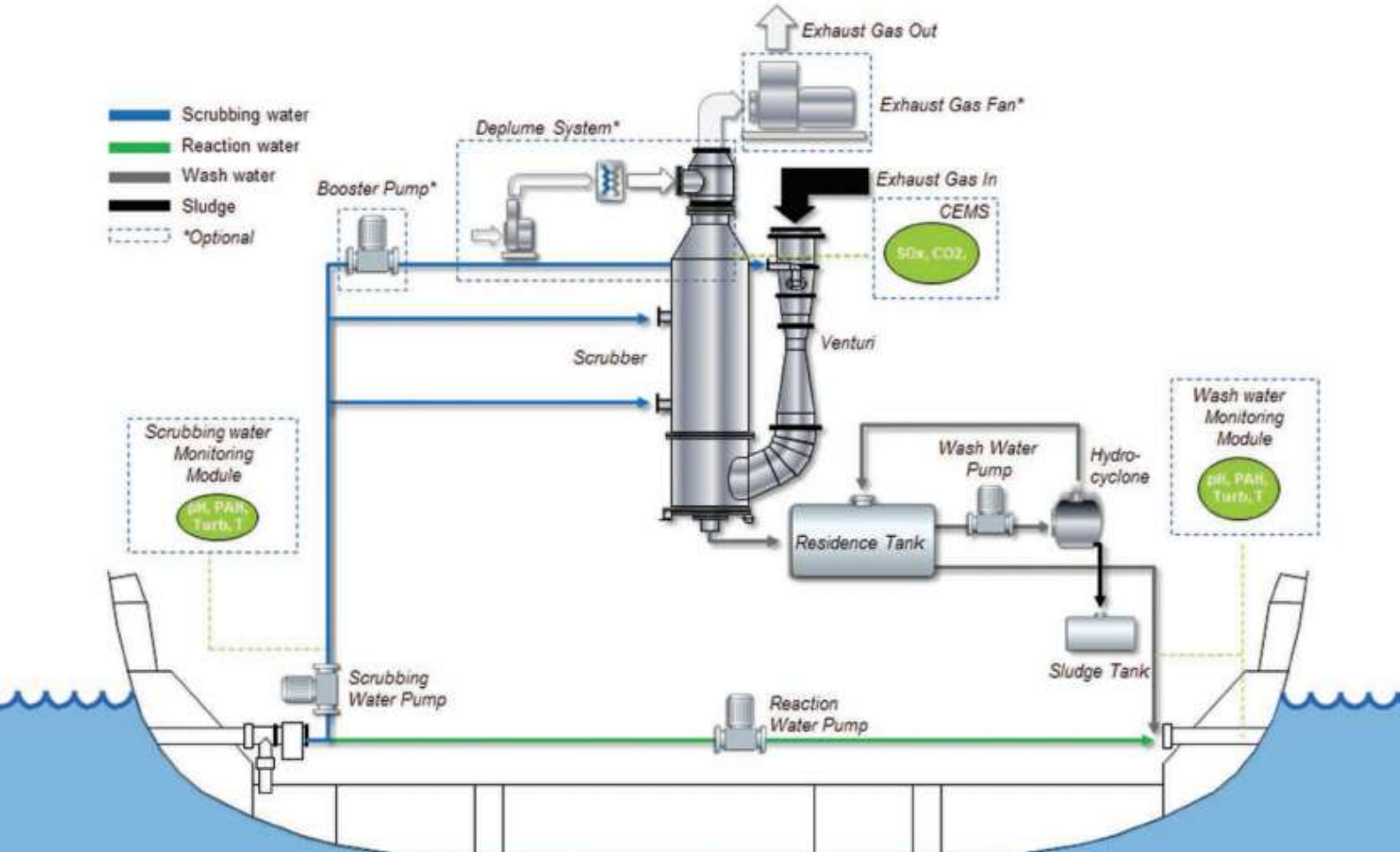


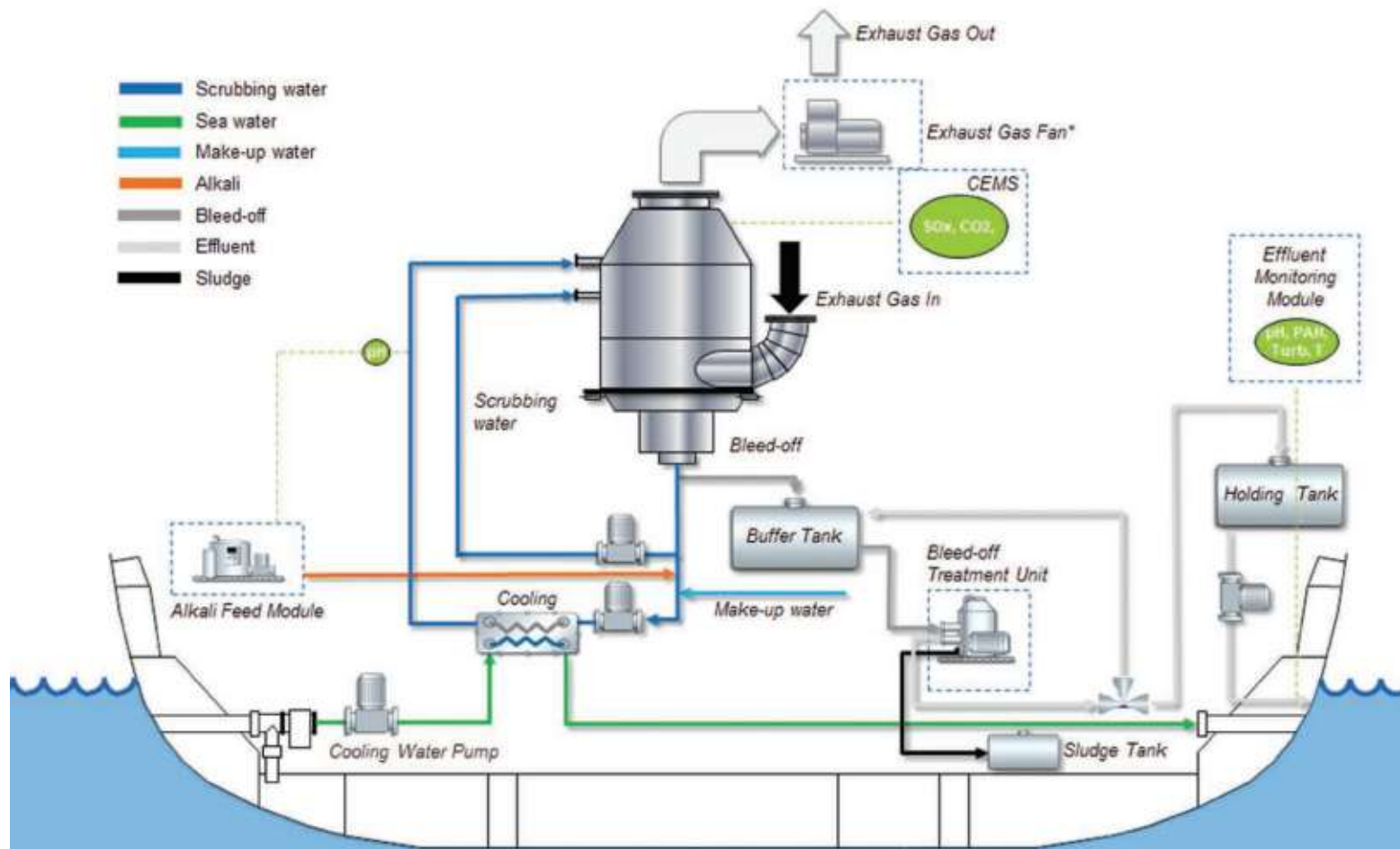
Fig. 29: Running in Fresh Water mode

# Scrubber Units: open loop



WÄRTSILÄ OPEN LOOP SCRUBBER SYSTEM

# Scrubber Units: closed loop

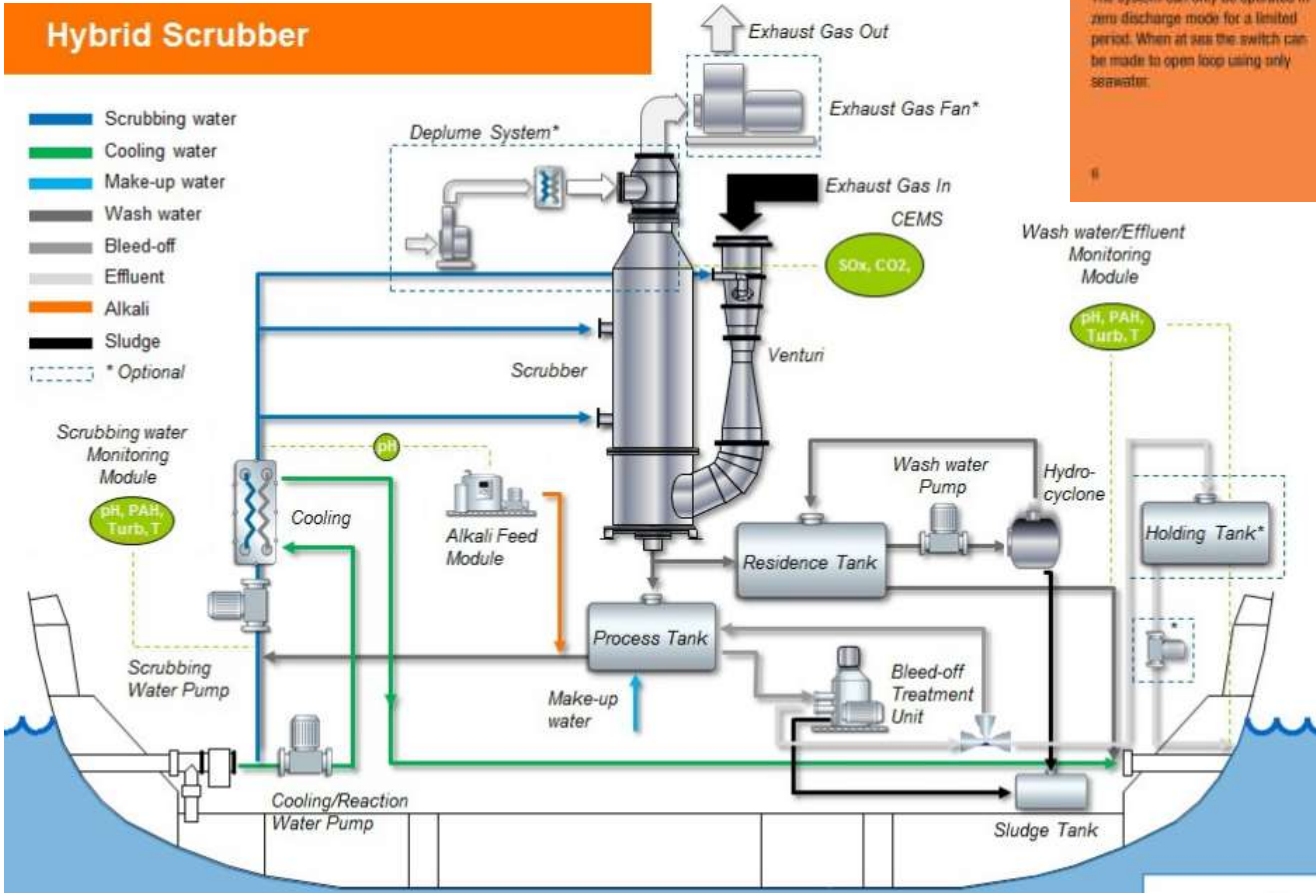


**WÄRTSILÄ CLOSED LOOP  
SCRUBBER SYSTEM**

# Scrubber Units: Σε συνδιασμό (hybrid)

## Hybrid Scrubber

- █ Scrubbing water
- █ Cooling water
- █ Make-up water
- █ Wash water
- █ Bleed-off
- █ Effluent
- █ Alkali
- █ Sludge
- \* Optional



### WÄRTSILÄ HYBRID SCRUBBER SYSTEM - FLEXIBILITY IN OPERATION

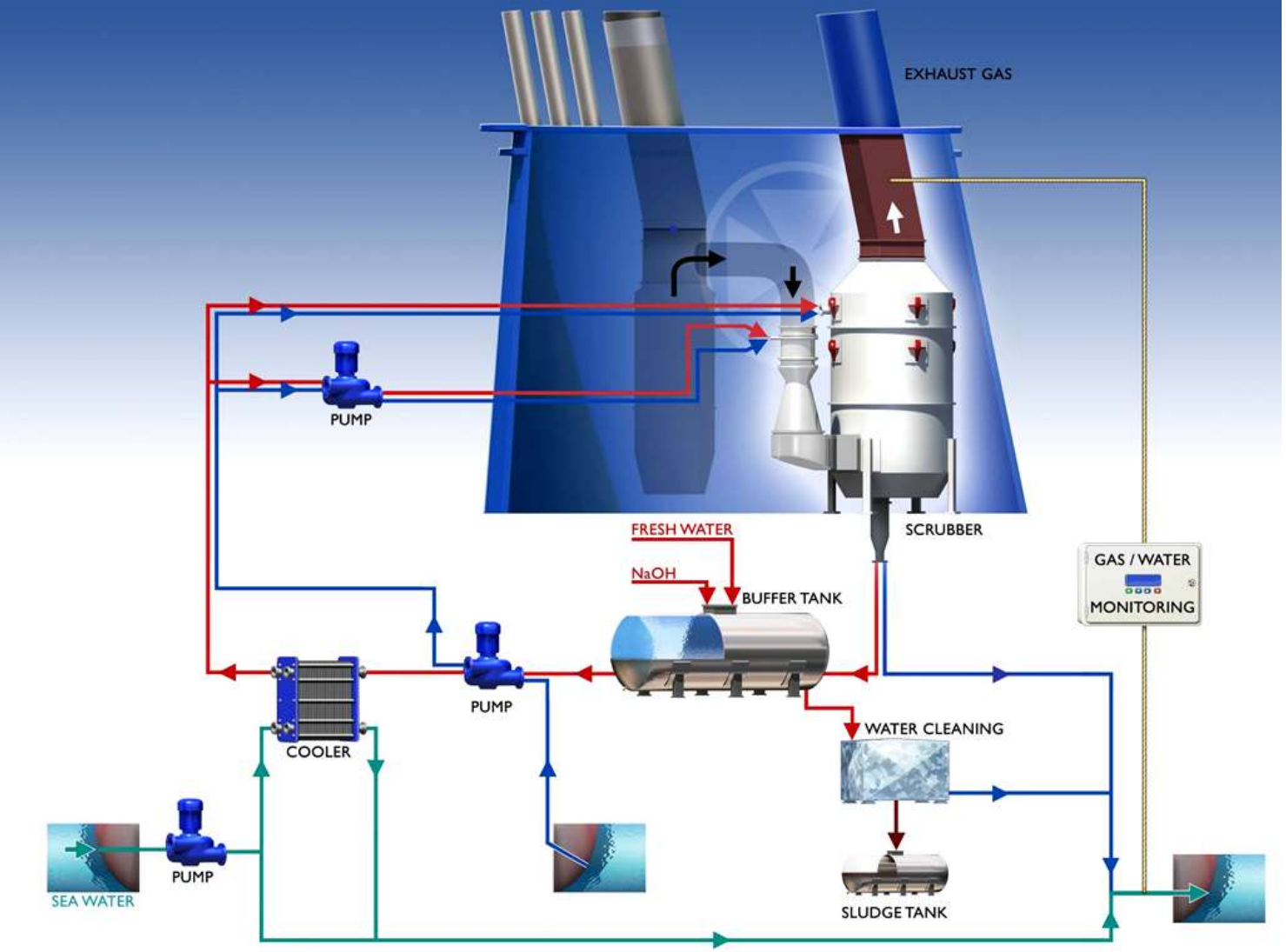
Wärtsilä additionally provide hybrid solutions. These solutions have the flexibility to operate in both open and closed loop. This provides a flexibility of operation in low alkaline waters as well as the open ocean. The hybrid approach enables operation in closed loop mode when required, for instance whilst in port and during maneuvering using NaOH as a buffer. The system can only be operated in zero discharge mode for a limited period. When at sea the switch can be made to open loop using only seawater.



# Scrubber Units on board

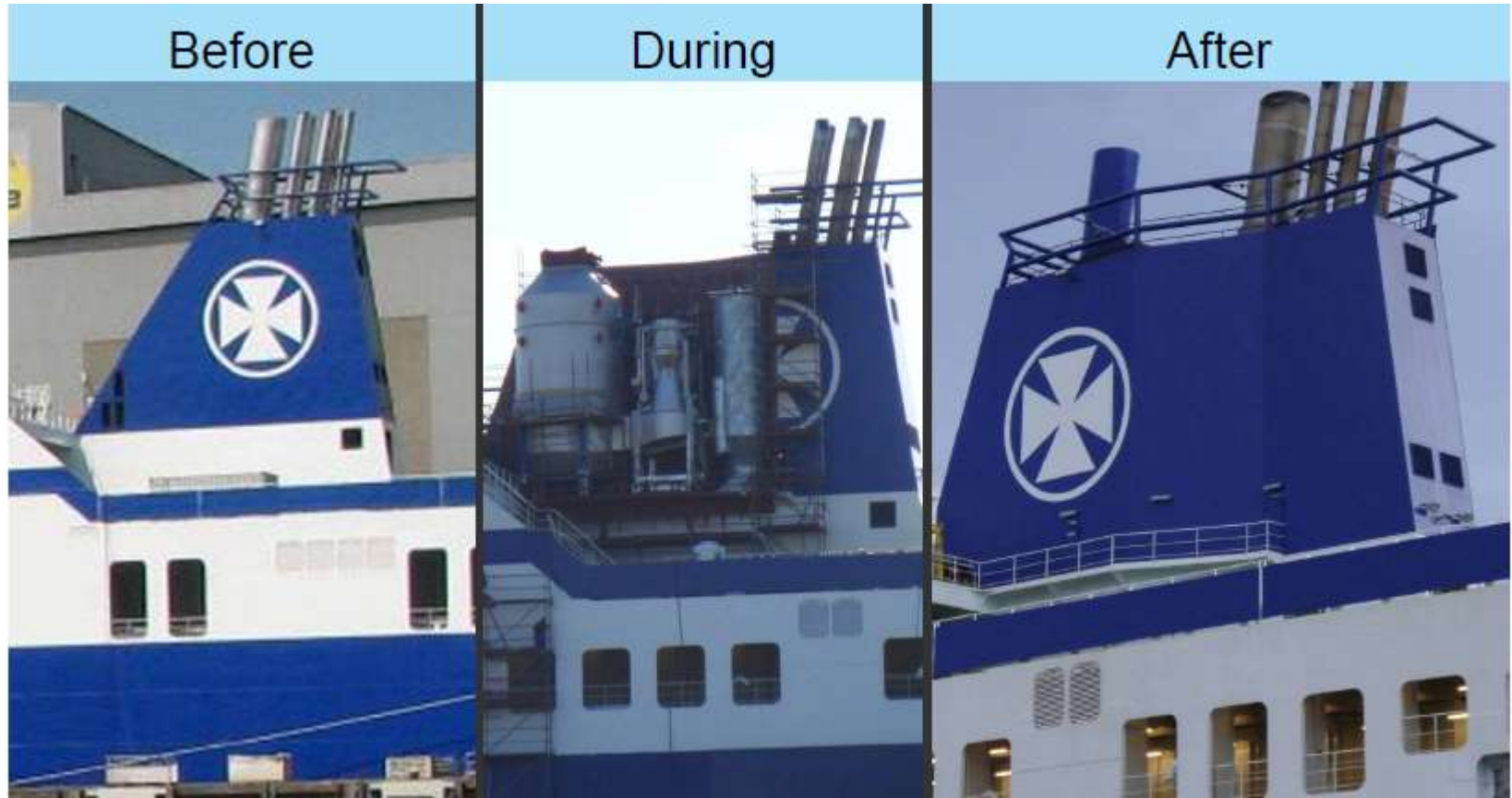


# Scrubber Units on board





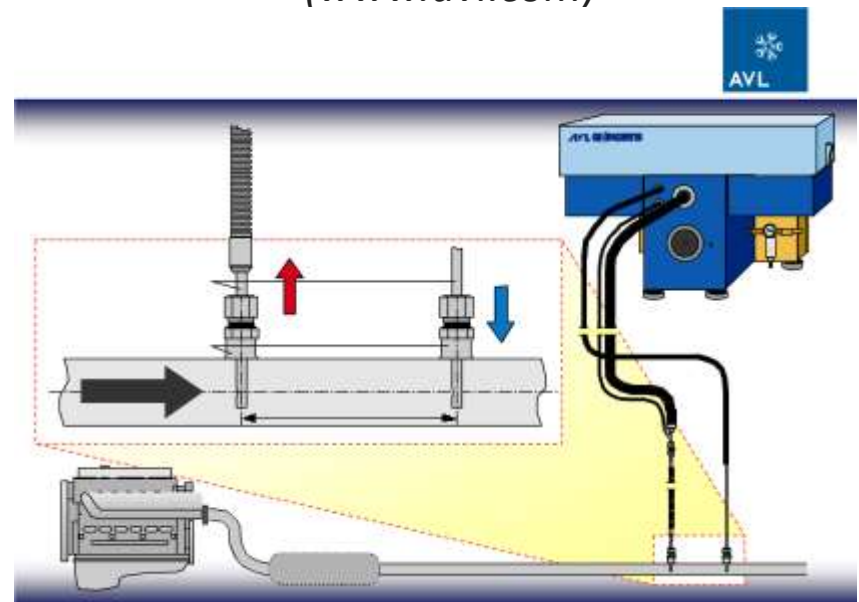
# Scrubber Units on board



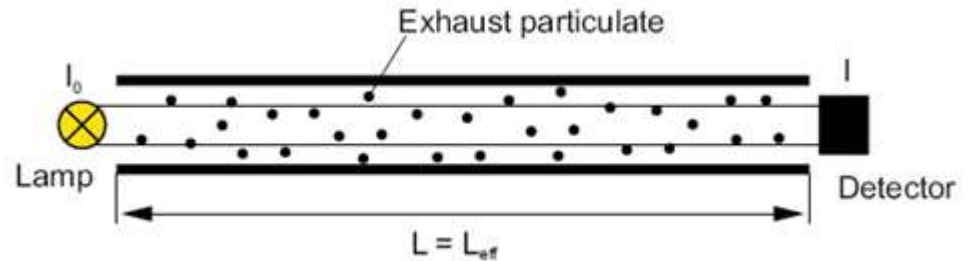
# 5. Μετρήσεις ρύπων Opacity -1

- Ο μετρητής αδιαφάνειας (Opacimeter 439 ) της AVL είναι ένα δυναμικό όργανο μέτρησης μερικής ροής για τη συνεχή μέτρηση της αδιαφάνειας των καυσαερίων.
- Χρησιμοποιείται κυρίως εργαστηριακά για σκοπούς R&D, πιστοποίησης και για τη διασφάλιση της συμμόρφωσης της παραγωγής κινητήρων.

([www.avl.com](http://www.avl.com))



# 5. Μετρήσεις ρύπων Opacity - 2



## Αρχή λειτουργίας:

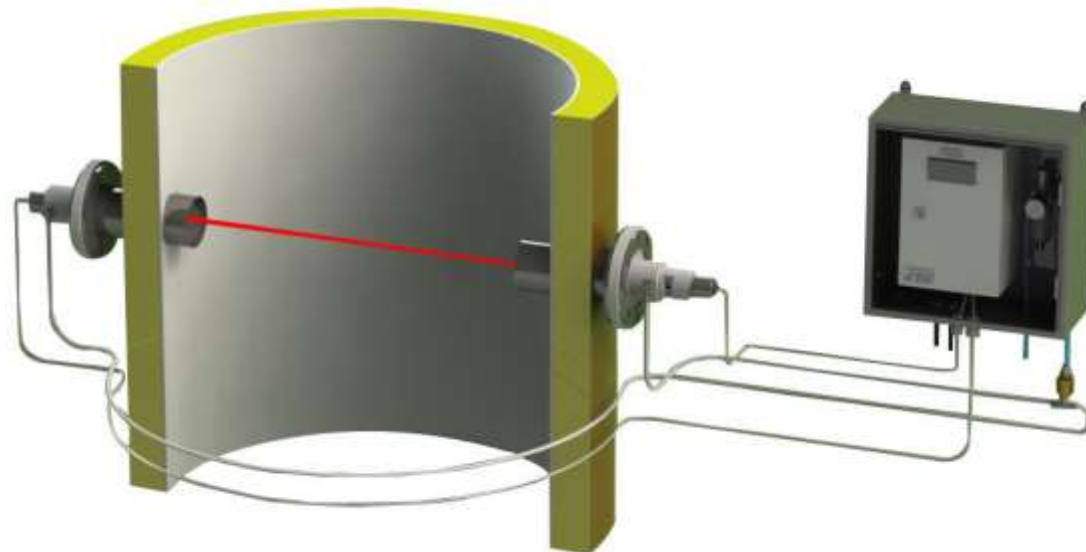
- Το όργανο AVL Opacimeter 439 μετρά την αδιαφάνεια των εκπομπών καυσαερίων ντίζελ.
- Ένας θάλαμος μέτρησης μήκους  $L$  και μη αντανακλαστικής επιφάνειας πληρώνεται ομοιογενώς με καυσαέρια.
- Καταμετράται η εξασθένηση φωτός που προκαλείται από τα σωματίδια καυσαερίων που είναι παγιδευμένα μεταξύ πηγής φωτός και δέκτη (αδιαφάνεια-opacity, 0-100 %).
- Η ειδική απορρόφηση των καυσαερίων (" $k$ ", σε  $m^{-1}$ ) υπολογίζεται βάσει της αδιαφάνειας. Ο υπολογισμός βασίζεται στον νόμο Beer-Lambert.

([www.avl.com](http://www.avl.com))

# 5. Μετρήσεις ρύπων Opacity - 3

- Ο μετρητής αδιαφάνειας (G1000 Smoke density monitor) της Green Instruments είναι όργανο μονής διέλευσης καυσαερίων που χρησιμοποιεί δέσμη υπέρυθρου φωτός υψηλής ισχύος.
- Τοποθετείται για μόνιμη μέτρηση σε οχετό καυσαερίων.

*(<http://greeninstruments.com>)*



# Μετρήσεις ρύπων PM - 1

- Αισθητήριο σωματιδίων ντίζελ (particulate matter – PM) της Bosch χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της απόδοσης του φίλτρου σωματιδίων ντίζελ (DPF), το οποίο συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών σωματιδίων περίπου 99 %.
- Το αισθητήριο σωματιδίων τοποθετείται κατάντη του DPF και μπορεί να τοποθετηθεί εύκολα σε αγωγό μέσω μιας βίδας συγκράτησης.

*(<http://products.bosch-mobility-solutions.com>)*



# Μετρήσεις ρύπων PM - 2

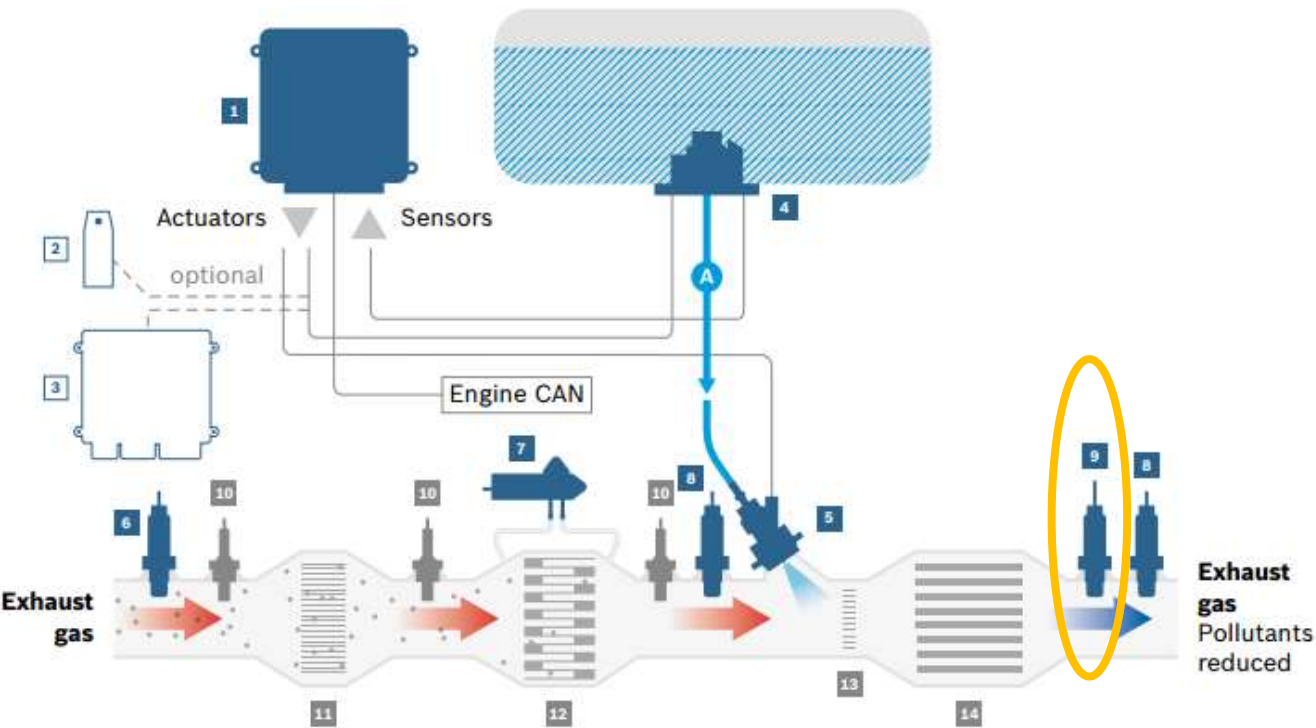
- Η **Αρχή λειτουργίας του αισθητηρίου PM** βασίζεται στη μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης.
- Τα σωματίδια αιθάλης εναποτίθενται σε διάταξη ηλεκτροδίων και σχηματίζουν αγώγιμες διαδρομές αιθάλης μεταξύ των ηλεκτροδίων.
- Πριν από κάθε φάση μέτρησης, το στοιχείο αισθητήρα αναγεννάται με θέρμανση, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι βρίσκεται σε προκαθορισμένη κατάσταση κατά την έναρξη της διαδικασίας μέτρησης.
- Το διαγνωστικό λογισμικό του οργάνου στη συνέχεια αναλύει τις επιδόσεις με βάση το μετρημένο ρεύμα.



# Μετρήσεις ρύπων PM - 3

## Exhaust gas treatment

Particulate matter sensor



### Bosch components

- 1 Dosing control unit DCU/ electronic engine control unit MDG1
- 2 Optional with MDG1: heater control unit HCU-PC
- 3 Optional with MDG1: glow control unit GCU
- 4 Supply module SM 5.1 (PC)/SM 5.2 (LD)
- 5 Dosing module DM 3.2/DM 3.4
- 6 Lambda sensor
- 7 Differential pressure sensor
- 8 NO<sub>x</sub> sensor
- 9 Particulate matter sensor

### Other components

- 10 Temperature sensor
- 11 Oxidation catalytic converter (optional: NO<sub>x</sub> storage catalyst)
- 12 Diesel particulate filter
- 13 Mixer
- 14 SCR catalytic converter

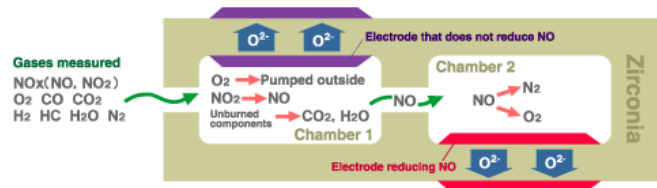
- A AdBlue®
- Electrical connection
- ▬ heat/cold

# 5. Μετρήσεις ρύπων NOx

- Ο αισθητήρας NOx/lambda (Smart NOx) της Continental μετρά το NOx πριν και μετά από τον καταλύτη SCR για τον έλεγχο της δοσολογίας ουρίας και για τη διάγνωση της λειτουργίας του συστήματος SCR.



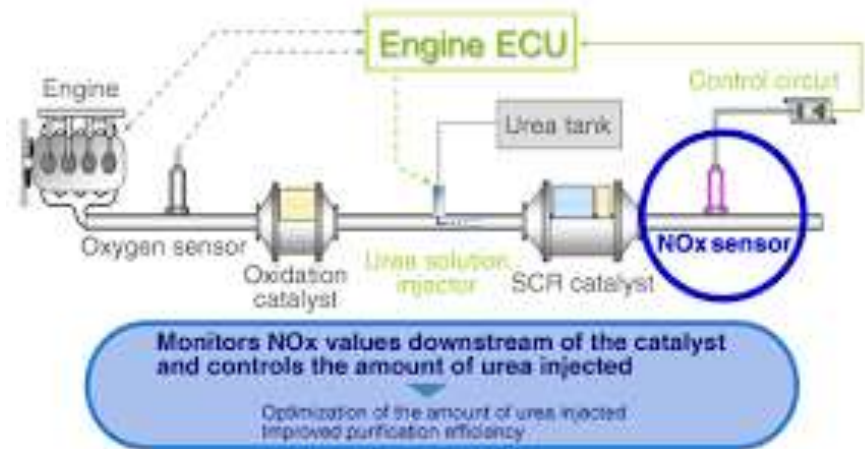
NGK Insulators, Ltd.  
Basic principle of the high-precision NOx sensor



1. In Chamber 1, any oxygen present in the exhaust gas is removed first.
2. In Chamber 1, combustible gases present in the exhaust gas are burned.
3. In Chamber 1, NO<sub>2</sub> present in the exhaust gas is replaced with NO.
4. In Chamber 2, the NO is decomposed by the reduction catalyst, and the amount of oxygen generated at the time of decomposition is measured.

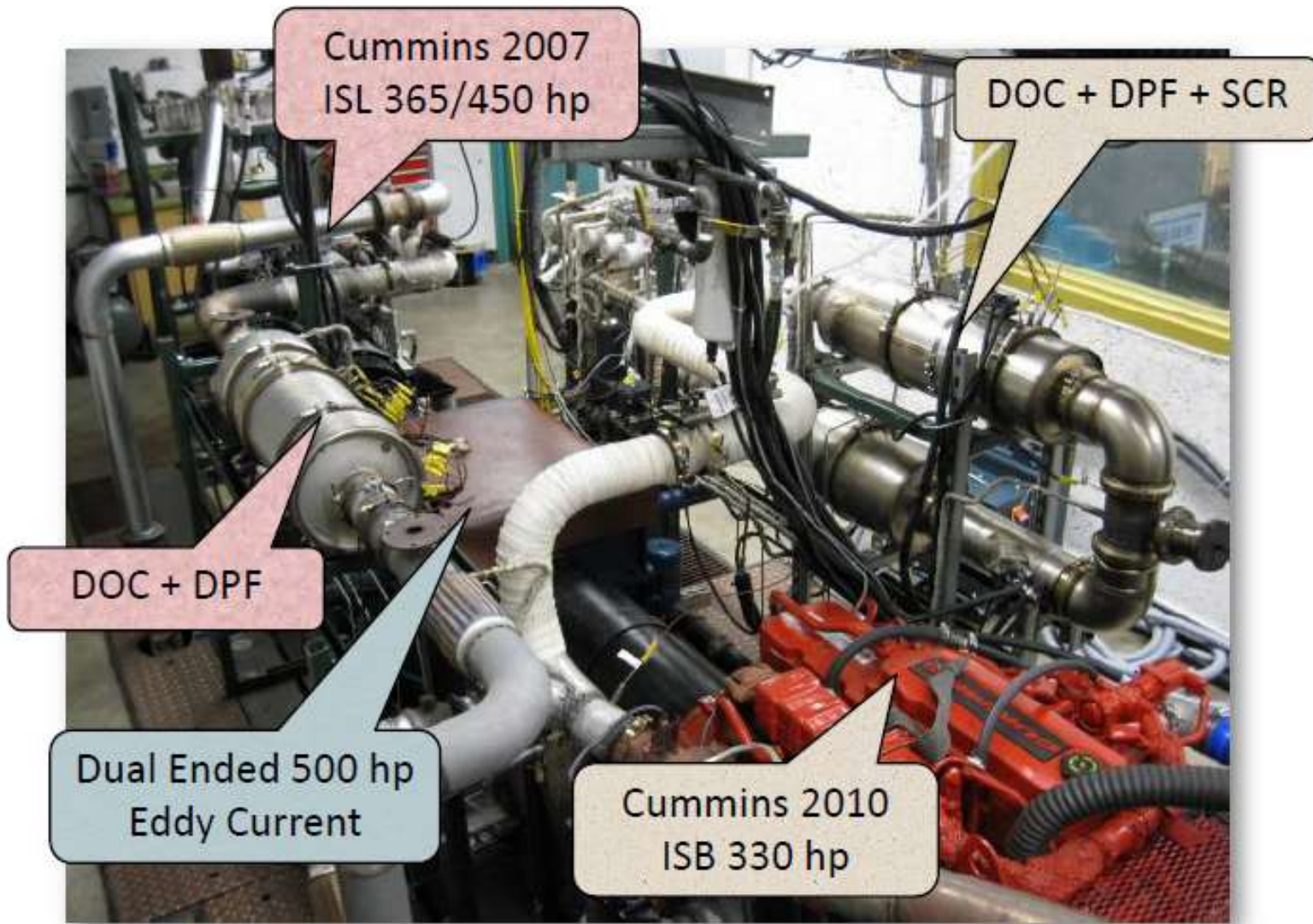
Example;  $2\text{NO} \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}_2$

Usage example SCR system SCR: Selective Catalytic Reduction





# Πειραματικές Δοκιμές DPF, SCR



MAN B&W 6S46MC-C8 (7MW) engine with integrated SCR fulfills the IMO's strictest emission standards. The engine is bound for a general cargo carrier, built at the Nakai shipyard, 2010. Engine was constructed by Hitachi Zosen Corporation at Ariake, Japan.



Τέλος Α' Μέρους