

Memo

www.tno.nl

thomas.frateur@tno.nl

+31621652889

Van T. (Thomas) Frateur
Onderwerp Rekenmethode - IKZ emissie monitoring

Datum
10 oktober 2024
Onze referentie
2024-STL-MEM-100354907

Dit document beschrijft de rekenmethode ten behoeve van emissie monitoring aan boord van zeeschepen uitgerust met NO_x sensoren in de uitlaatpijp. De uitleg in dit document is een aanvulling op de rekenmethode in flowchart formaat in document '*MonitoringEmissionCalculationDiagram_Final.pdf*'. Merk op dat onderstaande methode voor één motor wordt uitgevoerd. Bij schepen met meerdere motoren dient de methode voor elke motor afzonderlijk toegepast te worden.

De rekenmethode is opgedeeld in twee delen:

- Continue emissie berekeningen
- Cumulatieve emissie berekeningen

De continue emissie berekeningen bevatten de conversies van gemeten NO_x concentraties naar momentane emissies massa flow en arbeid specifieke emissies (g/kWh) per gelogde tijdstap. De resultaten uit deze berekeningen geven gedetailleerd inzicht in de NO_x emissies per tijdstap en kunnen later gebruikt worden om de oorzaak van hoge emissies te achterhalen. De momentane resultaten worden ook als input gebruikt voor de cumulatieve emissie berekeningen.

De cumulatieve emissie berekeningen maken gebruik van gemeten waarden en momentane emissie resultaten om relevante emissie data per dag te berekenen. De methode voor het berekenen van deze emissie waarden is sterk afhankelijk van de emissiecomponent aangezien NO_x wel actief gemeten wordt maar PN en PM emissies slechts berekend kunnen worden aan de hand van stationaire meetresultaten. Cumulatieve resultaten geven een hoog over beeld van het emissiegedrag van het gemonitorde schip en tonen de totale NO_x emissies over de gehele monitoringperiode.

1. Data

Bij benodigde data voor het correct uitvoeren van emissie monitoring aan boord van schepen maken we onderscheid tussen drie typen data:

- Live data – data die continue gemeten en/of gelogd wordt aan boord van het schip
- Statische informatie – informatie welke eenmalig verzameld dient te worden over karakteristieken van de motor.
- Fysische constanten.

Van alle typen data wordt in onderstaande secties een overzicht gegeven van alle benodigde variabelen.

1.1. Live data

Live data wordt verzameld aan boord van het schip doormiddel van een trackerbox. De live data wordt verzameld aan een vaste frequentie en bevat gemeten parameters van elke motor en uitlaatsysteem aan boord van het gemonitorde schip.

Tabel 1.1: Benodigde live data van het schip

Variabele	Uitleg	Eenheid
NO_x	Gemeten NO_x concentratie in de uitlaat na de nabehandelings systemen.	ppm
$p_{ambient}$	Gemeten omgeving luchtdruk.	Pa
$p_{manifold}$	Gemeten luchtdruk in het inlaatspruitstuk van de motor. Bij voorkeur achter de cooler.	Pa
$T_{manifold}$	Gemeten lucht temperatuur in het inlaatspruitstuk van de motor. Bij voorkeur achter de cooler.	deg C
S_{engine}	Rotatiesnelheid van de motor.	RPM
$P_{electrical}$	Gegenereerd elektrisch vermogen van de generator set. Merk op dat deze variabele enkel gebruikt wordt om het mechanische vermogen van de motor te bepalen in een latere stap.	kW
p_{DPF}	Gemeten tegendruk voor het DPF. Dit is een maat van de belading van het filter.	mBar
T_{DPF}	Gemeten temperatuur van het DPF. Bij voorkeur bij de ingang van het DPF gemeten.	mBar
<i>Bypass state</i>	De status van de DPF bypass: False = bypass niet actief, True = bypass actief.	Boolean
<i>Regeneration flag</i>	De status van DPF regeneratie: False = regeneratie niet actief, True = regeneratie actief.	Boolean

1.2. Statische informatie

Statische informatie is informatie met betrekking tot motoreigenschappen welke eenmalig bij aanvang van de monitoring campagne opgehaald moet worden uit motor specificaties en stationaire metingen. De informatie uit de stationaire metingen kan ook gehaald worden uit de metingen van de ingebruikname test.

Tabel 1.2: Benodigde statische informatie van de motor

Variabele	Uitleg	Format	Eenheid
Cylinder volume	Gecombineerde cilinder inhoud van de motor.	Float	m ³
Mechanical power map	Map van elektrisch vermogen naar mechanisch vermogen van de motor.	Table	kW
Volumetric efficiency map	Map van mechanisch motorvermogen naar volumetrische efficiëntie.	Table	%
SFC map	Map van mechanisch motorvermogen naar specifiek brandstofverbruik (SFC).	Table	g/kWh
Tested load points	Een overzicht van de geteste lastpunten afhankelijk van de relevante IMO cyclus.	List	-
Percentual load points	Een overzicht van de geteste lastpunten afhankelijk van de relevante IMO cyclus, uitgedrukt in percentueel vermogen van de 'rated power'.	List	%
PN emissions per load point	Gemeten en berekende PN emissies per lastpunt van de relevante IMO cyclus.	Table	#/kWh
PM emissions per load point	Gemeten en berekende PM emissies per lastpunt van de relevante IMO cyclus.	Table	g/kWh
1/sampling frequency (Δt)	De sampling periode van de gebruikte signaal logger.	Float	s

1.3. Fysische constanten

Fysische constanten zijn eigenschappen van gemeten stoffen welke gebruikt worden in de rekenmethode.

Tabel 1.3: Benodigde fysische constanten

Variabele	Uitleg	Waarde	Eenheid
M_{NO_x}	Molaire massa van NO_x .	46	g/mol
M_{exh}	Molaire massa van uitlaatgas.	29 ¹	g/mol
R	Gasconstante van lucht.	287.05	J/(kg K)

2. Continue emissie berekeningen

Continue emissie berekeningen gebruiken live data en statische informatie als input en berekenen de NO_x massa stroom en arbeid specifieke emissies. Daarnaast wordt ook het mechanische vermogen van de motor berekend voor gebruik in de cumulatieve emissie berekeningen. NO_x emissies worden berekend aan de hand van gemeten emissie concentraties en uitlaatgas stroom berekeningen.

2.1. Geïnterpoleerde motor eigenschappen

In de statische motor informatie worden enkele motoreigenschappen gegeven in discrete conversie maps. Een voorbeeld van zo'n map wordt gegeven in Tabel 2.1. Om per tijdstap in de live data een geldige waarde voor de betreffende motoreigenschappen te kennen is interpolatie nodig. Voor interpolatie wordt gebruik gemaakt van een n^{th} order datafit op de beschikbare maps in de vorm van:

$$x_i = y_i^0 \cdot b_0 + y_i^1 \cdot b_1 + y_i^2 \cdot b_2 + \dots + y_i^n \cdot b_n$$

Hierbij zijn $b_0 \dots b_n$ de fitting parameters. De input y_i en te gebruiken datafit graad voor elke motor parameter wordt gegeven in Tabel 2.2.

Tabel 2.1: Voorbeeld van een conversie map ten behoeve van interpolatie.

Meetpunt	Input data	Output data
10%	170	187
25%	425	458
50%	850	897
75%	1275	1341
100%	1700	1789

Tabel 2.2: Datafit definities van relevante motor eigenschappen.

Motor eigenschap	Symbol	Input y_i	Datafit graad
Mechanisch vermogen	P [kW]	Elektrisch vermogen	1 ^e
Volumetrische efficiëntie	η_{vol} [%]	Mechanisch vermogen	2 ^e
Specifiek brandstofverbruik	SFC [$\frac{g}{kWh}$]	Mechanisch vermogen	4 ^e

¹ Molaire massa van uitlaatgas is afhankelijk van de lambda waarde van het uitlaatgas.

2.2. Flowberekeningen

NO_x emissies worden berekend aan de hand van gemeten emissie concentraties en berekende flow door de motor. De formule voor het berekenen van de emissie massa stroom ziet er dan als volgt uit:

$$NO_x \left[\frac{g}{h} \right] = \frac{NO_x [ppm] \cdot Flow_{exh} \left[\frac{g}{h} \right] \cdot M_{NO_x} \left[\frac{g}{mol} \right]}{10^6 \cdot M_{exh} \left[\frac{g}{mol} \right]}$$

Hierbij wordt de flow in de uitlaat van de motor $Flow_{exh}$ berekend door:

$$Flow_{exh} \left[\frac{g}{h} \right] = Flow_{air} \left[\frac{g}{h} \right] + Flow_{fuel} \left[\frac{g}{h} \right]$$

$$Flow_{air} \left[\frac{g}{h} \right] = 60 \cdot 10^3 \cdot \frac{(p_{manifold} [Pa] + p_{ambient} [Pa]) \cdot S_{engine} [RPM] \cdot V_{engine} [m^3] \cdot \eta_{vol} [\%]}{2 \cdot R \left[\frac{Pa \cdot m^3}{kg \cdot K} \right] \cdot (T_{manifold} [degC] + 273.15)}$$

$$Flow_{fuel} \left[\frac{g}{h} \right] = SFC \left[\frac{g}{kWh} \right] \cdot P [kW]$$

Tot slot wordt de arbeid specifieke emissie berekend met:

$$NO_x \left[\frac{g}{kWh} \right] = \frac{NO_x \left[\frac{g}{h} \right]}{P [kW]}$$

3. Cumulatieve emissie berekeningen

Cumulatieve berekeningen gebruiken de momentane resultaten uit de continue emissie berekeningen en enkele parameters uit de live data als input en geven de geleverde arbeid, gemiddelde arbeid specifieke NO_x, PN en PM emissies en cumulatieve NO_x emissies als resultaat. Daarnaast wordt er ook iets gezegd over het aantal regeneraties van het roetfilter en over de periode waarin de gemiddelde PN en PM emissies geldig zijn. Cumulatieve berekeningen worden over een vaste tijdperiode berekend. Een berekening per dag geeft een goed inzicht over het lange termijn emissie gedrag van een schip.

3.1. Motor arbeid

Motor arbeid word berekend door integratie van het momentane mechanische vermogen van de motor. De numerieke integratie van het vermogen wordt gegeven door:

$$W [kWh] = \sum_{t=0}^n \frac{P_{i,t} [kW] \cdot \Delta t [s]}{3600}$$

Hierbij loopt t van 0 tot de laatste tijdstap van de gekozen tijdperiode n .

3.2. NO_x emissies

3.2.1. Cumulatieve emissies

Cumulatieve NO_x emissies worden berekend door integratie van de emissie massa stroom over de gekozen tijdperiode.

De numerieke integratie van de emissie massa stroom wordt gegeven door:

$$NO_x[g] = \sum_{t=0}^n \frac{NO_x \left[\frac{g}{h} \right] \cdot \Delta t[s]}{3600}$$

Hierbij loopt t van 0 tot de laatste tijdstap van de gekozen tijdperiode n .

Merk op dat de cumulatieve emissies over de gehele monitoringperiode bepaald worden door de som van de cumulatieve emissies per gekozen tijdperiode.

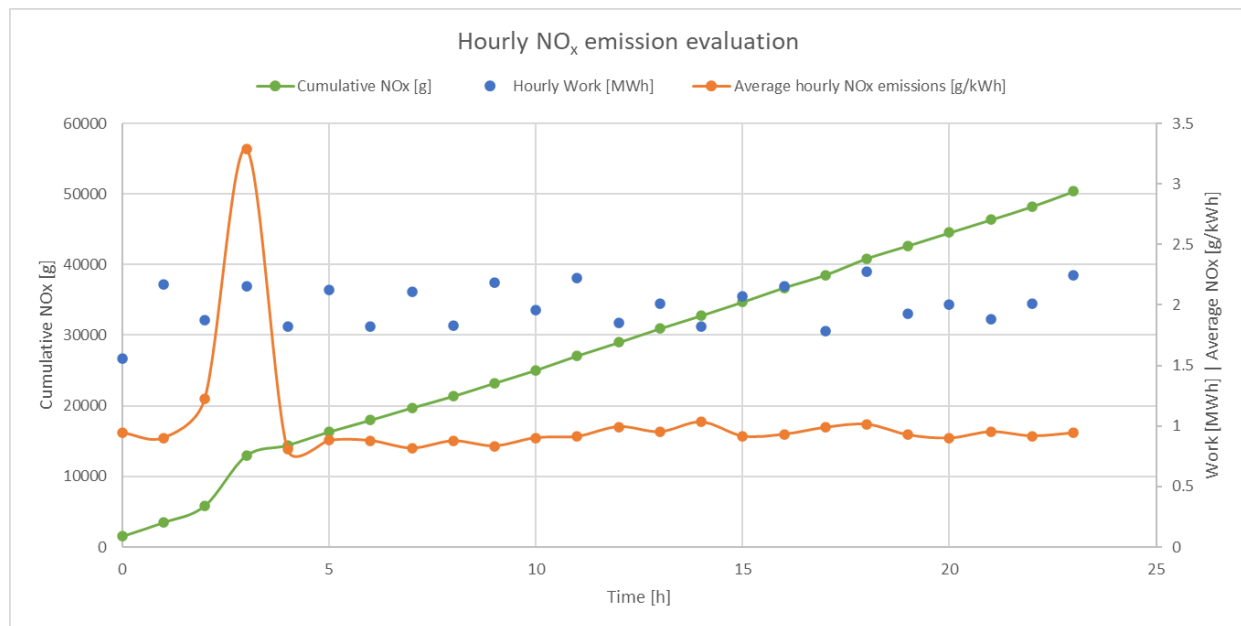
3.2.2. Arbeid specifieke emissies

De gemiddelde arbeid specifieke NO_x emissies worden bepaald door deling van de cumulatieve NO_x resultaten over de geleverde arbeid over dezelfde tijdperiode:

$$NO_{x,avg} \left[\frac{g}{kWh} \right] = \frac{NO_x[g]}{W[kWh]}$$

3.2.3. Voorbeeld data visualisatie

Een voorbeeld van een data visualisatie met de verzamelde NO_x data word gegeven in Figuur 3.1. Merk op dat cumulatieve resultaten in het voorbeeld per uur worden berekend in plaats van per dag.



Figuur 3.1: Voorbeeld visualisatie van verzamelde NO_x emissie data.

3.3. Deeltjes emissies

Deeltjes emissies worden niet rechtstreeks gemeten aan boord van het schip. Onder normale operationele omstandigheden blijft een deeltjes filter (DPF) vergelijkbaar werken en is de uitstoot van PN en PM emissies relatief constant. Door monitoren van enkele relevante parameters kan een oordeel gemaakt worden of het DPF goed functioneert en PN en PM emissie resultaten bij stationaire metingen geldig zijn voor de gemonitorde situatie. Aan de hand van het vermogensprofiel van de motor kan dan een representatief cycle resultaat berekend worden voor de gekozen tijdperiode.

3.3.1. Monitoring van DPF parameters

Om iets over de goede werking van het DPF te zeggen kunnen de volgende parameters gemonitord worden:

- Bypass status: bij gebruik van de DPF bypass worden deeltjes niet uit de uitlaatstroom gefilterd. De PN en PM emissies zijn daardoor veel hoger dan bij gebruik van het DPF.
 - De status van de bypass kan gemonitord worden aan de hand van de tegendruk in het DPF. Bij een DPF tegendruk boven 5 mBar kan men concluderen dat er uitlaatgas door het (schone) DPF stroomt.
 - Een tweede check kan uitgevoerd worden aan de hand van de ingaande DPF temperatuur (T_{DPF}): Bij temperaturen boven 250 graden (bij inactieve brander) wordt het DPF goed verwarmd door uitlaatgassen. Merk op dat deze methode meer vertraging heeft dan de tegendrukmethode. Temperatuur monitoring wordt enkel gebruikt als back-up optie om eventuele afwijkingen te onderzoeken. De automatische DPF check maakt geen gebruik van het temperatuur signaal.
- DPF tegendruk (p_{DPF}): de tegendruk van het DPF is een maat voor de belading van het filter. Bij te hoge beladingen is er kans op te sterke beïnvloeding van de motorprestaties of doorslaan van het filter hetgeen in hogere deeltjes emissies resulteert. De maximale tegendruk wordt gespecificeerd door de DPF fabrikant.

Door bovenstaande checks per tijdstap in de live data uit te voeren kan per gekozen tijdperiode een verhouding opgesteld worden van de periode waarin de DPF naar alle waarschijnlijkheid naar behoren werkt en de periode waarin operatie van de DPF onbekend is. Bovenstaande eisen moeten hiervoor met een AND operator beoordeeld worden.

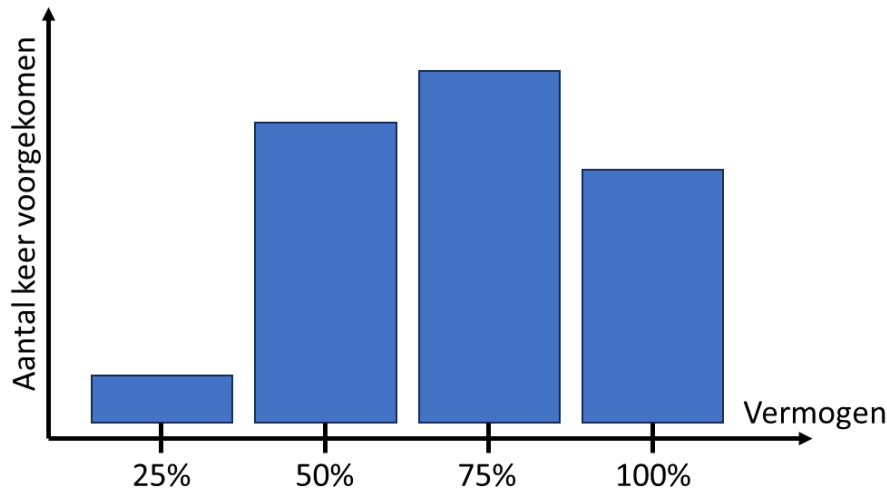
Als losse check kunnen ook het aantal regeneraties van het DPF gemonitord worden. De DPF fabrikant specificeert een benodigd aantal regeneraties van het DPF tijdens normale operatie. Indien minder of veel meer regeneraties voorkomen kan dit wijzen op een probleem van het DPF hetgeen mogelijk invloed heeft op de deeltjes emissies. Regeneraties kunnen bijgehouden worden aan de hand van 'flame sensor' data. Bij een flame sensor signaal van meer dan 5% staat de regeneratie brander aan.

3.3.2. Vermogensprofiel

Het vermogensprofiel van het gemonitorde schip tijdens de gekozen tijdperiode kan bepaald worden door binning van de momentane motorvermogens tijdens de gekozen tijdperiode. De bin definities voor de vermogens worden gedefinieerd door de gemeten vermogens uit de toepasbare IMO cycle waarbij dit vermogen steeds het midden van een bin vormt. Als voorbeeld wordt een fictief histogram gegeven op basis van een motor welke aan de E2 cycle voldoet in Tabel 3.1 en Figuur 3.2 . Merk op dat de laagste bin altijd wordt doorgetrokken tot 0.

Tabel 3.1: Lastpunten van de IMO E2 cycle en bijhorende bin definities.

	LP ₁	LP ₂	LP ₃	LP ₄
Relatief vermogen [%]	25%	50%	75%	100%
Bin definitie	0% - 37.5%	37.5% - 62.5%	62.5% - 87.5%	87.5% - 112.5%



Figuur 3.2: Fictief histogram van een vermogens profiel naar lastpunten van de IMO E2 cycle.

Het vermogensprofiel kan gebruikt worden voor bepaling van aangepaste weegfactoren voor gebruik in berekening van de representatieve cycle resultaten. Weegfactoren worden bepaald door:

$$WF_{LP_i} = \frac{occurrences_i}{\sum_{x=LP_1}^{LP_n} occurrences_x}$$

Hier is LP_i een van de lastpunten uit de toepasbare cyclus.

3.3.3. Representatief cycle resultaat.

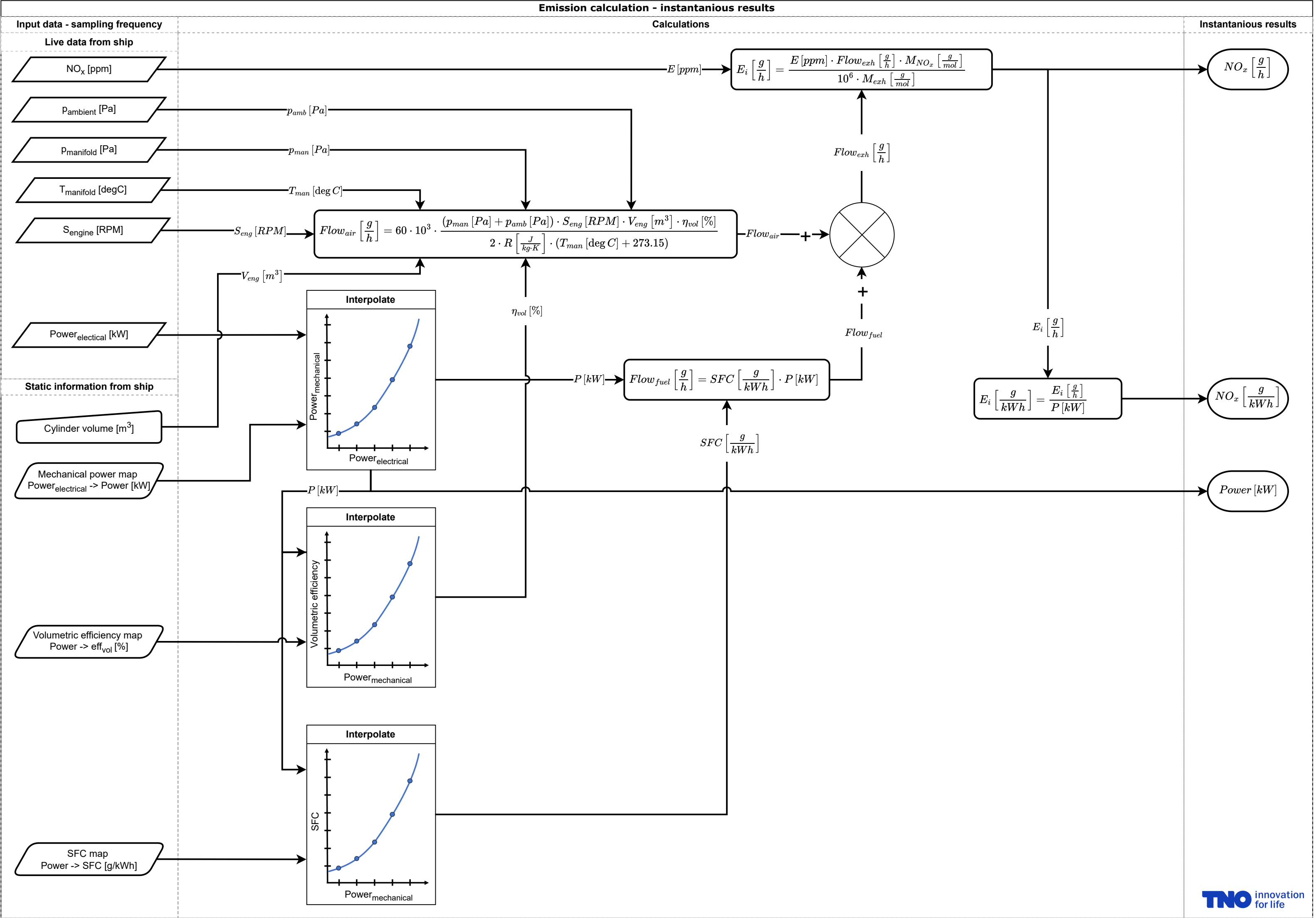
Het representatieve cycle resultaat wordt verkregen door de weegfactoren uit de toepasbare cyclus te vervangen met de aangepaste weegfactoren uit Sectie 3.3.2. De representatieve cycle resultaten voor PN en PM emissies worden dan gegeven door:

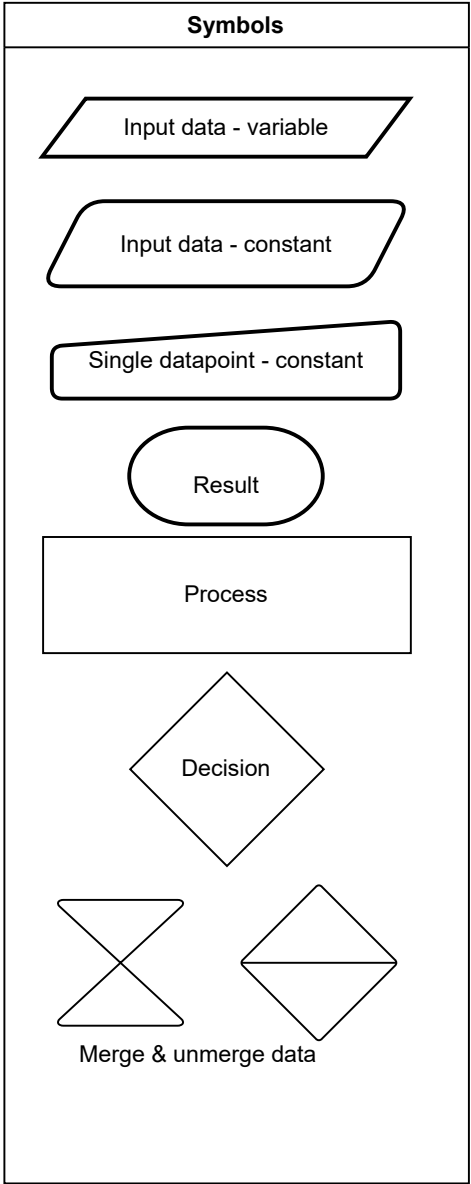
$$PN_{avg} \left[\frac{\#}{kWh} \right] = \sum_{x=LP_1}^{LP_n} \frac{WF_x \cdot PF_x \cdot PN_x \left[\frac{\#}{kWh} \right]}{\sum_{i=LP_1}^{LP_n} WF_i \cdot PF_i}$$

$$PM_{avg} \left[\frac{g}{kWh} \right] = \sum_{x=LP_1}^{LP_n} \frac{WF_x \cdot PF_x \cdot PM \left[\frac{g}{kWh} \right]}{\sum_{i=LP_1}^{LP_n} WF_i \cdot PF_i}$$

Hierbij is WF_x steeds de weegfactor en PF_x de nominale power factor (relatief vermogen) van de betreffende vermogens bin.

Merk op dat bovenstaande gemiddelde deeltjes emissies enkel geldig zijn gedurende de geldige tijd fractie bepaald in Sectie 3.3.1.





Constants
$M_{NO_x} : 46 \left[\frac{g}{mol} \right]$
$M_{exh} : 29 \left[\frac{g}{mol} \right]$
$R : 287.05 \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$