



ANTWERP MARITIME ACADEMY

Analyse van het ventilatiesysteem in de scheepsaccommodatie/machinekamer

Milan Denys

Scriptie voorgedragen tot het behalen
van de graad van
Master in de Nautische Wetenschappen

Promotor: Kapt. dr. W. Jacobs

Academiejaar: 2022 - 2023.

Woord vooraf

In deze thesis kaart ik de problemen van het ventilatiesysteem in de scheepsaccommodatie/machinekamer aan. Volgens mij is dit een onderwerp dat onvoldoende aandacht krijgt. In dit onderzoek wil ik nagaan welke problemen er zijn en wil ik meer aandacht vestigen op de tekortkomingen van het ventilatiesysteem van de accommodatie.

Ik hoop dat deze thesis een hulp is voor zeevarenden in de toekomst en dat er verder onderzoek zal gebeuren om de besproken problemen te verhelpen.

Ik zou nog een woord van dank willen richten aan mijn promotor Kapt. dr. Werner Jacobs voor alle hulp die hij bood bij het verzamelen en analyseren van de data en voor het nalezen van deze thesis. Tot slot Als laatst wil ik ook mijn dank betuigen aan iedereen die mij op één of andere manier geholpen heeft met het schrijven en opstellen van deze thesis.

Samenvatting

De ventilatie van de accommodatie is een systeem van het schip waaraan vaak niet genoeg aandacht wordt besteed. Desondanks is het een zeer vitaal systeem en staat het in voor de veiligheid van zeevarenden.

Om na te gaan of dit systeem wel optimaal werkt, is onderzoek gedaan aan boord van verschillende schepen, waaronder duwboten, haven sleepboten en een zeilschip.

Eerst werd de temperatuur en luchtvochtigheid die op de schepen werd gemeten bestudeerd. Daarbij is er onderzoek gedaan naar de relatie tussen deze twee factoren, met name hoe ze er samen voor zorgen dat een ruimte een aangename temperatuur heeft. Verder werd nagegaan of deze aangename omgeving wel effectief aanwezig is aan boord van de schepen.

Vervolgens is het niveau van koolstofdioxide in de gemeten ruimtes onderzocht. Dit is een belangrijk gegeven omdat het verwijderen van koolstofdioxide uit de ruimte één van de belangrijkste redenen is om een ventilatiesysteem in de accommodatie en de machinekamer te voorzien. De mens ademt namelijk zuurstof in en koolstofdioxide terug uit, waardoor er continu een toevoer van zuurstof nodig is in de ruimtes. Om na te gaan of dit wel optimaal gebeurt, is het belangrijk om de grootte van de concentraties koolstofdioxide in de ruimte na te gaan. Als die te hoog zijn, wijst dit op een slecht functioneren van het ventilatiesysteem.

Tot slot is er ook onderzocht in welke mate het ventilatiesysteem de zeevarenden beschermt tegen schadelijke gassen die zich in de atmosfeer rond het schip bevinden. Deze gassen kunnen afkomstig zijn van de industrie in de havens, uitstoot van andere schepen, maar vooral van de uitlaatgassen van de motor van het schip zelf.

Daarbij is er gekeken naar het verschil in concentratie schadelijke gassen tussen de schepen terwijl ze varen en terwijl ze aan de kade liggen. Bij het zeilschip is daarenboven gekeken naar de verschillende meetresultaten wanneer het schip op motor aan het varen was en wanneer het schip aan het zeilen was.

Om na te gaan hoe en wanneer deze gassen in de accommodatie terecht komen, worden verschillende factoren besproken die dit zouden kunnen beïnvloeden. Bij enkele van die factoren, wordt ook het effect onderzocht.

Abstract

The ventilation in the accommodation spaces is a system that is often neglected. Yet, it remains a vital system and supports the safety of seafarers at sea.

To control the optimum functioning of this system, research has been carried out on board of multiple ships, such as pushers, port tugboats and a sailing vessel.

First, the temperature and humidity measured on board of these vessels were examined. The relation between these two factors and how they both contribute to a comfortable temperature was studied. With this information the studied ships were monitored for this comfortable temperature.

A second important factor is the level of carbon dioxide in the measured spaces. One of the vital purposes of the ventilation system in the accommodation and in the engine room, is the exhaust of these gasses. Humans continuously breath in oxygen and breath out carbon dioxide, so a constant supply of oxygen in the spaces is vital. To verify the proper functioning of the system, carbon dioxide concentrations are measured in these spaces. If these concentrations are too high, the ventilation system is not functioning properly.

Lastly, the protection of seafarers from harmful gasses in the surrounding atmosphere of the ship was looked at. These gasses can originate from the industry of ports, exhaust gasses from other ships, but mostly from the exhaust gasses of the ship's motor.

Therefore, the difference in concentration of harmful gasses while the ship is sailing or when she is moored, was analyzed. On top of that there has been a look at the difference to when the sailing ship was sailing with her sails or when she was sailing with her engine.

To see how and when these gasses entered the accommodation, different factors got discussed and how they could influence this. The effect of some of these factors also got investigated.

Inhoudstafel

Woord vooraf	i
Samenvatting.....	ii
Abstract	iii
Inhoudstafel	iv
Lijst met figuren.....	vii
Lijst met tabellen.....	ix
Inleiding.....	1
1 Het belang van ventilatie:	2
1.1 Fysieke problemen.....	2
1.2 Mentale problemen:.....	3
1.3 Bijkomend probleem	4
2 Het onderzoek.....	6
2.1 Schepen initieel onderzoek	6
2.2 Dar Mlodziezy	8
2.2.1 Uitlaat van de motor.	9
2.2.2 Belangrijke informatie in het logboek.....	10
2.3 De meettoestellen	11
2.4 De gemeten waarden	12
3 Temperatuur en relatieve luchtvochtigheid	16
3.1 Optimale atmosferische conditie	16
3.1.1 Optimale verhouding tussen temperatuur, lichtsnelheid en relatieve luchtvochtigheid.....	16
3.1.2 Relatieve luchtvochtigheid	19
3.2 Effectieve Verhouding tussen de relatieve luchtvochtigheid en de temperatuur aan boord van de gemeten schepen.....	20
3.2.1 Categorie 1: ruimtes zonder externe warmtebron	22
3.2.2 Categorie 2: ruimtes met externe warmtebron.....	26
3.3 Verloop van de temperaturen	29
4 CO ₂	34
4.1 Gezondheidsproblemen van CO ₂	34
4.2 Bronnen van CO ₂ aan boord	35
4.3 Het verloop van de CO ₂ concentratie	38

4.4	CO ₂ concentratie vs snelheid v/h schip	43
4.5	CO ₂ concentratie Dar Mlodziezy	45
5	PM	50
5.1	Factoren die de PM aan boord beïnvloeden	50
5.2	Het verloop van PM aan boord	51
5.2.1	Resultaten van de brug	52
5.2.2	Resultaten van de Dar	55
5.2.3	Resultaten van de machinekamer	58
6	CO	61
6.1	Gezondheidsproblemen van CO	61
6.2	Bronnen van CO aan boord	62
6.3	Verloop CO aan boord	63
6.3.1	De brug	63
6.3.2	De machinekamer	65
6.3.3	Kajuit Dar	68
7	TVOC	73
7.1	Factoren die TVOC aan boord beïnvloeden.	73
7.2	Gezondheidsproblemen van TVOC	73
7.3	Verloop van TVOC aan boord.	74
7.3.1	De Brug	74
7.3.2	De machinekamer	77
7.3.3	Kajuit Dar	79
8	NO _x en SO ₂	81
8.1	Gezondheidsproblemen van NO ₂	81
8.2	Gezondheidsproblemen van NO	82
8.3	Bronnen van NO _x aan boord	83
8.4	Gezondheidsproblemen van SO ₂	85
8.5	Bronnen van SO ₂ aan boord	85
8.6	Verloop van NO _x	87
8.7	Verloop van SO ₂	88
9	H ₂ S	89
	Conclusie	91
	Bibliografie	94

Lijst met figuren

Figuur 1 voorbeeld van een haven sleepboot.....	7
Figuur 2 voorbeeld van een duwboot	7
Figuur 3 dar mlodziezy	8
Figuur 4 plaats van de kajuit	9
Figuur 5 positie uitlaat dar mlodziezy	10
Figuur 6 het gebruikte meettoestel	12
Figuur 7 comfort grafiek opgemaakt door de american society of heating and air conditioning engineers	18
Figuur 8 zomercomfortzone 0.5m/s	20
Figuur 9 verhouding relatieve luchtvochtigheid en temperatuur brug schip A	22
Figuur 10 verhouding relatieve luchtvochtigheid en temperatuur brug schip B.....	23
Figuur 11 verhouding relatieve luchtvochtigheid en temperatuur brug schip C.....	23
Figuur 12 verhouding RH en temperatuur kajuit Dar	24
Figuur 13 positie air conditioning unit Dar Mlodziezy	26
Figuur 14 positie te warme kajuiten Dar Mlodziezy	26
Figuur 15 verhouding RH en temperatuur keuken schip A.....	27
Figuur 16 verhouding RH en Temperatuur keuken schip B	28
Figuur 17 verhouding RH en temperatuur machinekamer schip D	28
Figuur 18 verloop van temperatuur machinekamer schip B	30
Figuur 19 vergelijking temperaturen schip C	31
Figuur 20 detail van de brug van een havensleper	32
Figuur 21 CO2 concentraties schip B.....	38
Figuur 22 CO2 concentraties schip A	39
Figuur 23 CO2 concentraties schip C.....	39
Figuur 24 CO2 concentraties schip D	40
Figuur 25 verloop CO2 brug schip C	43
Figuur 26 verloop CO2 brug schip B.....	43
Figuur 27 verloop CO2 kajuit Dar Mlodziezy.....	46
Figuur 28 verloop CO2 kajuit Dar in de haven	47
Figuur 29 verloop CO2 kajuit Dar detail	48
Figuur 30 verloop van fijn stof op brug van schip B.....	51
Figuur 31 verloop fijn stof brug schip B	53
Figuur 32 verloop fijn stof brug schip C	54
Figuur 33 detail verloop fijn stof brug schip B	55
Figuur 34 verloop van fijn stof op de dar	56
Figuur 35 verloop CO2 en PM kajuit Dar deel 1	57
Figuur 36 verloop CO2 en PM kajuit Dar deel 2.....	58
Figuur 37 verloop fijn stof machinekamer schip B.....	59
Figuur 38 verloop fijn stof machinekamer schip C.....	60
Figuur 39 verloop fijn stof machinekamer schip D	60
Figuur 40 verloop koolstof monoxide brug schip C	64

Figuur 41 verloop koolstof monoxide brug schip A	65
Figuur 42 verloop CO machinekamer schip C	66
Figuur 43 verloop CO machinekamer schip D	67
Figuur 44 verloop CO machinekamer schip B	68
Figuur 45 verloop CO kajuit Dar	69
Figuur 46 verloop CO kajuit dar t.o.v. rel windrichting.....	70
Figuur 47 verloop CO kajuit Dar onder zeil	71
Figuur 48 verloop TVOC brug schip C.....	75
Figuur 49 verloop TVOC brug schip A.....	75
Figuur 50 verloop TVOC en CO brug schip C	76
Figuur 51 verloop TVOC brug schip B.....	77
Figuur 52 verloop TVOC machinekamer schip B	78
Figuur 53 verloop TVOC machinekamer schip C	79
Figuur 54 verloop CO en TVOC kajuit Dar	80
Figuur 55 verloop van CO ₂ , PM en NOX	87
Figuur 56 verloop SO ₂ op brug schip B	88
Figuur 57 verloop waterstofsulfide op schip B	89

Lijst met tabellen

Tabel 1 voorbeeld van gemeten waarden	13
---	----

Inleiding

Als er wordt gesproken over ventilatie aan boord van schepen, heeft men het vooral over het ventileren van de lading. Het gaat dan niet alleen over het ventileren op tankerschepen en andere schepen om gassen uit de laadruimte van het schip te krijgen. Maar ook om het ventileren om het zweten van de het schip of de lading tegen te gaan.

Dit is vooral omdat het hoofddoel van schepen is om een lading van een bepaalde plaats naar een andere plaats te vervoeren zonder de lading te beschadigen of te verliezen. Hiervoor is een werkende voortstuwing nodig (wat meestal een verbrandingsmotor is). Verbrandingsmotoren hebben verse zuurstof nodig om te blijven werken. Hiervoor is het ook belangrijk om verse zuurstof in de machinekamer te krijgen zodat de motor en alle andere machines aan boord van schepen zouden kunnen blijven draaien.

Naast een manier om het schip een voortstuwing te geven is er ook iets of iemand nodig om het schip te besturen en te onderhouden. Momenteel wordt dit voornamelijk gedaan door de verschillende mensen die aan boord leven. Deze mensen leven in een metalen kist. De plaats waarin geleefd wordt, is afgeschermd van de zee en het weer. Het is niet altijd mogelijk om eventjes een raam open te zetten, zoals in de meeste huizen.

Daarom is het belangrijk dat mechanische ventilatie aanwezig is voor het onderhouden van een leefbare omgeving aan boord van schepen. Maar meestal stopt de functie ervan bij het opwarmen of afkoelen van de ruimte en het toevoeren van verse lucht.

Hoe dit gebeurt en of dit wel voldoende is, wordt niet zo belangrijk geacht. In deze thesis wordt besproken of de ventilatie in de ruimtes waar mensen aan boord werken en leven wel goed genoeg is om een leefbare omgeving te voorzien en welke complicaties ventilatie met zich mee kan brengen.

Er wordt nagegaan of er genoeg verse lucht in de leefruimtes is aan boord en of het niveau van de temperatuur comfortabel genoeg is. Daarenboven worden verschillende stoffen die invloed hebben op de luchtkwaliteit besproken die zich mogelijk in de ruimte kunnen bevinden.

1 Het belang van ventilatie:

In dit hoofdstuk wordt duidelijk gemaakt waarom het belangrijk is om een goed functionerend ventilatiesysteem aan boord te hebben en waarom er meer aandacht aan besteed moet worden. Ventilatie is belangrijk want het moet alle parameters die in de lucht van de accommodatie en machinekamer nodig zijn voor het gezond (over)leven van een zeeman onderhouden.

Deze parameters bestaan uit onder andere: de O₂ concentratie, de CO₂ concentratie, de luchtvochtigheid en de geuren in de ruimtes van de accommodatie en machinekamer. Daarenboven is het belangrijk dat het ventilatiesysteem, als er schadelijke stoffen of pollutanten de ruimte binnen komen, ervoor zorgt dat die zich niet opstapelen en zo snel mogelijk de ruimte verlaten. Als deze parameters niet optimaal zijn, kan dit leiden tot gezondheidsproblemen.

Er zijn 2 verschillende soorten gezondheidsproblemen, de fysieke problemen en de mentale problemen.

1.1 Fysieke problemen

De mens ademt zuurstof (O₂) in en CO₂ uit. Als het ventilatiesysteem niet meer functioneert, wordt geen verse lucht meer in de ruimte geleverd en blijven de in de ruimte aanwezige mensen O₂ consumeren zonder dat er O₂ wordt toegevoegd en CO₂ afgevoerd.

Als het percentage zuurstof daalt tot onder de aanvaardbare norm van 21% kan dit zware gevolgen hebben op het menselijke brein. Als de mens te weinig zuurstof inademt, treedt hypoxie op ('Hypoxie (medisch)', 2020). Dit heeft als gevolgen: vermoeidheid, duizeligheid, misselijkheid en hoofdpijn. Bij ernstig zuurstoftekort kan dit leiden tot het verlies van bewustzijn en het sterven van een persoon.

Satish e.a. (2012) hebben in hun onderzoek bewezen dat een verhoogde hoeveelheid CO₂ in de ingeademde lucht voor prestatievermindering kan zorgen. Specifiek gaat het hier over het optreden van een belangrijk en betekenisvolle vermindering in de prestatie om beslissingen te maken. Zo een vermindering kan op een schip leiden tot ernstige gevolgen. Want één kleine foute beslissing kan zware schade met zich meebrengen. Welke problemen er zich optreden en bij welke concentratie, wordt verder besproken in paragraaf 4.1

1.2 Mentale problemen:

Naast de toevoer van zuurstof en de afvoer van CO₂ staat ventilatie ook in voor het thermisch comfort (hoe dit wordt bereikt, wordt besproken in paragraaf 3.1.1) van de zeevarenden. Alhoewel comfort een gevoel is dat zich voor een groot deel in ons hoofd afspeelt, kan het leiden tot vermoeidheid en mentale problemen. Mullins & White (2019) vermelden dat er een duidelijk verband is tussen de omgevingstemperatuur en het aantal zelfmoorden, opnames van mensen met mentale problemen,... . Hiernaast wordt er ook vermeld dat de mens minder goed slaapt als hij een te warm gevoel heeft. Mensen worden dus sneller ongelukkig en slapen slechter als ze zich niet comfortabel voelen met de temperatuur van de omgeving.

Ventilatie speelt ook een grote rol bij het verluchten van een ruimte. De mens produceert onaangename geuren (denk maar hoe muf een ruimte ruikt als iemand erin heeft geslapen). Het is zeer onaangenaam als die geuren in de ruimte blijven hangen. Aangezien ventilatie zorgt voor de toevoer van verse lucht en afvoer van vervuilde lucht, zorgt het er ook voor dat deze geuren verdwijnen.

Rocha, Pérez, Rodríguez-Sanz, Obiols, & Borrell (2012) hebben navraag gedaan of de deelnemers van hun onderzoek omgevingsproblemen hadden en of ze zich mentaal goed voelden. Hieruit is gebleken dat veel mensen die vinden dat ze omgevingsproblemen hebben, zich ook mentaal niet goed voelen. Uit dit onderzoek blijkt dat er een link is tussen minder goede omgevingsfactoren en de mentale gezondheid van mensen. De omgevingsfactoren die het meeste invloed hebben op de mentale gezondheid van mensen zijn, volgens het onderzoek: geluid, luchtvervuiling, slechte geur en te weinig groene parken in de buurt.

Er bevinden zich geen groene parken aan boord van schepen. Hierdoor is dus een van de factoren die kan zorgen voor een goede mentale gezondheid niet aanwezig. Zo zal de mentale gezondheid van de zeevarenden veel meer afhangen van de factoren waar de ventilatie wel invloed op heeft.

Ventilatie op het schip, is wel van belang (gedeeltelijk of volledig) voor de andere 3 factoren:

- het ventilatiesysteem is een van de bronnen van geluid in een ruimte
- ventilatie zorgt er ook voor dat vervuilde lucht, die mogelijks rond de accommodatie kan hangen, binnen in de accommodatie terecht kan komen

- ventilatie verhelpt ook het probleem van slechte geuren in de ruimte

Sridevi (2020) vermeldt in zijn onderzoek dat een mens veel positiever gaat denken en minder gestresseerd is als hij bepaalde geuren opvangt. Het gaat dan vooral om geuren die voorkomen in de natuur. Deze geuren kan je in een ruimte brengen door verstuivers of door simpelweg een takje lavendel bij de uitlaat van de ventilatie te plaatsen. Hieruit blijkt dat ventilatie ook kan worden gebruikt om het mentale welzijn van de zeevaarder te stimuleren.

1.3 Bijkomend probleem

Bovenstaande problemen komen voor doordat mensen de ruimte gebruiken. Het doel van de ventilatie is dus om ervoor te zorgen dat die mensen zich in een ruimte met een comfortabele temperatuur en een aangename geur kunnen bevinden. Maar de ruimte moet vooral gezond zijn. Er mag zich geen CO₂ opstapelen, en er moet vooral voldoende zuurstof aanwezig zijn.

Om dit te realiseren moet het ventilatiesysteem verse lucht halen van buiten de accommodatie. Hiermee verbreekt het de fysieke barrière tussen de binnenruimte van de accommodatie en de omgeving rond de accommodatie. Zo komen de stoffen die zich in de buitenlucht bevinden binnen in de leefruimtes van de accommodatie. Deze stoffen kunnen verschillende oorsprongen hebben, zoals uitlaatgassen van de scheepsmotoren en schadelijke stoffen die zich verspreiden vanuit de industrie die zich situeert in de haven.

Er zijn verschillende internationale organisaties die regulaties rond het ventilatiesysteem van de accommodatie hebben opgelegd in verschillende verdragen. Hieronder valt het *Maritiem arbeidsverdrag van de internationale arbeidsorganisatie* (ILO, 2006) en de *Guide to ship sanitation* van de Wereldgezondheidsorganisatie (World Health Organization, 2011). In deze verdragen wordt er echter vooral gefocust op de aanwezigheid van een systeem om voldoende luchtverversing te voorzien. Buiten een vermelding dat maximum 60% procent van de toegevoerde lucht in het ventilatiesysteem afkomstig mag zijn van ruimtes in de accommodatie die geen sanitaire ruimtes zijn, wordt niet vermeld waar de resterende minimum 40% buitenlucht vandaan moet komen. Er wordt dus niet vermeld waar de lucht inlaten zich moeten bevinden.

Een uitzondering hierop vormen de schepen die Benzene in bulk vervoeren. In *voluntary structural guidelines for new ships carrying liquids in bulk containing benzene* (IMO, 2006) zijn

er richtlijnen die vermelden waar de luchtinlaten het best geïnstalleerd worden. In dit document wordt er vermeld dat de luchtinlaat best geplaatst wordt op het boot dek en verbonden wordt met het machinekamer omhulsel of in de schoorsteen. Verder wordt er in dit document ook gesproken over lucht filters.

De IMO legt vooral zijn focus op de schepen die onder de IBC-code (internationale code voor de bouw en uitrusting van schepen die gevaarlijke chemicaliën in bulk vervoeren) vallen als het gaat over gevaarlijke stoffen die in de accommodatie terecht komen. Gevaarlijke stoffen kunnen echter ook van de scheepsmotoren en van de industrie in de haven komen. Deze stoffen kunnen mogelijk via het ventilatiesysteem in de ruimtes van de accommodatie komen.

2 Het onderzoek

Om mogelijke problemen met het ventilatiesysteem aan te tonen is onderzoek gedaan aan boord van meerdere schepen. Eerst zijn de toestellen (die besproken worden in paragraaf 2.3) geplaatst op verschillende schepen die varen in de haven. Deze schepen worden besproken in de volgende paragraaf en zijn uitgekozen omdat die makkelijk toegankelijk waren en altijd in de buurt waren om de toestellen te verwisselen.

De data die gemeten werden door de meettoestellen, zijn van deze schepen de enige beschikbare informatie. De gemeten stoffen zijn allemaal stoffen die een indicatie geven van een goede of slechte luchtkwaliteit, deze stoffen worden verder besproken in paragraaf 2.4. De data van de metingen op deze eerste schepen toonden aan dat er een probleem was met het ventilatiesysteem, maar het was moeilijk om na te gaan waar het probleem precies vandaan kwam. Het was niet geweten hoeveel personen er zich bevonden in een ruimte op een bepaald moment. De relatieve windrichting van de schepen was ook niet gekend. Deze gegevens waren belangrijk om te weten waarom er zich een bepaalde stof op een bepaald moment aan boord werd gemeten.

Het bedrijf van welke de havenschepen eigendom waren, zag een verder onderzoek niet zitten. Om toch nog een antwoord te krijgen op de vragen die de eerste data met zich meebrachten, is er een extra onderzoek gedaan aan boord van het zeilschip *Dar Mlodziezy*. Het voordeel hiervan is dat de data van het logboek ter beschikking waren waardoor het mogelijk was om antwoorden te verkrijgen op bepaalde vragen. Hiernaast bleef het vaargebied van dit schip niet beperkt tot een haven. Tijdens de meetperiode aan boord heeft de *Dar Mlodziezy* gevaren op motor, gevaren op zeil, geankerd en aangemeerd in de haven. Dit maakt het mogelijk om het verschil in luchtkwaliteit te zien voor de verschillende situaties.

2.1 Schepen initieel onderzoek

De eerste metingen vonden plaats op 4 verschillende schepen waarvan het vaargebied beperkt is tot een haven. Omwille van privacy mogen de namen van de schepen en het bedrijf niet vermeld worden. Daarom wordt er gesproken over Schip A, B, C en D.

- Schip A is een haven sleepboot met een lengte van 29.5 meter en een breedte van 11.03 meter. Eigen aan haven sleepboten is dat de uitlaat waar de gassen van de motor

uitkomen zich net achter de stuurhut bevindt, zoals te zien op Figuur 1. Deze schepen bevinden zich ook vaak achter de uitlaat van de grotere schepen die ze slepen in de haven. De positie van de inlaat van de ventilatie is echter niet gekend. Op dit schip werden de meettoestellen geplaatst op de brug en in de machinekamer. Hier werden de metingen uitgevoerd van 11/06/2021 tot en met 30/06/2021.



*Figuur 1 voorbeeld van een haven sleepboot
Bron: (gCaptain, 2019)*

- Schip B is een duwboot van 30 meter lang met een breedte van 11 meter die grote bakken duwt. Deze duwboot vaart continu in hetzelfde gebied als de haven sleepboten. In tegenstelling tot de sleepboten is er een grotere afstand tussen de uitlaat van de motor en de brug van het schip, zoals te zien op Figuur 2. Hier werden de metingen gedaan op 3 verschillende plaatsen: de brug, de keuken en de machinekamer. De metingen werden gedaan tussen 30/06/2021 en 02/09/2021



*Figuur 2 voorbeeld van een duwboot
Bron: ('Duwboot', 2022)*

- Schip C is net als schip A een haven sleepboot. Het schip is even lang met een lengte van 29.5 meter. Het is wel breder (12.5 meter). Het grootste verschil met schip A is de positie van de uitlaat van de motor. De uitlaat van schip C is enkele meters meer naar achter gesitueerd en is meer naar boven gericht. Hierdoor zullen de gassen van de motor van schip C hoger en meer naar achter geblazen worden dan de gassen van schip A. De metingen op dit schip werden gedaan op de brug en in de machinekamer. De periode van de metingen is tussen 02/09/2021 en 01/10/2021
- Schip D is net zoals Schip C. De metingen zijn echter maar uitgevoerd tussen de volgende datums: 01/10/2021 – 27/10/2021. De metingen werden hier gedaan op de brug en in de machinekamer. De uitlaat van schip D heeft ongeveer dezelfde positie en vorm als de uitlaat van schip C.

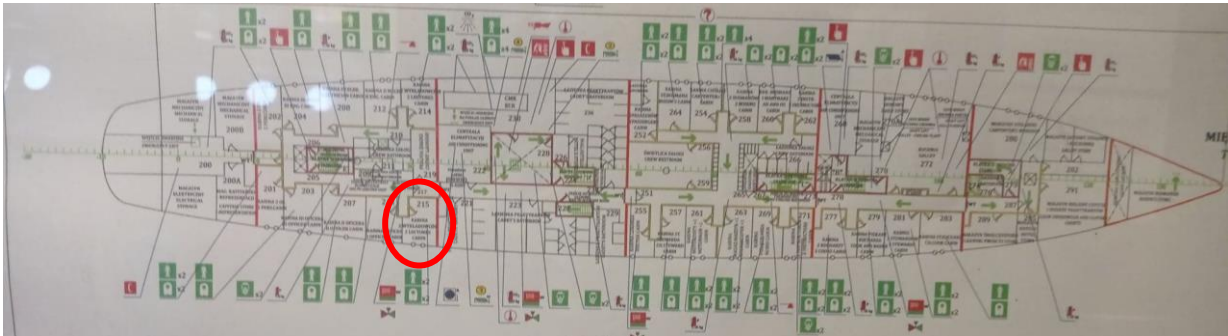
2.2 *Dar Młodzieży*

Het meettoestel op de *Dar Młodzieży* werd geplaatst in een kajuit voor 2 personen. De kajuit is aangeduid op Figuur 4 en bevindt zich 2 dekken onder het bovenste dek. De enige manier om verse lucht in de kajuit te krijgen is dus via het ventilatiesysteem.



Figuur 3 dar młodzieży
Bron: ('*Dar Młodzieży*', 2022)

Het voordeel aan meten op een zeilschip is dat er 2 manieren van voorstuwing zijn: de motor en de zeilen. Het is dus mogelijk dat, als het schip vaart (en de ventilatie aan staat), de motor niet wordt gebruikt. Dit maakt het mogelijk om het verschil te zien in de concentraties van stoffen in de ruimte tussen de momenten dat de motor aan staat en de momenten waar de motor af staat.



Figuur 4 plaats van de kajuit

Bron: fireplan van het schip

Belangrijk om te weten is dat er op elk moment wel een generator aan het draaien was om het schip te voorzien van elektriciteit. Deze generator stoot ook uitlaatgassen uit. Het feit dat de motor niet aan staat op sommige momenten, geeft de mogelijkheid om te zien hoe groot het verschil in concentratie is tussen de momenten wanneer alleen de generator aan staat en wanneer de motor en de generator aan staan.

2.2.1 Uitlaat van de motor.

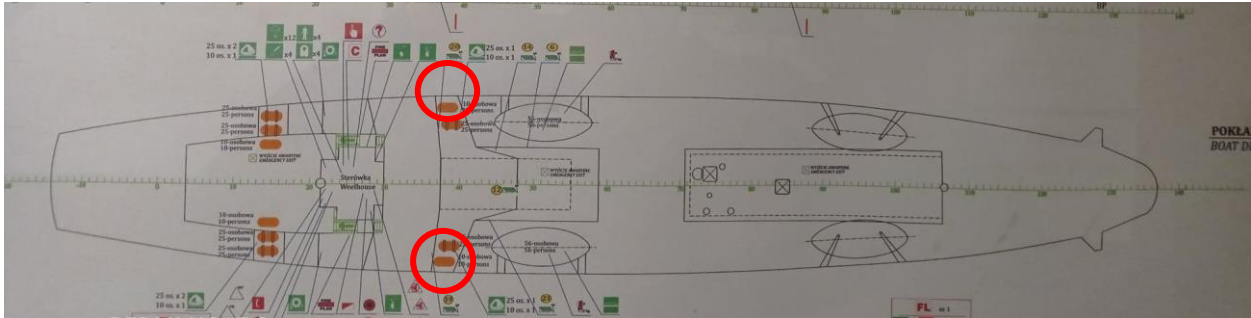
Omdat het een zeilschip is, heeft de Dar geen uitlaat die zich achter de accommodatie bevindt zoals de meeste conventionele schepen. De positie van de uitlaat van de motor is aangeduid in het rood op Figuur 5. Er zijn 2 uitlaten. De ene uitlaat bevindt zich aan de bakboordkant van het schip en de tweede uitlaat bevindt zich aan de stuurboordkant van het schip.

Deze uitlaten worden nooit op hetzelfde moment gebruikt. Welke uitlaat gebruikt wordt, hangt af van aan welke kant de relatieve wind komt. Als de relatieve wind van de stuurboordkant van het schip komt, wordt de uitlaat aan de bakboord kant gebruikt. En omgekeerd.

Her voordeel van dit systeem zou moeten zijn dat de uitlaatgassen direct weggeblazen worden van het schip door de wind.

Het nadeel van dit systeem is echter dat het niet automatisch gebeurt. De wisseling van uitlaat gebeurt manueel op het uiterste punt van de uitlaat. Deze wisseling wordt uitgevoerd door

de officier van de wacht op het moment dat hij merkt dat de relatieve wind van aan de andere kant van het schip komt. Het nadeel hiervan is dat het mogelijk is dat de officier niet direct ziet dat de relatieve wind van kant is veranderd en dat de uitlaatgassen voor een moment terug richting het schip worden geblazen door de wind.



*Figuur 5 positie uitlaat dar mlodziezy
Bron: fireplan van het schip*

2.2.2 Belangrijke informatie in het logboek

Om de wisseling in concentraties te kunnen verklaren, is het nodig om sommige punten die in het logboek genoteerd staan, te bekijken.

Eén van de belangrijkste informatie uit het logboek, is de manier van voortstuwing. Zoals eerder vermeld, is de Dar een zeilschip dat twee mogelijkheden van voortstuwing heeft. Ofwel vaart het op motor, ofwel zeilt het op de wind.

Het schip probeerde zo veel mogelijk op de wind te zeilen. Soms was dit echter niet mogelijk en werd de motor gebruikt. De momenten dat de motor ingeschakeld en uitgeschakeld werd zijn de volgende:

- 27/03/2022 1300 stop engine
- 29/03/2022 0600 start engine
- 29/03/2022 1845 stop engine
- 03/04/2022 2245 start engine
- 04/04/2022 0200 engine off
- 05/04/2022 0745 start engine
- 05/04/2022 time unknown engine of
- 05/04/2022 2255 start engine
- 06/04/2022 2045 stop engine
- 08/04/2022 2050 start engine

- 09/04/2022 0035 stop engine
- 10/04/2022 time unknown start engine
- 10/04/2022 time unknown stop engine
- 13/04/2022 time unknown start engine
- 14/04/2022 0930 stop engine
- 14/04/2022 2150 start engine
- 16/04/2022 1657 stop engine
- 16/04/2022 2345 start engine
- 17/04/2022 0115 stop engine
- 19/04/2022 2055 start engine

Een andere belangrijke factor die genoteerd staat in het logboek, is of het schip aan het varen is of niet. Dit kan een effect hebben omdat, als het schip vaart, het weg beweegt van de uitlaatgassen die het juist heeft uitgestoten.

Een schip ten anker of in de haven blijft in het gebied liggen waar het juist zijn uitlaatgassen heeft uitgestoten. Enkel als de wind ze wegvoert, bewegen de uitlaatgassen weg van het schip. De momenten dat het schip niet vaart, zijn de volgende:

- 04/04/2022 0200 tot 05/04/2022 0813 ten anker
- 09/04/2022 0030 tot 10/04/2022 tijd onbekend ten anker
- 10/04/2022 tijd onbekend tot 13/04/2022 1320 in de haven
- 17/04/2022 0115 tot 18/04/2022 0800 ten anker

Andere factoren die in het logboek staan zijn: de snelheid van het schip over de grond, de koers van het schip over de grond, de windrichting en de windkracht. Met deze gegevens is het mogelijk om de relatieve wind te bepalen. Dit maakt het dan ook mogelijk om te zien wanneer de relatieve wind van kant verandert.

De tijden vermeld in deze paragraaf zijn in Watch tijd; WT=UTC+2

2.3 De meettoestellen

Het gebruikte meettoestel valt te zien op Figuur 6. Dit is een toestel dat de luchtkwaliteit in de ruimte monitort. Het toestel bevat een Poynting Puck antenne die gekoppeld is met een router. Zo kan het de geografische data van waar het toestel zich bevindt, verzamelen. Deze

router zorgt er ook voor dat er een verbinding is met de Cloud. Een singleboardcomputer vraagt een meting van een microprocessor op het sensoren veld. Deze microprocessor is verbonden met een klok (UT) en een heleboel sensoren via een PCB.

Het toestel bevat een heleboel sensoren die het volgende meten: de temperatuur, de relatieve luchtvochtigheid, de druk, de koolstofdioxide, fijn stof, CO, NO₂, O₃, NO, H₂S, SO₂, TVOC en VOC metaaloxide sensors.

De single board computer stuurt een signaal uit waardoor alle sensoren 10 keer gelezen worden. Dit gebeurt in enkele milliseconden. De processor van het toestel berekent dan de gemiddelde waarde voor elke sensor en stuurt dit naar de single board computer. Daar worden de signalen gefilterd om geruis en uitschieters er uit te halen.

Op hetzelfde ogenblik, zet een kalibratie functie de ruwe signalen om in overeenkomende fysieke waarden. Deze waarden worden dan ook afgebeeld op het scherm. (Schalm, Carro, Lazarov, Jacobs, & Stranger, 2022)



*Figuur 6 het gebruikte meettoestel
Bron: (Schalm e.a., 2022)*

2.4 De gemeten waarden

In Tabel 1 zijn alle door de toestellen gemeten waarden en stoffen te zien. In dit deel zullen alle stoffen en waarden apart besproken en uitgelegd worden.

timestamp	lat	long	T (°C)
11/06/2021 12:00	78,31270599	62,32029104	24,01
RH(%)	CO2 (ppm)	NO2 (ppb)	O3 (ppb)
65,48	547,32	10,77	26,93
NO (ppb)	SO2 (ppb)	CO (ppb)	H2S (ppb)
6,41	10,44	5820,20	0,15
TVOC (µg/m3 eq.)	PM1 (ug/m3)	PM2.5 (ug/m3)	PM10 (ug/m3)
652,12	21,88	25,90	31,06

Tabel 1 voorbeeld van gemeten waarden
Bron: eigen werk

- **Timestamp:** Dit is de datum en tijd waarop de meting plaats vond. Zoals hierboven al besproken zijn de metingen uitgevoerd met een interval van telkens 3 minuten.
- **Lat en long:** Dit is de positie van het schip in geografische coördinaten. Met andere woorden: dit is respectievelijk de breedtegraad en de lengtegraad op het moment van de meting. De waarden in Tabel 1 zijn voorbeeldwaarden, deze komen niet overeen met de lat en long van een gemeten waarde
- **T(°C):** Dit is de dry bulb temperatuur ofwel de droge bol temperatuur in de ruimte op het moment van meten. De temperatuur wordt uitgedrukt in graden Celsius (°C).
- **RH(%):** relative humidity, ofwel de relatieve luchtvochtigheid. Dit geeft aan hoeveel waterdamp de lucht bij de heersende temperatuur bevat. Een waarde van 100% wijst op een maximale hoeveelheid waterdamp. De lucht is dan verzadigd. Bij een relatieve luchtvochtigheid van 50 % bevat de lucht bij de heersende temperatuur de helft van de maximale mogelijke hoeveelheid waterdamp. ('KNMI - Vochtigheid', z.d.)
- **CO₂:** carbon dioxide, ofwel koolstofdioxide: is een kleurloos en niet ontvlambaar gas bij normale druk en temperatuur. Een molecule koolstofgas is een anorganische verbinding van koolstof en zuurstof. Het heeft verschillende natuurlijke bronnen, zoals: vulkanen, bosbranden, ... Het wordt niet als direct giftig beschouwd, maar net zoals

vele stoffen is het wel schadelijk als je er te veel van binnen krijgt. ('Carbon Dioxide | Center for Science Education', z.d.) Koolstofdioxide wordt uitgedrukt in *parts per million* (ppm). Dit wil zeggen dat bij 1ppm er zich 1 deeltje CO₂ per miljoen luchtdeeltjes bevindt.

- **CO:** carbon monoxide, ofwel koolstof monoxide. Dit een kleurloos, geurloos en smaakloos gas dat ontvlambaar is. Het is ook schadelijk voor mensen en organismen die zuurstof inademen ('Carbon Monoxide | Center for Science Education', z.d.). Koolstof monoxide wordt uitgedrukt in parts per billion (ppb). Dit wil zeggen dat bij 1ppb er zich 1 deeltje CO per biljoen luchtdeeltjes bevindt.
- **O₃:** Ozon is een speciaal soort zuurstof molecule. Het wordt aangetroffen in 2 verschillende lagen. Ozon in de onderste laag van de atmosfeer wordt gezien als "slechte ozon" en is een schadelijke vervuiler. In de hogere lagen van de atmosfeer beschermt ozon de planeet tegen UV stralen. ('Ozone | Center for Science Education', z.d.) Ozon wordt uitgedrukt in *parts per billion*
- **NO₂ en NO:** nitrogen dioxide, ofwel stikstofdioxide en nitrogen monoxide ofwel stikstofmonoxide worden beide gezien als stikstofoxiden. De moleculen van deze gassen zijn opgemaakt uit stikstof en zuurstofatomen. Ze vormen beide deel van het luchtvervuilingsprobleem en helpen bij het vormen van smog en zure regen. Stikstofoxiden zijn afkomstig van natuurlijke en menselijke bronnen. ('Nitrogen Oxides | Center for Science Education', z.d.) De concentratie stikstofoxiden wordt uitgedrukt in *parts per billion*.
- **SO₂:** sulfur dioxide, ofwel zwaveldioxide is opgemaakt uit zwavel en zuurstofatomen. Zwaveldioxide helpt ook bij het vormen van zure regen en gedeeltelijke vervuiling. Zwaveldioxide heeft natuurlijke en menselijke bronnen. Zwaveldioxide is een giftig kleurloos gas dat ruikt naar verbrande lucifers.('Sulfur Oxides | Center for Science Education', z.d.) De concentratie zwaveldioxide wordt uitgedrukt in *parts per billion*.
- **H₂S:** hydrogen sulfide, ofwel waterstofsulfide is een sterk ruikend giftig gas. Het komt voor in aardgas, opgelost in grondwater, en in darmgassen. ('Waterstofsulfide', 2022) De concentratie waterstofsulfide in de ruimte wordt uitgedrukt in *parts per billion*.
- **TVOC.** Total volatile organic components. Ofwel totaal van vluchtige organische stoffen. Dit zijn organische chemicaliën die verdampen in de atmosfeer op kamertemperatuur. Ze worden organisch genoemd omdat ze het element koolstof bevatten.('Volatile

Organic Compounds (VOCs) | Center for Science Education', z.d.) De concentratie vluchtige organische stoffen wordt uitgedrukt in $\mu\text{g}/\text{m}^3$

- **PM** particulate matter/ particulars, ook wel fijn stof genoemd. Dit zijn kleine vaste of vloeibare deeltjes die in de lucht rondhangen. Fijnstof wordt in 3 groepen opgedeeld: PM1, PM2,5 en PM10. De cijfers achter de PM staan voor de diameter van de stof. ('Fijnstof', 2022).
 - PM10 zijn deeltjes waarvan de diameter kleiner is dan 10 micrometer(μm)
 - PM2,5 zijn deeltjes waarvan de diameter kleiner is dan 2,5 μm
 - PM1 zijn deeltjes waarvan de diameter kleiner is dan 1 μm

De concentratie fijn stof wordt uitgedrukt in $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

3 Temperatuur en relatieve luchtvochtigheid

Eén van de belangrijkste functies van een ventilatiesysteem is het onderhouden van een goede temperatuur in de ruimte. Een te warme of te koude temperatuur wijst meestal op een probleem van het koeling- of verwarmingselement van het systeem. Maar het kan ook een andere oorzaak hebben.

In het onderzoek zijn op verschillende schepen en plaatsen metingen gedaan. Deze plaatsen kunnen opgedeeld worden in 2 categorieën. De eerste categorie bevat de plaatsen waar er buiten het ventilatiesysteem geen kunstmatige warmtebron aanwezig is. Deze plaatsen zijn de bruggen op de havenslepers en havenduwboot en de kajuit op de Dar.

In de andere categorie is er door de functie van de ruimte een kunstmatige warmtebron aanwezig. De ruimtes die tot deze categorie behoren zijn de keuken en de machinekamer.

Als men spreekt over een goede temperatuur, spreekt men meestal over een temperatuur waar de zeevaarder zich comfortabel bij voelt. Er zijn echter meerdere factoren die het comfort in de ruimte bepalen op het vlak van temperatuur. Namelijk de temperatuur, de vochtigheidsgraad en de luchtsnelheid in de ruimte. Daarom spreekt men niet over een comfortabele temperatuur, maar over een comfortabele/optimale atmosferische conditie.

De optimale atmosferische conditie heeft niet direct iets te maken met de positie van de luchtinlaat en de gevaarlijke stoffen die binnenkomen in de accommodatie via het ventilatiesysteem. Het is eerder een indicatie van het goed functioneren van het ventilatiesysteem. Het gaat dan vooral om het verwarmings- en koelingselement van het systeem.

3.1 *Optimale atmosferische conditie*

3.1.1 Optimale verhouding tussen temperatuur, luchtsnelheid en relatieve luchtvochtigheid

Om vermoeidheid te vermijden moet de zeevaarder zich comfortabel voelen in de ruimte waarin hij zich bevindt.

Comfort wordt gedefinieerd als *'de conditie van de geest dat voldoening uitdrukt bij de temperatuur in de omgeving'* (Palfy, 2016). Dit is dus meer een gevoel en hangt af van hoe een bepaalde persoon de omgeving in zich opneemt. Hierdoor is het dus moeilijk om een ideale

temperatuur, luchtsnelheid en luchtvochtigheid in een ruimte te vinden. Een ideale conditie is meestal als ongeveer 80% van de personen zich comfortabel voelt met alle factoren in de ruimte.

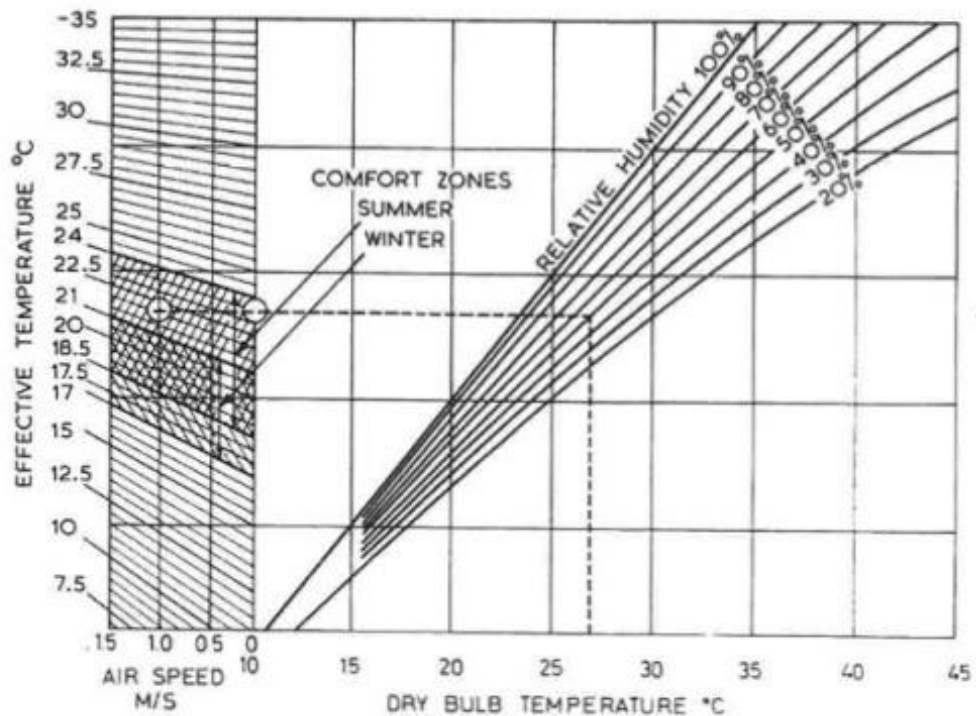
Zoals vermeld werd in bovenstaande paragraaf, hangt het comfortgevoel met betrekking tot de temperatuur af van drie factoren: de temperatuur, de vochtigheidsgraad en de snelheid waarmee de lucht zich verplaatst. Deze 3 factoren zijn elk apart verantwoordelijk voor het comfortgevoel van de mens. Maar ze moeten ook samen bekeken worden. Want zelfs als je bij elk van deze 3 factoren een comfortwaarde ervaart, kan je je toch oncomfortabel voelen.

Deze factoren vormen samen de effectieve temperatuur (McGeorge, 1999).

De effectieve temperatuur is de temperatuur van lucht met een bepaalde relatieve luchtvochtigheid en een snelheid in een ruimte, omgevormd naar de temperatuur van stilstaande, volledig gesatureerde lucht die hetzelfde gevoel van warmte geeft. Dit wordt soms ook wel de gevoelstemperatuur genoemd. Met deze temperatuur heeft *The American society of heating and air conditioning engineers* een grafiek kunnen opmaken om de comfortzones te bepalen.

In Figuur 7 zie je deze grafiek, met volgende variabelen:

- *Relative humidity* (in het Nederlands: *relatieve vochtigheid*): dit is het percentage vochtigheid dat in de lucht zit ten opzichte van de maximale hoeveelheid vocht die de lucht kan dragen bij een bepaalde temperatuur.
- *Dry bulb temperature* (in het Nederlands: *droge bol temperatuur*) : dit is de temperatuur gemeten door een normale thermometer zonder effect van het vocht in de lucht. ('Temperatures—Dry Bulb/Web Bulb/Dew Point', z.d.)
- *Air speed* (in het Nederlands: *luchtsnelheid*) : dit is de snelheid in meter per seconde waarmee de luchtdeeltjes de ventilatie uitlaat uitkomen.



Figuur 7 comfort grafiek opgemaakt door de american society of heating and air conditioning engineers
Bron: marine auxiliary machinery (McGeorge, 1999)

De grafiek in Figuur 7 maakt het mogelijk om te bepalen op welke temperatuur de lucht die via het ventilatiesysteem in de ruimte komt het best ingesteld wordt om een comfortabele gevoelstemperatuur in de ruimte te creëren.

Bijvoorbeeld: indien je een effectieve temperatuur wil bereiken van ongeveer 22°C en de lucht komt met een snelheid van 1.0m/s de ruimte in met een relatieve luchtvochtigheid van 50% (de limieten van de relatieve luchtvochtigheid worden besproken in paragraaf 3.1.2) dan moet, volgens Figuur 7 de toegevoegde lucht een temperatuur van 27°C hebben. Deze berekening is echter puur theoretisch. Het is immers moeilijk om in 1 ruimte op elke plaats exact dezelfde temperatuur te hebben. Dit is omdat warme lucht stijgt en koude lucht daalt. Het is ook zeer moeilijk om de luchtsnelheid gelijk te krijgen over de gehele ruimte

Aan de hand van de effectieve temperatuur kan je kijken in welke comfortzone de ruimte zich bevindt.

Er zijn 2 comfortzones, een winterzone en een zomerzone. De winterzone bevindt zich tussen een effectieve temperatuur van 17°C en 21°C, terwijl de zomerzone ligt tussen een effectieve temperatuur van 18.5°C en 24°C.

Deze zones verschillen van elkaar omdat de mens zich aanpast. In de winter, waar het overall kouder is, kan de mens koudere temperaturen verdragen dan in de zomer.

Opmerkelijk is dat het verschil tussen de minimum- en maximumtemperatuur meer dan 4°C bedraagt. De comfortzone is dus zeer groot en geeft wat mogelijkheid tot speling. Het is echter beter om de effectieve temperatuur net boven het minimum te houden. Het is immers eenvoudig om wat extra kleren aan te doen om zich in deze temperatuur comfortabel te voelen.

Bij deze waarden van effectieve temperatuur is er voor 80% van de mensen een gevoel van comfort. Men blijft hier best tussen.

Als dit niet lukt, mag de temperatuur zeker niet hoger zijn dan 25.6°C. Volgens Mc George (1999) is dit de temperatuur waarbij het grootste deel van de zeevarenden begint te zweten. Deze temperatuurwaarden zijn bekomen door meerdere testen te doen op zeevarenden die alleen een T-shirt en een short droegen.

Zoals eerder aangehaald zijn de waarden van de factoren afzonderlijk ook belangrijk.

De snelheid waarmee de lucht in de ruimte wordt geblazen is ook belangrijk voor het comfortgevoel. Het *American bureau of shipping*, heeft in de *guide for crew hability on ships* (Palfy, 2016) opgelegd dat de snelheid van de luchtdeeltjes niet hoger mag zijn dan 0.5m/s. Deze limiet is opgelegd omdat de lucht anders te tochtig aanvoelt.

3.1.2 Relatieve luchtvochtigheid

Zoals eerder aangehaald, heeft men de relatieve luchtvochtigheid nodig om de comfortabele omgevingstemperatuur te berekenen. Tot nu toe werd de relatieve luchtvochtigheid behandeld als een constante. In de praktijk is de relatieve luchtvochtigheid een variabele die manipuleerbaar is. Deze variabele speelt een cruciale rol voor de gezondheid aan boord.

Arundel, Sterling, Biggin, & Sterling (1986) onderzochten klachten zoals oogirritaties, droge neus en keel, etc. bij een extreem lage relatieve luchtvochtigheid. Om dit te voorkomen zou de relatieve luchtvochtigheid boven de 30% à 40% moeten liggen.

Als men kijkt naar de directe gevolgen van de relatieve luchtvochtigheid in de lucht zou men kunnen besluiten dat het gunstig is om deze zo hoog mogelijk te houden. Toch brengt dit problemen mee die op lange termijn ook ziektes kunnen opwekken. Zo bevordert een hoge

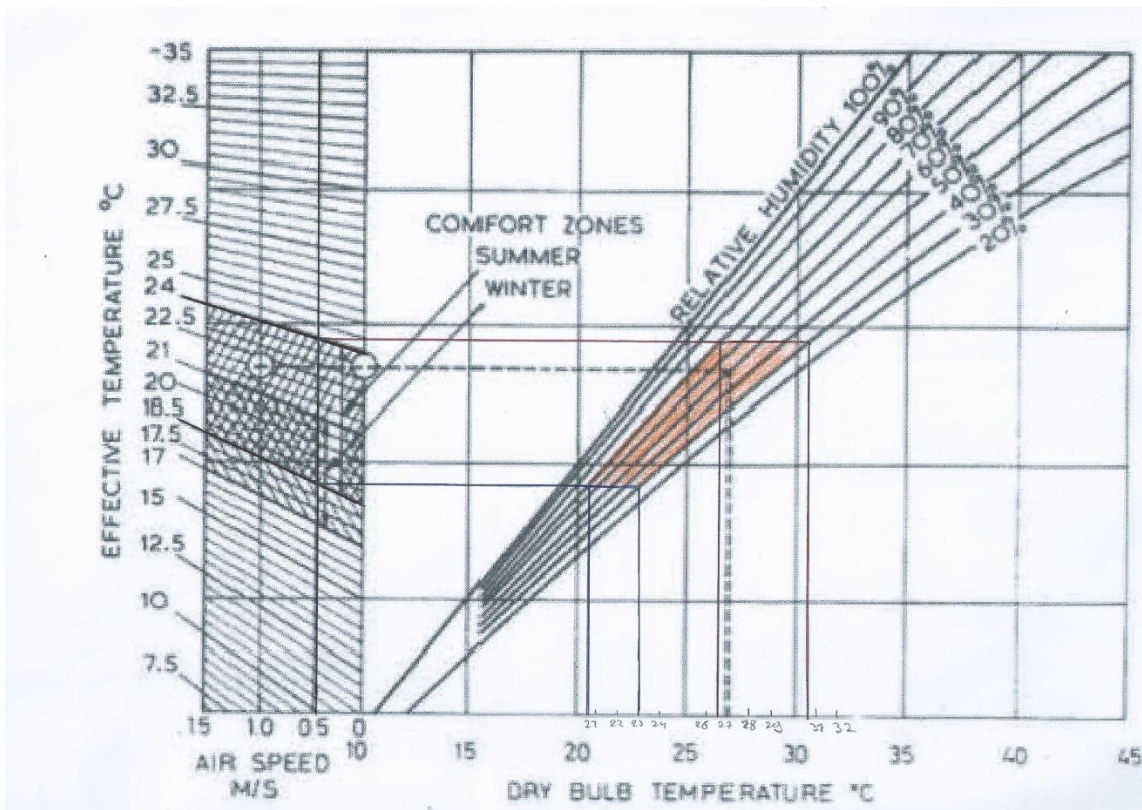
relatieve luchtvochtigheid de groei van schimmels en paddenstoelen. De meeste soorten kunnen niet groeien met een luchtvochtigheid onder de 60%.

Bij een relatieve luchtvochtigheid tussen 40% en 70% blijken veel bacteriën en virussen aanzienlijk minder besmettelijk. Een relatieve luchtvochtigheid van 100% gaat gepaard met een grote kans op condensatie. Dit zorgt onder meer voor de vorming van natte plaatsen in kajuiten. Maar ook voor roestvorming, wat de stevigheid en de structuur van het staal van het schip aantast.

Rekening houdend met deze factoren, wordt het aangeraden om de relatieve luchtvochtigheid tussen de 40% en de 60% te houden.

Palfy (2016) spreekt over een relatieve luchtvochtigheid tussen 30% en 70%. Dit is omdat het zeer moeilijk is om de relatieve luchtvochtigheid zo precies te houden.

3.2 Effectieve Verhouding tussen de relatieve luchtvochtigheid en de temperatuur aan boord van de gemeten schepen



Figuur 8 zomercomfortzone 0.5m/s
Bron: eigen werk

Uit bovenstaande paragrafen kan men afleiden dat de relatie tussen de relatieve luchtvochtigheid en de droge bol temperatuur zeer belangrijk is. Deze waarden zijn gemeten door het meettoestel. De windsnelheid, een andere belangrijke factor, is niet gemeten en is ook niet gekend op de momenten van de metingen. Hierdoor is het moeilijk om met zekerheid te zien of de gemeten waarden binnen het zomercomfortgebied liggen. Het zomercomfortgebied wordt gebruikt omdat de metingen gedaan zijn in de maanden juni tot september. Deze maanden zijn zomermaanden op de plaats waar de meettoestellen opgesteld waren.

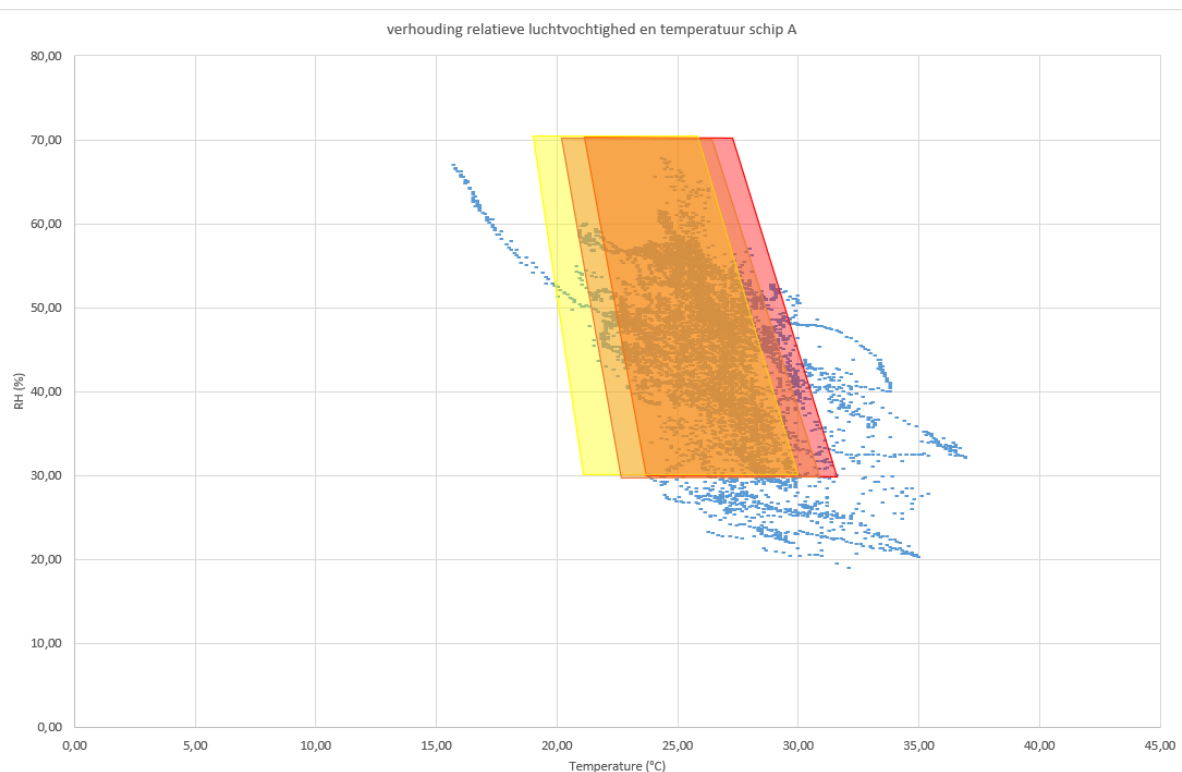
Palfy(2016) vermeldt dat de snelheid van de luchtdeeltjes in de ruimte niet hoger mag zijn dan 0.5 m/s. Het is echter onmogelijk om ervan uit te gaan dat dit continu precies het geval was in de periode dat de metingen werden uitgevoerd. Het is echter wel mogelijk om er van uit te gaan dat de luchtsnelheid in de ruimtes tussen de waarden 0m/s en 1m/s lag. Dit is omdat de grootte van een snelheid nooit kleiner kan zijn dan 0m/s en omdat er wel een serieus probleem moet zijn als de snelheid hoger is dan het dubbele van de waarde die opgelegd is door de Wereldgezondheidsorganisatie. Om toch te kunnen zien of er een probleem is met de temperatuur aan boord van de schepen wordt er van uitgegaan dat er geen fundamenteel probleem is met de luchtsnelheid in de ruimtes aan boord van de schepen.

Op Figuur 8 valt te zien hoe de zomercomfortzone van de effectieve temperatuur omgevormd is tot een zone tussen de verhouding van droge bol temperatuur en relatieve luchtvochtigheid. Dit is gedaan via de grafiek opgemaakt door Mc George, (1999). Voor het maken van deze zone is er betrokken aan de kant van de effectieve temperatuur met de opgelegde luchtsnelheid door de Wereldgezondheidsorganisatie van 0.5m/s. Met de 2 effectieve temperaturen van de zomercomfortzone, gecorrigeerd voor de luchtsnelheid, zijn er 2 lijnen (1 lijn met de minimum effectieve temperatuur en 1 lijn met de maximum effectieve temperatuur) getrokken tot aan de grafieken van de relatieve luchtvochtigheid. Deze 2 lijnen snijden de grafiek van de minimum relatieve luchtvochtigheid van dertig procent en de maximum relatieve luchtvochtigheid van zeventig procent. Deze 4 snijpunten geven een zone van droge bol temperaturen aan die gelijk is aan de zomercomfortzone van de effectieve temperaturen.

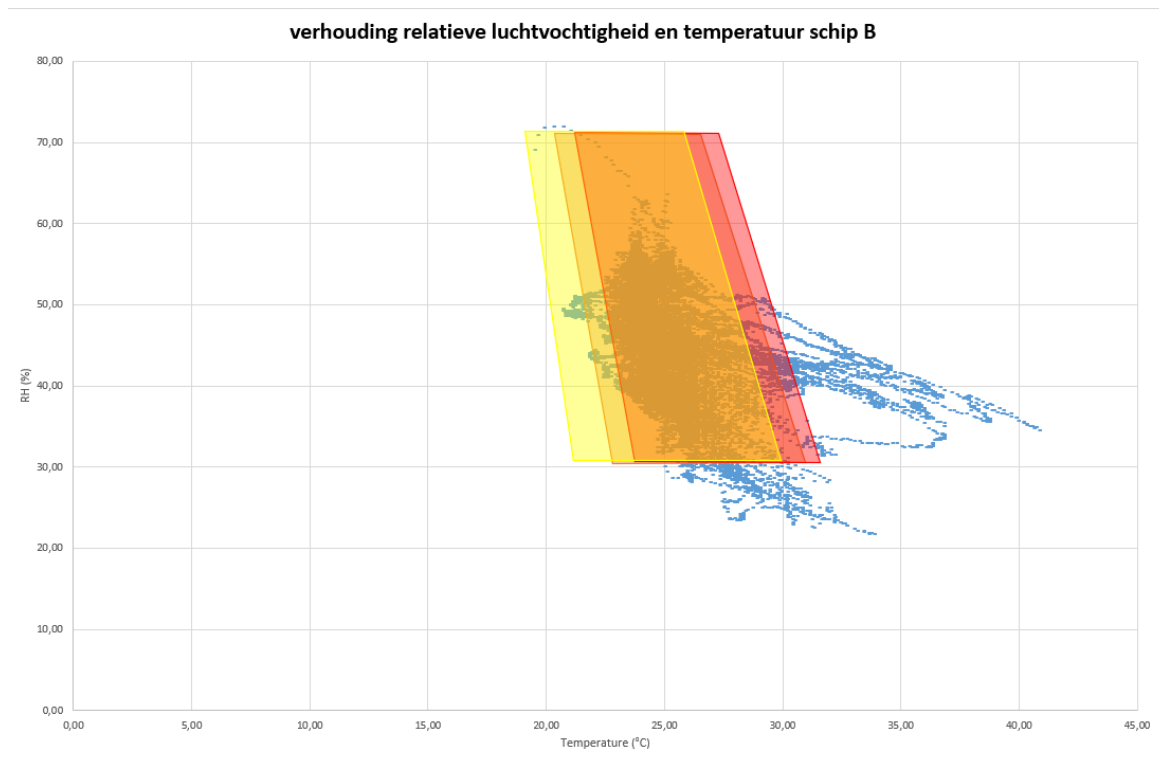
Hetzelfde is gedaan voor een luchtsnelheid van 0m/s en 1m/s. Deze drie zones worden gebruikt in volgende paragrafen om aan te duiden welke verhoudingen van relatieve luchtvochtigheid en droge bol temperaturen er een comfortabel gevoel geven.

3.2.1 Categorie 1: ruimtes zonder externe warmtebron

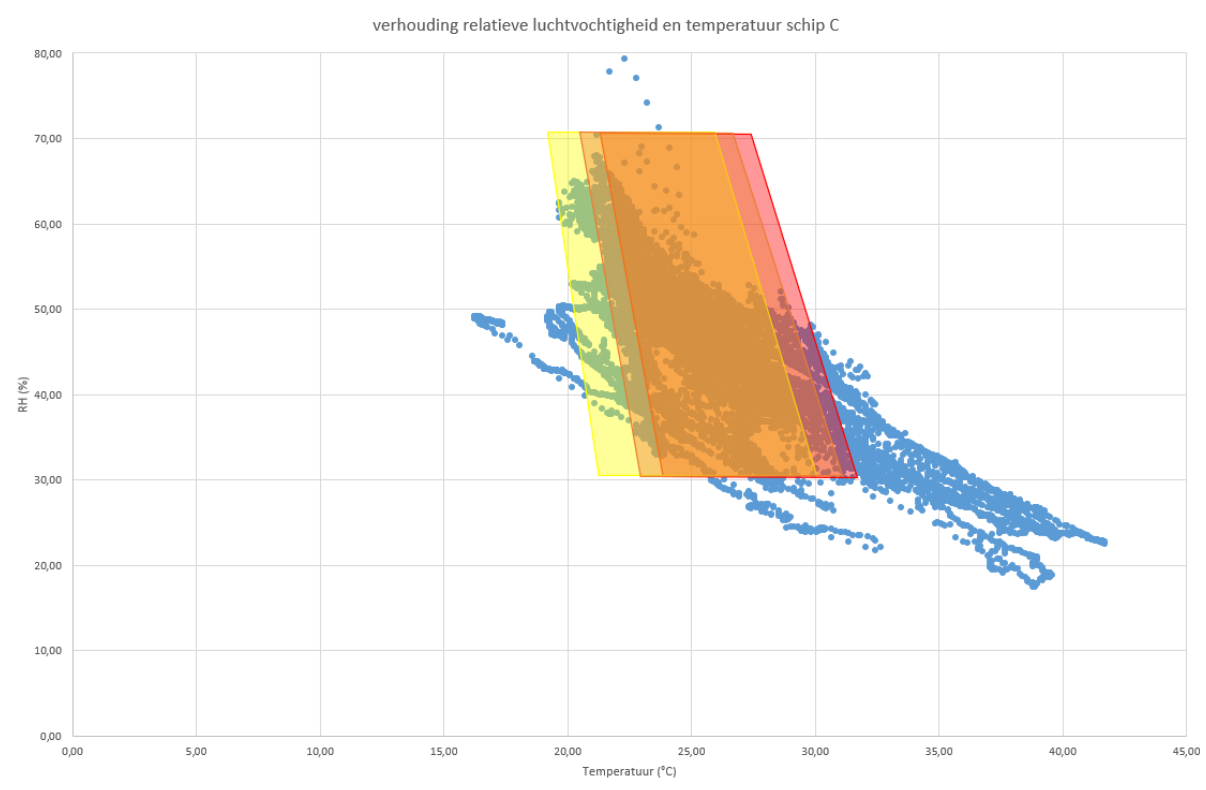
In Figuur 9, Figuur 10 en Figuur 11 is voor elke meting de verhouding van de relatieve luchtvochtigheid met de temperatuur van diezelfde meting uitgezet. De metingen uitgezet op deze figuren zijn respectievelijk afkomstig van de brug van schip A, B en C. Voor schip D zijn er echter niet genoeg metingen gedaan op de brug waardoor de bekomen grafiek niet representatief genoeg is. De ingekleurde zones op de figuren komen overeen met de zone in dezelfde kleur van Figuur 8. Zo is de gele zone de zomercomfortzone voor een luchtsnelheid van 0m/s, de oranje zone voor 0.5m/s en de rode zone voor 1m/s.



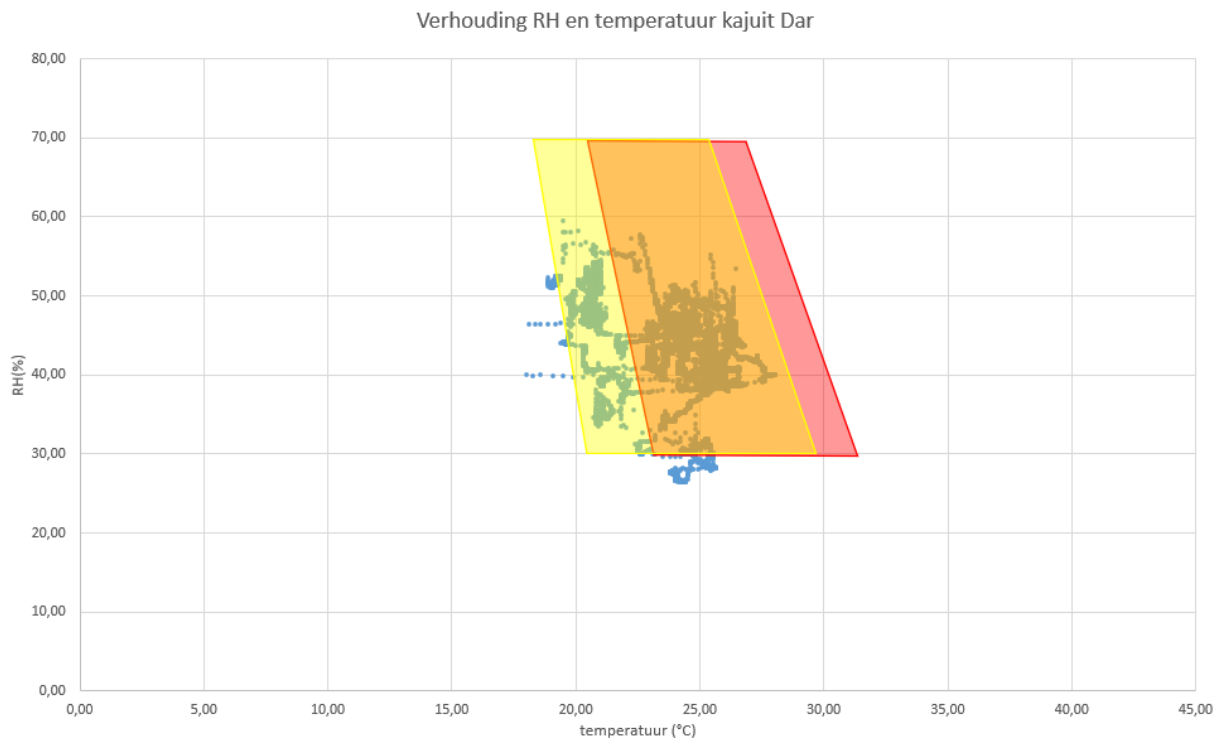
*Figuur 9 verhouding relatieve luchtvochtigheid en temperatuur brug schip A
Bron: eigen werk*



Figuur 10 verhouding relatieve luchtvochtigheid en temperatuur brug schip B
Bron: eigen werk



Figuur 11 verhouding relatieve luchtvochtigheid en temperatuur brug schip C
Bron: eigen werk



*Figuur 12 verhouding RH en temperatuur kajuit Dar
Bron: eigen werk*

De precieze luchtsnelheid in de ruimte op het moment van elke meting is niet gekend, maar er wordt van uitgegaan (zoals besproken in paragraaf 3.1.1) dat die waarde zich situeert tussen 0m/s en 1m/s. Hierdoor kan er gezegd worden dat de metingen die zich in de gele, oranje of rode zone bevinden, een comfortabele gevoelstemperatuur in de ruimte aangeven. Elke meting die buiten deze zones ligt, heeft dus geen goede waarde en wijst op een probleem in de regeling van de effectieve temperatuur in de ruimte. Dit kan een probleem zijn in het koeling/verwarming gedeelte of in luchtbevochtiger/droger van het ventilatiesysteem.

Op Figuur 9, Figuur 10 en Figuur 11 valt te zien dat bij de meeste metingen de waarden voor relatieve luchtvochtigheid en droge bol temperatuur zich in de aanvaardbare zone bevinden. Er zijn echter wel momenten waar de metingen buiten deze zone vallen. Dit gebeurt echter bij een minimaal deel van de metingen. Wel valt op dat dit meestal gebeurt bij een te hoge temperatuur of/en een te lage relatieve luchtvochtigheid. Het gebeurt zelden dat de ruimte een te lage temperatuur of/en een te hoge relatieve luchtvochtigheid had.

Uit Figuur 9, Figuur 10 en Figuur 11 valt te concluderen dat het koeling/verwarming element en bevochtiging/droging element van de ventilatiesystemen van de schepen op de meeste

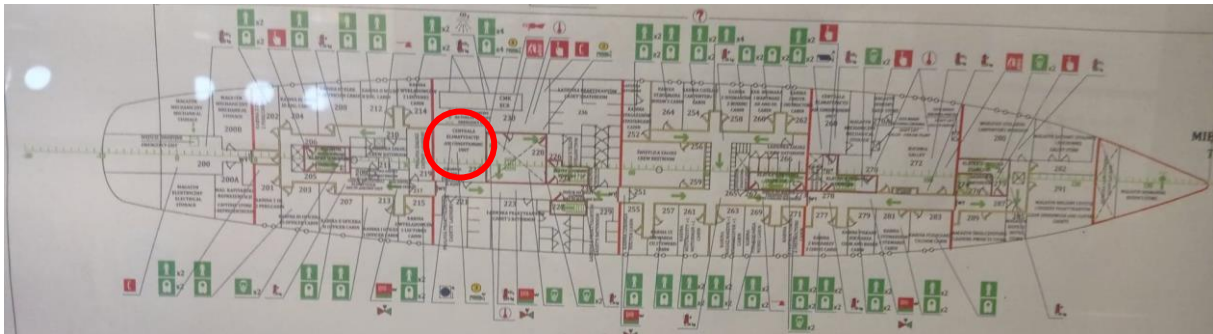
momenten goed werkt en dat er geen fundamentele problemen zijn. Er zijn echter wel relatief veel momenten waarop de temperatuur te hoog is in de ruimte.

Op Figuur 12 zijn de metingen van in de kajuit aan boord van het zeilschip Dar Mlodziezy te zien. Hier valt niet veel op aan te merken. Zo goed als alle waarden bevinden zich in de aanvaardbare comfortzones. Slechts enkele momenten was het te droog of te koud in de kajuit. Hier is het duidelijk dat het koeling/verwarmingselement van het ventilatiesysteem optimaal werkt voor de kajuit waar de waarden gemeten zijn.

Het is wel belangrijk te weten dat op dit schip de temperatuur zwaar afhankelijk was van kajuit tot kajuit. Door een bevraging aan de opvarenden die sliepen in de kajuit waar de metingen zijn gebeurd bleek dat (zoals Figuur 12 ook aantoont) ze nooit het gevoel hadden dat het te warm was in de kajuit.

Dit is in tegenstelling tot andere opvarenden die in andere kajuiten sliepen. De opvarenden die sliepen in de kajuiten die het verst verwijderd waren van de positie van de airconditioning unit aan boord hadden de grootste klachten van het feit dat ze vonden dat hun kajuit te warm aanvoelde. Deze klachten hadden vooral betrekking op de nachten wanneer alle opvarenden die in die kajuit sliepen aanwezig waren. Het ventilatiesysteem moest ervoor zorgen dat de warmte die geproduceerd werd door de 10 opvarenden die toen in de kajuiten aanwezig waren, werd vervangen door koudere frisse lucht. Wat het niet deed.

Op Figuur 13 is de positie van de airconditioning unit van het ventilatiesysteem te zien. Dit is de plaats waar de lucht van het ventilatiesysteem effectief gekoeld wordt. Op Figuur 14 is de positie aangeduid van de kajuiten waar de opvarenden met de meeste klachten over een te warme kajuit sliepen. Als je dit vergelijkt met de positie van de airco, dan zie je dat dit de kajuiten zijn die het verst ervan verwijderd zijn. Het is dus duidelijk dat op grotere schepen (niet op de havenschepen die hier ook besproken worden) de positie van de kajuit ten opzichte van het koelingselement een grote rol speelt in de efficiëntie van het ventilatiesysteem.



Figuur 13 positie air conditioning unit Dar Młodzieży
Bron: fire plan Dar Młodzieży



Figuur 14 positie te warme kajuiten Dar Młodzieży
Bron: fire plan Dar Młodzieży

3.2.2 Categorie 2: ruimtes met externe warmtebron

In tegenstelling tot de brug hebben de machinekamer en de keuken buiten het verwarmingselement in het ventilatiesysteem een extra onnatuurlijk verwarmingselement. Voor de machinekamer is dit de verbrandingsmotor en voor de keuken zijn dit de fornuizen.

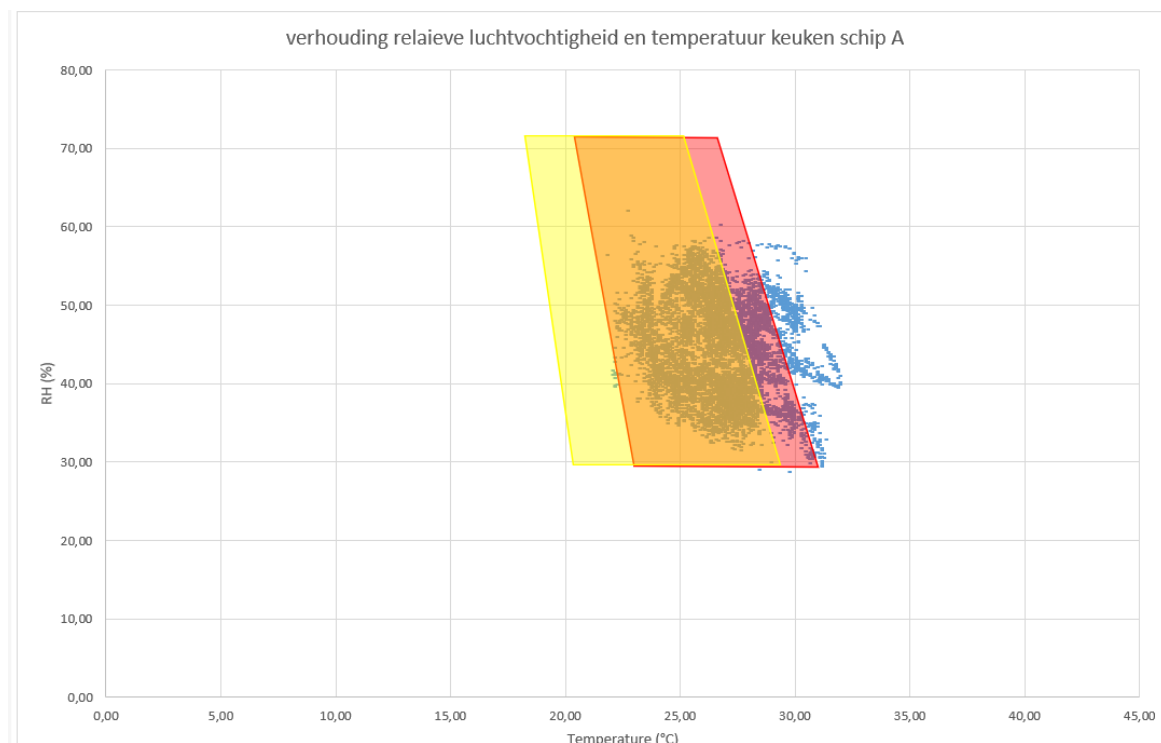
Als het schip aan het varen is, staan de motoren aan en geven ze warmte af. Bij de keuken kan er echter niet met zekerheid gezegd worden wanneer de fornuizen aanstaan.

Op Figuur 15 en Figuur 16 is de verhouding tussen de relatieve luchtvochtigheid en de temperatuur in de keuken van respectievelijk schip A en schip B te zien. Opvallend is dat net zoals op de brug van dezelfde schepen de temperatuur relatief hoog ligt, en dat op sommige momenten de temperatuur zelfs te hoog is. Maar in tegenstelling tot de metingen op de brug van dezelfde schepen blijven de gemeten temperaturen en relatieve luchtvochtigheid in dezelfde zone. Er gaan geen afwijkingen van extreem hoge temperatuur gepaard met lage relatieve luchtvochtigheid. Zoals te zien op Figuur 9 en Figuur 10.

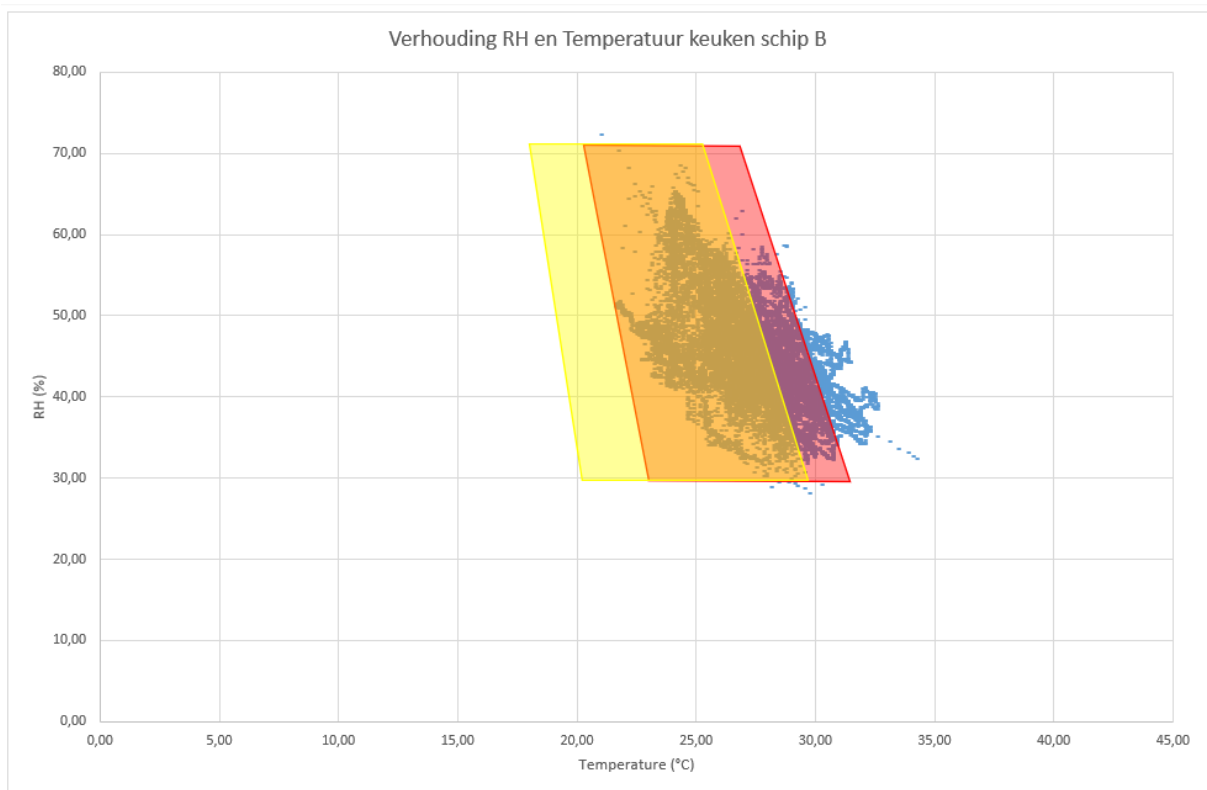
Figuur 17 toont de verhouding tussen de relatieve luchtvochtigheid en de temperatuur voor de machinekamer van schip D. Voor Schip B en C zijn er niet genoeg metingen gedaan in de machinekamer om een representatieve verhouding te tonen. Op deze figuur valt te zien dat de verhoudingen tussen de temperatuur en de relatieve luchtvochtigheid zich bijna allemaal

in dezelfde zone bevinden. Er zijn echter wel kleine afwijkingen uit die zone. Deze afwijkingen zijn echter niet zo groot als de afwijkingen waargenomen op de metingen van de bruggen. De zone waar de meeste waarden zich in bevinden, ligt in de aanvaardbare comfortzones. Enkel de afwijkingen uit die zone, vallen buiten de aanvaardbare comfortzones.

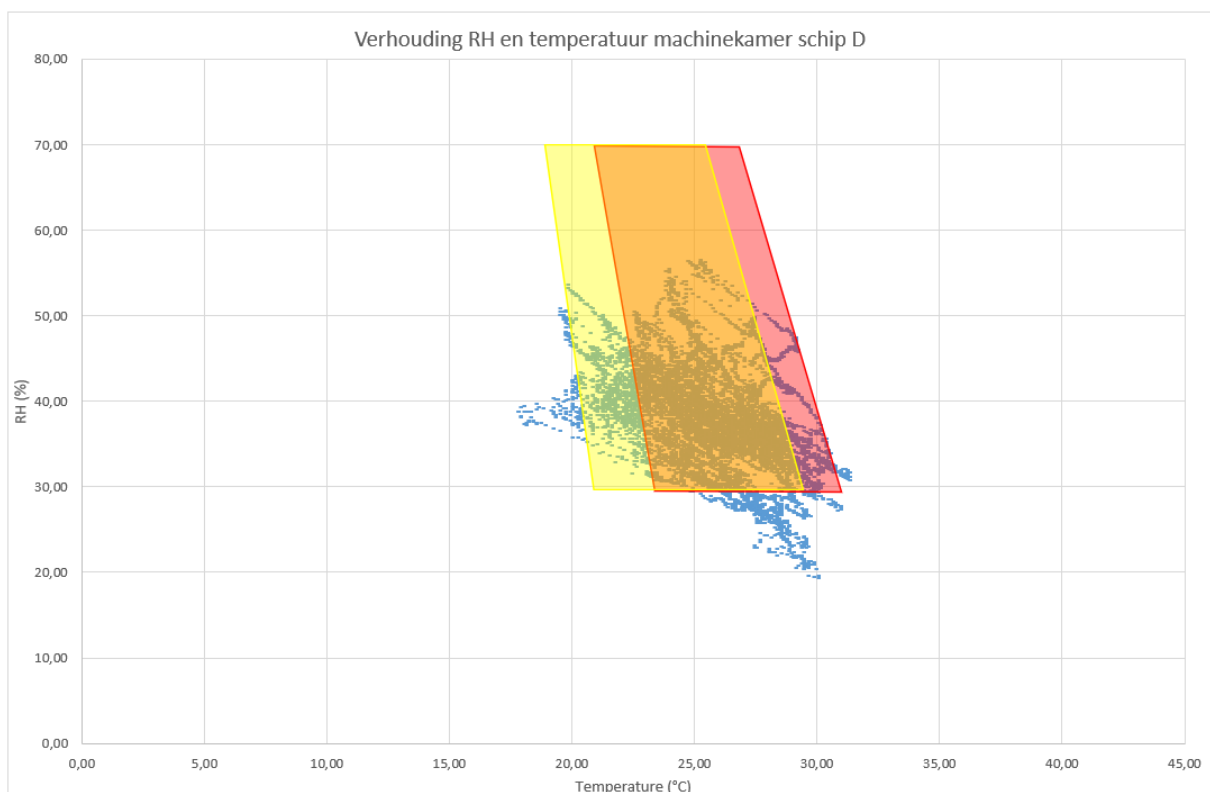
Het is dus duidelijk dat, ondanks de externe onnatuurlijke warmtebronnen die aanwezig zijn in de machinekamer en de keuken, de effectieve temperatuur zich meer in de aanvaardbare comfortzone bevindt dan op de brug waar er geen onnatuurlijke externe warmtebron aanwezig is.



*Figuur 15 verhouding RH en temperatuur keuken schip A
Eigen werk*



*Figuur 16 verhouding RH en Temperatuur keuken schip B
Bron: eigen werk*



*Figuur 17 verhouding RH en temperatuur machinekamer schip D
Bron: eigen werk*

Uit paragraaf 3.2 valt te concluderen dat de temperatuur niet op elke plaats aan boord van hetzelfde schip even hoog (of dezelfde) is. Zoals in paragraaf 3.2.1 besproken speelt de afstand

van de ruimte tot de machine van het ventilatiesysteem een rol. Met andere woorden, hoe langer de weg tussen het koeling/verwarmingselement en de ruimte hoe minder efficiënt het ventilatiesysteem voor die ruimte werkt. Er zijn echter nog andere factoren die de temperatuur in de ruimte beïnvloeden. Deze factoren worden in volgende paragrafen besproken. Wel werd een groot probleem met het koeling/ verwarmingssysteem op de brug van de gemeten schepen duidelijk: de lucht is op vele momenten te warm en te droog.

3.3 Verloop van de temperaturen

Om na te gaan waar de hogere temperaturen op de brug vandaan komen is het noodzakelijk om het verloop van de temperaturen op de verschillende plaatsen te bekijken en deze te vergelijken met elkaar. Dit gaat dan niet alleen over de temperaturen gemeten in de andere ruimte van de schepen (de machinekamer of de keuken), maar ook over de buitentemperatuur op het moment van de metingen.

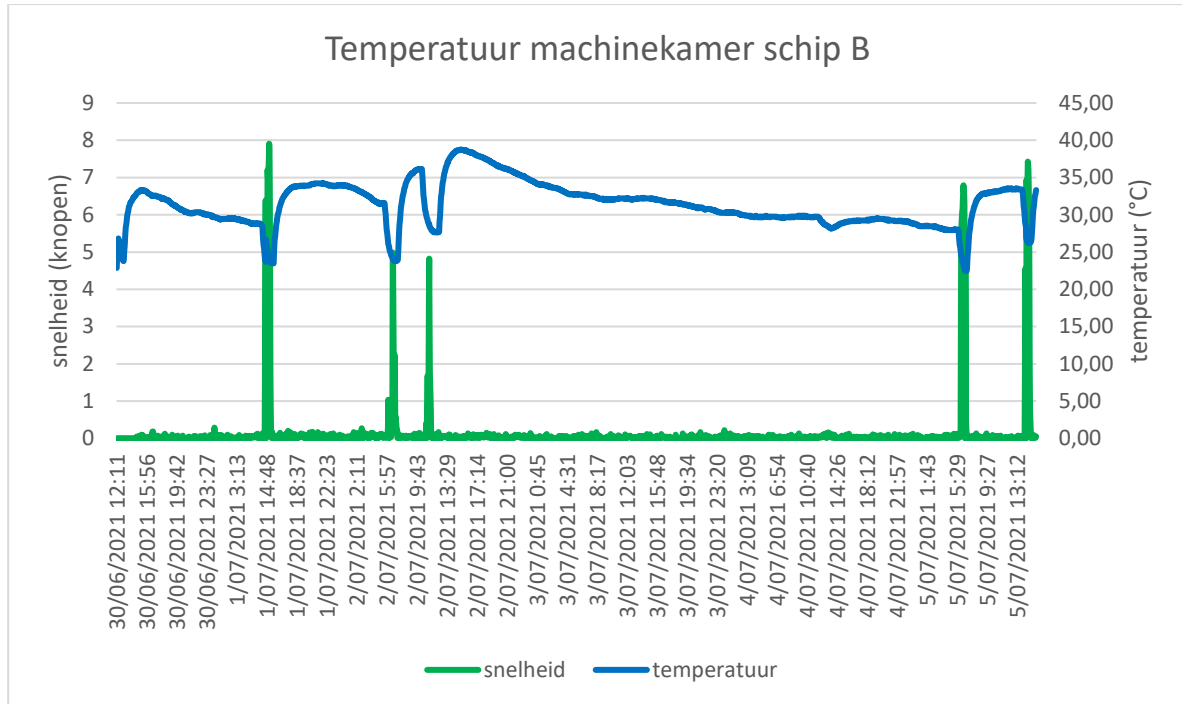
De waarden van de buitentemperatuur zijn niet gemeten door de meettoestellen, maar komen van een project van de Universiteit van Gent. Het vlinderproject ('UGent VLINDER', z.d.) is een project van de universiteit van Gent waarbij Vlaamse scholen, onderzoekers en lokale partners het weer monitoren in een netwerk van 70 weerstations. Een van die stations is gelegen in de zone waar de schepen regelmatig gevaren hebben op het moment van de metingen.

Het is belangrijk om te weten of het ventilatiesysteem wel aan stond. De schepen waarop de temperaturen op de brug te hoog oplopen zijn de schepen die havenwerkzaamheden uitvoeren. Deze schepen zijn niet continu aan het varen en liggen vaak dagen na elkaar vast op hun ligplaats. Bij de gemeten waarden bevinden zich de coördinaten waarop het schip zich bevindt op het moment dat de meting gedaan is. Door de coördinaten van een bepaalde meting te vergelijken met de coördinaten van de voorgaande meting is het mogelijk om de snelheid van het schip te berekenen en zo na te gaan wanneer het schip aan het varen is.

Op Figuur 18 is in het blauw het verloop van de temperatuur in de machinekamer van schip B te zien samen met in het groen de snelheid die het schip op dat moment had. Als het schip aan het varen is (dus als het een snelheid heeft die groter is dan 1) dan staat de motor aan. Op alle andere momenten staat de motor niet aan en geeft deze dus ook geen warmte af.

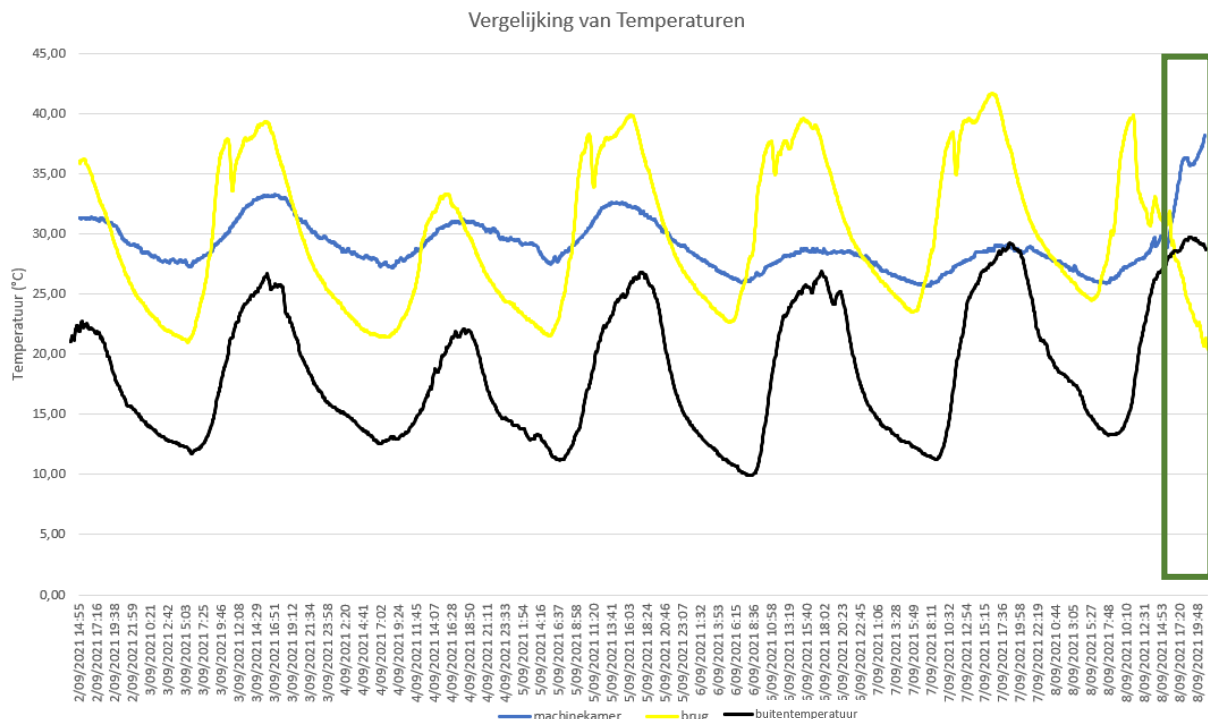
Als de motor aan staat dan zou de temperatuur in de machinekamer dus moeten stijgen.

Op Figuur 18 is echter het tegenovergestelde waar te nemen. Als de motor van het schip aanstaat dan daalt de temperatuur. Dit is te verklaren door dat het ventilatiesysteem koele lucht in de ruimte blaast als de motor aanstaat. Als de motor niet aanstaat dan wordt er duidelijk geen koele lucht de ruimte in geblazen. Dit komt omdat het ventilatiesysteem niet aanstaat als het schip niet aan het varen is



Figuur 18 verloop van temperatuur machinekamer schip B
Bron: eigen werk

Het meest opvallende aan het verloop van de temperatuur in de machinekamer van schip B is dat, als het schip stopt met varen de temperatuur terug stijgt tot een hogere temperatuur. Dit is omdat het ventilatiesysteem uitgeschakeld wordt als de motor wordt uitgeschakeld. Deze motor geeft na het uitschakelen nog altijd warmte af aan de lucht in de machinekamer waardoor de temperatuur in de machinekamer terug stijgt. Als de motor daarna een lange tijd niet aanstaat, dan blijft de temperatuur in de machinekamer dalen totdat de motor terug ingeschakeld wordt.



Figuur 19 vergelijking temperaturen schip C
Bron: eigen werk

Op Figuur 19 is het verloop van de temperatuur op de brug en in de machinekamer van schip C te zien gecombineerd met de buitentemperatuur die op dat op moment aanwezig was. Tijdens deze metingen was het schip enkel aan het varen in de periode die aangeduid is door de groene rechthoek aan de rechterkant van de figuur. Een groot deel van de tijd was het schip niet aan het varen en stond het ventilatiesysteem niet aan. Opvallend is dat de temperaturen aan boord hoger liggen dan de temperatuur buiten en dat de temperatuur op de brug meer de schommeling van de buitentemperatuur volgt dan de temperatuur in de machinekamer. Dit heeft te maken met de bouw van schepen en vooral de havenslepers.

Zoals te zien op Figuur 20 is de brug van een havensleper voor het grootste deel opgebouwd in glas gecombineerd met metaal. De brug van een havensleper kan je dus vergelijken met een serre. Dit creëert een soort van broeikaseffect. Als de zon op de brug schijnt dan wordt het daar overdag veel warmer dan buiten en wordt de warmte ook goed vastgehouden waardoor het niet afkoelt tot op de temperatuur van de buitenlucht. De temperatuur volgt echter wel nog hetzelfde verloop omdat de brug nauw in contact staat met de buitenlucht.



*Figuur 20 detail van de brug van een havensleper
Bron:(gCaptain, 2019)*

De machinekamer van een havensleper is anders opgebouwd dan de brug. De machinekamer zit in de romp van het schip en heeft geen glas rondom zich. De muren van de machinekamer zijn volledig gemaakt van staal. Deze muren bevinden zich gedeeltelijk of volledig onder de waterlijn, waardoor de ruimte extra gekoeld wordt. De zonnestralen kunnen hier niet rechtstreeks binnen komen. Het verschil in temperatuur tussen dag en nacht valt te verklaren door de zon die op het staal van het schip schijnt. Dit staal warmt op en geeft zijn warmte af aan de lucht in de machinekamer. Doordat het staal dient als tussenelement en de lucht niet rechtstreeks wordt opgewarmd door de zonnestralen gebeurt dit minder snel als op de brug. Bij het afkoelen, koelt ook eerst het staal af voordat de lucht in de machinekamer kan afkoelen.

Op Figuur 19 wordt echter op een bepaald moment de temperatuur op de brug lager dan de temperatuur van de buitenlucht. Op dat moment is het schip aan het varen. De in de brug door het broeikas effect opgestapelde warmte, wordt dan weggevoerd door het ventilatie- en koeling systeem dat dan in werking treedt. Op schip C stijgt de temperatuur in de machinekamer wel als de motor en het ventilatiesysteem aanstaan. Dit valt te verklaren doordat havenslepers veel krachtigere motoren hebben dan een duwbak. Deze motoren geven dan ook meer warmte af. Door deze stijging is het ook duidelijk dat het koelings element van de ventilatie voor de machinekamer van schip C niet (goed) werkt.

Het meest opvallende is het verschil in het verloop van de temperatuur van de machinekamer tussen Figuur 18 en Figuur 19. Terwijl de temperaturen in de machinekamer van schip C beïnvloed worden door dag en nacht, gebeurt dit niet (of in zeer kleine mate) voor de

temperaturen in de machinekamer van schip B. Dit is omdat schip B geen havensleper is en de machinekamer anders gebouwd is waardoor deze minder beïnvloed wordt door de dag en nacht schommeling van de temperatuur. Daarenboven heeft het tijdens de periode van de metingen op Figuur 18, volgens de gegevens van het vlinder project ('WOW-BE – The weather together!', z.d.) geregend waardoor de zon niet altijd scheen en deze ook minder effect had op de temperatuur in het schip.

De plaats van de ruimte (los van de positie van het ventilatiesysteem) aan boord van het schip beïnvloedt dus de temperatuur die gemeten wordt in de ruimte. De figuren in dit hoofdstuk hebben ook aangetoond dat het ventilatiesysteem aan boord van schepen een belangrijk mechanisme is om de temperatuur aan boord van schepen in een comfortabele zone te houden. Dit valt te zien doordat de opgestapelde warmte in de ruimtes zo goed als verdwijnt op het moment dat het ventilatiesysteem ingeschakeld wordt.

4 CO₂

4.1 Gezondheidsproblemen van CO₂

De aanwezigheid van CO₂ is één van de belangrijkste redenen voor de aanwezigheid van het ventilatiesysteem aan boord van schepen. De mens ademt immers zuurstof in en koolstofdioxide terug uit. Hierdoor wordt de zuurstof (O₂) in de ruimte vervangen door koolstofdioxide (CO₂). Als de ruimte niet geventileerd wordt en dezelfde lucht in de ruimte blijft, dan zal na een tijdje het zuurstofgehalte dalen onder de minimumdrempel van 21%. Deze minimumconcentratie is nodig om gezond te leven.

Zoals eerder vermeld in paragraaf 1.1, is CO₂ ook giftig als je er te veel van in één keer binnen krijgt. Voor deze hoeveelheid zijn er verschillende limieten opgesteld waaraan een mens blootgesteld mag worden.

- TLV-TWA: *Threshold limit value – Time weighted average*. Dit is de limiet van een bepaalde stof aan welke een mens blootgesteld mag worden over een werkweek van 40 uur (8uur per dag).
- TLV-STEL: *Threshold limit value- Short term exposure limit*. Dit is het limiet aan welke een persoon niet langer dan 15 minuten per keer en 4 keer per dag blootgesteld mag worden.
- TLV-C; *Threshhold limit value – Ceiling*: Dit is de limiet van een bepaalde stof aan welke een persoon nooit blootgesteld mag worden

Bron: ('What is Threshold Limit Value - Time-Weighted Average (TLV-TWA)?', z.d.)

Als de concentratie van een bepaalde stof zijn TLV overstijgt, kan dit schadelijk zijn voor de gezondheid van de personen die er blootgesteld aan worden.

Voor Koolstofdioxide zijn deze limieten volgens het veiligheidsinformatieblad kooldioxide van IGS (2011):

- TLV-TWA:5000ppm
- TLV-STEL:30000ppm
- TLV-C: 40000ppm

Bij overschrijding van deze limieten treden merkbare gezondheidsproblemen op, zoals hoofdpijn, verhoogde ademhaling, problemen met zintuigen, etc.

Naast deze waarden is er ook nog de waarde van 170 000ppm, waarbij een persoon sterft als hij er meer dan één minuut aan wordt blootgesteld. ('CO₂ Carbon Dioxide Gas Exposure limits', z.d.)

CO₂ kan ook bij lagere concentraties problemen geven. Dit zijn echter geen fysieke problemen.

Satish e.a. (2012) hebben onderzoek gedaan bij mensen die blootgesteld werden aan verschillende lage concentraties CO₂ (onder TLV-TWA).

Uit dit onderzoek blijkt dat de prestatie voor beslissingen maken verlaagt als de concentratie CO₂ verhoogt. Bij een CO₂ concentratie van 2500ppm (de helft van TLV-TWA) was de prestatie van de proefpersonen op het nemen van initiatief, basisstrategie, gebruik van informatie zo laag dat het geklasseerd werd als onfunctioneel.

Een prestatievermindering aan boord van schepen kan op sommige momenten leiden tot ongevallen met zware gevolgen. Daarom is het aan te raden om het CO₂ limiet zeker onder de 2500 ppm te houden. In een artikel van de Washington State University ('Measuring CO₂ Inside Buildings', 2013.) wordt zelfs aangeraden om de CO₂ concentratie in een binnenruimte onder de 1030 ppm te houden.

4.2 Bronnen van CO₂ aan boord

CO₂ heeft verschillende bronnen (plaatsen waar het vandaan kan komen). Zoals in paragraaf 2.4 vermeld wordt, kan koolstofdioxide afkomstig zijn van natuurlijke bronnen zoals vulkaanuitbarstingen en bosbranden. Ook de industrie en de mens produceren koolstofdioxide.

Omdat er zoveel bronnen koolstofdioxide produceren, is er continu koolstofdioxide aanwezig in de atmosfeer.

Volgens Keith (2009), zou 0.04% van de lucht bestaan uit koolstofdioxide. Dit zou als gevolg moeten hebben dat, als je je ventilatiesysteem verse lucht laat blazen in een ruimte zonder personen, op een schip zonder motor of generator, die zich bevindt in het midden van de

ocean (waar er geen luchtvervuiling is), je op elk moment een koolstofdioxide concentratie zou moeten meten van ongeveer 400ppm.

Zoals eerder vermeld zijn de mensen die leven en werken aan boord een van de belangrijkste producenten van koolstofdioxide in de accommodatie. De mens ademt zuurstof in, deze zuurstof wordt in de longen omgezet tot (onder meer) koolstofdioxide die de mens terug uitademt.

Volgens het artikel *Measuring Carbon Dioxide Inside Buildings – Why is it Important?* (2013) ademt de mens tussen 35000ppm en 50000 ppm CO₂ uit per keer dat hij ademt. Volgens Radboudumc ('Een normale ademhaling', z.d.) zou de mens per ademteug 400-500ml lucht uitademen.

In het Maritiem Arbeidsverdrag (ILO, 2006) wordt vermeld dat een kajuit voor 1 persoon op een schip groter dan 10 000GT een minimum vloeroppervlakte van 7m² en een minimum hoogte van 203cm moet hebben. Dit impliceert dat het minimaal volume van een kajuit voor één persoon 14,21m³ of 14 210 liter moet zijn.

Met de waarden uit de 2 bovenstaande alinea's is het mogelijk om de maximumconcentratie CO₂ die de mens per ademhaling uitstoot in de ruimte te bepalen.

Bij 1,759 ppm per ademhaling in een niet-geventileerde ruimte, en rekening houdende dat de gemiddelde mens ongeveer 15 keer per minuut in- en uitademt, kan worden afgeleid dat een persoon maximaal 1.583 ppm per uur kan uitademen. Hier zijn de maximale waarden gebruikt van hoeveel ppm CO₂ per ademhaling een persoon uitademt en het maximaal aantal keer een normaal persoon per minuut ademt. Deze berekening hangt natuurlijk af van elke individuele persoon.

Ook werden de minimumafmetingen van een éénpersoonskajuit gebruikt. Bij een grote ruimte zal de ppm die een persoon uitademt per uur minder zijn omdat de hoeveelheid CO₂ die een persoon uitademt in een grotere ruimte wordt verspreid.

Bijna elk schip heeft een verbrandingsmotor aan boord, die energie produceert door een koolstof houdende stof te verbranden. Het resultaat van een volledige verbranding is bijna altijd CO₂.

De hoeveelheid CO₂ die een schip uitstoot hangt af van verschillende factoren.

Volgens In Tran & Lam (2022), is één van die factoren de snelheid van het schip. Als een schip sneller gaat varen zal dat schip ook meer CO₂ uitstoten. De hoeveelheid CO₂ die een schip uitstoot hangt af van schip tot schip. Zwaardere schepen zullen meer brandstof nodig hebben om een bepaalde snelheid te halen dan kleine schepen. Hierdoor zullen ze ook meer CO₂ uitstoten.

In deze thesis gaat het niet over de hoeveelheid CO₂ een schip uitstoot, maar over de vraag hoeveel CO₂ wel of niet binnenkomt in het ventilatiesysteem. Dit kan afhangen van verschillende factoren.

De eerste factor is besproken in bovenstaande paragraaf (de hoeveelheid CO₂ deeltjes die de motor uitstoot).

Een tweede bepalende factor is de afstand tussen de positie van de uitlaat van de motor en de positie van de inlaat van het ventilatiesysteem voor de scheepsaccommodatie. Hoe groter deze afstand, hoe minder CO₂ er in de accommodatie kan binnenkomen.

Een andere factor is de snelheid van de wind. Het gaat dan niet over de ware windsnelheid, maar over de relatieve windsnelheid. Op bijna alle schepen bevindt de uitlaat van de motor zich achter of boven de inlaat van het ventilatiesysteem. Als de relatieve wind dus meer op de boeg komt en een hoge snelheid heeft, verlaagt de kans dat CO₂ deeltjes uit de motor in de ventilatie van de accommodatie terecht komen. Een hoge snelheid verhoogt het aantal CO₂ deeltjes dat de motor uitstoot, maar vermindert ook de kans dat die CO₂ deeltjes in het ventilatiesysteem terecht komen.

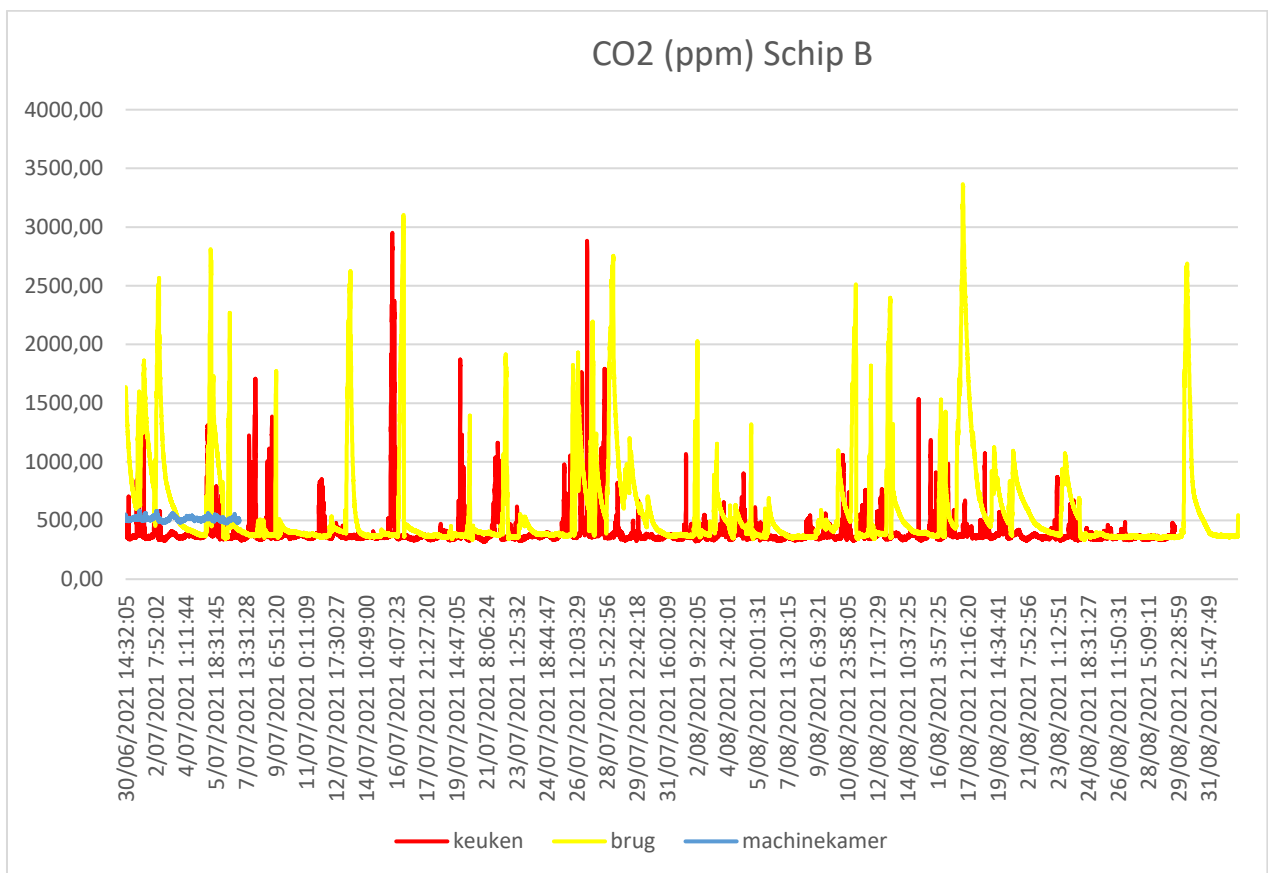
Naast de vaste hoeveelheid CO₂ in de atmosfeer en de CO₂ geproduceerd aan boord (door de mens en door de motor) is er nog de CO₂ geproduceerd door derden.

De hoeveelheid koolstofdioxide geproduceerd door derden die in het ventilatiesysteem kan geraken hangt af van verschillende factoren:

- De positie van het schip. De schepen A, B, C en D waarop de metingen zijn gedaan varen alle 4 in een drukke haven waar de industrie en het verkeer ook koolstofdioxide uitstoot.

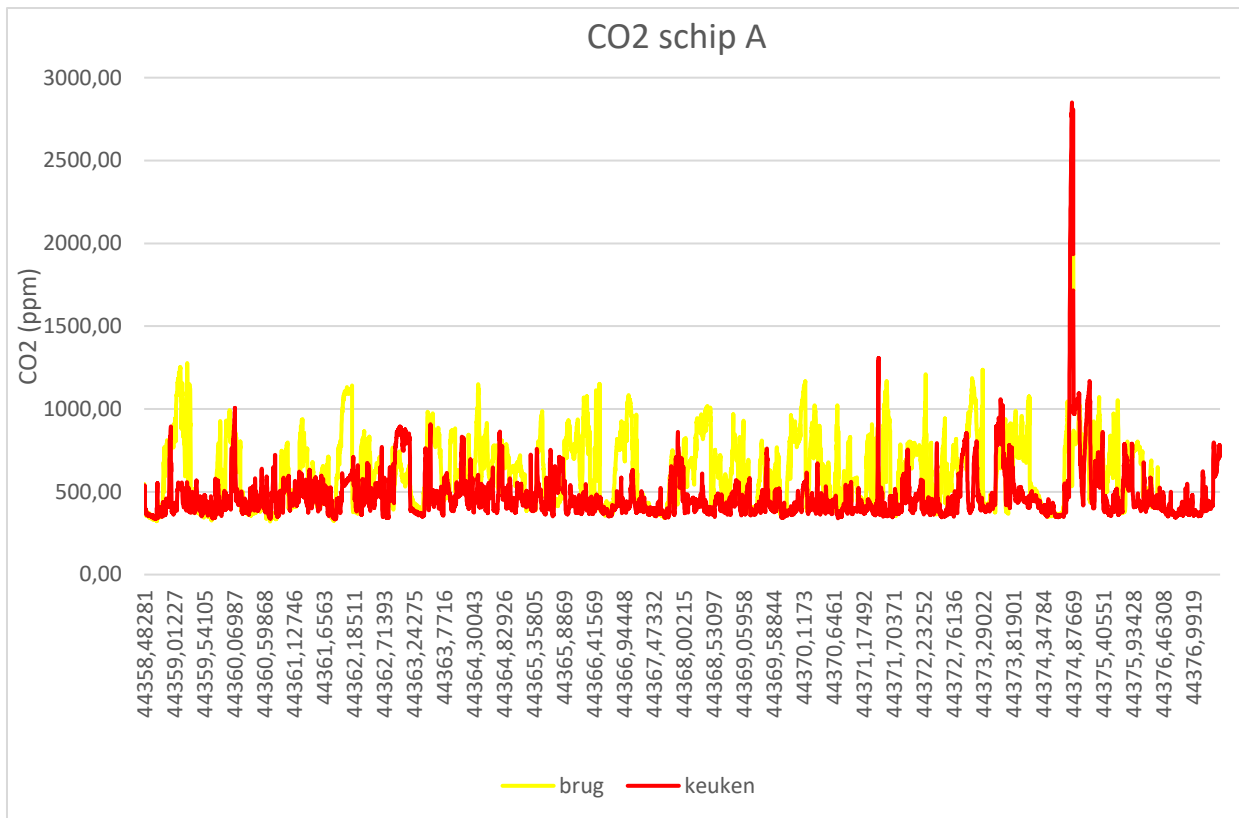
- Het aantal schepen in de buurt en hun positie. Schip A,C en D zijn sleepboten. Deze boten bevinden zich vaak achter een groot zeeschip waar ze de CO₂ die dat schip uitstoot in het ventilatiesysteem kunnen krijgen.
- Het weer: de wind speelt een belangrijke factor. Zonder wind kan de CO₂ die wordt uitgestoten door derden zich makkelijk opstapelen op een bepaalde plaats in de haven of op een rivier. Hoe meer wind, hoe minder koolstofdioxide er zich opstapelt.

4.3 Het verloop van de CO₂ concentratie

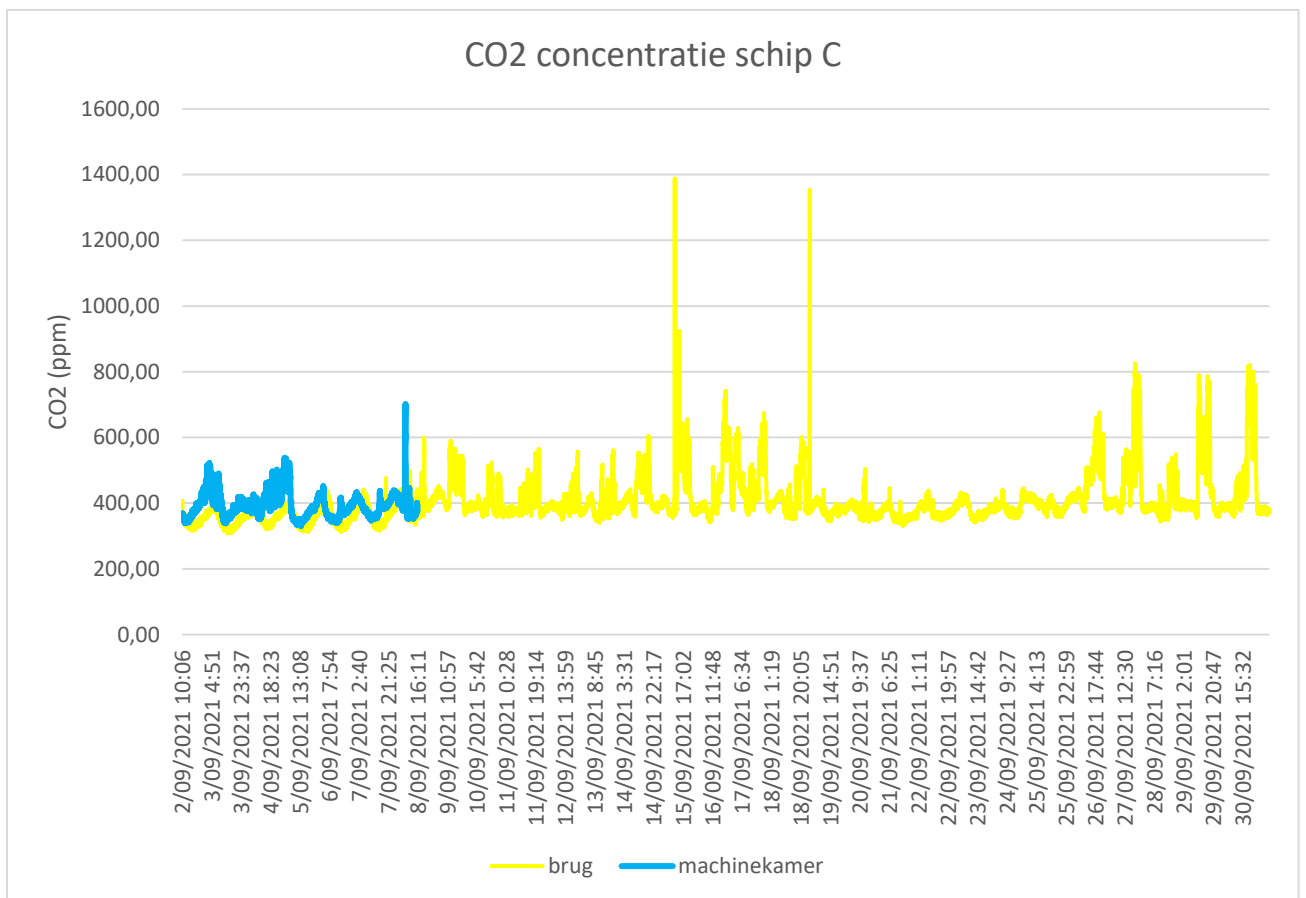


Figuur 21 CO₂ concentraties schip B

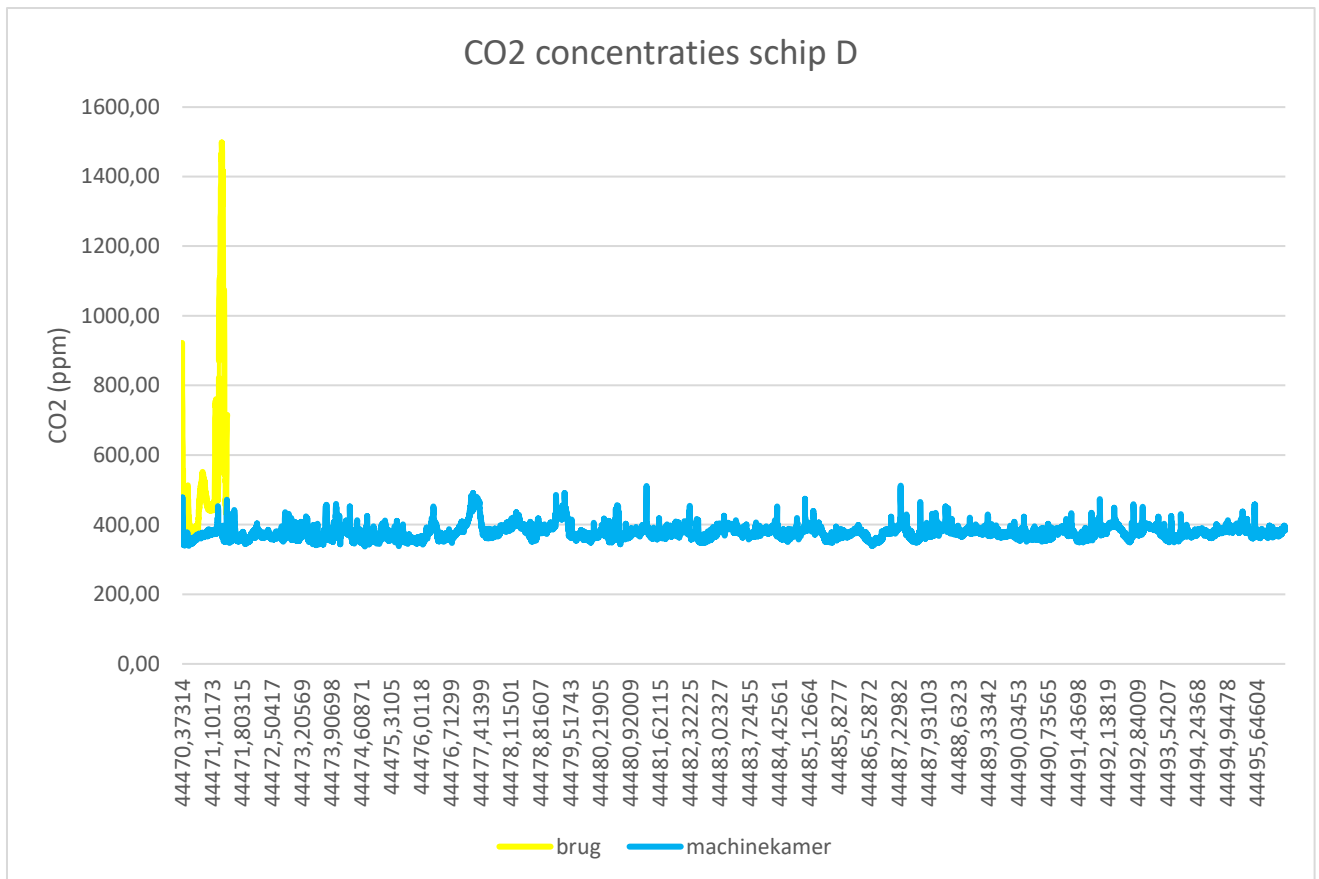
Bron: eigen werk



Figuur 22 CO2 concentraties schip A
Bron: eigen werk



Figuur 23 CO2 concentraties schip C
Bron: eigen werk



*Figuur 24 CO2 concentraties schip D
Bron: eigen werk*

Op Figuur 21, Figuur 22, Figuur 23 en Figuur 24 is het verloop van de gemeten CO₂ concentraties weergegeven. Deze grafieken zijn afgebeeld per schip.

Op Figuur 21 zijn de gemeten waarden van schip B te zien. Op dit schip is er op 3 plaatsen gemeten. Deze plaatsen zijn: de brug, de keuken en de machinekamer.

Figuur 22 presenteert de metingen die zijn uitgevoerd op schip A. Hier zijn er evenveel metingen voor de brug als voor de machinekamer.

De grafieken van de CO₂ concentraties gemeten op schip C zijn terug te vinden op Figuur 23. Op Figuur 24 zijn de grafieken voor schip D te zien. Op deze schepen zijn er op 2 verschillende plaatsen metingen gedaan. Namelijk op de brug en in de machinekamer.

De kleur voor de grafiek is voor elke plaats gelijk. De gele grafieken zijn de metingen van de toestellen die op de brug stonden, de blauwe metingen komen van toestellen uit de machinekamer. De rode grafieken zijn de weergave van de metingen in de keuken.

Het is duidelijk dat er op geen enkel schip en in geen enkele ruimte een direct probleem optreedt voor de gezondheid van de opvarenden. Er is geen enkel ogenblik dat de concentratie van de CO₂ boven de TLV-TWA van 5000ppm gaat.

Er zijn echter wel momenten dat de CO₂ concentratie boven de ideale maximumwaarde van 1030 ppm gaat die wordt aangeraden door de Washington State University ('Measuring CO₂ Inside Buildings', 2013.). Dit gebeurt vooral op de schepen A en B. Deze schepen zijn ouder dan de andere twee. Dit kan als gevolg hebben dat de oudere motor meer uitstoten en dat het ventilatiesysteem minder goed werkt.

Zoals in paragraaf 4.2 besproken, is de positie van de uitlaat ten opzichte van de inlaat van de ventilatie een factor die mee bepaalt hoeveel CO₂ er in het ventilatiesysteem terecht kan komen.

De schepen A, C en D zijn alle drie haven sleepboten en doen hetzelfde werk. Toch is de concentratie CO₂ in de ruimtes op schip A hoger dan op schip C en D. Bij schip A staat de positie van de uitlaat dicht bij de accommodatie dan bij de andere schepen. Dit maakt het makkelijker voor de uitlaatgassen om de accommodatie binnen te dringen. De uitlaat van schip B is het verst gelegen van de accommodatie (in vergelijking met de drie andere schepen), maar dit schip heeft een andere functie.

De pieken van de CO₂ concentratie vallen op in bovenstaande figuren. Deze pieken vallen ook ongeveer samen voor elke ruimte op hetzelfde schip.

De hoogte van de pieken is wel niet altijd gelijk voor de verschillende ruimtes aan boord van de schepen. Elke ruimte heeft een ander volume en een verschillend aantal mensen dat in de ruimte aanwezig is. Dit heeft een invloed op de efficiëntie van het ventilatiesysteem en de hoeveelheid koolstofdioxide die de aanwezige mensen uitademen. Zoals besproken in voorgaand hoofdstuk speelt de positie van de ruimte ten opzichte van de positie van het ventilatiesysteem aan boord een grote rol in de efficiëntie van het ventilatiesysteem.

Op Figuur 21 is vast te stellen dat de CO₂ concentratie vaak schommelt rond dezelfde waarde met onregelmatige hoge pieken ertussen. De waarde die het meest voorkomt, is de minimumwaarde. Deze waarde ligt rond de 400ppm en is de concentratie CO₂ die standaard aanwezig is in de atmosfeer. Zoals te zien is op de blauwe grafiek op Figuur 21, Figuur 23 en Figuur 24 blijft de gemeten concentratie aan CO₂ in de machinekamer bijna constant onder

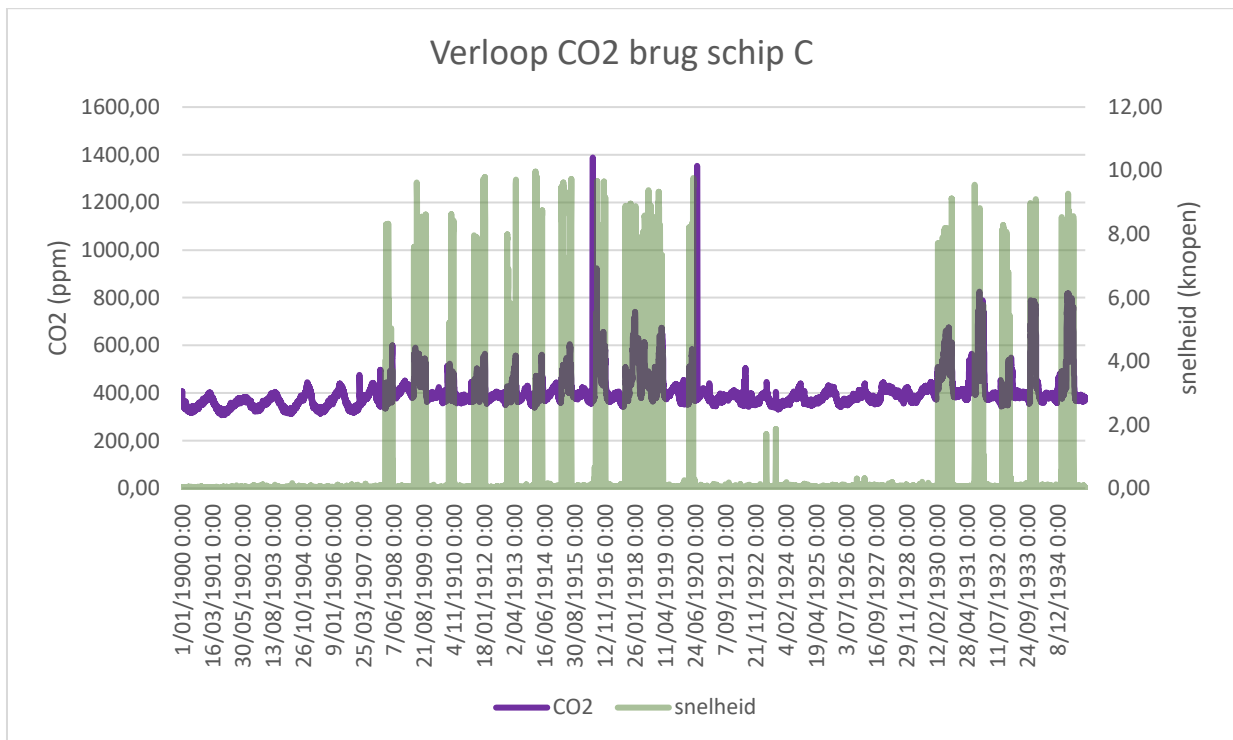
de 800 ppm. Ook terwijl op schip B en schip D de concentraties op hetzelfde gemeten moment soms boven de 1500 ppm liggen, zoals gemeten op de brug of in de keuken.

Dit wordt verklaard door het volgende:

- Er kan van uit gegaan worden dat de afvoer van de uitlaatgassen volledig in orde is en dat er geen lek is tussen de motor en de schouw.
- Het is mogelijk dat de positie van de inlaat van het ventilatiesysteem voor de motor beter geïmponeerd is ten opzichte van de inlaat voor de brug en de keuken. Hierdoor is het mogelijk dat minder uitlaatgassen van de motor de ingang van het ventilatiesysteem voor de machinekamer bereiken.
- De machinekamer is niet altijd bemand. De schepen waarop de metingen uitgevoerd zijn, hebben niet zo veel bemanning en zijn niet zo groot. Na het opstarten van de motor zijn er geen personen meer aanwezig in de machinekamer. Zo is er ook geen uitgeademde CO₂ die in de ruimte terecht komt. Soms komt er wel een persoon in de ruimte, maar dan voert een goed werkende ventilatie die koolstof dioxide direct af.
- Machinekamers hebben meer toevoer van zuurstof nodig dan andere plaatsen in de accommodatie. Dit is omdat de verbrandingsmotor meer zuurstof nodig heeft om energie te kunnen leveren dan een mens nodig heeft. Hierdoor wordt er meer verse lucht in de machinekamer geblazen en zijn er dus meer luchtverwisselingen dan op de brug. CO₂ die in de ruimte geraakt (boven het normale niveau) zal deze veel sneller verlaten, dan op de brug.

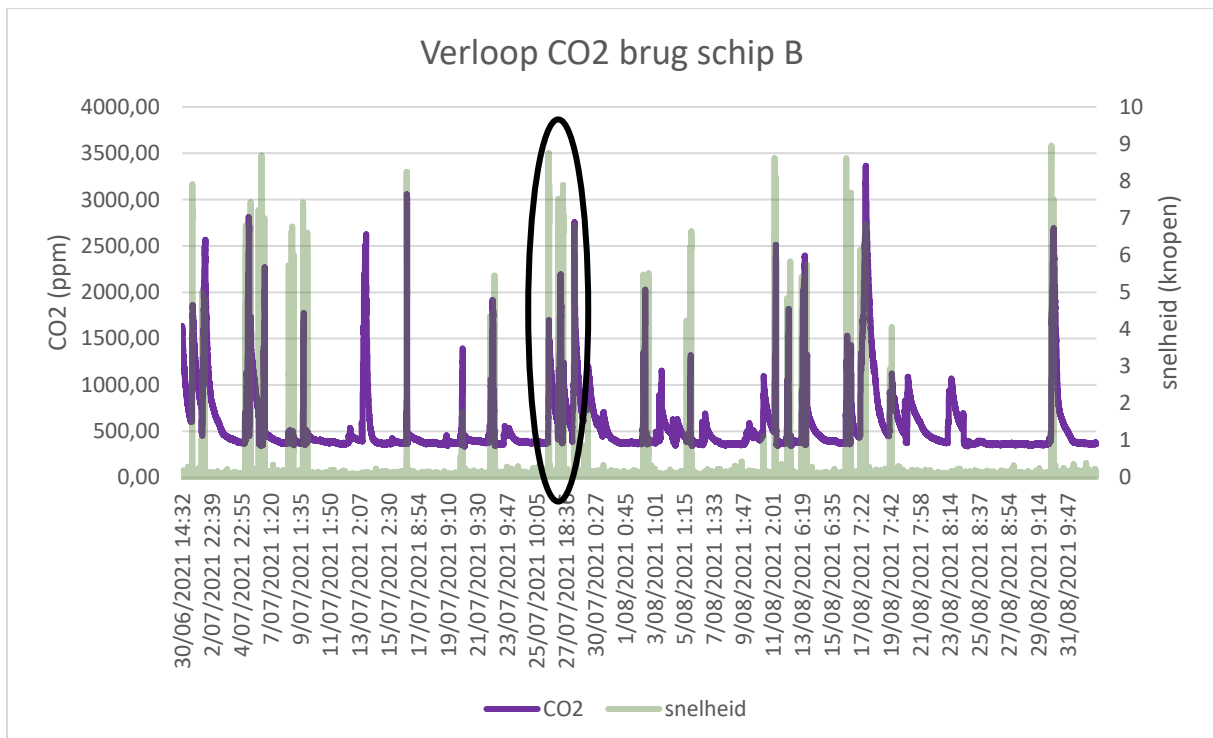
Eén van de hoofddoelen van het ventilatiesysteem van de accommodatie is om het CO₂ gehalte zo laag mogelijk te houden om de gezondheid van de opvarenden optimaal te houden. Aangezien geen enkele keer een TLV werd overschreden (wel een paar keer de TWA, maar dit gedurende een periode minder dan acht uur) kan je concluderen dat het systeem functioneert. Op alle schepen is de concentratie op sommige momenten echter wel hoger dan 1000ppm, wat niet schadelijk is voor de gezondheid maar toch enkele mentale gevolgen kent. Het is dus mogelijk om te concluderen dat het ventilatiesysteem zijn werk doet, maar dat het beter kan.

4.4 CO₂ concentratie vs snelheid v/h schip



Figuur 25 verloop CO2 brug schip C

Bron: eigen werk



Figuur 26 verloop CO2 brug schip B

Bron: eigen werk

Om te onderzoeken waarom op sommige momenten er een hoge concentratie koolstofdioxide wordt gemeten, is op Figuur 25 en Figuur 26 het verloop van de koolstofdioxide concentratie voor de brug van schip C en schip B te zien samen met de

snelheid van het schip in knopen. Er is gekozen voor de brug omdat er voor de machinekamer geen grote pieken te zien waren op Figuur 21, Figuur 23 en Figuur 24. Er was dus geen groot probleem te zien bij de concentratie in de machinekamer. Voor de concentratie op de brug is er voor het verloop van schip B en C gekozen. Dit is omdat schip A bijna continu aan het varen was en er daardoor een minder duidelijke grafiek was. Bij schip D was er een probleem met de gemeten coördinaten van de brug waardoor het niet mogelijk was om de snelheid van het schip te bepalen.

Op Figuur 25 en Figuur 26 valt duidelijk te zien wanneer het schip snelheid maakt: wanneer het schip aan het varen is en de motor en de generator aanstaan, zijn er pieken van koolstofdioxide.

De stijging van de concentratie koolstofdioxide als het schip vaart, kan twee verschillende oorzaken hebben.

- De CO_2 die uitgestoten wordt door de motor komt binnen in het ventilatiesysteem van de accommodatie. Als een schip niet aan het varen is, dan staat zijn motor niet aan. Zo kan er van die motor dus geen koolstof dioxide in het ventilatiesysteem terecht komen. In hoofdstuk 3 is besloten dat het ventilatiesysteem niet aanstaat als het schip niet aan het varen is. Indien de generator (die kan aanstaan als het schip niet aan het varen is) grote hoeveelheden koolstofdioxide uitstoot kan het ventilatiesysteem dit niet binnenbrengen in de ruimte.
- Wanneer het schip stilligt aan de kade is er niet continu bemanning aanwezig op het schip. De pieken in de concentratie van koolstofdioxide kunnen dus afkomstig zijn van de adem van de bemanning van het schip die aan boord is als het schip vaart.

Deze twee oorzaken kunnen de pieken in de concentratie koolstofdioxide verklaren. In paragraaf 4.5 wordt hier verder op ingegaan om de precieze bron van deze pieken te vinden. In dit hoofdstuk wordt ook een verklaring gegeven voor de verschillende pieken in de concentratie CO_2 op momenten dat het schip niet aan het varen is (figuur 25).

De hoogte van de pieken is echter moeilijker te verklaren. Deze kunnen afhangen van de verschillende factoren die besproken zijn in paragraaf 4.2.

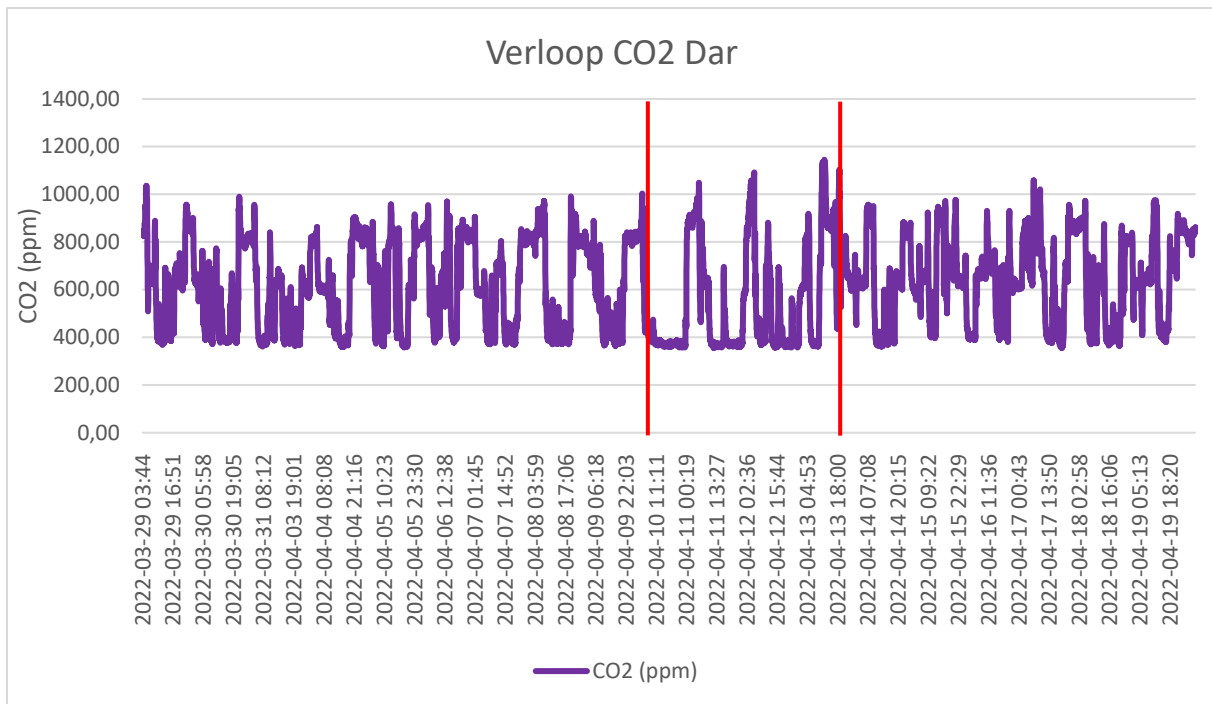
De waarden van die factoren zijn echter niet gekend waardoor het moeilijk te verklaren valt waarom sommige pieken hoger zijn dan andere. Wel kan worden uitgesloten dat de snelheid

van het schip een grote invloed heeft op de grootte van de pieken in de concentratie koolstofdioxide. Op Figuur 25 en Figuur 26 valt te zien dat wanneer het schip een kleinere snelheid heeft, er toch een grotere hoeveelheid koolstofdioxide aanwezig is dan op momenten dat het schip een grotere snelheid heeft. Een voorbeeld hiervan is aangeduid op Figuur 26 met een zwarte cirkel. In de zwarte cirkel zijn er drie momenten waarop het schip snelheid maakt, de eerste keer heeft het schip de grootste snelheid en de laatste keer de kleinste. Toch is de concentratie koolstofdioxide de eerste keer lager dan bij de laatste keer. Ook gebeurt het soms dat hetzelfde schip met dezelfde snelheid op bepaalde momenten een grotere hoeveelheid koolstofdioxide op de brug heeft dan op andere momenten bij diezelfde snelheid. Hoe dit komt, wordt besproken in paragraaf 4.5.

Op Figuur 25 valt te zien dat wanneer het schip niet aan het varen is, er toch veranderingen gebeuren in de concentratie van koolstofdioxide aan boord. Deze concentraties zijn groter 's nachts dan overdag. Dit volgt het verloop van de atmosferische concentratie koolstof dioxide die volgens The Copernicus Programme ('Carbon dioxide levels are rising: Is it really that simple? | Copernicus', z.d.) lager ligt overdag omdat dan de bomen en de planten meer koolstofdioxide opnemen omdat deze licht nodig hebben om koolstofdioxide om te zetten in zuurstof.

4.5 CO₂ concentratie Dar Młodzieży

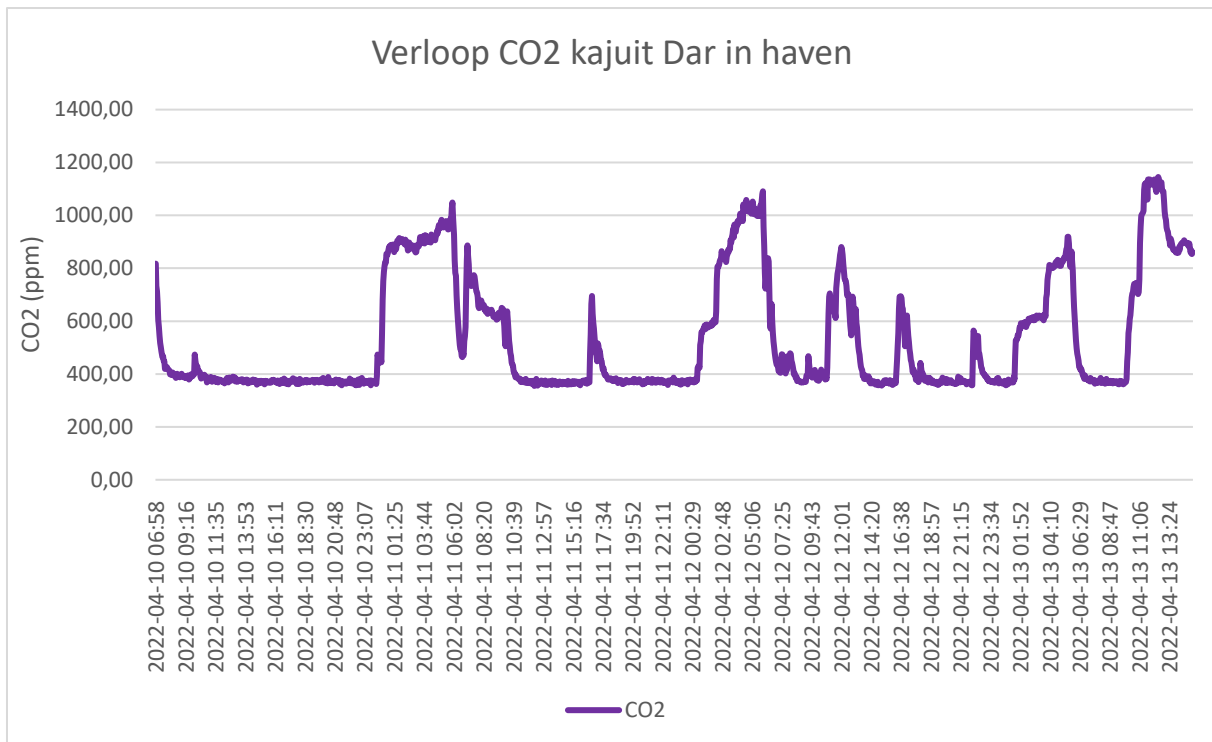
In bovenstaande paragraaf is aangetoond dat, als de schepen aan het varen zijn, er hogere concentraties koolstofdioxide gemeten worden op de brug en in de keuken. Het was echter niet duidelijk of deze pieken van de koolstofdioxide afkomstig waren van de uitlaatgassen van de motor/generator of van de mensen die zich in de ruimte bevonden. Dit is omdat het niet geweten is wanneer en hoeveel mensen zich in de accommodatie bevonden. Er kon alleen met zekerheid gezegd worden dat er mensen aanwezig waren op het moment dat het schip aan het varen was. De momenten waarop met zekerheid gezegd kon worden dat de motor aanstond en de bemanning aan boord was zijn dezelfde momenten. Hierdoor was het onmogelijk om een onderscheid te maken.



*Figuur 27 verloop CO2 kajuit Dar Mlodziezy
Bron: eigen werk*

Op Figuur 27 is het verloop van de concentratie koolstofdioxide in de kajuit op de Dar Mlodziezy afgebeeld. Net zoals in de figuren in paragraaf 4.3 zijn er meerdere pieken en dalen in de concentratie koolstofdioxide. In die paragraaf werd vastgesteld dat de pieken in de concentratie koolstofdioxide samenvallen met de momenten waarop het schip aan het varen is, dus wanneer de motor en de generator van de schepen aan stonden en de bemanning aan boord was. Hier vaart het schip bijna altijd, met uitzondering van 3 dagen. Het is dus niet mogelijk om met zekerheid te zeggen dat de koolstofdioxide in de ruimtes afkomstig is van de uitlaatgassen van de motor.

Het meest opvallende is dat, tijdens die 3 dagen dat het schip niet vaart en het dus aangemeerd is (deze momenten zijn de metingen tussen de 2 rode strepen op Figuur 27), de gemeten concentraties hetzelfde verloop blijven aanhouden als wanneer het schip aan het varen is. Er is dus geen verschil in pieken tussen wanneer het schip aan het varen is en de voortstuwingsmotor aan ligt en tussen wanneer het schip niet aan het varen is en enkel de generator aan ligt.



*Figuur 28 verloop CO2 kajuit Dar in de haven
Bron: eigen werk*

Op Figuur 28 is het verloop van de koolstofdioxide concentratie te zien van de dagen waarop het schip was aangemeerd. Van deze dagen kan met zekerheid gezegd worden dat de voortstuwingsmotor van het schip niet aanstaat en dat alleen de generator aanstaat. Maar er kan ook met zekerheid gezegd worden wanneer de bemanningsleden die in de kajuit sliepen aan boord waren of niet.

Op Figuur 28 valt duidelijk te zien dat de eerste 2 dagen dat het schip in de haven lag, er alleen 's nachts koolstofdioxide in de ruimte aanwezig was en dat overdag de concentratie in de ruimte gelijk was aan de concentratie koolstofdioxide in de atmosfeer. Tijdens de eerste 2 dagen in de haven is de bemanning die in de kajuit sliep alleen 's nachts aan boord om te slapen (buiten 1 moment tijdens de 2 de dag). De derde dag bleven de bemanningsleden aan boord en kwamen ze af en toe in hun kajuit. Op die dag zijn er meerdere pieken van koolstofdioxide gemeten in de kajuit. Hierdoor kan je dus met zekerheid zeggen dat de grote pieken in de concentratie van de koolstofdioxide afkomstig zijn van de bemanning die op dat moment aan boord is.

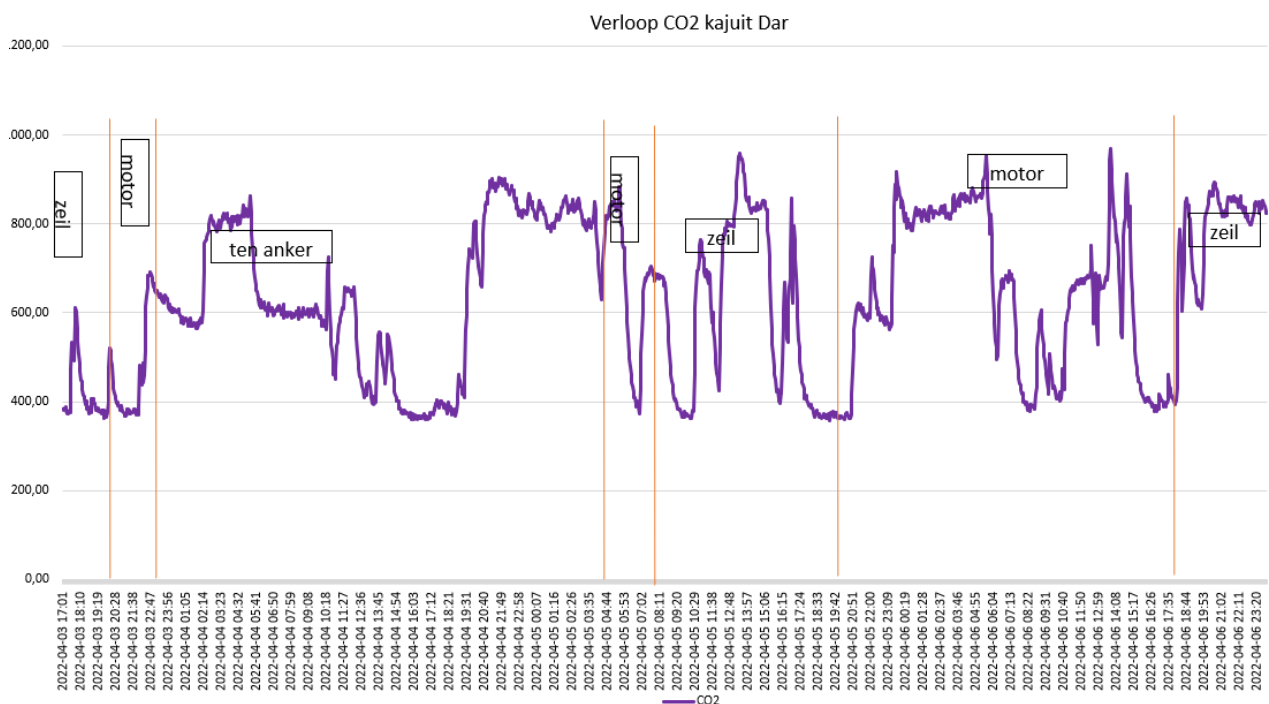
Hierdoor kunnen de kleinere pieken wanneer het schip niet aan het varen is op Figuur 26 dus verklaard worden door bemanning die aan boord komt om iets te bekijken als het schip niet aan het varen is.

Wanneer er een persoon in de ruimte komt, stijgt de concentratie koolstofdioxide bijna direct tot boven de 600ppm. Wanneer een 2^{de} persoon in de ruimte komt (dit valt te zien aan de trappen in het verloop van de concentratie koolstofdioxide) kan die waarde zelfs stijgen tot boven de 1000ppm. Hierdoor zijn er meerdere momenten waarop de concentratie koolstofdioxide in de ruimte boven de aanbevolen waarde van 1030 ppm ligt.

Dit is een indicatie dat het ventilatiesysteem niet optimaal werkt. Een verhoging van de concentratie koolstofdioxide is te verwachten als een bron van koolstofdioxide de ruimte binnen komt. Het is echter opvallend dat de concentratie zeer snel stijgt tot het een bepaald saturatiepunt bereikt heeft.

Het saturatiepunt wanneer er 1 persoon in de ruimte is ligt rond de 800ppm. Dit saturatiepunt bevindt zich nog ver genoeg onder de aangeraden concentratie van 1030ppm. Dit is niet ideaal, maar het is niet echt een aanduiding van een probleem. Wanneer er echter een 2^{de} persoon in de ruimte komt, stijgt dit saturatiepunt tot rond 1000ppm. Dit is net onder de aangeraden concentratie van 1030ppm, maar op sommige momenten zijn er pieken waar de concentratie in de ruimte hoger ligt.

Aangezien de kajuit bestemd is voor 2 slapende personen, is dit een indicatie dat het ventilatiesysteem in de kajuit niet optimaal werkt.



Figuur 29 verloop CO2 kajuit Dar detail

Bron: eigen werk

Op Figuur 28 is alleen de meting op het moment dat de Dar in de haven lag afgebeeld. Om na te gaan of er een verschil is in de koolstofdioxide concentratie tussen wanneer het schip in de haven ligt, en wanneer het schip aan het varen is op zeil of op motor, is op Figuur 29 het verloop van de concentratie koolstofdioxide te zien van een paar dagen dat het schip niet in de haven lag. Op deze figuur zijn er ook aanduidingen van wanneer het schip aan het varen was op zeil, op motor of ten anker lag.

Op deze figuur valt opnieuw te zien dat 's nacht de concentratie koolstofdioxide hoger is dan overdag. Daarbij zijn er overdag momenten waarop de concentratie koolstofdioxide de atmosferische concentratie heeft van 400ppm terwijl dit 's nacht niet gebeurt.

Op Figuur 29 is ook te zien dat de hoogste pieken koolstofdioxide voorkomen net nadat de concentratie koolstof dioxide stijgt of net voordat de concentratie begint te dalen. Dit is omdat op deze momenten de bemanning wakker is in de kamer en zich klaar maakt om te slapen of zich klaar maakt om de dag te beginnen. Dit toont aan dat het verschil in concentraties op sommige momenten vooral afhankelijk is van de hoeveelheid koolstofdioxide die de bemanning in de kajuit uitstoot. Een actief persoon ademt meer koolstofdioxide uit dan een persoon in rust.

5 PM

5.1 Factoren die de PM aan boord beïnvloeden

Fijn stof is een omvangrijk begrip. Het bevat meerdere stoffen die van verschillende plaatsen afkomstig kunnen zijn. Het kan gaan om afgescheurde stukjes rots en roet die in uitlaatgassen zitten, tot gassen zoals stikstofoxiden en zwaveldioxide die zich verbonden hebben aan vaste deeltjes.

Hans Otto Kristenen (2015) vermeldt dat fijn stof wordt uitgestoten door de motor aan boord van het schip. Het gaat dan specifiek over een mengeling van organische en anorganische stoffen. De mix bestaat vooral uit elementair koolstof, roet, zware metalen en een deel koolwaterstoffen dat gedeeltelijk of niet hebben meegedaan aan de verbranding in de motor.

De omvang van de uitstoot van fijnstof van een schip hangt voor een groot deel af van de volledigheid van de verbranding. Rook is een middel om de kwaliteit van de verbranding te zien.

De uitstoot hangt ook af van de brandstof. De uitstoot van fijn stof is hoger als er een grotere hoeveelheid zwavel in de brandstof zit. Dit is de reden waarom in MARPOL annex VI (IMO, 1997) de regelgeving om de uitstoot van fijn stof te beperken dezelfde is als de regelgeving om de zwaveldioxide uitstoot te beperken. Namelijk het verlagen van het zwavelgehalte in de brandstof.

Fijn stof is schadelijk voor het milieu en voor de gezondheid. Om de uitstoot hiervan nog meer te beperken zijn er verschillende behandelingen die gedaan kunnen worden aan boord waaronder een *diesel particulate filter*, een *Diesel oxidation catalyst* en een *continuous regeneration trap*.

Zoals hierboven vermeld, zijn er verschillende soorten fijn stof, van verschillende oorsprongen, zoals de wind die zandkorrels en verschillende grondstoffen de lucht in blaast tot elektriciteitscentrales, industrie en transport. De meeste bronnen van fijn stof hebben wel te maken met de industrie. In industriegebieden zoals havens kan je dus een hoger gehalte van fijn stof verwachten. Het jaargemiddelde van fijn stof lag tussen 10 en 15µg/m³ in de

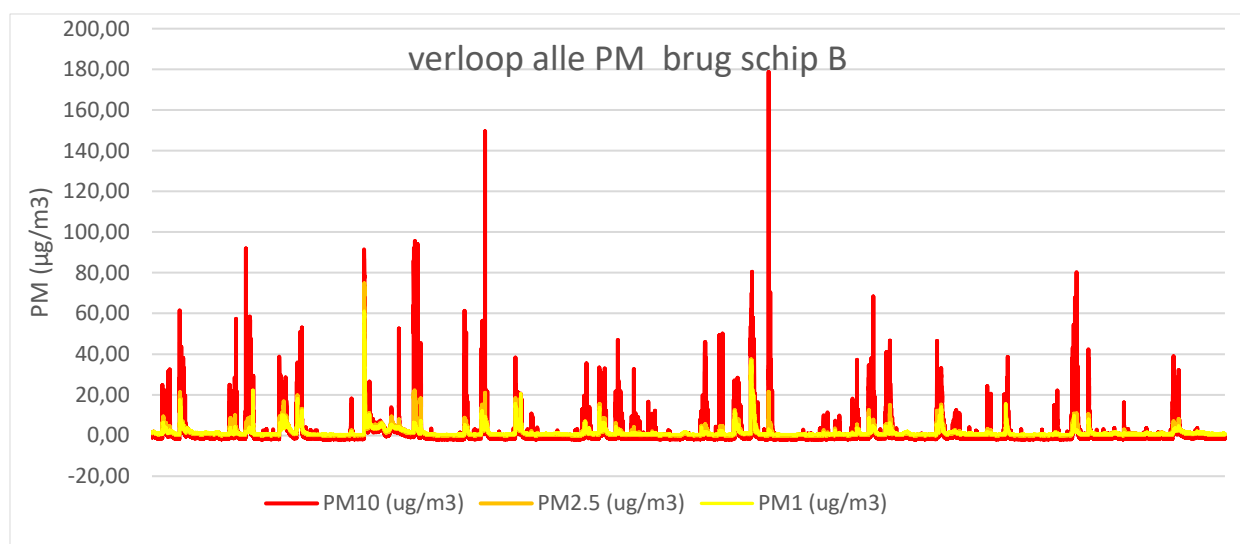
zomer van 2021 (de periode waarop de metingen zijn gedaan). ('Intergewestelijke Cel voor het Leefmilieu (IRCEL)—Nederlands', z.d.)

Dit jaargemiddelde is echter het gemiddelde van waarden gemeten in meetstations over het gehele land. In de haven ligt die waarde hoger door de aanwezigheid van industrie en verkeer die fijn stof uitstoten.

5.2 Het verloop van PM aan boord

Op Figuur 30 valt het verloop van fijn stof op de brug aan boord van schip B te zien. Opvallend is dat, net als bij het verloop van de koolstofdioxideconcentratie, het verloop van de concentratie fijn stof in de ruimte, bestaat uit een basislijn met verschillende pieken. Deze basislijn is opnieuw de concentratie van fijn stof die altijd aanwezig is in de atmosfeer.

Voor de waarden van fijn stof in dit hoofdstuk zullen de gemeten waarden van PM₁₀ gebruikt worden. Dit wordt gedaan omdat, zoals op Figuur 30 valt te zien, de concentratie van PM₁, PM_{2,5} en PM₁₀ gelijklopen met elkaar, waarbij PM₁₀ iedere keer de hoogste concentratie heeft. Dit is omdat, zoals in paragraaf 2.4 wordt vermeld, voor de waarde van de concentratie PM₁₀ alle deeltjes fijn stof worden gemeten met een diameter kleiner dan 10µm. Hieronder vallen dus ook de deeltjes met een diameter kleiner dan 2,5µm (=PM_{2,5}) en de deeltje kleiner dan 1µm (=PM₁).



Figuur 30 verloop van fijn stof op brug van schip B
Bron: eigen werk

5.2.1 Resultaten van de brug

In deze paragraaf wordt de concentratie fijn stof op de brug van schip B en schip C bekeken om na te gaan of het ventilatiesysteem goed werkt. Schip B en schip C zijn opnieuw gekozen om dezelfde reden als in voorgaand hoofdstuk. De concentratie in de machinekamer en in de kajuit van de Dar wordt in komende paragrafen besproken omdat die anders verlopen dan de concentratie op de brug.

Op Figuur 31 en Figuur 32 is het verloop van de fijn stof concentratie (PM10) te zien op de brug van respectievelijk schip B en schip C. Vooreerst valt op dat de fijn stof concentratie (aangeduid in het blauw) vaak ligt boven de advieswaarde van $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ die de Wereld gezondheidsorganisatie heeft opgesteld. Dit is al een duidelijke aanduiding dat er een probleem is met de bescherming door het ventilatiesysteem van de opvarenden, die op de brug aanwezig zijn, tegen fijn stof dat in de lucht hangt.

Op Figuur 31 en Figuur 32 is ook de snelheid te zien (in het groen) die het schip had op het moment van meten. Op deze figuren valt direct te zien dat, als het schip vaart en de motor aanstaat, er grote pieken zijn in de concentratie van fijn stof. Dit zijn de momenten waarop (zoals vermeld in bovenstaande alinea) de hoeveelheid fijn stof in de ruimte boven de advieswaarde van de Wereldgezondheidsorganisatie ligt.

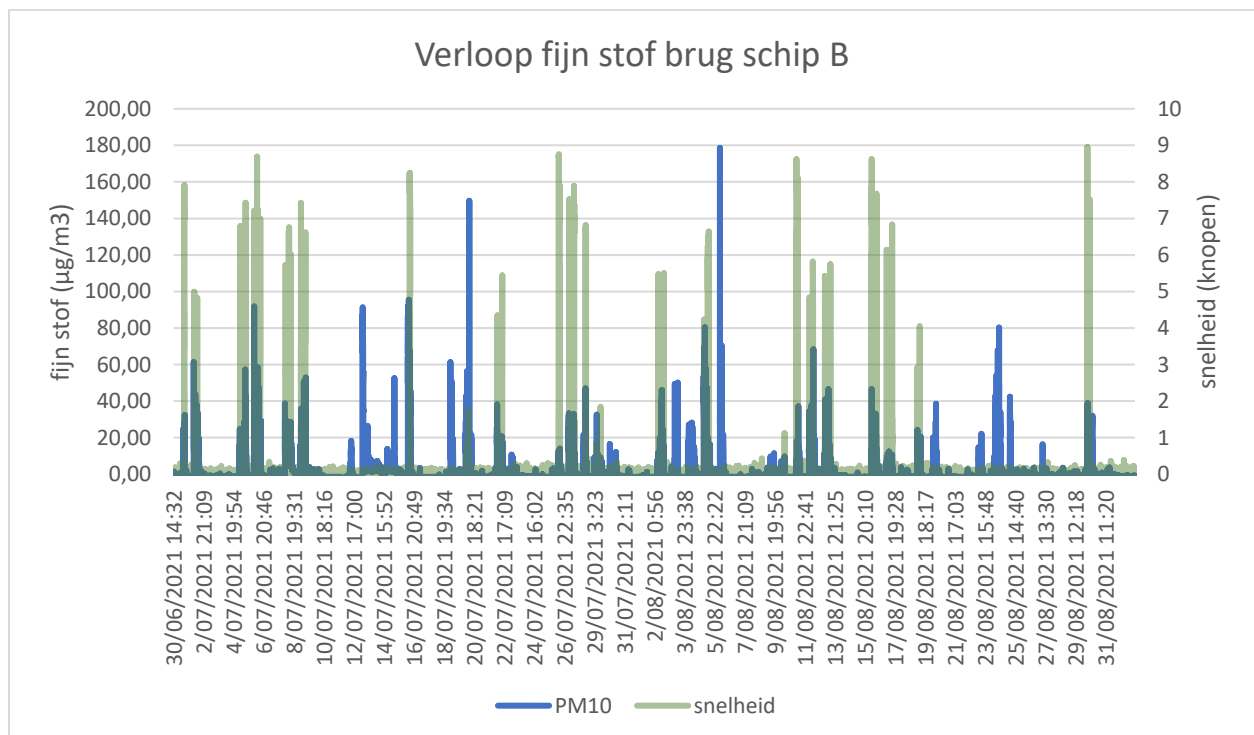
Zoals aangetoond in hoofdstuk 3 staat het ventilatiesysteem niet aan als het schip niet vaart en de motor niet aan staat. Als het schip vaart en de motor dus aan staat is het ventilatiesysteem ingeschakeld. Dit kan fijn stof uit de atmosfeer binnenbrengen. Er kan echter met zekerheid gezegd worden dat de concentratie fijn stof die kan binnenkomen uit de atmosfeer niet zo groot is als de pieken fijn stof die te zien zijn op Figuur 31 en Figuur 32 . Om een idee te krijgen van hoe groot de waarde van de concentratie fijn stof kan zijn in een haven refereer ik naar een rapport van de haven van Antwerpen (Vlaamse milieu maatschappij, 2021). Daarin wordt het maximum gemeten jaargemiddelde vastgesteld op $60\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Het fijn stof dat binnenkomt op de brug zal dus voornamelijk afkomstig zijn van de motor van het schip of van de mensen die in de ruimte aanwezig zijn. Mensen die bewegen in een ruimte kunnen (fijn) stof doen opwaaien. De concentratie fijn stof is, net zoals de concentratie

koolstofdioxide, onafhankelijk van de snelheid van het schip. In volgende paragraaf wordt verder besproken wat de exacte oorzaak is van de verhoogde concentratie fijn stof.

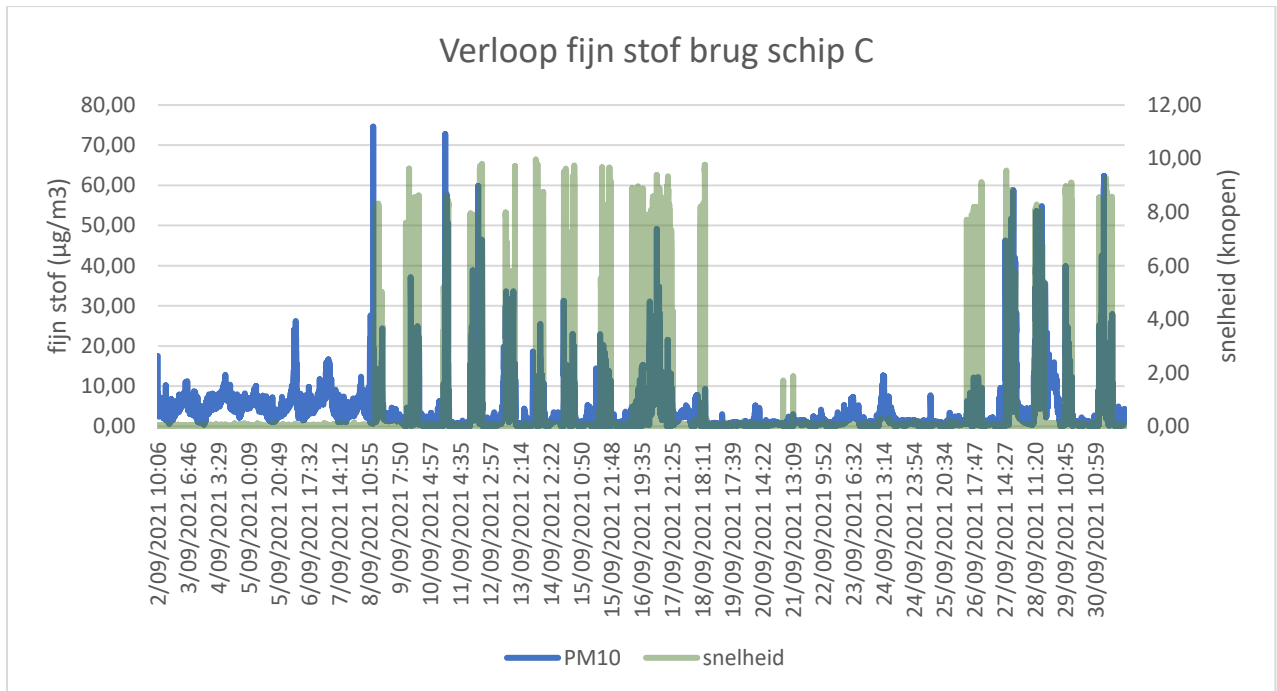
Op Figuur 31 valt te zien dat er momenten zijn van verhoogde concentratie fijn stof op de brug van schip B terwijl het schip niet aan het varen is. Deze momenten vallen samen met de pieken koolstofdioxide op Figuur 26 wanneer het schip niet aan het varen is. Dit is een aanduiding van bemanning aan boord van het schip. Het is dan ook mogelijk dat de motor of generator aanstaat wanneer het schip geen snelheid maakt. Op deze momenten is het mogelijk dat het schip werkzaamheden uitvoert, zonder vooruit te bewegen. Zoals besproken in paragraaf 2.1 is schip B een duwboot, Figuur 2 is echter een voorbeeld van een duwboot. Schip B heeft in werkelijkheid een kraan om werkzaamheden uit te voeren. De motor/ generator van het schip ligt dus aan en er is soms bemanning aan boord zonder dat het schip effectief snelheid maakt.

Op Figuur 32 zijn ook enkele pieken te zien in de concentratie van fijn stof als het schip niet aan het varen is en er geen bemanning aan boord is. Deze pieken zijn echter klein en kunnen afkomstig zijn van het fijn stof dat op dat moment in de atmosfeer zit, of van een ander schip dat voorbijvaart als de wind de uitlaatgassen van dat schip naar de aanmeerplaats van schip C blaast.

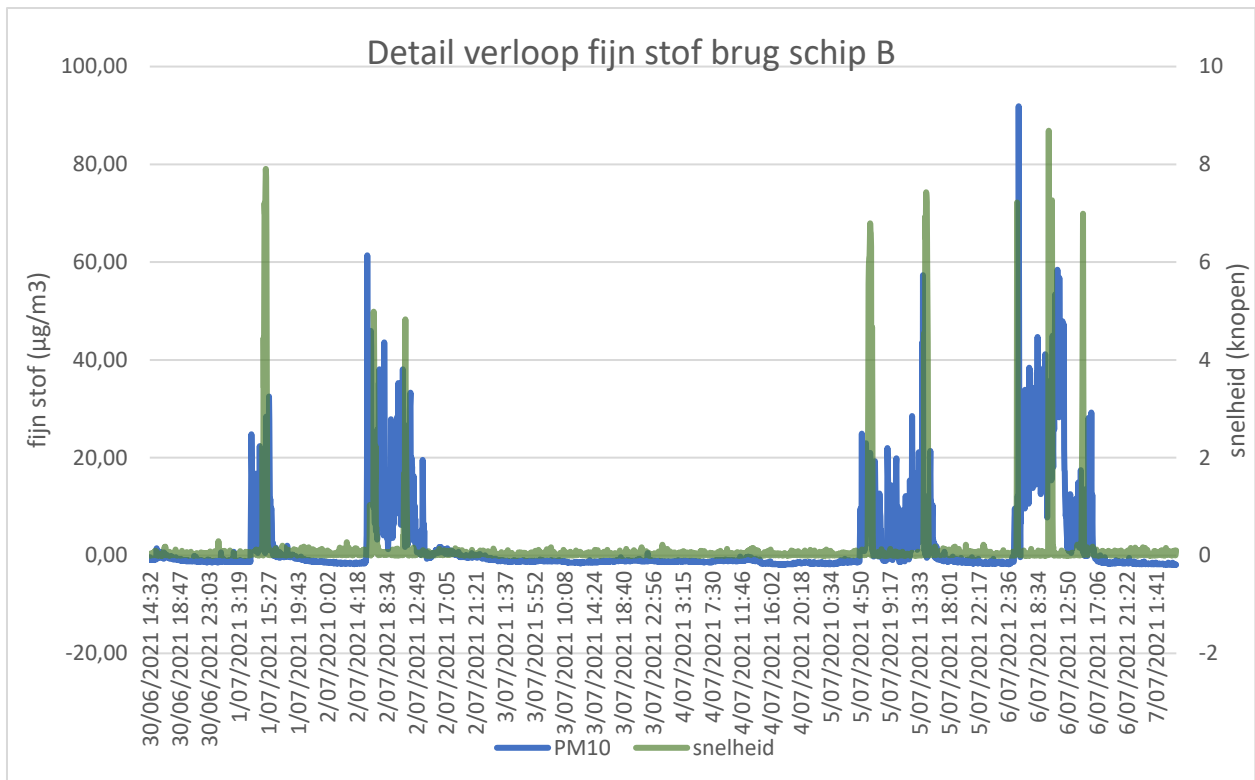


Figuur 31 verloop fijn stof brug schip B
Bron: eigen werk

Op Figuur 33 is het verloop van het fijn stof te zien op de brug van schip B dat gemeten is gedurende 1 week. Op deze figuur valt beter te zien wanneer het fijn stof binnen komt in de accommodatie. Het is duidelijk dat het fijn stof al binnenkomt eventjes voordat het schip begint te varen. Eerst komt de bemanning aan boord en moet de motor aanliggen alvorens een schip kan vertrekken. Het fijn stof komt al binnen van zodra de bemanning aan boord komt of de motor/ generator (en ook het ventilatiesysteem) aan worden gestoken.



*Figuur 32 verloop fijn stof brug schip C
Bron: eigen werk*



Figuur 33 detail verloop fijn stof brug schip B

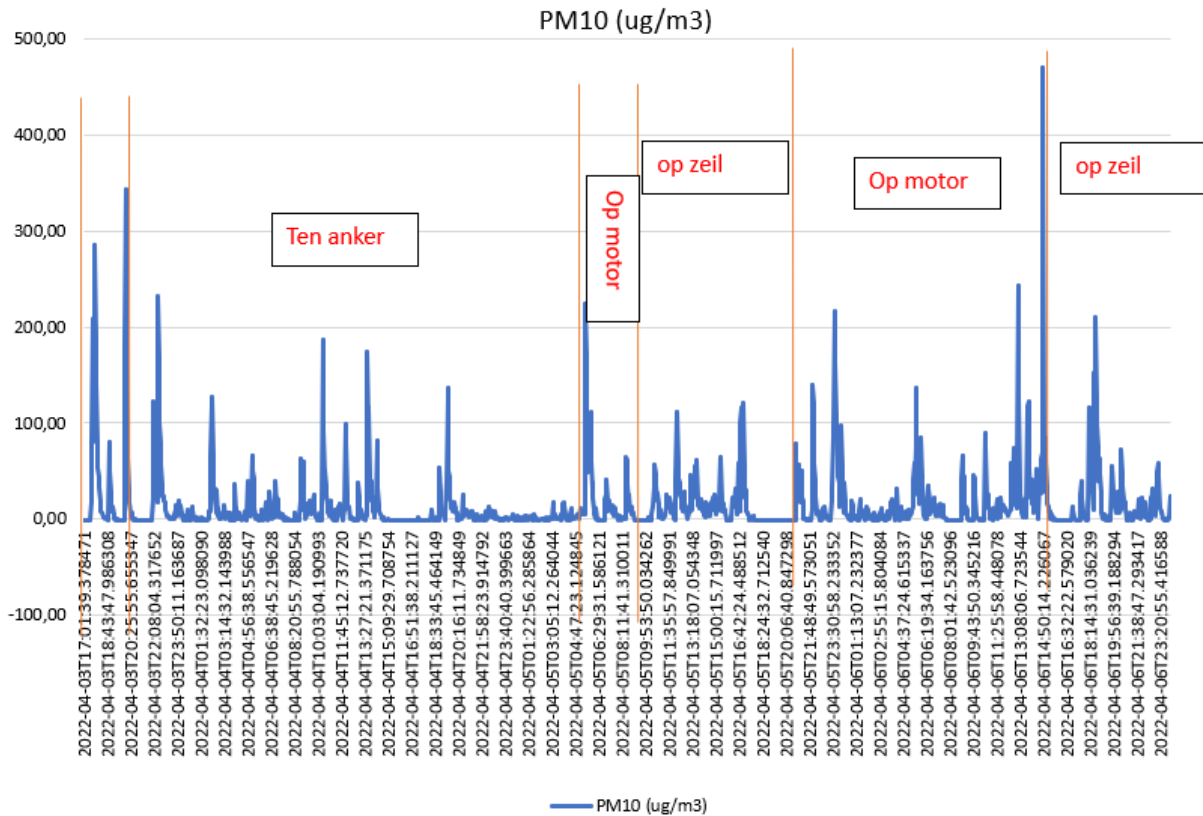
Bron: eigen werk

5.2.2 Resultaten van de Dar

Om na te gaan waar de verhoogde concentratie fijn stof vandaan komt, wordt de concentratie fijn stof in de kajuit van de Dar onderzocht. Hier is er meer kennis van het tijdstip waarop mensen aanwezig zijn in de kajuit en wanneer de motor en de generator aan staan.

Op Figuur 34 valt het verloop van de fijn stof concentratie in de kajuit op de Dar te zien. Het grote verschil met vorige schepen is dat er continu een generator aan stond (ook als het schip in de haven lag). Op Figuur 34 is ook aangeduid of het schip aan het varen was op zeil, op motor of ten anker lag. De weergegeven concentraties zijn gemeten tussen 03/04/2022 1700 en 07/04/2022 0000. Deze periode is gekozen omdat in deze 4 dagen het schip ten anker heeft gelegen en een paar keer is afgewisseld tussen varen op zeil en varen op motor.

Opvallend is dat er in elke situatie een concentratie fijn stof in de kajuit aanwezig was, of het schip nu ten anker lag of aan het varen was op motor of op zeil. Er is dus geen verschil tussen wanneer het schip aan het varen is op zeil of op motor. Er is echter wel een verhoogde concentratie fijn stof bij de overgang van bv motor naar zeil.



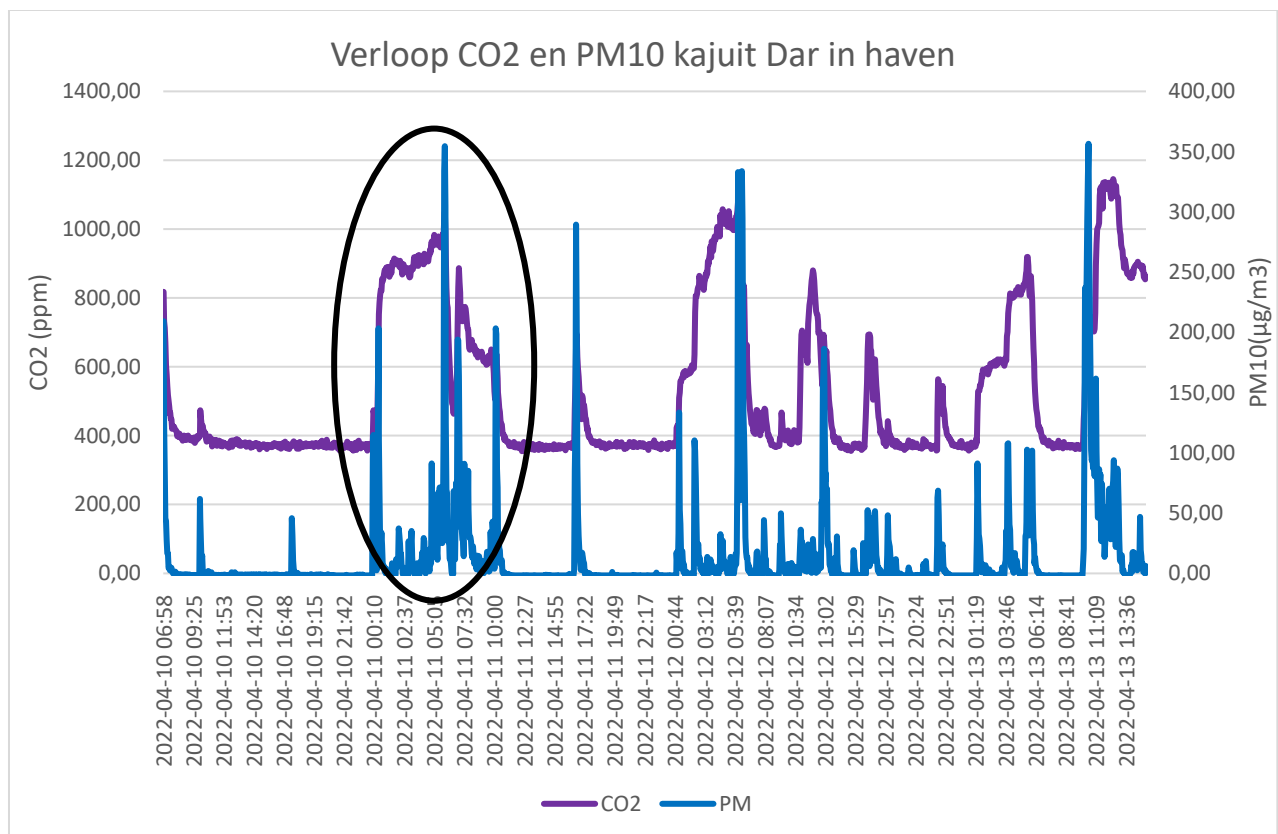
Figuur 34 verloop van fijn stof op de dar
Bron: eigen werk

Het valt op dat de pieken in de concentratie fijn stof groter zijn als de motor draait, dan wanneer de motor niet draait. Dit kan een aanduiding zijn dat de uitlaatgassen van de motor de concentratie van fijn stof in de ruimte verhogen.

Om te onderzoeken of de verhoging van de concentratie fijn stof wordt veroorzaakt door de motor of de mens, die beweegt in de ruimte, tonen Figuur 35 en Figuur 36 het verloop van de concentratie fijn stof in de kajuit van de Dar samen met het verloop van de concentratie koolstof monoxide in de kajuit. Figuur 35 is gekozen omdat de momenten van de gemeten waarden dezelfde zijn als op Figuur 28. Bij deze figuur werd besproken dat de verhoogde concentratie koolstof monoxide afkomstig is van de adem van de opvarenden die aanwezig waren in de ruimte.

Op Figuur 35 valt te zien dat de pieken in de concentratie fijn stof alleen voorkomen wanneer er pieken zijn in de concentratie koolstof dioxide. Hierdoor kan er dus besloten worden dat de verhoging in de concentratie fijn stof veroorzaakt wordt door menselijke activiteit in de kajuit.

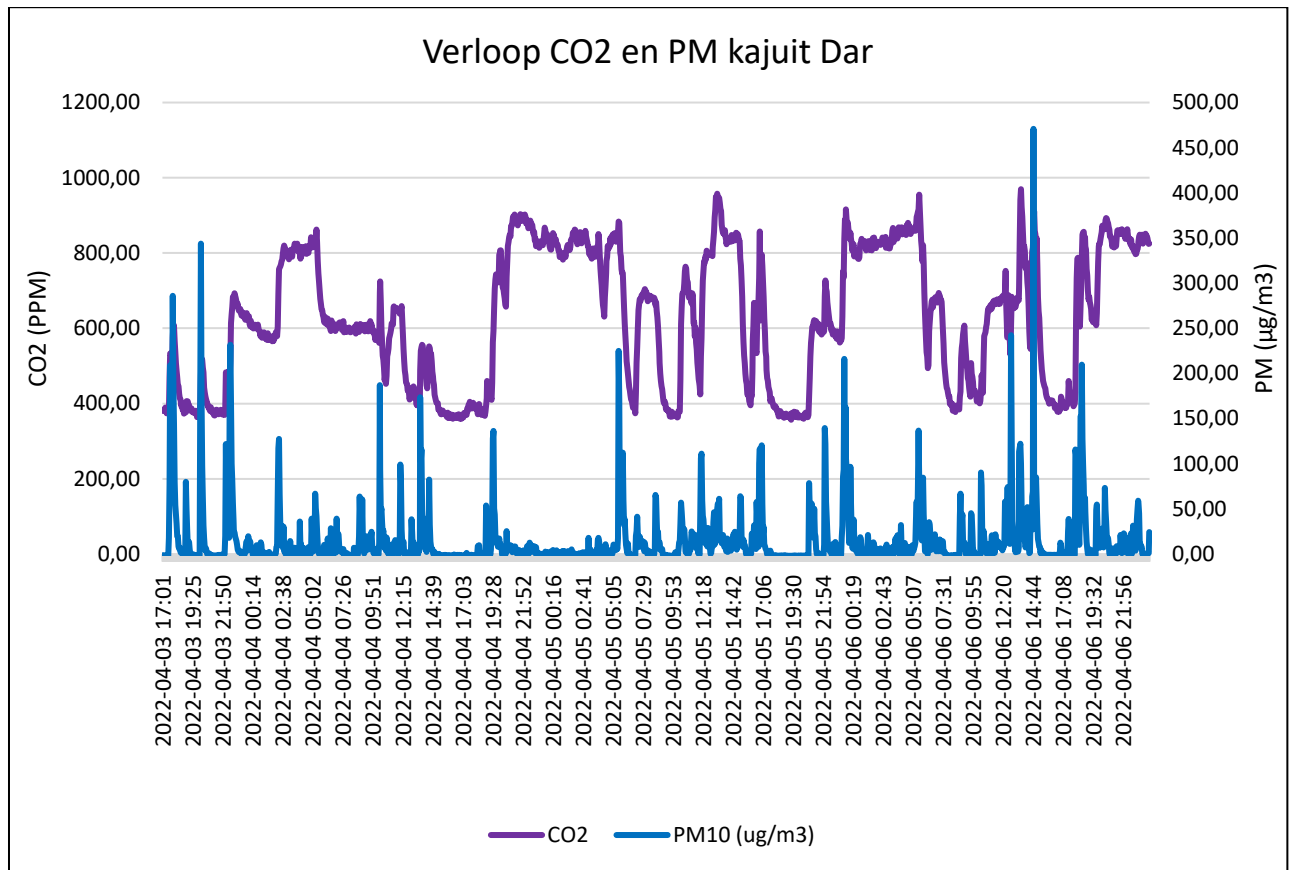
Om dit te verduidelijken wordt het verloop van de eerst nacht besproken. Deze is op Figuur 35 omcirkeld. In het begin van de nacht komen de opvarenden binnen in de kajuit. Zij ademen koolstofdioxide uit in de kajuit. Zo stijgt de concentratie koolstof dioxide. Op dat moment is er een piek in de concentratie fijn stof. Dit is omdat de opvarenden rond bewegen en zich klaar maken om in bed te kruipen. Eenmaal in bed bewegen ze minder, waardoor de concentratie fijn stof daalt. Er zijn wel nog enkele kleine pieken, omdat niet iedereen volledig stil ligt als hij slaapt. Omstreeks 5u30 op de figuur (7U30 WT) is er terug een piek in de concentratie fijn stof omdat op dat moment de opvarenden opstaan voor het appel van 8u WT. Op dat moment daalt de concentratie koolstofdioxide ook. Na het appel kruipen ze terug even in hun bed en vertoont de concentratie fijn stof terug een piek. Op dat moment stijgt de concentratie koolstofdioxide ook terug. Hierna blijft de concentratie fijn stof heel even laag totdat de opvarenden terug opstaan en er een piek fijn stof is, gevolgd door een daling in de concentratie koolstofdioxide. Daarna gaan de opvarenden van boord en is er geen fijn stof en geen verhoogde concentratie koolstofdioxide meer aanwezig.



Figuur 35 verloop CO2 en PM kajuit Dar deel 1

Bron: eigen werk

Op Figuur 36 is terug te zien dat er bij een stijging of daling van de concentratie koolstofdioxide, er zich een piek van fijn stof vertoont. Deze figuur is gekozen omdat de dagen van deze metingen in verdere hoofdstukken nog gebruikt zullen worden bij verder onderzoek.



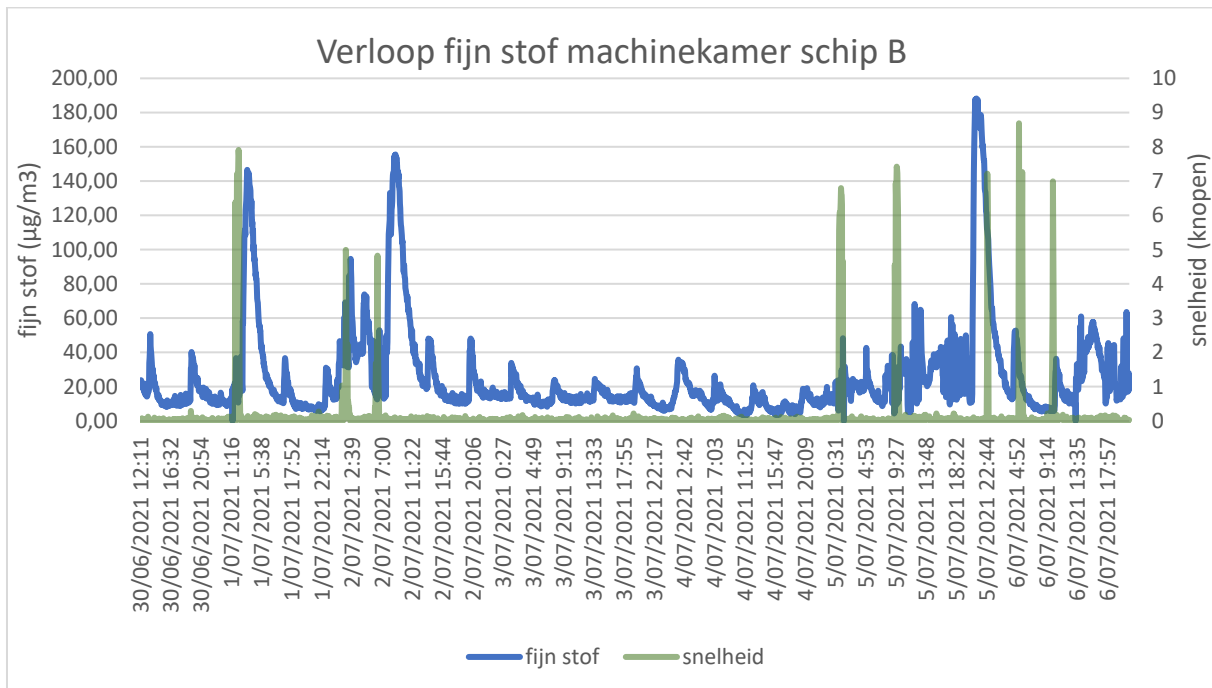
Figuur 36 verloop CO2 en PM kajuit Dar deel 2
Bron: eigen werk

5.2.3 Resultaten van de machinekamer

Het grote verschil met de machinekamer van de havenschepen, de brug van de havenslepers en de kajuit van de Dar is dat de machinekamer voor het grootste deel onbemand is. Zoals in bovenstaande paragraaf besproken zijn de pieken in de concentratie fijn stof veroorzaakt door mensen die fijn stof laten rondvliegen in de ruimte.

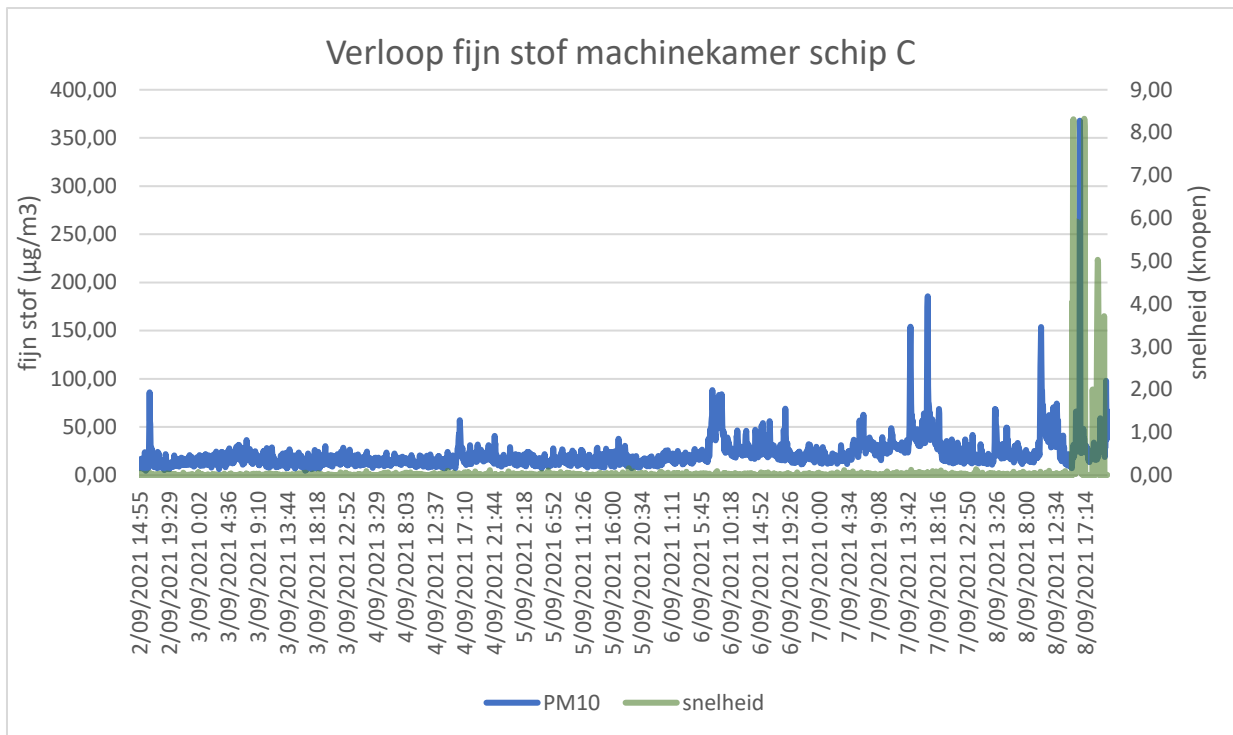
Op Figuur 37 valt het verloop van fijn stof in de machinekamer van schip B te zien. Het valt op dat de grootste concentratie fijn stof gemeten is net voor of net nadat het schip aan het varen is. Op dat moment ligt de motor van het schip net aan of is hij net uitgeschakeld. Op de momenten van grote pieken in de machinekamer wordt er op de brug geen fijn stof meer gemeten. Dit is omdat het personeel de brug verlaten heeft en er daarna iemand in de machinekamer komt om de motor te bekijken.

Een andere mogelijkheid is dat de motor fijn stof blijft uitstoten in de ruimte nadat die is uitgeschakeld. Dit toont een groot probleem aan met de ventilatie van de machinekamer van schip B. Desbetreffende pieken hebben daarbij een concentratie boven $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Terwijl de concentratie fijn stof op de brug tijdens dezelfde week nooit boven de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gaat. Dit toont aan dat er meer fijn stof aanwezig is in de machinekamer dan op de brug.



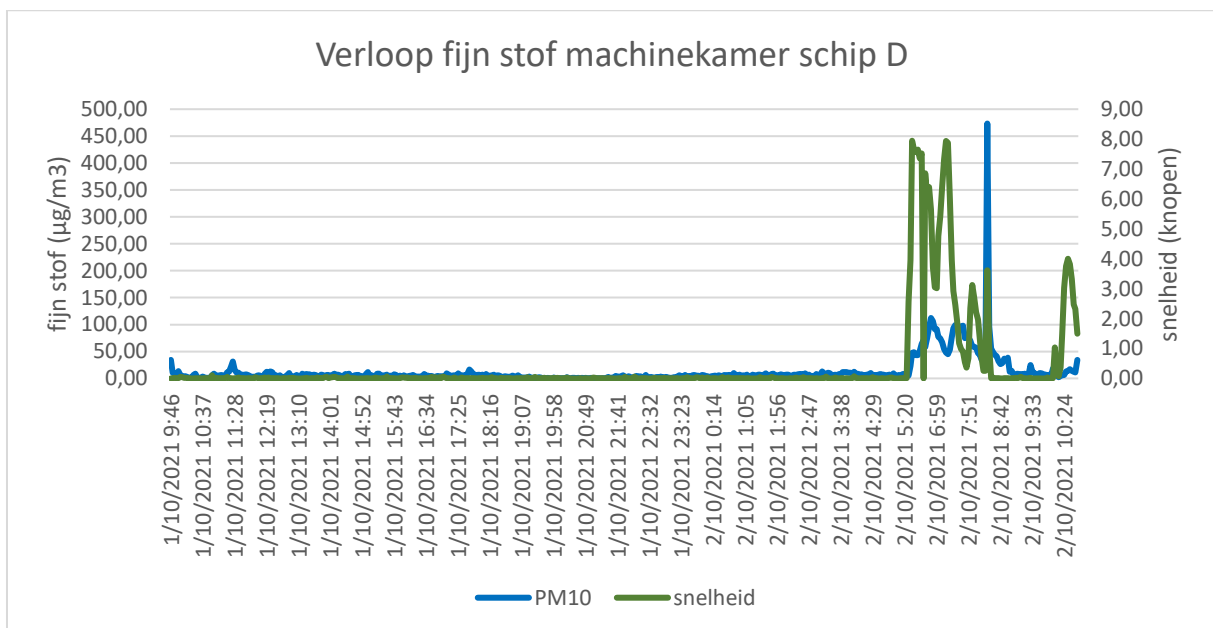
Figuur 37 verloop fijn stof machinekamer schip B
Bron: eigen werk

Het verloop van fijn stof in de machinekamer op schip C, dat te zien valt op Figuur 38, toont een nog groter probleem aan met de werking van het ventilatiesysteem dan bij schip B. Wanneer het schip niet aan het varen is, zijn er concentraties gemeten boven de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Het is echter moeilijk te verklaren hoe dit komt, want in tegenstelling tot schip B is er geen bemanning aan boord op dat moment en heeft het schip ook geen bijkomende functie waardoor het kan functioneren zonder te varen. Om een duidelijke verklaring te geven voor deze pieken is er meer informatie nodig. Maar dit toont, samen met de gemeten concentratie van boven de $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$, aan dat, als het schip aan het varen is en de motor aan ligt met bemanning aan boord, de machinekamer een ongezonde ruimte is om in te werken en dat er een groot probleem is met de ventilatie van de machinekamer van schip C.



Figuur 38 verloop fijn stof machinekamer schip C
Bron: eigen werk

Ook de machinekamer van schip D heeft een grote concentratie aan fijn stof van boven de $400\mu\text{g}/\text{m}^3$ als het schip vaart. Dit valt te zien op Figuur 39. Het is dus duidelijk dat er niet alleen een probleem is met de ventilatie van de brug op de gemeten schepen, maar vooral met de ventilatie van de machinekamer. Er worden te hoge concentraties aan fijn stof gemeten waardoor het vaak niet gezond is om aan boord te zijn.



Figuur 39 verloop fijn stof machinekamer schip D
Bron: eigen werk

6 CO

6.1 Gezondheidsproblemen van CO

CO kan, in tegenstelling tot CO₂, wel schadelijk zijn voor de mens als het voorkomt in lage concentraties. Het is geurloos en kleurloos, waardoor het moeilijk detecteerbaar is zonder hulpmiddel. Het wordt soms 'de stille moordenaar' genoemd. Daarom zijn er al verschillende bewustzijns campagnes gevoerd om mensen bewust te maken van het gevaar.

Koolstof monoxide is schadelijk voor de menselijke gezondheid omdat het interfereert met de capaciteit van de mens om zuurstof op te nemen uit de lucht. Koolstof monoxide bindt zich met de hemoglobine in het bloed die zuurstof opneemt en vervoert. Als hemoglobine gebonden is met koolstofmonoxide, kan het geen binding meer maken met zuurstof. Daarenboven is de affiniteit voor hemoglobine en koolstof 200 tot 250 keer groter ten opzichte van zuurstof. Dit wil zeggen dat hemoglobine zich veel sneller zal binden met koolstof monoxide dan met zuurstof. Een ander nadeel hiervan is dat de koolstofmonoxide veel langer op de hemoglobine blijft zitten dan zuurstof normaal doet. Als iemand koolstof monoxide in zijn bloed heeft, halveert die concentratie pas na 5 uur ademen in normale lucht. (Alan Abelsohn, Margaret D. Sanborn, Barry J. Jessiman, & Erica Weir, 2002)

Net zoals CO₂ heeft koolstof monoxide ook verschillende *treshold limit values*. (drempel grenswaarden)

Deze worden vermeld door Chaulya & Prasad (2016) en hebben de volgende waarden.

- TLV-TWA: 0.005%=50ppm=50000ppb
- TLV-STEL=0.04%=400ppm=400000ppb

Het veroorzaakt hoofdpijn, vermoeidheid en duizeligheid als een persoon voor een bepaalde tijd wordt blootgesteld aan een te hoge concentratie.

Omdat een lage koolstofmonoxide concentratie belangrijk is voor de gezondheid van de mens hebben de Europese unie en de Wereld gezondheidsorganisatie ook grenswaarden opgelegd voor een maximum hoeveel koolstof monoxide dat aanwezig mag zijn in de atmosfeer op een bepaald moment. De grenswaarde opgegeven door de Europese Unie is een 8 uur gemiddelde van 10mg/m³ (8,729 PPM). De grenswaarden opgelegd door de

Wereldgezondheidsorganisatie bestaan uit 4 verschillende waarden, een grenswaarde voor het 24uur gemiddelde van 4mg/m³ (3,492ppm), een grenswaarde voor het 8uur gemiddelde dat gelijk is aan de waarde opgelegd door de Europese unie, een grenswaarde waar de concentratie niet langer dan 1 uur hoger mag zijn dan 35mg/m³ (30,552ppm) en een absolute grenswaarde waar de concentratie niet langer dan 15 minuten hoger mag zijn dan 100mg/m³ (87,290 PPM).

6.2 Bronnen van CO aan boord

In tegenstelling tot CO₂ is er buiten vulkaanuitbarstingen, ontgassen van moerassen en bosbranden geen natuurlijke bron van koolstof monoxide. De mens produceert geen CO en in een normale ruimte van de accommodatie zou er geen bron van CO mogen zijn. Na een eerdere blootstelling aan CO ademt de mens na een tijdje die CO wel terug uit (intracto, z.d.)

Koolstof monoxide wordt geproduceerd als er een onvolledige verbranding is van een brandstof die koolstof bevat. Onvolledige verbrandingen ontstaan als er onvoldoende zuurstof in de ruimte aanwezig is en de verbranding niet stopt. De hoeveelheid koolstof monoxide die een motor uitstoot hangt dus af van hoe goed het ventilatiesysteem werkt in de machinekamer.

Een hoge concentratie koolstof monoxide in de ruimtes van de accommodatie kan dus wijzen op een slechte positie van de inlaat van het ventilatiesysteem van de accommodatie en een niet goed functionerend ventilatiesysteem van de machinekamer.

Echter Hans Otto Kristenen (2015) vermeldt dat de hoeveelheid koolstof monoxide die een motor van een schip uitstoot afhangt van nog andere factoren. Zo kan de slijtage van de motor een impact hebben op de uitstoot van koolstof monoxide. Ook een slecht onderhouden motor die al enkele jaren dienstdoet, zal meer koolstof monoxide uitstoten dan een goed onderhouden motor die nog maar net geplaatst is.

Een andere factor is de belading van de motor. Onder belading van de motor wordt de kracht die tegenwerkt op de energie die de motor produceert begrepen ('Engine Load—Definition, Calculation, vs. RPM, at Idle', 2022). Bij een lagere belading, zal de uitstoot van CO hoger zijn dan bij een hogere belading. Daarbij komt ook dat volgens Murtdha. S. Imran & Hayder J.Kurji

(2018) de koolstof monoxide uitstoot van een motor daalt als het toerental van de motor stijgt.

Naast de koolstof monoxide die wordt uitgestoten door het eigen schip, is het ook mogelijk dat koolstof monoxide die wordt geproduceerd door andere schepen, het ventilatiesysteem binnenkomt. In gebieden waar er veel maritiem verkeer is, bestaat de kans dat de concentratie van koolstof monoxide stijgt.

Alle verbrandingsmotoren produceren CO, ook de motoren van auto's en vrachtwagens. Het wordt ook uitgestoten door olieraffinaderijen en andere fabrieken die zich situeren in industriegebieden. Hierdoor is het mogelijk dat CO uitgestoten door voertuigen en fabrieken in een haven binnenkomt in het ventilatiesysteem als het schip zich in de haven bevindt.

6.3 Verloop CO aan boord

Om een begrip te krijgen van de hoeveelheid koolstof monoxide die binnenkomt, wordt er eerst gekeken naar de concentraties op de brug en hoe die verlopen. Daarna worden de concentraties in de machinekamer geanalyseerd om te zien of er een verschil is tussen de 2 locaties aan boord.

Als laatste, om een begrip te krijgen van waar de koolstof monoxide precies vandaan komt, wordt het verloop van de concentratie onderzocht in de kajuit aan boord van de Dar.

6.3.1 De brug

Op Figuur 40 is het verloop van de concentratie koolstof monoxide te zien op de brug van schip C. Net zoals in voorgaande hoofdstukken is de snelheid die het schip had op het moment van de meting, ook te zien op de figuur.

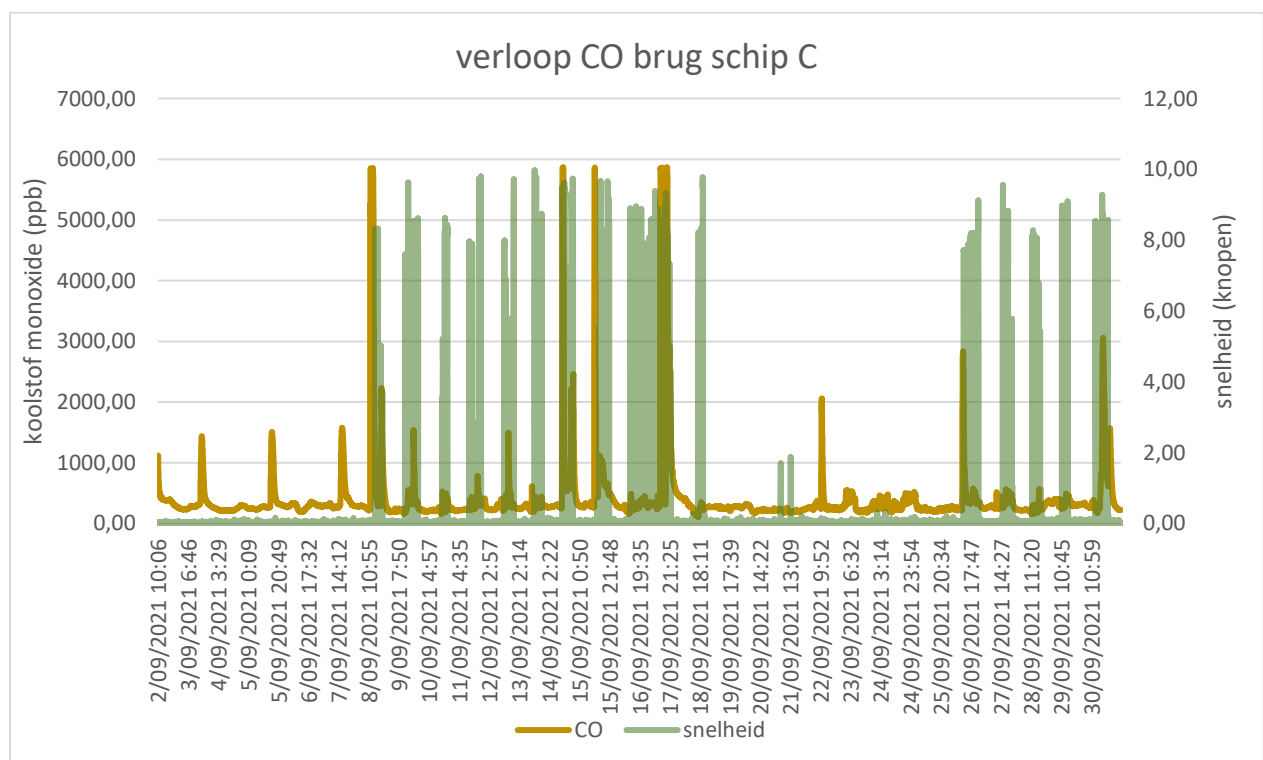
Het is duidelijk dat er grote pieken koolstof monoxide binnenkomen op de brug van het schip als het schip aan het varen is. Net zoals bij de concentratie fijn stof, heeft ook hier de grootte van de snelheid van het schip een zeer kleine tot geen invloed op de concentratie koolstof monoxide die gemeten wordt als het schip aan het varen is.

Bij de hoogste pieken overstijgt de concentratie koolstof monoxide de grenswaarden voor het 24 uurgemiddelde van 3,492 PPM dat opgelegd is door de Wereldgezondheidsorganisatie. De termijn waarin deze waarde overschreden wordt, duurt echter nooit langer dan een paar uur en direct daarna daalt de concentratie terug tot onder de 1000 PPB. Dit geeft dus niet direct

een significant probleem aan voor de gezondheid. Maar toch kan je hierbij zeggen dat er ook op het vlak van de koolstof monoxide concentratie een probleem is met de bescherming van het ventilatiesysteem tegen de uitlaatgassen van de motor van het schip.

Op Figuur 40 valt op dat, net zoals bij de concentratie fijn stof op de brug van schip C (besproken in paragraaf 5.2.1.), er meerdere pieken zijn in de concentratie koolstof monoxide voordat het schip voor de eerste keer gaat varen. Opmerkelijk is dat de pieken in de koolstofmonoxide concentratie vallen op het moment dat de fijn stof concentratie een lagere concentratie heeft. Dit is opvallend en is moeilijk te verklaren met de beschikbare data. Het verloop van de concentraties koolstof monoxide buiten het schip, kan hier mogelijk uitsluitsel geven, maar de noodzakelijke informatie is niet ter beschikking.

Deze pieken komen wel elke dag voor omstreeks 17u. Een oorzaak van die pieken zou de keuken kunnen zijn die vlak bij is gelegen. Het kan dus zijn dat deze pieken afkomstig zijn van de fornuizen waarop eten wordt gemaakt. Op schip C is de concentratie in de keuken echter niet gemeten. Het is dus onmogelijk om dit met zekerheid te stellen .



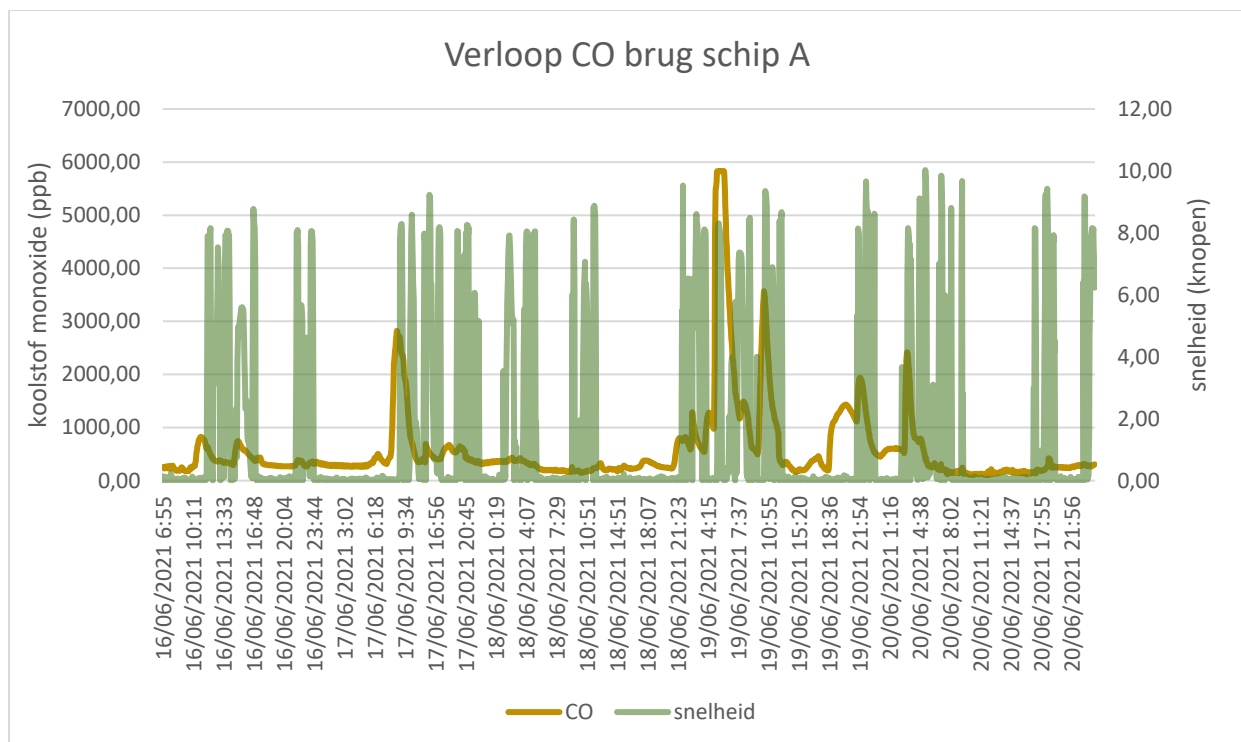
Figuur 40 verloop koolstof monoxide brug schip C
Bron: eigen werk

Op Figuur 41 is het verloop van de koolstofmonoxide concentratie gemeten op de brug van schip A over enkele dagen. Hier valt te zien dat de stijging in de koolstof monoxide

concentratie net zoals de stijging in de concentratie fijn stof begint voordat het schip snelheid maakt. Daarenboven bevindt de top van de piek zich wanneer het schip begint te varen of net daarna.

Ook hier zijn er meerdere pieken die zich boven de grenswaarde van 3,492 PPM van de Wereldgezondheidsorganisatie bevinden. In tegenstelling tot andere pieken, valt de grootste piek (die bijna een concentratie heeft van 6PPM) niet nadat het schip een lange tijd stil heeft gelegen, maar midden in een blok waarin het schip vaart. Net voor deze piek valt, heeft het schip eventjes een snelheid van 0 knopen. Deze piek kan dus te wijten zijn aan het opstarten van de motor of het versnellen van het schip.

Uit Figuur 41 kan je, net zoals bij het verloop van de concentratie koolstofmonoxide op de brug van schip C, concluderen dat er geen kritiek probleem is op vlak van directe gezondheid. Er moeten toch wel aanpassingen gebeuren om de bemanning op de brug te beschermen tegen koolstof monoxide die via het ventilatiesysteem op de brug komt.



Figuur 41 verloop koolstof monoxide brug schip A
Bron: eigen werk

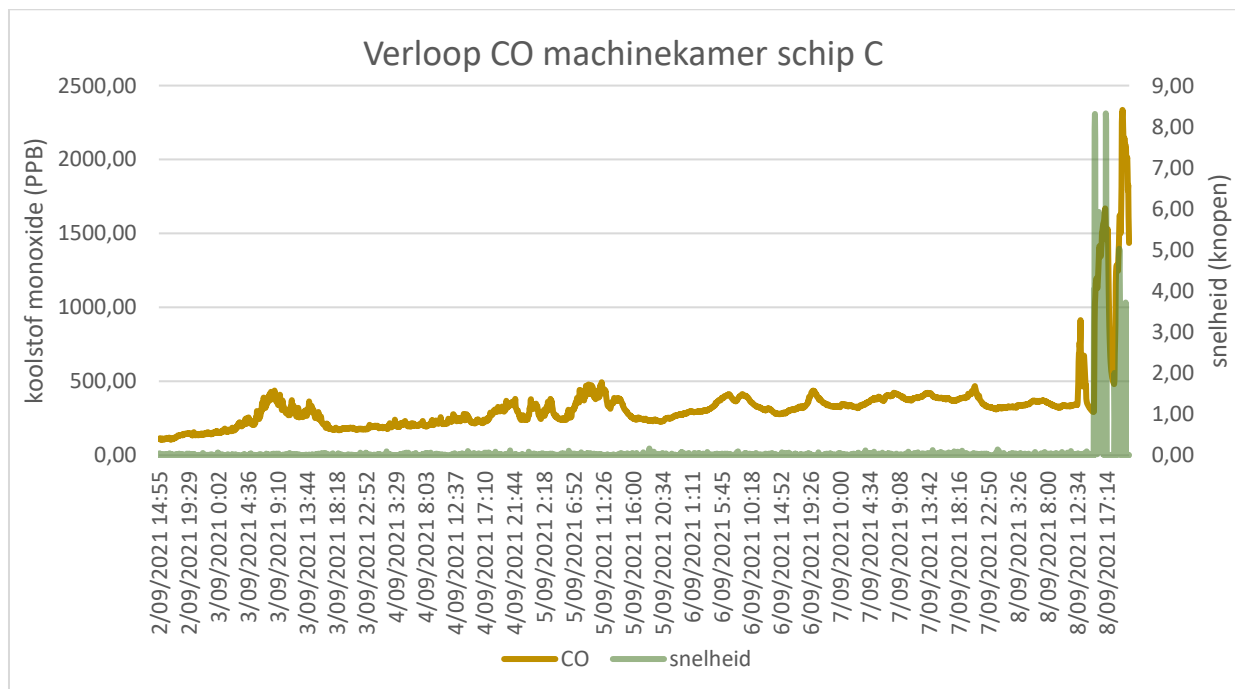
6.3.2 De machinekamer

Op Figuur 42 en Figuur 43 is het verloop voor de koolstofmonoxide concentratie voor de machinekamer van respectievelijk schip C en schip D te zien, samen met de snelheid die de schepen hadden op het moment van de metingen.

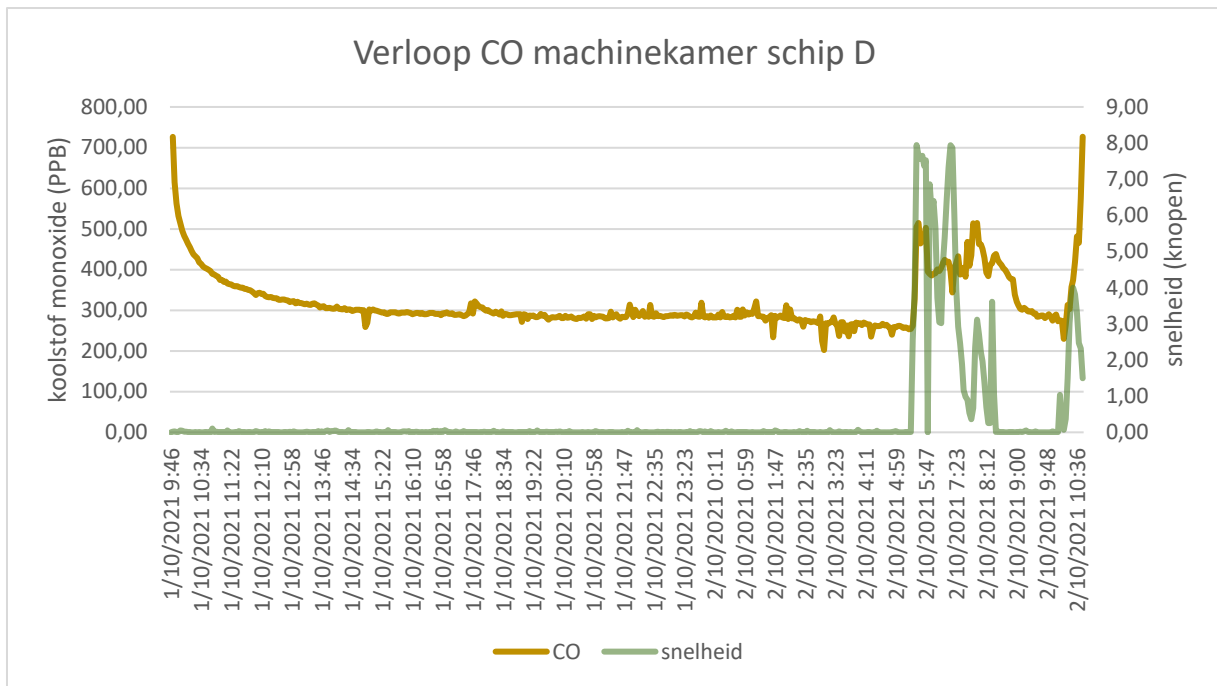
Beide figuren tonen dat de concentratie op de momenten dat het schip niet aan het varen is, zich rond de gemiddelde atmosferische concentratie van 280PPM ('Concentratie koolstofmonoxide—Vlaamse Milieumaatschappij', z.d.) situeert.

Echter, net zoals bij de concentratie op de brug, stijgt de concentratie koolstof monoxide als het schip begint te varen. Voor schip C stijgt die concentratie niet tot boven de opgelegde grenswaarde van de Wereldgezondheidsorganisatie. In de machinekamer van schip D gebeurt dit echter wel. Hier gaat de concentratie tot boven de grenswaarde van 3,492 PPM en komt het zelfs dicht in de buurt van de 8uur grenswaarde van 8,729 PPM. Dit toont, net zoals bij de brug, een probleem aan met het ventilatiesysteem.

Dit probleem is niet alleen te wijten aan het feit dat koolstof monoxide binnenkomt in de machinekamer. Deze koolstofmonoxide is voor een deel afkomstig van de motor in de machinekamer zelf. Zoals besproken in paragraaf 6.2 wordt koolstof monoxide gevormd als er zich een onvolledige verbranding voordoet in de motor wanneer er te weinig zuurstof voorradig is om een volledige verbranding te laten doorgaan. Dit duidt dus ook aan dat er een probleem is met de toevoer van zuivere lucht in de machinekamer aan boord van de schepen.



Figuur 42 verloop CO machinekamer schip C
Bron: eigen werk



Figuur 43 verloop CO machinekamer schip D

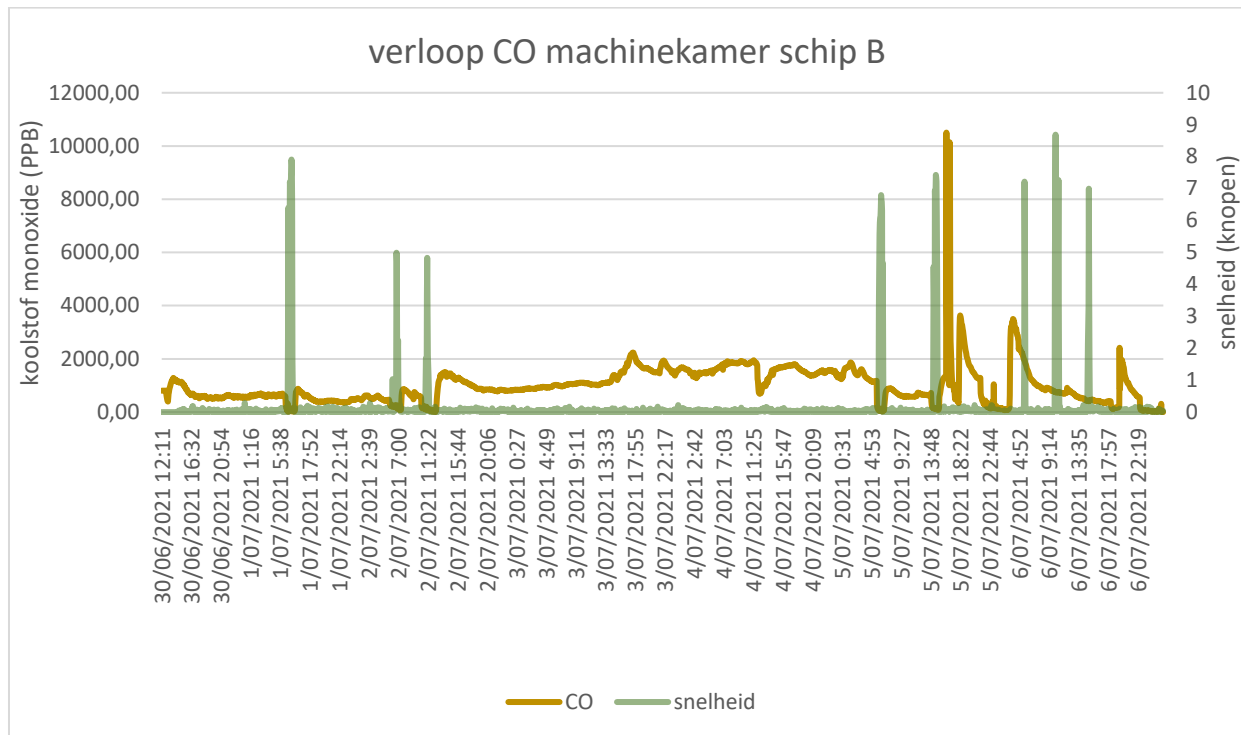
Bron: eigen werk

Figuur 44 toont het verloop van de concentratie koolstof monoxide in de machinekamer van schip B. Het verschil in het verloop van de concentratie tussen de machinekamer van schip B en de machinekamers van schip C en D valt op. Waar bij schip C en D de concentratie koolstof monoxide stijgt als het schip aan het varen is, daalt deze in de machinekamer van schip B. Wanneer schip B vaart, daalt de concentratie van de koolstof monoxide tot de gemiddelde concentratie gemeten in de atmosfeer (deze is vermeld in bovenstaande paragraaf). Als het schip dan stopt met varen, stijgt de concentratie weer tot relatief hoge waarden. Op sommige momenten zelfs tot boven de 10PPM, dus boven bepaalde grenswaarden opgelegd door de Wereldgezondheidsorganisatie. Dit gebeurt echter niet lang genoeg om alarmerend te zijn, maar toont wel een probleem aan met de ventilatie van de machinekamer.

Wanneer het schip aan het varen is, werkt de ventilatie perfect en houdt het de concentratie koolstof monoxide in de machinekamer van schip B op het niveau dat gemiddeld aanwezig is in de atmosfeer. Het probleem ontstaat wanneer het schip stopt met varen. Dan stijgt de concentratie tot waarden die soms boven de 1000PPB komen. Ook al ligt het schip een lange tijd stil, dan nog blijft de concentratie in de machinekamer te hoog. Deze koolstof monoxide is mogelijks restgas dat nog uitgestoten wordt als de motor en het ventilatiesysteem uitstaan.

Dit verschil tussen schip B en de andere schepen viel ook al te zien bij het verloop van de temperatuur in de machinekamer besproken in hoofdstuk 3. Wanneer bij de havenslepers de

temperatuur steeg als het schip begon te varen, daalde de temperatuur in de machinekamer van schip B.



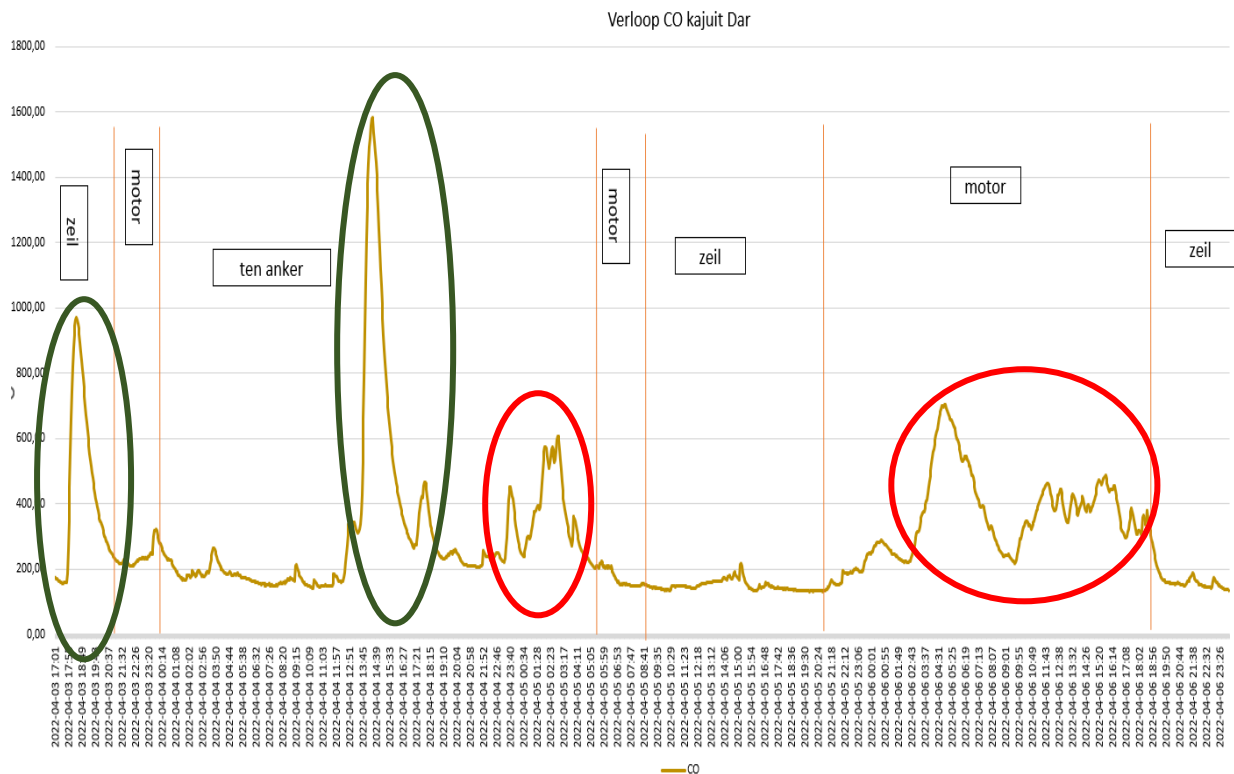
Figuur 44 verloop CO machinekamer schip B

Bron: eigen werk

6.3.3 Kajuit Dar

Op Figuur 45 is het verloop van de concentratie koolstof monoxide te zien in combinatie met de aanduiding of het schip aan het varen was op motor, op zeil of ten anker lag. Het is duidelijk te zien dat er net zoals bij de sleepboten verschillende pieken zijn in de gemeten concentraties in de kajuit. De pieken zijn echter minder groot en komen op geen enkel moment boven de waarde van 2000 PPB/ 2 PPM. Er is dus, net zoals bij de sleepboten, geen direct gevaar voor de gezondheid van de opvarenden. Wel toont het opnieuw een probleem aan van het ventilatiesysteem in verband met de bescherming van de zeevarenden in de kajuit tegen koolstof monoxide.

Bij de studie van het verloop van de concentratie van koolstofmonoxide, valt op dat er twee verschillende soorten pieken zijn. De ene soort is aangeduid met rode cirkels en toont een langere verhoging en fluctuatie aan in de concentratie koolstof monoxide. De andere soort aangeduid op de figuur met groene cirkels en toont 1 vloeiende snelle stijging van koolstof monoxide die direct gevolgd wordt door een geleidelijke daling in concentratie.

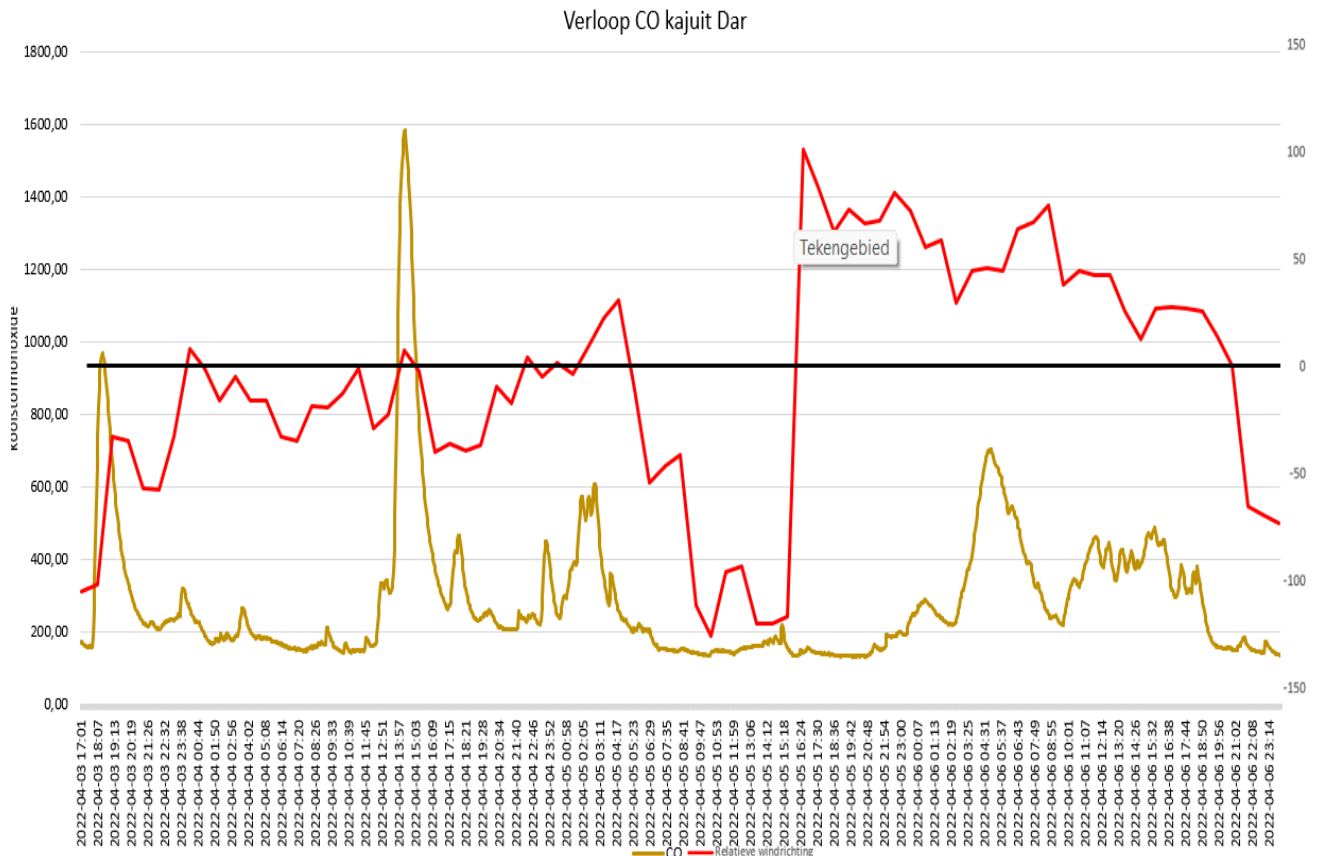


Figuur 45 verloop CO kajuit Dar
Bron: eigen werk

Het meest opvallende is dat het eerste soort pieken niet voorkomt als het schip aan het varen is op voorstuwing van zeil, maar wel als het aan het varen is op voorstuwing van motor en als het schip ten anker ligt. Dat deze pieken ook voorkomen als alleen de generatoren aanliggen en niet de motor, toont aan dat het probleem van CO concentratie dat binnenkomt niet ligt aan het gebruik van de voorstuwingmotor. Er is dus een andere oorzaak die ervoor zorgt dat er op sommige momenten koolstof monoxide binnenkomt in het ventilatiesysteem.

Om te onderzoeken welke factoren er invloed hebben op het eerste soort pieken is op Figuur 46, in graden, de relatieve windrichting die heerst op het schip geplaatst op de grafiek van Figuur 45. De dikke zwarte lijn is de boeg van het schip. Als de windrichting dus daarop zit, dan komt de relatieve wind van recht op de boeg. Als de rode lijn zich boven de zwarte lijn bevindt dan komt de relatieve wind van over stuurboord en onder de zwarte lijn komt die van over bakboord. De graden boven en onder de zwarte lijn zijn de graden ten opzichte van welke de relatieve wind komt met de nul as zijnde de voor- achterlijn van het schip.

Op deze figuur valt af te leiden dat de relatieve windrichting een invloed heeft op de concentratie koolstof monoxide die gemeten wordt in de kajuit op de Dar.

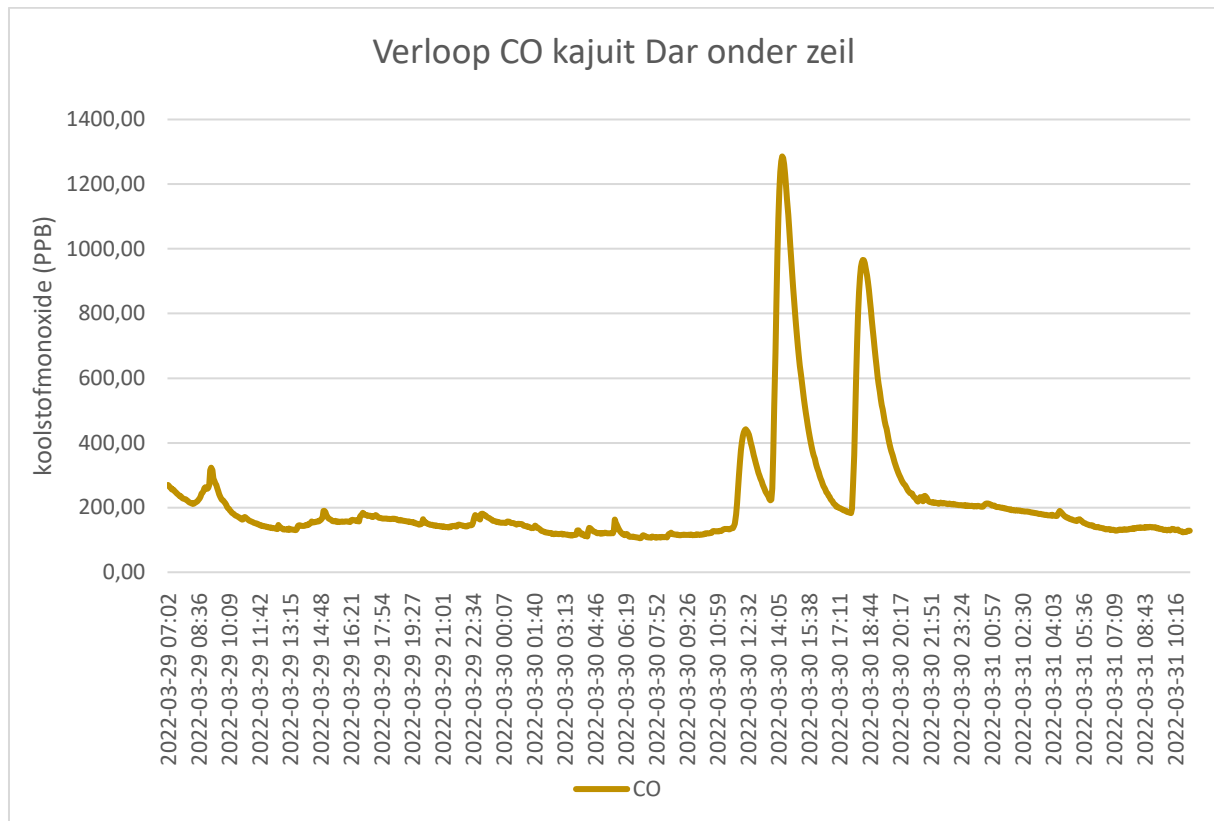


Figuur 46 verloop CO kajuit dar t.o.v. rel windrichting
Bron: eigen werk

Het valt op dat, wanneer de rode lijn zich in de buurt van de dikke zwarte lijn begeeft, er pieken worden gevormd in de concentratie koolstofmonoxide die binnenkomt in de kajuit. Dit is het meest opvallend in de rechterhelft van de figuur (wanneer er voor de laatste keer op motor wordt gevaren). Daar is er bijna continu een verhoogde concentratie koolstof monoxide gemeten, behalve op een moment waar er een dal is in de concentratie. Op dat moment is de hoek van de relatieve windrichting ten opzichte van de boeg bijna dubbel zo groot als op de andere momenten tijdens die periode. Dit is een duidelijk een teken dat koolstofmonoxide van de motor/generator van het schip binnen komt in de accommodatie als de relatieve windrichting van op scherpe hoek van de boeg komt. Vooral als de relatieve wind tussen 20 graden bakboord en 50 graden stuurboord op de boeg komt wordt een verhoogde concentratie koolstof monoxide gemeten. Het probleem is het grootst als de relatieve wind van stuurboord komt.

De 2 verschillende pieken worden beïnvloed door verschillende factoren. Op Figuur 47 is het verloop te zien van de concentratie in de kajuit wanneer het schip alleen aan het varen was op zeil. Hier valt duidelijk te zien dat alleen het 2^{de} soort pieken voorkomen (aangeduid op

Figuur 45 met groene cirkels) tijdens die periode. Er zijn nog een aantal andere pieken maar die zijn van kleine grootte en hebben geen impact op de gezondheid van de zeevarenden en kunnen overall vandaan komen. Er kan dus gezegd worden dat het 1^{ste} soort pieken niet voorkomt als het schip aan het varen is op zeil zonder voorstuwingsmotor.



Figuur 47 verloop CO kajuit Dar onder zeil
Bron: eigen werk

Bij het bekijken van het logboek van de momenten wanneer het 2^{de} soort pieken (aangeduid in het groen) voorkomt, valt op dat op die momenten verkeer in de buurt van het schip wordt gerapporteerd. Deze pieken kunnen dus verklaard worden doordat de Dar vaart door uitlaatgassen van andere schepen. Ook toen het schip ten anker lag, waren er schepen in de buurt ten anker en soms schepen die op enkele kabels van het schip aan het varen waren. Het verkeer dat in de buurt van de schepen voorbijkomt, is dus een grote factor in de grootte van de concentratie koolstofmonoxide die binnenkomt in de accommodatie van de schepen.

Uit dit hoofdstuk valt te concluderen dat er koolstof monoxide binnenkomt in de accommodatie van de schepen. Deze koolstofmonoxide heeft meerdere bronnen en heeft soms een concentratie met een twijfelachtige grootte. De grootste pieken in de

koolstofmonoxide concentratie zijn vooral afkomstig van de uitlaat van andere schepen. Wanneer de relatieve windrichting echter niet goed zit, komt er ook koolstofmonoxide, die uitgestoten wordt door de motor/generator van het schip zelf, binnen in de accommodatie van het schip. Dit alles toont een probleem aan met de bescherming van het ventilatiesysteem tegen de koolstofmonoxide die binnendringt in de leefruimtes aan boord van schepen.

7 TVOC

7.1 *Factoren die TVOC aan boord beïnvloeden.*

Vluchtige organische stoffen kunnen van verschillende bronnen komen.

De meest opmerkelijke bron, zijn de objecten en stoffen zoals verf en plastic die zich bevinden in de ruimte. Holøs e.a (2019) bespreken de uitstoot van vluchtige organische stoffen door sommige nieuwe materialen. In de studie werd ook aangetoond dat niet alleen nieuwe materialen, maar ook materialen die al een paar jaar aanwezig zijn in de ruimte, vluchtige organische stoffen uitstoten. Dit wel in mindere mate. De concentratie van deze vluchtige organische stoffen kan gaan tot wel 9000 µg/m³

Naast de ouderdom van de materialen in de ruimte, hangt de grootte van de concentratie vluchtige organische stoffen ook af van de temperatuur en de luchtvochtigheid. Poppendieck, Ng, Persily, & Hodgson (2015) hebben ondervonden dat de concentratie van de vrijgekomen vluchtige organische stoffen ongeveer 3 keer zo groot is als de temperatuur stijgt met 8 graden Celsius.

De motor van een schip stoot ook vluchtige organische stoffen uit. Dit zijn vooral stoffen die deel uitmaken van de brandstof die werd ingevoerd in de motor, maar die niet meegedaan hebben aan het verbrandingsproces. De hoeveelheid uitgestoten stoffen, hangt af van de kwaliteit en de hoeveelheid brandstof die verbruikt wordt.

Net zoals alle andere stoffen worden vluchtige organische stoffen ook uitgestoten door de industrie die aanwezig is in de haven waar de havenscheepen rondvaren. (Vlaamse milieumaatschappij, 2021)

7.2 *Gezondheidsproblemen van TVOC*

Vluchtig organische stoffen kunnen een gevaar vormen voor de gezondheid en kunnen oog, neus en keel irritaties veroorzaken. Daarbij kunnen zij ook hoofdpijn, concentratieverlies en misselijkheid teweeg brengen en kunnen zij de lever, de nieren en het centrale zenuwstelsel beschadigen. Sommige organische stoffen kunnen zelfs kanker veroorzaken. De eerstgenoemde problemen vormen vaak de eerste symptomen die kunnen optreden bij een

teveel aan vluchtige organische stoffen in de ruimte.
(‘AkIAQ_VolatileOrganicCompounds.pdf’, z.d.)

Vluchtige organische stoffen kunnen zoveel verschillende gezondheidsproblemen veroorzaken omdat er onder de term vluchtige organische stoffen vele specifieke stoffen vallen. Al deze stoffen kunnen specifieke gezondheidsproblemen veroorzaken. Sommige concentraties zijn niet schadelijk voor de gezondheid. Het is onmogelijk om een bepaalde TLV op TVOC te zetten omdat elke stof een ander limiet heeft. Het is dus niet mogelijk om te weten of de gemeten concentratie vluchtige organische stoffen gevaarlijk is voor de gezondheid van de opvarenden of niet. Dit is omdat de gemeten waarde een totaalwaarde is van alle vluchtige organische stoffen dat zich op dat moment in de ruimte bevindt.

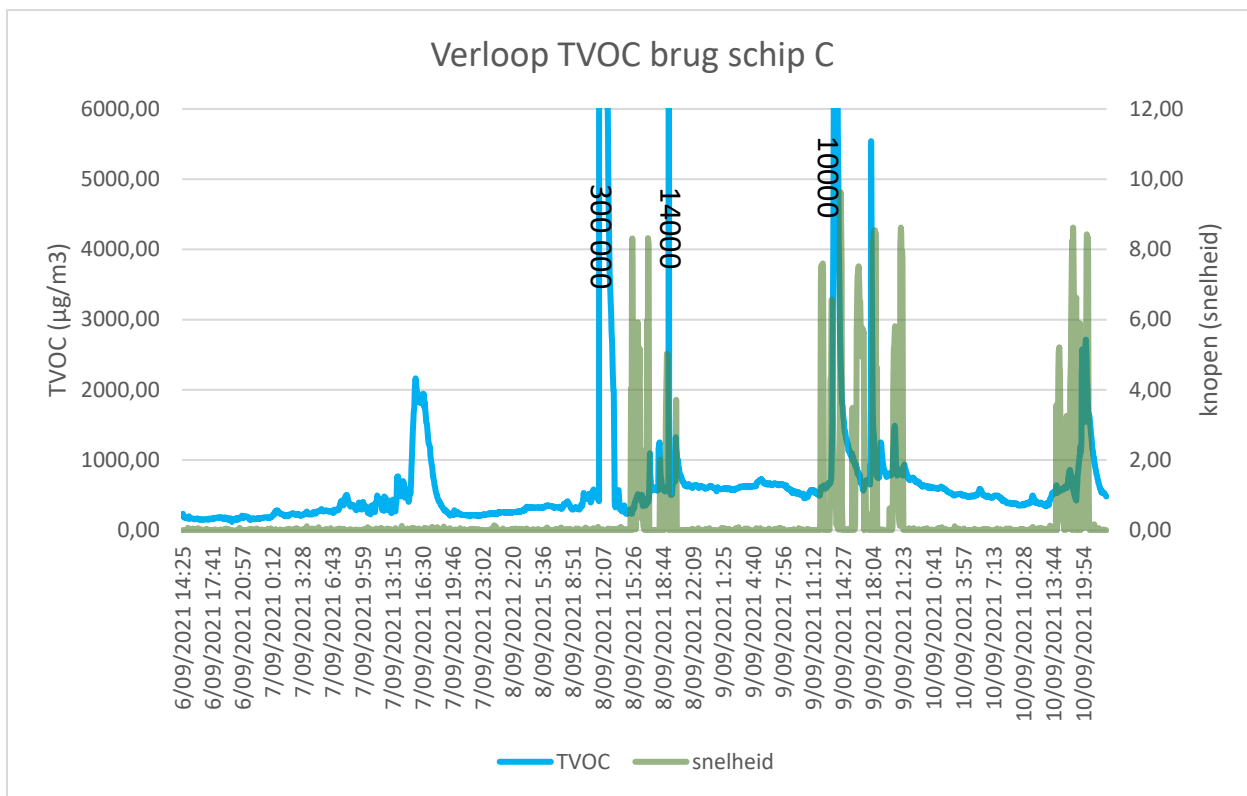
7.3 Verloop van TVOC aan boord.

7.3.1 [De Brug](#)

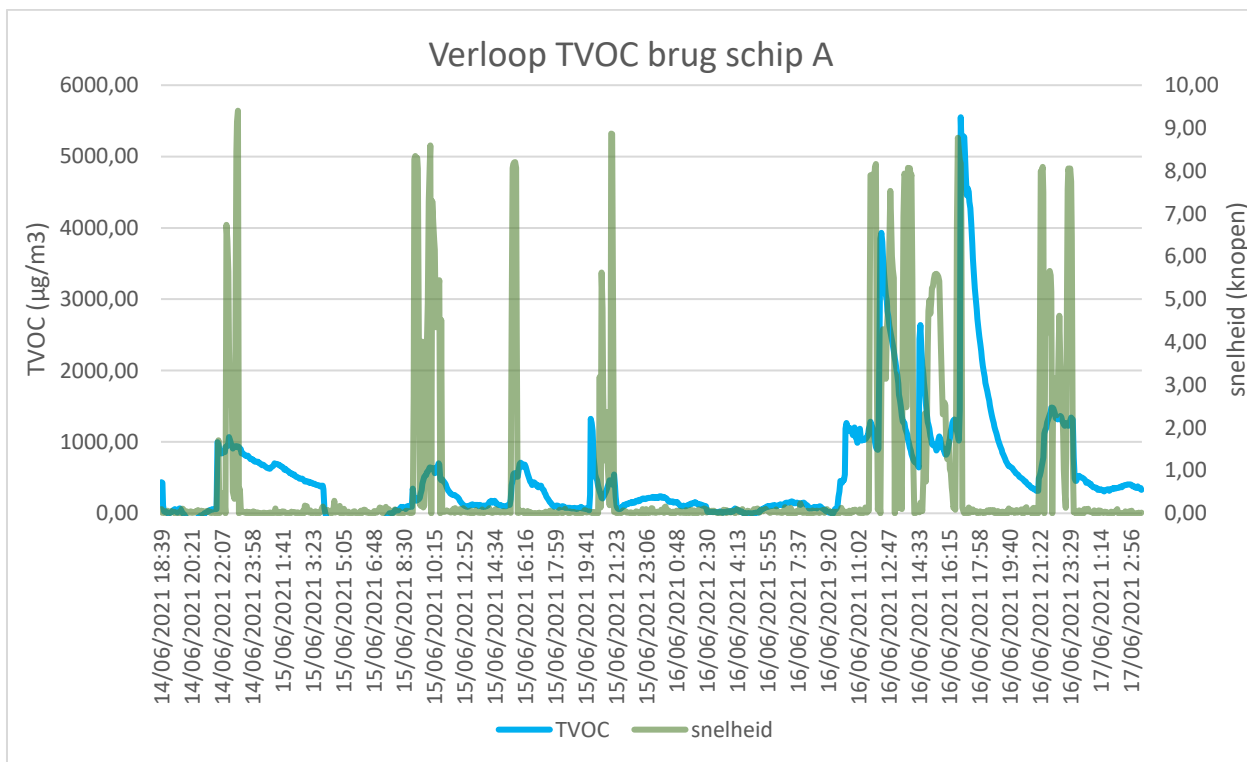
Op Figuur 48 is het verloop van vluchtige organische stoffen te zien op de brug van schip C. Opnieuw valt hier te zien dat de concentratie VOC stijgt en pieken vertoont als het schip aan het varen is of net voordat het schip begint te varen. Hier is er echter ook een piek in de concentratie op een dag dat het schip niet vaart. Daar wordt op het einde van het hoofdstuk op terug gekomen.

Om het verloop van de concentratie fijn stof duidelijk te maken toont de schaal van de figuur niet de top van de pieken. Om toch een idee te krijgen van hoe groot de grootste pieken zijn staat de waarde erbij. Op sommige momenten heeft de concentratie fijn stof aan boord een grootte van meer dan $10000\mu\text{g}/\text{m}^3$. Het is echter niet mogelijk om te bepalen of dit schadelijk is voor de gezondheid of niet, maar het toont opnieuw aan dat er een probleem is met de werking van het ventilatiesysteem.

Op Figuur 49 is het verloop van de vluchtige organische stoffen te zien op de brug van schip A, hier valt terug hetzelfde te zien als bij het verloop van de concentratie vluchtige organische stoffen op de brug van schip C. Hier is er echter geen piek in de concentratie op het moment dat het schip niet aan het varen is.



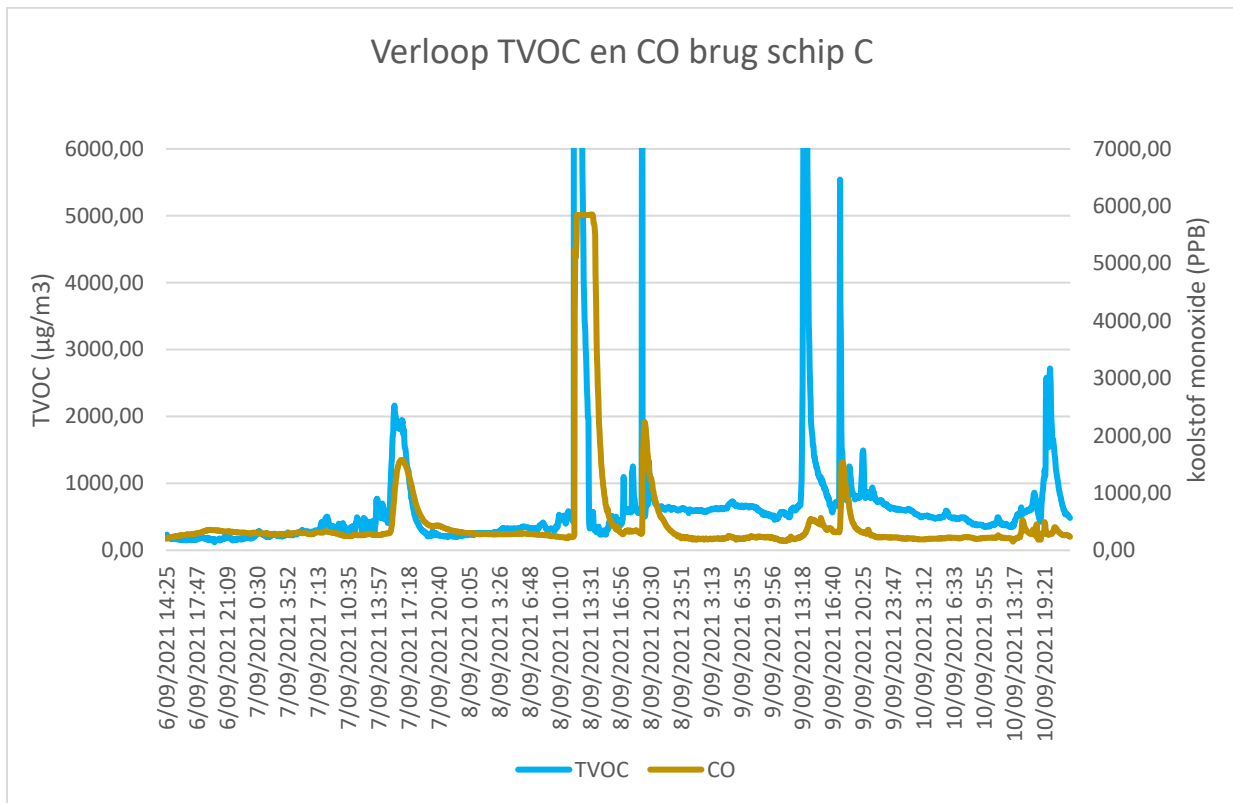
Figuur 48 verloop TVOC brug schip C
Bron: eigen werk



Figuur 49 verloop TVOC brug schip A
Bron: eigen werk

Uit verder onderzoek is gebleken dat op elk moment dat er een piek in de concentratie vluchtige organische stoffen is, er ook een piek in de concentratie koolstofmonoxide te zien valt. Dit is aangetoond op Figuur 50, waar het verloop in concentratie vluchtige organische

stoffen op de brug van schip C vergeleken wordt met het verloop in koolstof monoxide op de brug van schip C. Het is duidelijk dat er bij een piek in de concentratie vluchtige organische stoffen er ook een piek is in de concentratie koolstofmonoxide. Dit toont aan dat beiden afkomstig zijn van dezelfde bron, namelijk de motor van een schip.



Figuur 50 verloop TVOC en CO brug schip C
Bron: eigen werk

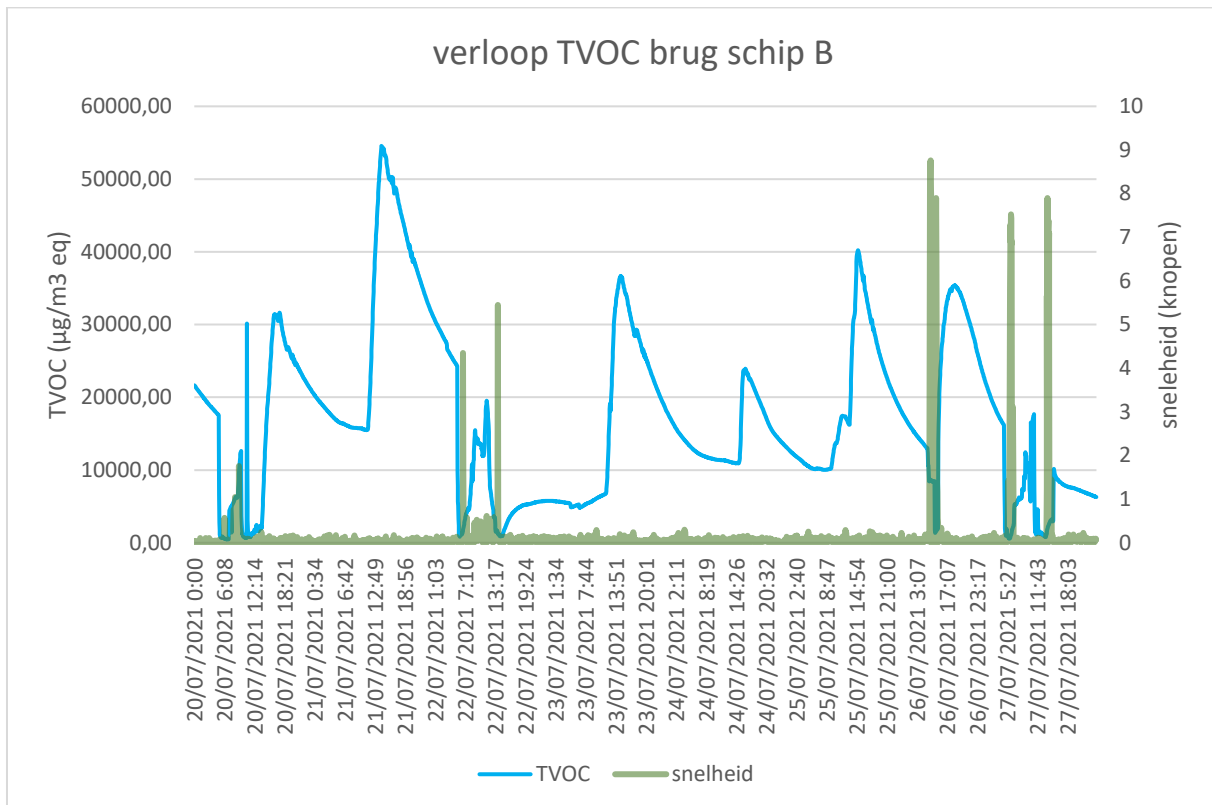
Zoals te zien op Figuur 51 is het verloop van vluchtige organische stoffen anders op de brug van schip B dan op de brug van de andere schepen (deze vallen te zien op Figuur 49 en Figuur 48). Het grootste verschil is dat de grootste pieken zich niet voordoen als het schip aan het varen is, maar wel als het schip stilligt.

Deze pieken als het schip niet vaart, hebben een duidelijk direct stijgend verloop overdag tussen 12u en 14u. Vlak daarna daalt de concentratie geleidelijk aan. Hoe dit komt is moeilijk om na te gaan. Er is ergens een puntbron die een snelle directe stijging veroorzaakt in de concentratie vluchtige organische stoffen. Deze is niet afkomstig van de keuken of van de motor van het schip.

Nadat de vluchtige organische stoffen binnengekomen zijn, blijven ze een tijdje in de ruimte omdat het ventilatiesysteem op dat moment niet aan staat.

Als het schip dan gaat varen, wordt het ventilatiesysteem aangezet en worden de opgestapelde vluchtige organische stoffen afgevoerd uit de ruimte. Eerst is er een duidelijke daling tot op de concentratie die aanwezig is in de atmosfeer. Daarna begint de concentratie terug te stijgen.

De stijging wanneer het schip vaart, valt ook te zien bij de metingen op de andere bruggen (Figuur 48 en Figuur 49) en heeft dezelfde oorzaak.



Figuur 51 verloop TVOC brug schip B
Bron: eigen werk

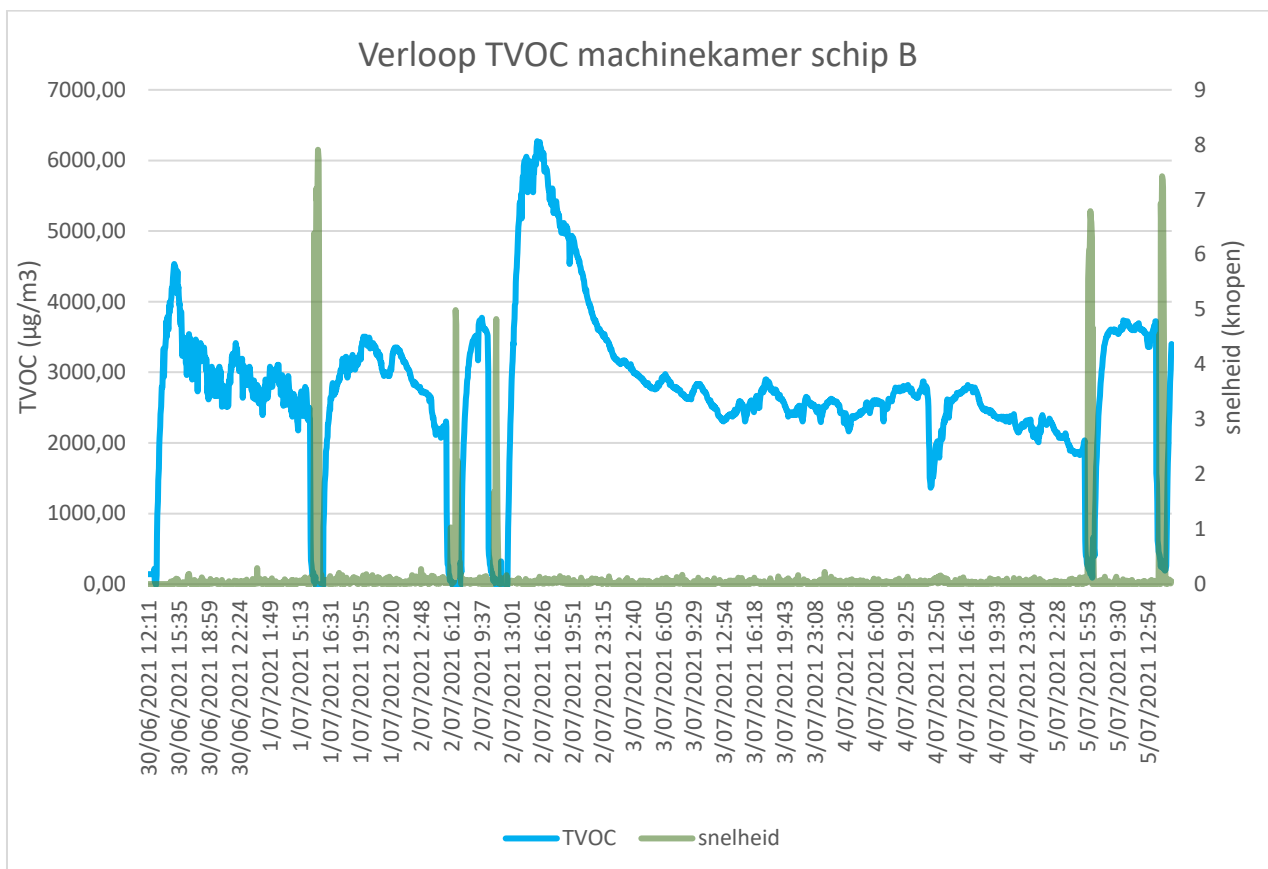
7.3.2 De machinekamer

Op Figuur 52 is het verloop van de concentratie vluchtige organische stoffen te zien in de machinekamer aan boord van schip B. Hier heeft de concentratie vluchtige organische stoffen net zoals de concentratie koolstof monoxide een relatief hoge concentratie als het schip niet aan het varen is. Als het schip dan begint te varen, treedt het ventilatiesysteem in actie en daalt de concentratie vluchtige organische stoffen tot de concentratie die in de atmosfeer aanwezig is.

Als het schip stopt met varen, stijgt de concentratie terug tot een hogere waarde dan de concentratie die gemeten is voordat het schip begon te varen. Als het schip dan een langere

tijd stilligt, daalt de concentratie in de ruimte geleidelijk tot het schip dan terug gaat varen. Dit verloop, en het verloop van koolstof monoxide in dezelfde ruimte, toont aan dat gassen van de motor blijven hangen in de ruimte van de machinekamer als het schip stopt met varen.

De motor kan op het ogenblik dat het ventilatiesysteem uit staat nog altijd gassen produceren door de restwarme die nog in de motor aanwezig is. Dit toont nogmaals een probleem aan met de werking van de ventilatie. Het grootste probleem hier is dat het ventilatiesysteem te vroeg uitgeschakeld wordt. Een walstroom die het ventilatiesysteem draaiende houdt tot de motor volledig afgekoeld is, kan hiervoor een oplossing zijn.



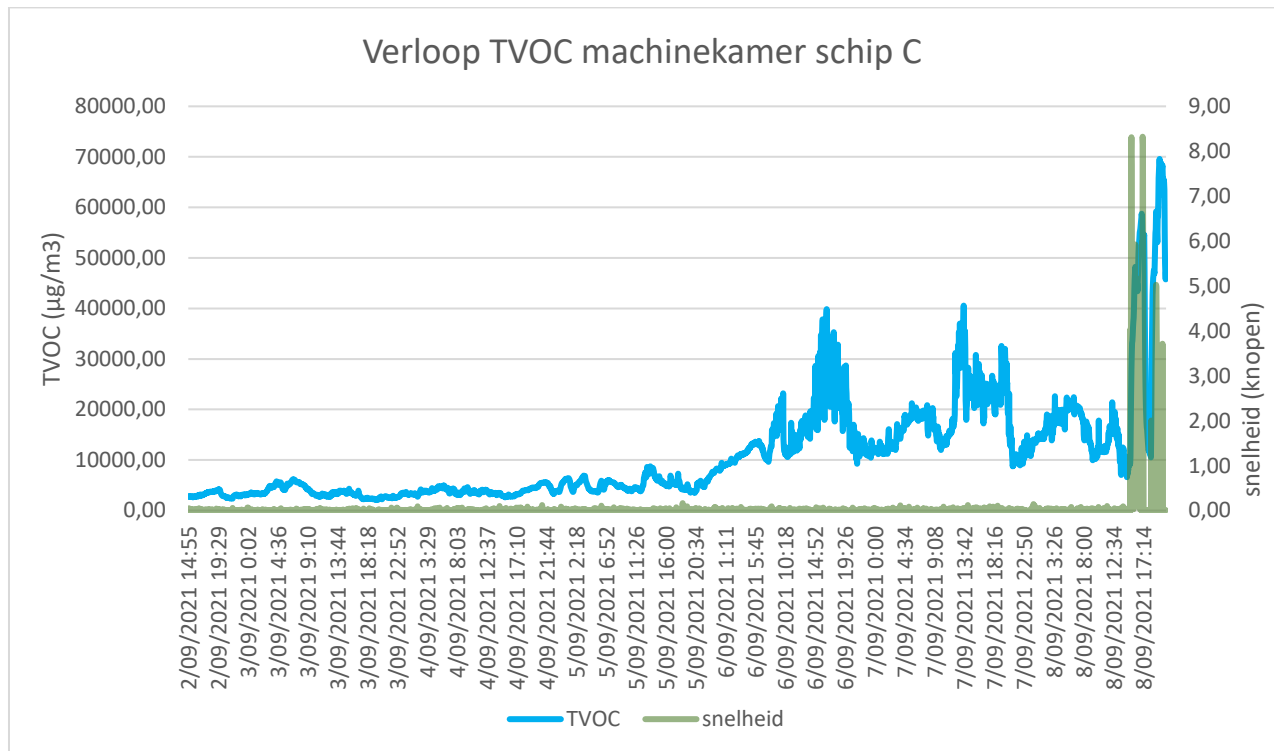
Figuur 52 verloop TVOC machinekamer schip B
Bron: eigen werk

Op Figuur 53 valt het verloop van de concentratie vluchtige organische stoffen te zien in de machinekamer van schip C. Hier stijgt, net zoals bij de concentratie gemeten op de brug en bij de concentratie koolstofmonoxide, de concentratie wanneer het schip begint te varen. Hoe dit komt, werd al aangekaart in dit hoofdstuk.

Het meest opvallende echter is dat in de dagen voordat het schip begint te varen de concentratie een stijgend en dalend verloop toont. Op die momenten stijgt de concentratie

tot boven de 30000 µg/m³ en toont deze een stijgend en dalend verloop. Dit verloop is echter niet hetzelfde zoals op Figuur 51. De kans is dus zeer klein dat deze dezelfde oorzaak kent.

Op die momenten toont de concentratie koolstof monoxide niet hetzelfde verloop. Dit toont aan dat deze pieken in de concentratie vluchtige organische stoffen niet afkomstig zijn van een motor (ook niet van de eigen motor van het schip). De oorzaak van deze pieken kan niet achterhaald worden met de gegevens die ter beschikking zijn.



Figuur 53 verloop TVOC machinekamer schip C
Bron: eigen werk

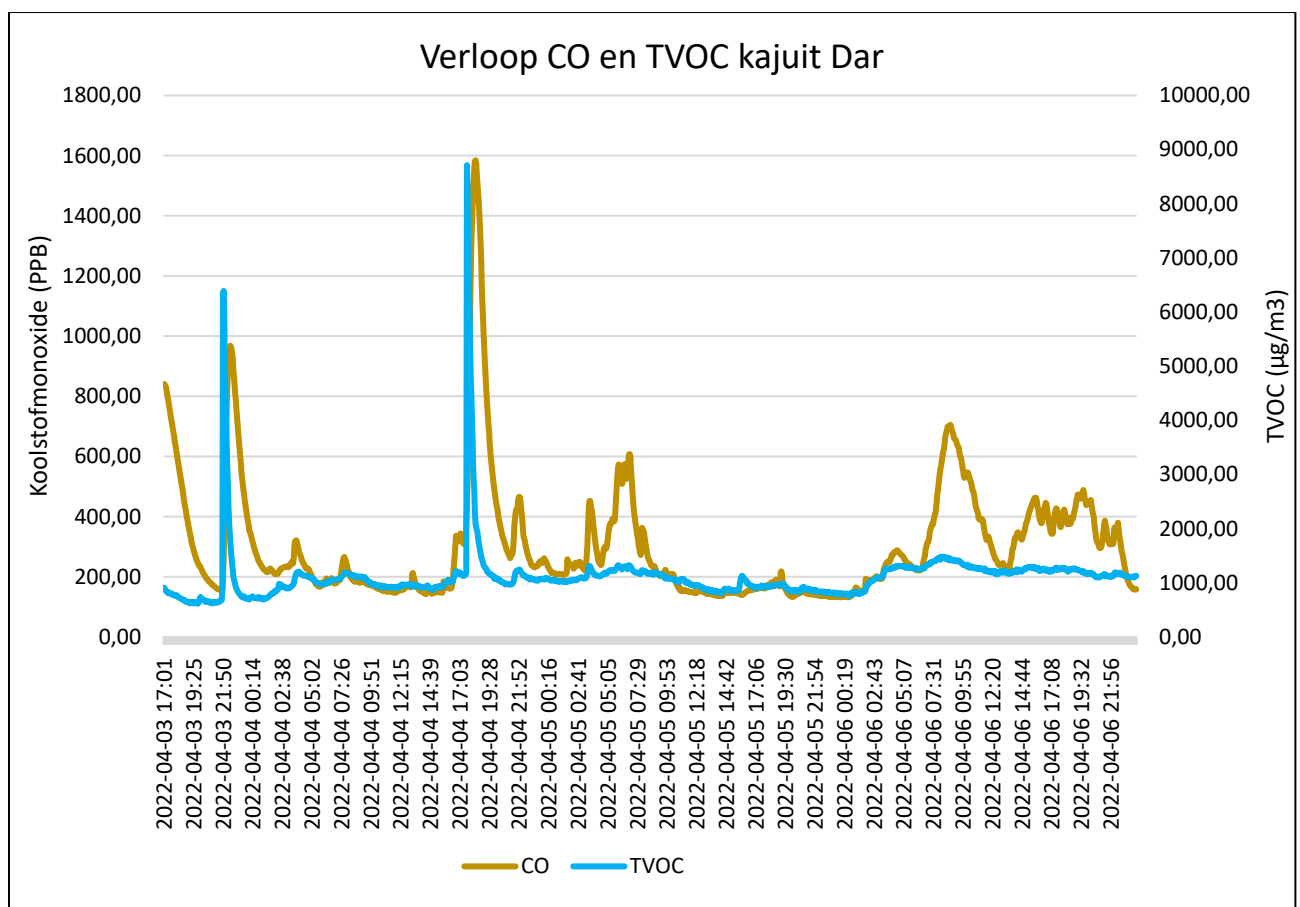
7.3.3 Kajuit Dar

Op Figuur 54 is het verloop van de concentratie vluchtige organische stoffen te zien samen met de concentratie koolstof monoxide aan boord van de kajuit op de Dar. Hier valt te zien dat de concentratie vluchtige organische stoffen het verloop van de concentratie koolstofmonoxide volgt. Het meest opvallende is dat de grootste concentratie vluchtige organische stoffen gemeten worden als de 'vuile lucht' afkomstig is van de uitlaat van een ander schip.

Dit blijkt uit het feit dat de grootste 2 pieken in de concentratie vluchtige organische stoffen samenvallen met het 2^{de} soort pieken dat op Figuur 45 aangeduid is met groene cirkels en waarvan er gezegd kan worden dat die van andere schepen afkomstig zijn.

Als de koolstof monoxide echter afkomstig is van de uitlaat van het eigen schip volgt de concentratie vluchtige organische stoffen de concentratie koolstofmonoxide in kleinere mate. Dit valt vooral te zien in de rechterhelft van Figuur 54. Eerst is er een lage concentratie koolstof monoxide zonder grote pieken. Op die momenten blijft de concentratie vluchtige organische stoffen onder de 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Als de concentratie koolstofmonoxide dan groter wordt en grotere pieken begint te vertonen, stijgt de concentratie vluchtige organische stoffen tot boven de 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Dit toont aan dat dezelfde conclusies genomen kunnen worden met betrekking tot de factoren die de concentratie vluchtige organische stoffen beïnvloeden en de werking van het ventilatiesysteem als in hoofdstuk 6.



Figuur 54 verloop CO en TVOC kajuit Dar
Bron: eigen werk

8 NO_x en SO₂

8.1 Gezondheidsproblemen van NO₂

Stikstof dioxide is een roodbruin gas met een scherpe vieze geur. Het wordt aanzien als een giftig gas dat ernstige gevolgen met zich mee kan brengen. Het brengt gezondheidsproblemen mee van korte duur. Bij een langdurige blootstelling aan stikstof monoxide gas, is het echter ook mogelijk om langdurige gezondheidsproblemen op te lopen zoals bronchitis en pneumonia.

Volgens Rahman, Khan, & Siddiqui (z.d.) zijn er verschillende symptomen die optreden bij een blootstelling aan stikstof dioxide. Dit veroorzaakt niet alleen problemen na inademen, maar ook als je er gewoon mee in contact komt. De volgende lichaamsdelen worden aangetast bij blootstelling aan een te hoge concentratie stikstof dioxide:

- **De ogen:** blootstelling kan roodheid, pijn en een erg branderig gevoel geven. Dit komt doordat koolstof dioxide reageert met water om salpeterzuur te vormen.
- **De huid:** het kan brandwonden, roodheid en pijn aan de huid veroorzaken
- **De longen:** waar reacties aan de huid en de ogen optreden op bij hoge concentraties, kunnen de longen al schade oplopen bij lage concentraties. Stikstof dioxide kan zwellingen en lichte pijn veroorzaken in de longen. Deze kunnen soms onmerkbaar gebeuren.
- Andere gevolgen van inademen van het gas kunnen zijn: hoesten, spijsverteringstoornissen en koorts.
- Het kan ook schadelijk zijn als het ingenomen wordt via de maag, maar aangezien NO₂ een gas is in atmosferische condities is de kans zeer klein dat dit gebeurt.

Net zoals bij alle andere giftige stoffen treden deze symptomen pas op bij een blootstelling aan een bepaalde concentratie. Daarom zijn er door *the american conference of governmental industrial hygienists* (dinuoscio, 2022) verschillende *Treshold limit values* opgelegd.

Voor stikstofdioxide gaan die als volgt:

- TLV-TWA: 3 ppm
- TLV-STEL: 5 ppm

- TLV-C: word nergens gespecificeerd maar volgens wikipedia ('Stikstofdioxide', 2022) veroorzaakt een concentratie hoger dan 13ppm een direct gevaar op het leven van een persoon.

In een artikel van de *Centers for disease control and prevention* ('1988 OSHA PEL Project— Nitrogen Dioxide | NIOSH | CDC', 2020) wordt evenwel vermeld dat er verschillende studies zijn waaruit bleek dat er gevallen zijn waarbij een lichte vermindering in vitale capaciteit en maximale ademhaling werd vastgesteld bij een blootstelling aan een concentratie van 0.4 tot 2.7ppm gedurende 8 uren per dag voor 6 jaar lang. Ook zijn er gevallen van chronische bronchitis vastgesteld bij dezelfde personen.

Vanuit het NIOSH (*national institute for occupational safety and health*) wordt aangeraden om de concentratie NO₂ onder 1ppm, ofwel 1000ppb te houden. Dit is mede omdat volgens Chaulya & Prasad (2016) er een irritatie optreedt aan de neus en keel bij een concentratie vanaf 1ppm.

8.2 Gezondheidsproblemen van NO

Nitrogen monoxide/ nitric oxide, ofwel stikstof monoxide is volgens zijn *material safety data sheet* (Nitric_oxide, z.d.) een kleurloos oxiderend gas met een irriterende geur. De gezondheidsproblemen vermeld in het document, zijn quasi gelijk aan de gezondheidsproblemen van stikstof dioxide. Dit is logisch aangezien er door Weinberger (2001) vermeld wordt dat stikstof monoxide in de longen omgevormd wordt tot stikstof dioxide en zo de gezondheidsrisico's van stikstof dioxide kan veroorzaken.

In de *material safety data sheet* (Nitric_oxide, z.d.) wordt echter ook vermeld dat stikstof monoxide in het bloed hemoglobine kan oxideren tot meta hemoglobine. Dit kan tot de dood en coma leiden als de meta hemoglobine een niveau van 70% bereikt.

Net zoals bij koolstof monoxide kan zuurstof niet meer binden met hemoglobine als het al gebonden is met stikstof monoxide. Zo kan het ook tot dezelfde gezondheidsproblemen leiden als bij koolstof monoxide.

Net zoals alle andere stoffen heeft stikstof monoxide ook zijn opgelegde limieten.

Voor stikstof monoxide is er enkel een TLV-TWA. De concentratie van dit limiet is 25ppm.

8.3 Bronnen van NO_x aan boord

De hoofdbron van stikstof oxiden (stikstof dioxide en stikstof monoxide) aan boord is de motor. De meeste maritieme brandstoffen bevatten stikstof, die door de verbranding in de motor wordt omgevormd tot stikstof oxiden.

Stikstof oxiden worden beschouwd als broeikasgassen en zijn schadelijk voor het milieu. Daarom zijn er nogal wat regels die de uitstoot van stikstof oxiden reguleren. Deze regels zijn opgelegd door de IMO in de MARPOL conventie.

De hoeveelheid stikstof oxiden wordt verduidelijk in MARPOL Annex VI regulatie 13.(IMO, 1997).

De hoeveelheid stikstofoxiden dat een schip mag uitstoten hangt af van verschillende factoren:

- **De datum van de installatie van de motor:** de datum waarop de diesel motor was geïnstalleerd in het schip. Hiervoor zijn er 3 verschillende periodes.
 - o **Voor 1 januari 2000.** Hiervoor zijn er geen beperkingen vermeld in Marpol annex VI regulatie 13.
 - o **Na 1 januari 2000 en voor 1 januari 2011.** Deze motoren worden aanzien als tier I
 - o **Na 1 januari 2011** deze motoren worden aanzien als tier II
- **Het toerental waarop de motor draait.** Tussen 130 rpm (rotations per minute, ofwel rotaties per minuut) en 2000 rpm hangt de hoeveelheid koolstof oxiden dat uitgestoot mag worden af van het precieze aantal rpm. Hoe hoger de rpm hoe minder koolstof oxiden de motor mag uitstoten.
- **Het gebied waarin het schip vaart.** Er zijn verschillende ECA zones (*emission control area's*) waarin de toegelaten uitstoot van het schip zwaar wordt gereguleerd. In deze zones moet de uitstoot onder de zogenaamde tier III klasse zijn. De schepen waarop het onderzoek werd uitgevoerd, bevonden zich in wateren die volgens EGSCA (exhaust gas cleaning systems association) (Admin, z.d.) in de ECA zone van de Noordzee zijn gelegen.

Om aan de regulaties te voldoen is het dus belangrijk om de uitstoot van NO_x laag te houden.

De concentratie NO_x die een motor uitstoot, hangt af van verschillende factoren.

In Palash e.a. (2013) worden deze factoren als volgt beschreven :

- **De brandstof:** Er zijn verschillende factoren in de brandstof die de uitstoot van NO_x bepalen. Deze zijn onder andere: het zuurstof gehalte van de brandstof, de moleculaire structuur van de brandstof en de adiabatiscie vlamtemperatuur.
- **De motor:** Het type en de afstelling van de motor kan ook invloed hebben op de hoeveelheid NO_x die wordt uitgestoten door een schip. Door bijvoorbeeld H₂ in de ontploffingskamer te brengen kan de hoeveelheid stikstof oxiden die wordt uitgestoten verminderd worden. Ook heeft een vertraging van de ontsteking een invloed hierop. Daarenboven kan de tijd van de injectie van de brandstof ook een invloed hebben.
- **De belading van de motor:** De uitstoot van NO_x verhoogt lineair met de lading op de motor.

Omdat de uitstoot van NO_x op sommige momenten extreem laag moet zijn, bestaan er verschillende behandelingen om die uitstoot tegen te gaan. Volgens Palash e.a (2013) kan je deze maatregelen opdelen in 2 verschillende groepen: de behandeling vóór het verbrandingsproces en de behandelingen na het verbrandingsproces.

Het is zeker dat de havenschepen opereerden in een haven die zich in een ECA zone bevindt, waaruit kan worden afgeleid dat zij waarschijnlijk behoorden tot de tier III klasse van schepen, voor wat betreft de uitstoot van stikstof oxiden. Ook de Dar was op het begin van de metingen in deze ECA zone aan het varen, en zal tot die tier hebben behoord.

Zoals hierboven besproken worden stikstof oxiden uitgestoten door motoren.

Net zoals de andere stoffen die eerder besproken werden, wordt stikstof oxide ook uitgestoten door voertuigen en fabrieken die zich in de havens bevinden. De onderzochte schepen bevonden zich tijdens de metingen volgens een artikel in een nationale krant in een haven die is gekend als één van de grootste hotspots van stikstof oxidepollutie in de wereld. Opvallend is dat het artikel vermeldt dat het level NO_x in het weekend 31.7% lager is dan in de werkweek. Dit is te verklaren doordat een groot deel van de mensen die werken in de haven niet werken in het weekend. Daardoor zijn er minder voertuigen die zich op de weg

begeven. Op de figuren in het artikel is ook duidelijk te zien dat de uitstoot van NO_x een oorsprong heeft in de haven, en niet in de stad.

8.4 Gezondheidsproblemen van SO₂

Sulfur dioxide ofwel zwavel dioxide wordt net zoals stikstof dioxide en stikstof monoxide aanzien als een giftig gas. Het geeft ongeveer dezelfde klachten bij aantasting van de longen en de ogen als stikstof dioxide. Dit is omdat het ongeveer hetzelfde reageert.

Wanneer zwavel dioxide in aanraking komt met het vocht in ons lichaam dan vormt dit echter zwavelzuur in de plaats van salpeterzuur. Door het vormen van dit zuur kan het de zenuwen in het ademhalingsstelsel aantasten.

Rahman e.a (z.d.) verklaren dat gezonde mensen *bronchoconstriction* ervaren als ze blootgesteld worden aan een concentratie van 1.6ppm.

Bronchoconstriction is het samentrekken van de spieren rond de luchtwegen, waardoor de luchtwegen vernauwen.

Indien de concentratie hoger is dan de door de Wereldgezondheidsorganisatie opgelegde limiet, dan zijn het vooral de mensen met astma, chronische bronchitis en andere longziekten die het eerst problemen opmerken. Bij een hoge zwavel dioxide concentratie in de atmosfeer is er daardoor een verhoging van de hospitalisaties en sterfgevallen van mensen met long of hart problemen.

De aangeraden limieten voor stikstof dioxide van het NIOSH zijn de volgende.

- TWA: 2ppm
- STEL: 5ppm

Een *ceiling limiet* (maximum limiet) is er niet, maar een mens kan wel sterven als hij 10 minuten wordt blootgesteld aan een concentratie van 1000ppm.

8.5 Bronnen van SO₂ aan boord.

Zwavel dioxide wordt geproduceerd door energie centrales, vooral degene die werken op kolen. Het wordt ook uitgestoten door raffinaderijen, cement bedrijven, papiermoeafabrieken en metaal smelt- en verwerkingsfabrieken. Met andere woorden: het wordt uitgestoten door de industrie. Deze industrie is aanwezig in de haven waar de schepen varen. Het is dus

mogelijk dat stikstof dioxide uitgestoten door de haven in het ventilatiesysteem van schepen terecht komt.

Sommige brandstoffen bevatten een hoog zwavel gehalte. Deze brandstoffen worden gebruikt door schepen om de motor te doen draaien.

De hoeveelheid zwavel dioxide die een schip uitstoot, hangt volgens Hans Otto Kristenen (2015) af van twee factoren.

Eerst en vooral hangt de uitstoot, net zoals bij alle andere uitlaatgassen, af van de hoeveelheid brandstof die er verbruikt wordt. Hoe meer brandstof er wordt verbruikt, hoe meer zwaveldioxide er geproduceerd zal worden.

De andere bepalende factor is het zwavel gehalte dat in de brandstof zit. Hoe hoger het zwavelgehalte van de brandstof, hoe meer zwavel dioxide uitgestoten zal worden.

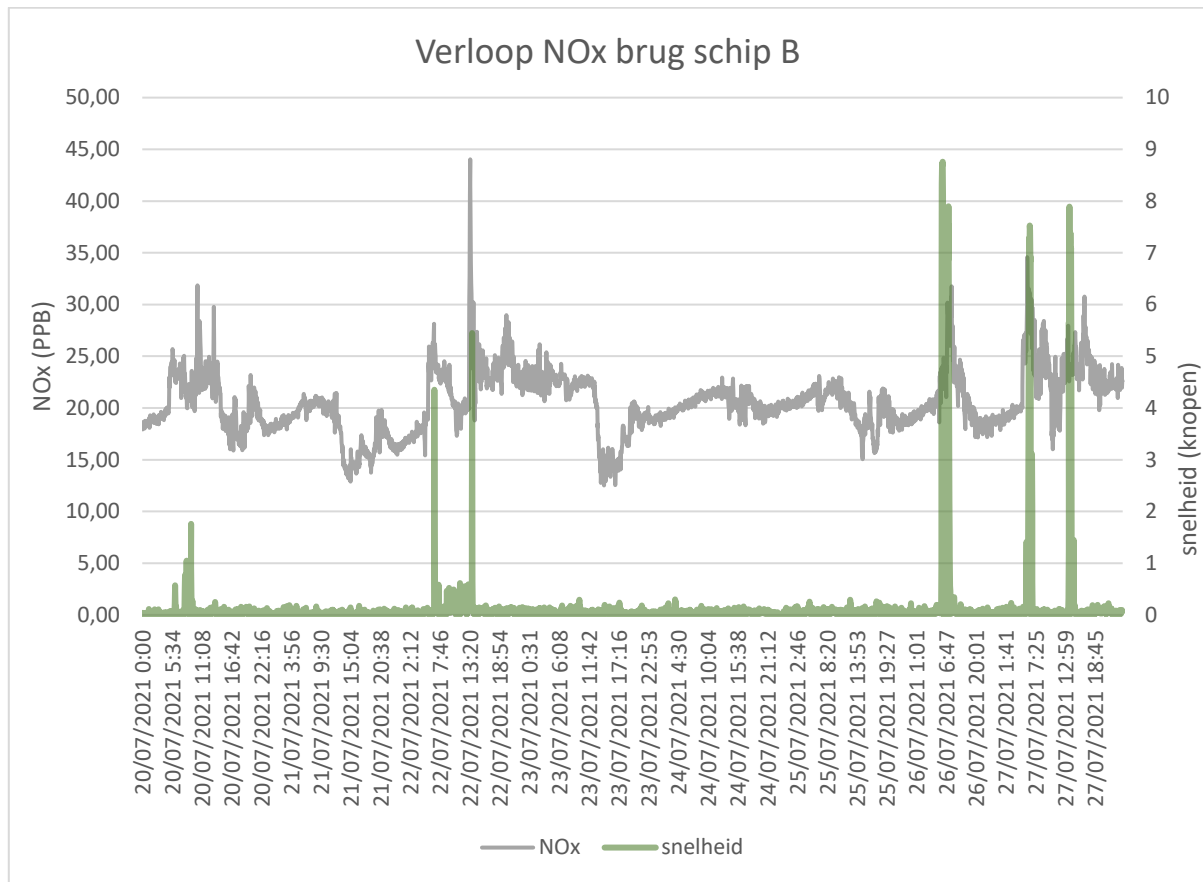
Zwavel dioxide kan met het water in de lucht reageren en kan zo zure regen creëren. Dit is schadelijk voor het milieu. Zoals besproken in hoofdstuk 8.4, kan het ook zorgen voor een verhoogd aantal sterfgevallen. Daarom zijn er regulaties opgesteld om de hoeveelheid zwaveldioxide die wordt uitgestoten door schepen te verminderen.

De reglementen rond het beperken van de zwavel dioxide uitstoot aan boord zijn opgesteld door de IMO in MARPOL annex VI regel 14(IMO, 1997) en bepalen dat het zwavelgehalte in de brandstof aan boord van een schip niet hoger mag zijn dan 0.50%.

Indien het schip zich echter in een ECA zone bevindt (zoals de schepen waarop het onderzoek is uitgevoerd) dan mag het zwavelgehalte van de brandstof die gebruikt wordt op dat moment niet hoger zijn dan 0.10 %.

Zoals al meerdere keren vermeld werd in voorgaande hoofdstukken, stoten andere schepen dezelfde stoffen uit als de schepen die onderzocht werden. Hierdoor is het dus mogelijk dat de zwaveldioxide die andere schepen uitstoten in het ventilatiesysteem van de accommodatie terecht komt.

8.6 Verloop van NOx



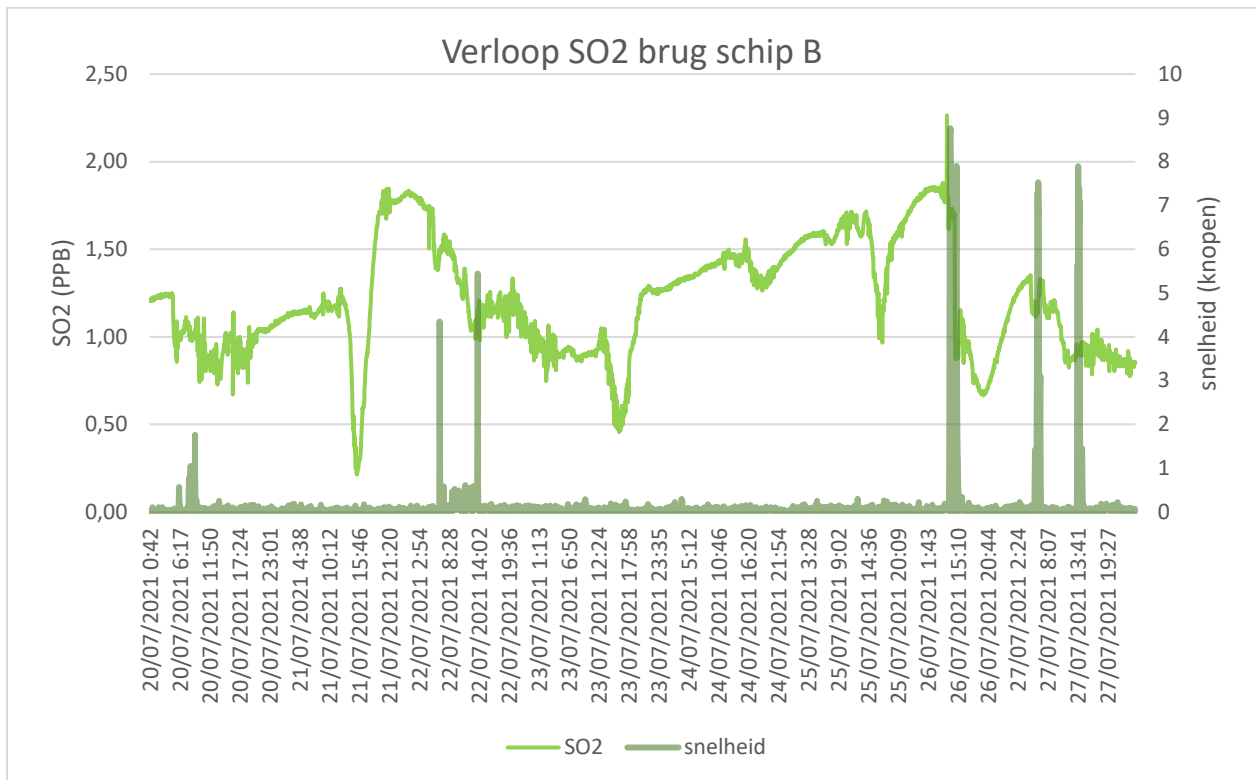
Figuur 55 verloop van CO₂, PM en NO_x
Bron: eigen werk

Op Figuur 55 is het verloop van de concentratie stikstof oxiden samen met de snelheid van het schip te zien.

Het valt op dat de concentratie stikstof dioxide een stijgend en dalend patroon vertoont als het schip niet aan het varen is. Er is echter geen groot verschil tussen de hoogste concentratie op die momenten en de laagste concentratie. Dit verschil is amper 15PPB. Dit stijgen en dalen in de concentratie wordt veroorzaakt door de omgeving en de atmosfeer waar het schip zich in bevindt.

Het is echter wel opmerkelijk dat als het schip aan het varen is, de concentratie stikstof oxiden hogere pieken vertoont. Dit kan wijzen op stikstof dioxide dat van de motor afkomstig is en dat in het ventilatiesysteem van de accommodatie terecht komt. Deze pieken zijn echter van kleine grootorde en blijven ver onder de TLV die in bovenstaande paragrafen besproken zijn. Dit toont dus geen groot probleem aan van het ventilatiesysteem.

8.7 Verloop van SO₂



Figuur 56 verloop SO₂ op brug schip B

Bron: eigen werk

Op Figuur 56 is het verloop van concentratie zwaveldioxide op de brug van schip B te zien ten opzichte van de snelheid die het schip op dat moment had.

Opvallend is dat stikstof dioxide een stijgend verloop vertoont op de momenten dat het schip niet aan het varen is. Deze stijging is echter zeer klein en heeft een grote van 1PPB. Zij is afkomstig van de atmosfeer waarin het schip zich bevindt.

De grootste gemeten waarde is 2PPB, wat ruim onder de TLV ligt die in voorgaande paragrafen besproken zijn. Dit toont aan dat er op het vlak van zwaveldioxide geen groot probleem is met de ventilatie en de motor.

Uit dit hoofdstuk valt te concluderen dat er geen groot probleem is met de concentratie stikstofoxiden en zwaveldioxiden aan boord. De schommeling in de gemeten waarden is zo klein dat je ze kan verwaarlozen. Deze gemeten waarden bevinden zich daarbij ook nog eens ruim onder de TLV en geven geen reden aan om verandering uit te voeren om deze stoffen tegen te houden.

9 H₂S

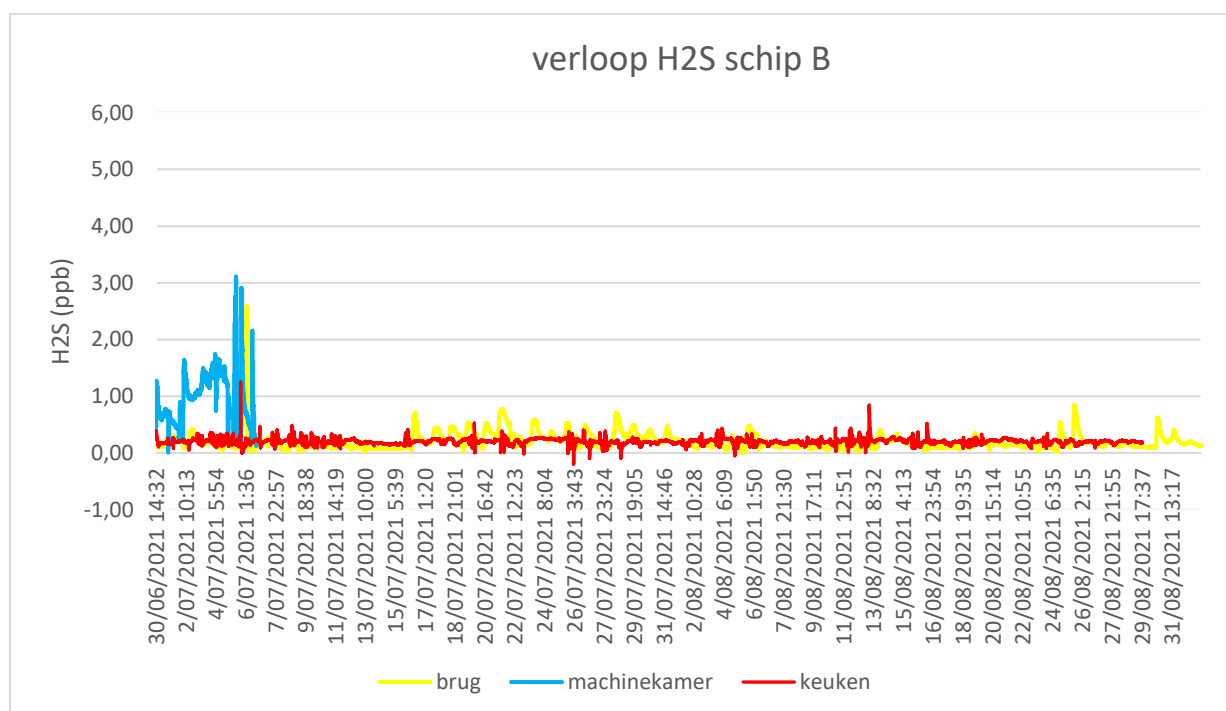
Waterstof sulfide is één van de gassen die werd opgemeten dat niet wordt uitgestoten door de motor.

Deze stof komt voor in aardgas en in darmgassen. Daarenboven zijn er nog verschillende mogelijkheden waar H₂S kan gevormd worden of in zit.

Het ontstaat als gevolg van microbiële afbraak van organisch materiaal in afwezigheid van zuurstof.

De schepen waarop de metingen werden uitgevoerd, zijn sleepboten, die normaal geen grote hoeveelheid aardgas aan boord hebben.

De gemeten H₂S is waarschijnlijk afkomstig van de uitscheiding van gassen door de mensen aanwezig op die plaatsen. Een andere mogelijkheid is de baggeroperaties waar schip B af en toe wordt voor ingezet. Ook daar kan H₂S vrijkomen.



Figuur 57 verloop waterstofsulfide op schip B

Bron: eigen werk

Op Figuur 57 is het verloop van waterstofsulfide te zien aan boord van schip B. De gele grafiek is de concentratie zwavelsulfide die gemeten is op de brug, de rode in de machinekamer en de blauwe in de keuken.

Hierop valt te zien dat de concentratie waterstofsulfide redelijk dezelfde blijft. De kleine pieken met een verschil van ongeveer 0,5ppb die te zien zijn, zijn mogelijks afkomstig van foutjes in de meettoestellen. De pieken zijn immers niet gelijk zijn aan elkaar en op sommige momenten is er een negatieve concentratie waterstofsulfide te zien. Deze kleine pieken schommelen rond de waarden van 0,2ppb. Dit is de concentratie waterstofsulfide die altijd in de atmosfeer zit.

Er zijn echter meerdere grotere pieken aanwezig die met hun top bij de 1ppb zitten. Deze zijn mogelijks afkomstig van mensen in de ruimte. Darmgassen van de mens zijn immers een bron van waterstofsulfide.

Belangrijk hierbij is dat ze boven de *minimale odor treshold limit* (dit is het limiet vanaf wanneer de mens de stof kan ruiken) van 0,5ppb komen. (WHO, 2000).

Dit maakt het mogelijk voor de mens om het gas te ruiken. Zoals besproken in hoofdstuk 1 is geur een belangrijke factor als het gaat om het comfort van mensen. Waterstofsulfide heeft echter een zeer onaangename geur, de geur van rotte eieren. Het is mogelijk dat die stof geroken wordt op sommige momenten, maar de hoofdoorzaak ligt dan hoogstwaarschijnlijk bij de afscheiding van darmgassen van de mens.

Er is echter één grote piek die voorkomt in elke ruimte van het schip op hetzelfde moment. Dit is waterstofsulfide die van buiten de accommodatie binnen is gedrongen via het ventilatiesysteem. Het schip was op dat ogenblik aan het varen, dus is het mogelijk dat de bron zich ergens in de haven situeert, of dat het afkomstig is van een ander schip.

Het valt op dat de concentratie op geen enkel moment in de meetperiode van 2 maanden aan boord van schip B, de waarde van 10ppb overstijgt, dit terwijl de TLV – STEL van waterstofsulfide 5ppm bedraagt.

Conclusie

De ventilatie van de accommodatie is een belangrijk systeem dat vaak als minder belangrijk wordt geacht. Maar door de vele gezondheidsproblemen die een slecht functionerend ventilatiesysteem met zich mee kan brengen, kan het invloed hebben op het veilig navigeren van het schip en op de veiligheid van de bemanning aan boord.

Er werden drie grote functies van het ventilatiesysteem onderzocht. Deze functies zijn: het onderhouden van een comfortabele omgeving met een comfortabele temperatuur, het afvoeren van koolstof dioxide plus het aanvoeren van zuurstof en als laatste, het beschermen van de bemanning tegen gevaarlijke stoffen die zich buiten en in de accommodatie bevinden.

Uit het onderzoek is gebleken dat de optimale atmosferische conditie, die een indicatie is van een comfortabel omgeving, niet altijd wordt behaald. Deze optimale atmosferische conditie wordt gevormd door de relatieve luchtvochtigheid, de droge bol temperatuur en de snelheid van de lucht in de ruimte. De limieten van de temperatuur en de luchtvochtigheid worden op meerdere momenten overschreden Dit toont aan dat het verwarming/verkoelingsstelsel aan boord van de schepen waarop gemeten is, niet optimaal werkte. Het is belangrijk dat de temperatuur en de luchtvochtigheid zich in het optimale spectrum bevinden. Als dit op de gemeten schepen niet altijd optimaal is, dan is dit hoogstwaarschijnlijk ook het geval op andere schepen. Dit is zeker een punt waaraan wat meer aandacht moet worden besteed.

Voor de werking van de uitwisseling van koolstof dioxide met zuurstof is het niveau van de concentratie van koolstof dioxide onderzocht. Hieruit kan worden geconcludeerd dat de mensen in de ruimte verantwoordelijk zijn voor bijna alle koolstof dioxide die zich in een ruimte bevindt.

Als er gekeken wordt naar de hoogte van de concentraties koolstof dioxide die gemeten zijn, valt er op dat er geen alarmerende waarden worden vastgesteld. Op sommige momenten ligt de gemeten waarde evenwel boven het optimale maximum en dit op alle schepen waarop er metingen plaats vonden.

Met andere woorden, de ventilatie functioneert goed genoeg. Het systeem zorgt ervoor dat de mensen in de ruimte geen alarmerende hoeveelheid koolstof dioxide binnen krijgen. Maar de concentratie overschrijdt wel de concentratie die aangeraden wordt door wetenschappers.

Het ventilatiesysteem werkt dus niet helemaal optimaal als het gaat over het verwijderen van koolstofdioxide uit de ruimtes. Om dit beter te begrijpen, zou er gekeken moeten worden naar de grootte van de ruimtes en het debiet van het ventilatiesysteem dat op die ruimte werkt.

De laatste functie van het ventilatiesysteem is het beschermen van de personen in de accommodatie tegen schadelijke gassen die zich buiten en in de accommodatie bevinden. Sommige van deze gassen zoals koolstof monoxide, koolstof dioxide, zwavel dioxide, nitraat oxide, vluchtige organische stoffen en fijn stof kunnen zich bevinden in de uitlaatgassen die afkomstig zijn van de motor en de generator.

Uit het onderzoek is gebleken dat als de schepen aan het varen zijn, er verschillende van deze stoffen binnekomen in de accommodatie. De concentratie van de stoffen die binnekomen is echter niet van een alarmerende grootorde, maar kan wel op lange termijn schadelijk zijn voor de gezondheid van zeevarenden.

De concentratie van schadelijke stoffen die in de accommodatie komen, hebben vele schommelingen en verschillen. Dit toont aan dat er elementen zijn die de hoeveelheid schadelijke stoffen in de accommodatie doen fluctueren.

Het onderzoek op het zeilschip Dar Mlodziezy maakt duidelijk dat een deel van de schadelijke stoffen afkomstig is van de uitlaatgassen van het schip zelf, maar vooral van de uitlaatgassen van andere schepen. Dit blijkt uit de grotere pieken van koolstof monoxide dat in de ruimte komt als er verkeer in de buurt van het schip wordt gerapporteerd.

De hoeveelheid uitlaatgassen die in het ventilatiesysteem van het schip komt, is echter niet op elk moment gelijk. Het is gebleken dat er nog meerdere factoren zijn die dit beïnvloeden. Eén van die factoren is de relatieve wind. Afhankelijk van de positie van de uitlaat van de motor en de inlaat van het ventilatiesysteem van de accommodatie, heeft de relatieve wind een invloed hierop. Een concreet verband tussen deze twee factoren kan hier niet worden gesteld aangezien de positie van de inlaat en de uitlaat onbekend zijn in dit onderzoek.

Er zijn echter nog meerdere factoren die de concentratie van gevaarlijke stoffen in de accommodatie kunnen beïnvloeden. Om hier een beter begrip van te krijgen zou het nodig zijn om verder onderzoek uit te voeren waarbij er gekeken wordt naar de gassen die de motor uitstoot, de gassen die binnekomen in de accommodatie en de gassen die in de atmosfeer hangen op de locatie van het schip. Deze zouden vervolgens samen met de relatieve

windsnelheid, windkracht en de positie van de inlaat van het ventilatiesysteem ten opzichte van de uitlaat bestudeerd moeten worden.

Algemeen kan men concluderen dat het ventilatiesysteem van de accommodatie functioneert, doch net op het minimum aanvaardbare niveau. Er is zeker een grote verbetering mogelijk én nodig om de gezondheid van de zeevarenden op lange termijn te garanderen. Er moet worden vermeden dat gassen van de motor van het schip zelf en van andere schepen in het ventilatiesysteem terecht kunnen komen. Ook moet het gehalte koolstofdioxide en fijn stof zeker zo laag mogelijk worden gehouden.

Bibliografie

1988 OSHA PEL Project—Nitrogen Dioxide | NIOSH | CDC. (2020, 27 februari). Geraadpleegd 7 juli 2022, van <https://www.cdc.gov/niosh/pel88/10102-44.html>

Admin. (z.d.). Belgium – EGCSA.com. Geraadpleegd van https://www.egcsa.com/belgium/AkIAQ_VolatileOrganicCompounds.pdf. (z.d.). Geraadpleegd van https://www7.nau.edu/itep/main/eeop/docs/airqlty/AkIAQ_VolatileOrganicCompounds.pdf

Alan Abelsohn, Margaret D. Sanborn, Barry J. Jessiman, & Erica Weir. (2002). Identifying and managing adverse environmental health effects: 6. Carbon monoxide poisoning. *Canadian medical association journal*.

Arundel, A. V., Sterling, E. M., Biggin, J. H., & Sterling, T. D. (1986). Indirect health effects of relative humidity in indoor environments. *Environmental Health Perspectives*, 65, 351–361. doi:10.1289/ehp.8665351

Carbon Dioxide | Center for Science Education. (z.d.). Geraadpleegd 20 december 2022, van <https://scied.ucar.edu/learning-zone/how-climate-works/carbon-dioxide>

Carbon dioxide levels are rising: Is it really that simple? | Copernicus. (z.d.). Geraadpleegd 3 januari 2023, van <https://atmosphere.copernicus.eu/carbon-dioxide-levels-are-rising-it-really-simple>

Carbon Monoxide | Center for Science Education. (z.d.). Geraadpleegd 20 december 2022, van <https://scied.ucar.edu/learning-zone/air-quality/carbon-monoxide>

Chaulya, S. K., & Prasad, G. M. (2016). Gas Sensors for Underground Mines and Hazardous Areas. *Sensing and Monitoring Technologies for Mines and Hazardous Areas* (pp. 161–212). Elsevier. doi:10.1016/B978-0-12-803194-0.00003-9

CO2 Carbon Dioxide Gas Exposure limits. (z.d.). Geraadpleegd 27 juni 2022, van https://inspectapedia.com/hazmat/Carbon_Dioxide_Exposure_Limits.php

Concentratie koolstofmonoxide—Vlaamse Milieumaatschappij. (z.d.). Indicator, . Geraadpleegd 16 januari 2023, van <https://www.vmm.be/lucht/meer-polluenten/concentratie-koolstofmonoxide>

Dar Młodzieży. (2022, 11 juli). *Wikipedia, wolna encyklopedia*. Geraadpleegd van https://pl.wikipedia.org/w/index.php?title=Dar_M%C5%82odzie%C5%BCy&oldid=67572945

dinuoscio, C. (2022, 12 februari). NITRIC OXIDE. *ACGIH*. Geraadpleegd van <https://www.acgih.org/nitric-oxide/>

Duwboot. (2022, 22 juni). *Wikipedia*. Geraadpleegd van <https://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Duwboot&oldid=62337697>

Een normale ademhaling. (z.d.). Geraadpleegd 27 juni 2022, van <https://www.radboudumc.nl/patientenzorg/behandelingen/revalidatie-bij-neuromusculaire->

aandoeningen/ademhalingsoefeningen-bij-neuromusculaire-aandoeningen/een-normale-ademhaling

Engine Load—Definition, Calculation, vs. RPM, at Idle. (2022, 3 januari). *Punchlist Zero*. Geraadpleegd van <https://www.punchlistzero.com/engine-load-definition-calculation-vs-rpm-at-idle/>

Fijnstof. (2022, 25 maart). *Wikipedia*. Geraadpleegd van <https://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Fijnstof&oldid=61398932>

G., S. (2020). Smells of Nature Reduces Stress And Creates Positivity – A Review. *International Journal of Pharmaceutical Research (09752366)*, 4185–4190. Association of Indian Pharmacist. doi:10.31383/ijpr/2020.SP2.519

gCaptain. (2019, 2 oktober). Lyttelton Port adds to its fleet with a RAport 2500 harbour tug. *GCaptain*. Geraadpleegd 21 augustus 2022, van <https://gcaptain.com/lyttelton-port-adds-to-its-fleet-with-a-rapport-2500-harbour-tug/>

Hans Otto Kristenen. (2015 september). *Energy demand and exhaust gas emissions of marine engines*. (Technical university of denmark, denmark).

Holøs, S. B., Yang, A., Lind, M., Thunshelle, K., Schild, P., & Mysen, M. (2019). VOC emission rates in newly built and renovated buildings, and the influence of ventilation – a review and meta-analysis. *International Journal of Ventilation*, 18(3), 153–166. doi:10.1080/14733315.2018.1435026

Hypoxie (medisch). (2020, 23 mei). *Wikipedia*. Geraadpleegd van [https://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Hypoxie_\(medisch\)&oldid=56355103](https://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Hypoxie_(medisch)&oldid=56355103)

IGS. (2011, 14 november). Veiligheidsinformatieblad kooldioxide.

ILO. (2006). Maritime labour convention.

IMO. (1997). MARPOL Annex VI. Geraadpleegd 8 juli 2022, van http://dmr.regs4ships.com/docs/international/imo/forthcoming/marpol_a-vi_r14_mepc32475.cfm

IMO. (2006, 12 december). Voluntary structural guidelines for new ships carrying liquids in bulk containing benzene. international maritime organisation.

Intergewestelijke Cel voor het Leefmilieu (IRCEL)—Nederlands. (z.d.). Voorpagina, . Geraadpleegd 8 juli 2022, van <https://irceline.be/nl>

intracto. (z.d.). Hoe wordt CO₂-gas in het lichaam opgenomen en geëlimineerd? *Belgisch Antigifcentrum*. Geraadpleegd 26 januari 2023, van <https://www.antigifcentrum.be/co-vergiftiging/co-wettenschappelijk-bekeken/hoe-wordt-co-gas-het-lichaam-opgenomen-en-ge-limineerd>

Keith, D. W. (2009). Why Capture CO₂ from the Atmosphere? *Science*, 325(5948), 1654–1655. doi:10.1126/science.1175680

KNMI - Vochtigheid. (z.d.). Geraadpleegd 20 december 2022, van <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/uitleg/vochtigheid>

McGeorge, H. D. (1999). *Marine Auxiliary Machinery*. Referex Mechanical Engineering and Materials (7th ed., revised.). San Diego: Butterworth-Heinemann [Imprint] Elsevier Science & Technology Books.

Measuring_CO2_Inside_Buildings-Jan2013.pdf. (z.d.). Geraadpleegd van https://www.energy.wsu.edu/Portals/0/Documents/Measuring_CO2_Inside_Buildings-Jan2013.pdf

Mullins, J. T., & White, C. (2019). Temperature and mental health: Evidence from the spectrum of mental health outcomes. *Journal of Health Economics*, *68*, 102240. doi:10.1016/j.jhealeco.2019.102240

Murtdha. S. Imran & Hayder J.Kurji. (2018). The effect of using waste corn oil on compression ignition engine performance. *International Journal of Applied Engineering Research*.

Nitric_oxide.pdf. (z.d.). Geraadpleegd van https://www.eol.ucar.edu/system/files/nitric_oxide.pdf

Nitrogen Oxides | Center for Science Education. (z.d.). Geraadpleegd 20 december 2022, van <https://scied.ucar.edu/learning-zone/air-quality/nitrogen-oxides>

Ozone | Center for Science Education. (z.d.). Geraadpleegd 20 december 2022, van <https://scied.ucar.edu/learning-zone/air-quality/ozone>

Palash, S. M., Kalam, M. A., Masjuki, H. H., Masum, B. M., Rizwanul Fattah, I. M., & Mofijur, M. (2013). Impacts of biodiesel combustion on NOx emissions and their reduction approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *23*, 473–490. doi:10.1016/j.rser.2013.03.003

Palfy, J. (2016). Guide for Crew Habitability on Ships, 108.

Poppendieck, D. G., Ng, L. C., Persily, A. K., & Hodgson, A. T. (2015). Long term air quality monitoring in a net-zero energy residence designed with low emitting interior products. *Building and Environment*, *94*, 33–42. doi:10.1016/j.buildenv.2015.07.001

Rahman, R., Khan, & Siddiqui, M. J. A. (z.d.). Review on effects of Particulates; Sulfur Dioxide and Nitrogen Dioxide on Human Health.

Rocha, K., Pérez, K., Rodríguez-Sanz, M., Obiols, J. E., & Borrell, C. (2012). Perception of environmental problems and common mental disorders (CMD). *Social Psychiatry and Psychiatric Epidemiology*, *47*(10), 1675–1684. doi:10.1007/s00127-012-0474-0

Satish, U., Mendell, M. J., Shekhar, K., Hotchi, T., Sullivan, D., Streufert, S., & Fisk, W. J. (2012). Is CO₂ an Indoor Pollutant? Direct Effects of Low-to-Moderate CO₂ Concentrations on Human Decision-Making Performance. *Environmental Health Perspectives*, *120*(12), 1671–1677. doi:10.1289/ehp.1104789

Schalm, O., Carro, G., Lazarov, B., Jacobs, W., & Stranger, M. (2022). Reliability of Lower-Cost Sensors in the Analysis of Indoor Air Quality on Board Ships. *Atmosphere*, 13(10), 1579. doi:10.3390/atmos13101579

Stikstofdioxide. (2022, 16 juni). *Wikipedia*. Geraadpleegd van <https://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Stikstofdioxide&oldid=62283154>

Sulfur Oxides | Center for Science Education. (z.d.). Geraadpleegd 20 december 2022, van <https://scied.ucar.edu/learning-zone/air-quality/sulfur-oxides>

Temperatures—Dry Bulb/Web Bulb/Dew Point. (z.d.). Geraadpleegd 15 september 2022, van https://www.weather.gov/source/zhu/ZHU_Training_Page/definitions/dry_wet_bulb_definition/dry_wet_bulb.html

Tran, N. K., & Lam, J. S. L. (2022). Effects of container ship speed on CO₂ emission, cargo lead time and supply chain costs. *Research in Transportation Business & Management*, 43, 100723. doi:10.1016/j.rtbm.2021.100723

UGent VLINDER. (z.d.). Geraadpleegd 21 augustus 2022, van <https://vlinder.ugent.be/>

Vlaamse milieu maatschappij. (2021). *Luchtkwaliteit in de antwerpse haven*. antwerpen.

Volatile Organic Compounds (VOCs) | Center for Science Education. (z.d.). Geraadpleegd 20 december 2022, van <https://scied.ucar.edu/learning-zone/air-quality/volatile-organic-compounds>

Waterstofsulfide. (2022, 15 februari). *Wikipedia*. Geraadpleegd van <https://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Waterstofsulfide&oldid=61102827>

Weinberger, B. (2001). The Toxicology of Inhaled Nitric Oxide. *Toxicological Sciences*, 59(1), 5–16. doi:10.1093/toxsci/59.1.5

What is Threshold Limit Value - Time-Weighted Average (TLV-TWA)? - Definition from Safeopedia. (z.d.). *Safeopedia.com*. Geraadpleegd 27 juni 2022, van <http://www.safeopedia.com/definition/2210/threshold-limit-value-time-weighted-average-tlv-twa>

WHO. (2000). Hydrogen sulfide. *Air quality guidelines—Second edition*.

World Health Organization. (2011). WHO guide to ship sanitation. World Health Organization. Geraadpleegd van <https://apps.who.int/iris/handle/10665/43193>

WOW-BE – The weather together! (z.d.). Geraadpleegd van <https://wow.meteo.be/nl/>

Lijst met bijlagen

- Reliability of Lower-Cost Sensors in the Analysis of Indoor Air Quality on Board Ships

Document dat de exactheid van de gebruikte meettoestellen beschrijft en weergeeft