

BEDÖMNING AV ARBETSMILJÖ OCH SÄKERHET VID VAL AV FARTYGSBRÄNSLEN

Cecilia Österman och Sarka Langer
Februari 2022

Bedömning av arbetsmiljö och säkerhet vid val av fartygsbränslen

CECILIA ÖSTERMAN & SARKA LANGER

cecilia.osterman@lnu.se

Medel från Stiftelsen Sveriges Sjömanshus

Upplaga Finns endast som pdf-fil för egen utskrift

© 2022 Författarna

Linnéuniversitetet

Sjöfartshögskolan

391 82 Kalmar

Lnu.se

INNEHÅLL

Bedömning av arbetsmiljö och säkerhet vid val av fartygsbränslen.....	1
Sammanfattning	2
Summary	5
Inledning	8
För ett hållbart arbetsliv i en hållbar sjöfart	8
Projektets syfte och mål	12
Sjöfartens miljöeffekter	13
Luftföroreningar i inomhusmiljön	16
Innomhusmiljö och hälsoeffekter	16
Genomförande.....	25
Fartyg som ingått i studien	25
Metoder för provtagning och analys av luftföroreningar	26
Enkätundersökning om upplevd luftkvalitet.....	28
Statistiska analyser	30
Bedömning av arbetsmiljö och säkerhet	30
Forskningsetiska överväganden	30
Resultat och diskussion	31
Effekter på inomhusmiljö och exponering	31
Resultat enkätundersökning.....	54
Bedömning av arbetsmiljö och säkerhet	61
Kumulativt riskindex.....	78
Slutsatser.....	87
Referenser.....	90

BEDÖMNING AV ARBETSMILJÖ OCH SÄKERHET VID VAL AV FARTYGSBRÄNSLEN

Den här rapporten sammanfattar forskningsprojektet *Bedömning av arbetsmiljö och säkerhet vid val av fartygsbränslen*. Projektet har syftat till att undersöka hur användningen av olika fartygsbränslen påverkar inomkvartern ombord och hur besättningens arbetsmiljö och arbetsbelastning påverkas med de olika alternativen.

Projektgruppen består av universitetslektor Dr Cecilia Österman vid Sjöfartshögskolan, Linnéuniversitetet, och professor Sarka Langer vid IVL Svenska Miljöinstitutet. Dessutom har vi under projektet även haft förmånen att kunna involvera ytterligare några personer: Dr Bo Strandberg, docent och yrkeshygieniker vid Lunds universitet, avdelningen för arbets- och miljömedicin, Dr. Theofanis Psomas, postdoktor och statistiker vid Chalmers tekniska högskola, institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik, avdelningen för installationsteknik, samt sjöingenjörerna Alva Heimdahl och Emil Lilja som gjorde sitt examensarbete inom projektet. Stort tack!

Vi vill även framföra vårt tack till Stiftelsen Sveriges Sjömanshus som finansierat projektet. Slutligen vill vi rikta ett varmt tack till de rederier som tagit emot oss och alla personer som välkomnat oss och bidragit så generöst med sin tid och klokskap. Utan er vore det här inte möjligt.

Kalmar februari 2022

Cecilia Österman

Sarka Langer

SAMMANFATTNING

Sjöfarten genomgår för närvarande en omfattande omställning för att minska miljöstörande utsläpp från fartyg. Det sker i huvudsak genom tre olika strategier: konvertering av fartygets motorer för att kunna köra på renare bränsle; helt eller delvis övergång till alternativa energibärare, exempelvis genom elektrifiering; eller genom att installera utrustning för rening av avgaserna, exempelvis skrubbersystem. Dessa åtgärder har minskat utsläppen av försurande svavelutsläpp till omgivningsluften men också av andra luftföroreningar, som partiklar, sot och polyaromatiska kolväten (PAH). Men även om fokus för sjöfartens energiomställning huvudsakligen syftar till att minska utsläppen av luftföroreningar till omgivningsluften, har tidigare studier indikerat att fartygsbränslet även kan ha inverkan på fartygens innemiljö och arbetsmiljö och därmed sjöpersonalens hälsa, säkerhet och välbefinnande.

I korthet har syftet med detta projekt varit att systematiskt och ur ett helhetsperspektiv undersöka hur olika driftsalternativ påverkar fartygs innemiljö, arbetsmiljö och säkerhet. Bedömningen omfattar även besättningens personliga exponering för farliga luftföroreningar, i vilken utsträckning deras arbetsuppgifter förändras, samt hur denna påverkan kan beskrivas i arbetsmiljöekonomiska termer.

Undersökningar har genomförts på sex olika fartyg. Fartygens innemiljö har undersökts med stationära mätningar av temperatur, luftfuktighet (RF) och koldioxid (CO₂), samt halten av luftföroreningarna svaveldioxid (SO₂), kväveoxider (NO_x = NO + NO₂), totalhalt flyktiga organiska ämnen (TVOC) och polycykliska aromatiska kolväten (PAH). Besättningens personliga exponering undersöktes för NO₂, TVOC och PAH. Provtagningen gjordes med passiva diffusionsprovtagare som burits i andningszonen av totalt 50 personer på fem av fartygen. En enkät med frågor om upplevd luftkvalitet på arbetsplatsen och i hytten har besvarats av 94 personer. Resultaten har jämförts med relevanta lagstadgade gränsvärden, hälsobaserade riktlinjer, samt med resultat från tidigare mätkampanjer.

Resultaten visar att samtliga halter från såväl stationära mätningar som personburen exponering låg mycket under Arbetsmiljöverkets hygieniska gränsvärden. De flesta halter var även lägre än de hälsobaserade riktlinjer som används som jämförelse.

Maskinutrymmen var ofta mera kontaminerade än andra utrymmen ombord, särskilt med avseende på ämnen avdunstade från bränslen och smörjmedel, eller ämnen från motoravgaser. En förhöjd exponering observerades för maskinmanskaper i samband med arbetsuppgifter kopplade till fartygens bränslesystem. I övrigt sågs ingen skillnad i personlig exponering mellan befäl och manskap.

Resultaten från enkätundersökningen av personalens upplevelse av arbetsmiljö och inommiljö visar att luftkvaliteten ombord generellt upplevdes som god, både vad gäller arbetsplatserna och i de egna hytterna.

Hälsorelaterat kumulativt riskindex kunde inte särskilja de primära bränsletypen. Bedömningen av hälsoaspekten i fartygens inommiljö blir otydlig framför allt på grund av användningen av sekundära bränslen. För fartygen med samma eller liknande funktion var batteridrift, lågsvavligt bränslet och LNG bättre alternativ än tjockolja och MDO. En mycket klar förbättring av inommiljön och besättningens exponering, utifrån det hälsorelaterade indexet, kunde påvisas för de fartyg som bytt bränsle till ett renare alternativ.

Alla driftalternativ har egenskaper och risker som kräver särskild hänsyn vid utformning av system, rutiner för drift och underhåll, utbildning och träning, samt nödrutiner. Riskbedömningar behöver därför omfatta både risker för allvarlig skada, ohälsa och att arbetsuppgifter kan utföras på ett tillfredsställande sätt. Samtliga flytande bränslen är att betrakta som giftiga utom naturgas. Metanol är akut giftigt, både vid förtäring och hudexponering. Däremot är det inte cancerframkallande.

Eftersom samtliga fartyg i undersökningen fortsatt har system för att köra på petroleum-baserade bränslen har få arbetsuppgifter försvunnit helt och inget av driftalternativen innebär minskade direkta kostnader för personal. Däremot ses skillnader i hur ofta olika arbetsmoment behöver utföras och under vilka förhållanden. Med renare bränslen följer ett minskat behov av rengöring av komponenter och maskinutrymmen. Det innebär i sin tur en minskad exponering för farliga ämnen och att arbetstid kan läggas på andra uppgifter som upplevs mer värdeskapande.

Eftersom många arbeten ombord innebär en samtidig exponering för flera kända riskfaktorer krävs en helhetssyn som omfattar preventiva åtgärder och ett långsiktigt hälsofrämjande arbete. Det är inte tillräckligt att rikta åtgärder endast mot de värsta exponeringarna.

Sammanfattningsvis visar resultaten av denna kartläggning att det inte finns en enda bästa lösning som passar alla fartyg, oavsett typ, last eller trad. Oavsett vilket driftsalternativ som väljs innebär det högre kostnader än den konventionella lösningen med förbränningsmotorer på tung bränsolja. Troligen kommer sjöfartens energiomställning att behöva ekonomiska incitament och harmoniserade regelverk för att påskynda utvecklingen av lösningar som är hållbara ur ett livscykelperspektiv och samtidigt kommersiellt gångbara. För ett hållbart och attraktivt arbetsliv i en hållbar sjöfart behöver framtidens lösningar även säkerställa att drift och underhåll kan utföras på ett tillfredsställande sätt med så liten risk för ohälsa och olycksfall som möjligt.

SUMMARY

The maritime industry is currently undergoing a transition to reduce harmful pollution from ships. This is largely achieved through three different strategies: conversion of the ship's engines to run on cleaner fuel; full or partial transition to alternative energy carriers, for example by electrification; or by installing an exhaust gas cleaning equipment, for example a scrubber system. These measures have reduced emissions of acidifying sulfur emissions to ambient air, but also of other air pollutants, such as particles, soot and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). Although the focus of the industry's energy conversion is to reduce the environmental impact, previous studies have indicated that the ship fuel can have an impact on the shipboard indoor air quality and working environment, and thus the health, safety, and wellbeing of seafarers.

The purpose of this project has been to systematically and from a holistic perspective examine how different operating alternatives affect the shipboard indoor air quality (IAQ), and occupational health and safety. The assessment comprises the crew's personal exposure to hazardous air pollutants, the extent to which their tasks change, and how this impact can be described in terms of work environment economics.

Investigations have been conducted on six different vessels. The vessels' IAQ has been investigated with stationary measurements of temperature, humidity (RH) and carbon dioxide (CO₂), as well as the content of the air pollutants sulfur dioxide (SO₂), nitrogen oxides (NO_x = NO + NO₂), total volatile organic compounds (TVOC) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH). The crew's personal exposure was examined for NO₂, TVOC and PAH. Sampling was done with passive diffusion samplers carried in the breathing zone by a total of 50 people on five of the vessels. A questionnaire with questions about perceived air quality at the workplace and in the cabin has been answered by 94 people. The results have been compared to relevant statutory occupational exposure limit values, health-based guidelines, and to results from previous measurement campaigns.

The results show that all concentrations from stationary and personal exposure measurements were well below the Swedish Work Environment Authority's occupational exposure limits. Most concentrations were also lower than the health-based guidelines used

for comparison. Engine spaces were often more contaminated than other spaces on board, especially regarding substances evaporated from fuels and lubricants, or substances from engine exhaust. An increased exposure was observed for engine ratings, especially when performing with work tasks related to the vessels' fuel systems. Otherwise, no difference was seen in personal exposure between officers and ratings.

The results from the questionnaire survey show that the IAQ on board was generally perceived as good, both for workplaces and in their own cabins.

The health-related cumulative risk index could not distinguish the primary fuel type. The assessment of the health aspect of the ships' indoor environment becomes unclear, mainly due to the use of secondary fuels during measurements. For vessels with the same or similar function, battery operation, low-sulfur fuel and LNG were better alternatives than HFO and MDO. A very clear improvement in the indoor environment and crew exposure, based on the health-related index, could be demonstrated for those vessels that had changed fuel to a cleaner alternative.

All operating alternatives have properties and risks that require special consideration when designing systems, routines for operation and maintenance, education and training, and emergency routines. Risk assessments therefore need to include both risks of serious injury, ill health, and that work tasks can be performed satisfactorily. All liquid fuels are considered toxic except natural gas. Methanol is acutely toxic, both when ingested and exposed to the skin. However, it is not carcinogenic.

As all vessels in the survey still have systems for running on petroleum-based fuels, few work tasks have disappeared completely and none of the operating alternatives entails reduced direct costs for personnel. On the other hand, differences are seen in how often different work tasks need to be performed, and under what conditions. With cleaner fuels comes a reduced need for cleaning of components and of the engine rooms. This in turn means a reduced exposure to hazardous substances and that working hours can be spent on other tasks that are perceived as more value-creating.

Since many jobs on board involve a simultaneous exposure to several known risk factors, a holistic approach is required that includes preventive measures and long-term health-promoting work. It is not enough to target only the worst exposures.

In sum, the results of this project show that there is no *one best way* that suits all vessels, regardless of type, cargo, or trade. Compared to conventional propulsion systems, there will be higher costs incurred, regardless of which alternative is selected. The maritime industry's energy transition is likely to need financial incentives and harmonized regulations to accelerate the development of solutions that are sustainable from a life cycle perspective, and at the same time commercially viable. For a sustainable and attractive working life in the maritime industry, the solutions of tomorrow must also ensure that ship operation and maintenance can be performed in a safe and satisfactory manner with minimum risk of ill-health and accidents.

INLEDNING

FÖR ETT HÅLLBART ARBETSLIV I EN HÅLLBAR SJÖFART

En långsiktigt hållbar utveckling innebär att dagens behov ska kunna tillgodoses utan att det sker på bekostnad av kommande generationers möjligheter att tillfredsställa sina behov. Utvecklingen grundas på ett systemperspektiv som omfattar både social, ekonomisk och miljömässig hållbarhet. I Sverige är hållbar utveckling en del av regeringsformen sedan 2003 (SFS 1974:152). År 2015 antog FN:s generalförsamling *Agenda 2030 för hållbar utveckling*. Det är en oerhört ambitiös färdplan som stakar ut vägen för att till år 2030 avskaffa extrem fattigdom, minska ojämlikheter och orättvisor i världen, främja fred och rättvisa, samt lösa klimatkrisen (Regeringskansliet, 2015). Genom överenskommelsen har FN:s medlemsstater åtagit sig att skjuta till medel för arbetet med att uppfylla 17 globala mål för hållbar utveckling. På global nivå uppskattas genomförandet av Agenda 2030 kräva att investeringar i storleksordningen biljoner dollar riktas om så att de skapar hållbar utveckling (FN, 2019). Samtidigt innebär uppfyllandet av de globala målen stora möjligheter att skapa positiva effekter genom ökad sysselsättning, bättre folkhälsa och miljö.

FN:s sjöfartsorgan IMO (International Maritime Organization) är en central aktör i det mellanstatliga arbetet för hur sjöfarten som bransch ska kunna bidra till att uppfylla de globala målen (IMO, 2018). Sedan MARPOL-konventionen trädde i kraft 1983 har den successivt utvidgats till att omfatta fler typer av föroreningar och detaljerade regler och kraven skärps kontinuerligt (IMO, 2022). I tillägg har det också introducerats en rad regionala och lokala bestämmelser, exempelvis inom EU. Även andra intressenter som lastägare och finansiärer visar ett allt större intresse för en hållbar sjöfartsnäring. Bland de initiativ som inrättats för att stödja och påskynda utvecklingen finns bland annat Poseidon-principerna, som ligger till grund för sjöfartsbankers utvärdering av fartygens miljö/klimatprestanda vid beslut om fartygsfinansiering. Andra exempel på initiativ är *Global Industry Alliance*, *Green Maritime Forum*, *Sustainable Shipping Initiative*, *Getting to Zero Coalition* och *Green Ship of the Future*.

Ett exempel på genomslaget som dessa självreglerande system har fått är det utbredda användandet av *RightShips* klassificering av växthusgasutsläpp. Under 2017 använde nästan 25 % av bulkmarknaden denna klassificering för att välja vilka fartyg som skulle chartras (Rehmatulla m.fl., 2017).

Sammantaget innebär det en föränderlig affärsmiljö för sjöfarten som idag är starkt beroende av fossila bränslen (Englert m.fl., 2021). Det ställer krav på utmanande tekniska och operativa beslut som formar dagens, och inte minst morgondagens fartyg, särskilt vad gäller val av framdrivningssystem och energibärare.

För att kunna möta de ökade kraven och minska miljöstörande utsläpp från fartyg ses idag huvudsakligen tre olika strategier: konvertering av fartygets motorer för att kunna köra fartygen på renare bränsle; hel eller delvis övergång till alternativ energibärare, exempelvis genom elektrifiering; eller genom att installera utrustning för rening av avgaserna, exempelvis skrubbersystem.

Bland de lågsvavliga bränslen som används idag finns lågsvavliga hybridoljor, destillerade bränslen (exempelvis marindiesel och gasolja), flytande naturgas (LNG) och metanol. Elektrifierade lösningar för fartyg finns i olika nivåer, beroende på fartygets energibehov och laddningsmöjligheter, från batterihybridssystem till helt elektrifierade lösningar. Skrubbersystem finns med öppet eller stängt kretslopp, eller som hybridlösning med möjlighet att kunna byta mellan de båda driftlägena.

Även om fokus för sjöfartens energiomställning huvudsakligen syftar till att minska utsläppen av luftföroreningar till omgivningsluften, har tidigare studier indikerat att valet av bränsle även har inverkan på fartygens innemiljö och arbetsmiljö. I det explorativa projektet *God innemiljö på svenska fartyg* som genomfördes under åren 2013–2015, kartlades inomhusluftens kvalitet på tio svenska fartyg av olika typ och med olika typer av last (Langer m.fl., 2015). Resultaten indikerade att det fanns skillnader i innemiljön mellan fartygen, beroende på typ av bränsle och framdrivning. I det uppföljande projektet *Riskbedömning av svenska sjömäns yrkesmässiga exponering för toxiska luftföroreningar* kompletterades sedan de stationära mätningarna med en kartläggning av besättningens personliga exponering. Under åren 2016–2018 genomfördes mätningar tillsammans med 123 personer på 11 olika fartyg.

Även resultaten från den studien tyder på att fartygsbränslet är en indikativ determinant för exponeringens storlek (Langer m.fl., 2018). En mindre förstudie pekade på att byte av fartygsbränsle på ett fartyg även hade viss inverkan på arbetsförhållanden och arbetsuppgifter, användning av tid, material och andra resurser, samt risken för olyckor och ohälsa (Ahlgren & Österman, 2015). Figur 1 illustrerar hur den kunskap som genererats i tidigare studier ligger till grund för utvecklingen av forskningsfrågor och forskningsdesign för det projekt som presenteras i denna rapport.



Figur 1. Illustration över kunskapsuppbyggnad genom tidigare studier och vilka kunskapsluckor som detta projekt syftar till att fylla.

Sammantaget pekar tidigare studier på behovet av en helhetssyn när viktiga beslut ska fattas om val av energibärare och framdrivningssystem. Det finns därför ett uttalat behov av att i tillägg till ekonomiska och miljömässiga analyser, även undersöka hur besättningens innemiljö, arbetsmiljö, säkerhet och hälsa påverkas. Tid och resurser relaterade till förändringar av verksamheten som kan påverka besättningens fysiska och mentala arbetsbelastning, arbetsmotivation och exponering för skadliga ämnen är långsiktiga och svåra att bedöma. Effekter som kan leda till minskad risk för ohälsa och olycksfall skulle vara fördelaktigt för såväl individ, företag som samhälle.

För ett rederi väger de ekonomiska aspekterna tungt. Omställningen innebär kostnader för utveckling av genomförbara åtgärder, samtidigt som det råder stora osäkerheter vad gäller infrastruktur och bränslekostnader samt hur miljöpolitik och lagstiftning kommer att utvecklas. Vilka effekter på den operativa verksamheten ombord som kan förväntas följa av olika alternativ är svårare att bedöma och det finns enbart enstaka studier om detta. En helhetsanalys kan ge en fingervisning om vilka åtgärder som är hållbara ur ett socio-ekonomiskt perspektiv där även det hållbara arbetslivet inkluderas.

I den här rapporten beskrivs genomförande och resultat av en utvärdering av de ovan nämnda aspekterna inte bara var och en för sig utan också som helhet för att kunna föreslå vägar till ekonomiskt, ekologiskt och socialt hållbart val av bränsle.

PROJEKTETS SYFTE OCH MÅL

I det här projektet undersöks och utvärderas följande driftalternativ:

- ULSFO, ett ultralågsavligt hybridrestbränsle
- Litiumjonbatteri i kombination med marindiesel
- LNG, flytande naturgas
- Metanol (i kombination med marindieseldrift)
- HFO-drift i kombination med skrubber för rökgasrening.

Syftet med projektet som presenteras i denna rapport är att systematiskt och ur ett helhetsperspektiv:

- undersöka vilka effekter dessa alternativ har på fartygets inommiljö och besättningens exponering för farliga ämnen.
- undersöka hur de olika alternativen påverkar arbetsmiljö, arbetsbelastning, hälsa och säkerhet ombord.
- undersöka andra kostnader som är förknippade med driftsalternativen ur ett arbetsmiljöekonomiskt perspektiv.

Snarare än att redogöra fördelar och nackdelar med de respektive alternativen, presenteras mätbara kriterier som kan ses som ledande indikatorer för social hållbarhet. Projektets mål är därför att utifrån en helhetsbedömning av ovanstående delar bidra till ett användbart stöd för att kunna fatta informerade beslut vid val av fartygsbränsle för fartyg i svensk och internationell sjöfart.

Även om projektets resultat primärt presenteras för rederier och fartygsoperatörer, förväntas de också vara av intresse för andra användargrupper, som exempelvis sjötransportköpare och tillsynsmyndigheter.

SJÖFARTENS MILJÖEFFEKTER

I den globala sjöfarten finns över 99 800 handelsfartyg över 100 bruttoton registrerade (UNCTAD, 2021). Dessa bemannas av uppskattningsvis 1,6 miljoner sjöfarare. Sjöfarten är en utpräglad globaliserad bransch som regleras, finansieras, opereras och förses med arbetskraft på internationell basis. I Sverige är sjöfarten en relativt liten bransch. År 2019 mönstrades cirka 15 000 personer på svenska fartyg, inklusive inom skärgårdstrafiken (Sweship, 2020). Sjötransporter har dock en avgörande betydelse för infrastruktur, konkurrenskraft och turistnäring. Svenska hamnar hanterar närmare 90 procent av Sveriges totala import och export och över 66 miljoner passagerare reser via svenska hamnar och bryggor (Lighthouse, 2021b).

Sjötransporterna har ökat stadigt över tid och eftersom transportbehovet förväntas fortsätta öka är det betydelsefullt att det kan göras på ett hållbart sätt. Organisationen *Sustainable Shipping Initiative* menar att för sjötransporter ska vara hållbara krävs bland annat att de är "säkra, inkluderande, tillgängliga, tillförlitliga, transparenta, prisvärda, bränsleeffektiva, miljövänliga och tar hänsyn till resurser i land och till havs, låga koldioxidutsläpp, samt att de är motståndskraftiga mot störningar, inklusive sådana som orsakas av klimatförändringar och naturkatastrofer (SSI, 2021).

Den Europeiska miljöbyrån uppskattar att den globala sjöfartens energiförbrukning för 2030 till mellan 12,1 och 14,2 EJ (EJ = 10^{18} Joule). Som jämförelse uppskattas energibehovet för uppvärmning av alla byggnader i EU till 10,7 EJ (ReUseHeat, 2021). Idag domineras sjöfarten av fartyg med konventionella förbränningsmotorer som drivs av lågsvavlig brännolja, eller av HFO i kombination med installerad skrubber. Cirka 120 fartyg har dual fuel-motorer för drift på LNG, runt 10 kan köras på metanol och cirka 120 fartyg drivs av batterier (DNV, 2020).

Vid förbränning av brännolja sker flera kemiska reaktioner som bildar avgaser med ett stort antal ämnen. Bland annat bildas koldioxid (CO_2), kolmonoxid (CO), samt kväveoxider (NO_x) som består av kvävemonoxid (NO) och kvävedioxid (NO_2). Polycykliska aromatiska kolväten (PAH) finns både som komponent i bränslet, samt bildas vid ofullständig förbränning. Även svavel finns naturligt i råoljan. Svaveldioxid (SO_2) bildas vid förbränning när svavlet reagerar med luftens syre. En högre andel svavel i bränslet ger mer SO_2 och ökar också utsläppet av partiklar i luften, vilket har en negativ påverkan på både klimat och folkhälsan, särskilt i hamnstäder (Corbett m.fl., 2007; Eyring m.fl., 2010).

Idag står sjöfarten för den största delen av såväl NO_x som SO_2 -utsläpp. I Sverige ger utsläppen från internationell flyg- och sjöfart upphov till betydligt större utsläpp än den inhemska sjöfarten och flyget. Inom så kallade utsläppskontrollområden (Emission Control Areas, ECA) gäller därför särskilda regler för utsläpp av NO_2 och SO_2 för samtliga fartyg som färdas inom områdena (IMO, 2022). I Europa är Östersjön, Nordsjön och engelska kanalen kontrollområden. För att minska utsläpp av försurande och hälsoskadliga svaveloxider i luften regleras hur hög svavelhalt som får förekomma i marint bränsle successivt skärpts. Inom svavelkontrollområdena (SECA) får svavelhalten i bränslet vara högst 0,1 viktprocent. I havsområden utanför dessa kontrollområden gäller sedan 1 januari 2020 gränsvärdet 0,5 viktprocent svavel (EU, 2016/802; IMO, 2019).

Sedan 2018 berörs även andra luftföroreningar. Då antog IMO en strategi för att minska de totala utsläppen av växthusgaser från sjöfarten med minst 50 % till 2050. Visionen är att fartygens utsläpp av växthusgaser helt ska fasas ut under detta århundrande och att utsläppen av koldioxid per transportarbete ska minskas med 70 % till 2050 jämfört med 2008 års nivåer (IMO, 2018). För närvarande omfattas utsläpp av växthusgaser endast av två globala obligatoriska krav. Det ena är Energy Efficiency Design Index (EEDI) för nybyggen, som innebär krav på upp till 30 % förbättring av designprestanda beroende på fartygstyp. Det andra är att samtliga fartyg omfattas av kraven på en Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP) men den innebär i sig inga uttryckliga prestandakrav. Under 2023 förväntas nya bestämmelser träda i kraft 2023 som innebär en kombination av design- och driftsbestämmelser och stödande icke-reglerande åtgärder som berör både nybyggen och befintliga fartyg.

Viktiga faktorer som påverkar utvecklingen och i hög grad styr valet av lösning för att möta de ökade miljökraven omfattar systemens tekniska mognad, kapacitet att installera, kostnader för motorer, tankar och bränslesystem, samt bränslets pris och tillgänglighet – hur utbredd bränslets infrastruktur är. Parallellt med den tekniska utvecklingen behöver även säkerhetsaspekterna beaktas. De flesta alternativa bränslen har egenskaper som innebär andra säkerhetsutmaningar än de konventionella eldningsolja. Det innebär att det också krävs tillgång till kompetent personal som kan sköta drift och underhåll. Oavsett val av strategi är det viktigt att inom miljö och arbetsmiljö inte drabbas negativt och att riskerna för besättningens säkerhet, hälsa och välbefinnande tillgodoses så långt det är möjligt. Detta kräver utveckling av föreskrifter och tekniska regler för säker utformning av system och användning ombord på fartyg innan de kan tas i bruk. Här råder en varierande mognad av regelverken. Ett fartyg byggt idag väntas att vara i drift till åtminstone 2040. Under den tiden behöver systemen vara användbara. Vanligt förekommande arbetsuppgifter behöver kunna utföras både säkert och effektivt.

Ett ökande antal studier har i detalj undersökt olika driftalternativ med avseende på genomförbarhet, miljöeffekt ur ett livscykelperspektiv, samt förväntade socio-ekonomiska konsekvenser (se exempelvis Bilgili, 2021; Brynolf m.fl., 2014; Brynolf m.fl., 2018; Taljegard m.fl., 2014; Van m.fl., 2019; Zetterdahl m.fl., 2016). LNG är det alternativ som idag leder utvecklingen. Cirka 3 % av världshandelsflottan och 26 % av orderboken har eller ska utrustas med dual fuel-motorer. Mer än 120 hamnar tillhandahåller LNG-bunkring. 23% av flottan och 28% av orderboken (bruttotonnage) har eller ska utrustas med skrubbersystem. Även dual-fuel metanol och dual-fuel ammoniakmotorer kommer sannolikt att få ökad användning. För kortare sträckor är även renodlad batteridrift eller batterihybrid ett alternativ. Det finns även andra bränslen och tekniska lösningar för att minska utsläppen men de är inte redo för storskalig implementering än. Investeringskostnaderna skiljer mellan alternativen och kan grovt indelas i kostnader för motorer, bränsletillförselsystemet; och för bränslelagring. Exempelvis är både motorer och bränslelagring dyrare för LNG än för metanol (Taljegard m.fl., 2014). Bränslepriserna påverkas av priset på biomassa, förnybar el och fossil energi samt kostnader för att kunna utnyttja icke-fossil koldioxid (Brynolf m.fl., 2018). Det råder för närvarande också stora skillnader i distributionskostnader för olika bränslen.

LUFTFÖRORENINGAR I INNEMILJÖN

Eftersom vi tillbringar större delen av vår tid inomhus, hemma eller på jobbet, har inomhusmiljön en betydande påverkan på vår hälsa och välbefinnande. Sambanden mellan inomhusmiljön och hälsa är komplexa, det är många olika faktorer som påverkar.

Inomhus i våra bostäder och i kontorsmiljöer iland härrör de vanligaste källorna till luftföroreningar från byggnadsmaterial, möbler, färger, och rengöringsprodukter. Exempelvis avges formaldehyd från spånskivor och textilier, organiska lösningsmedel från färger och lim, kemiska ämnen från vattenbaserade produkter, mjukgörare och aldehyder från mattor. Det är framför allt nya material som avger emissioner men för svårflyktiga ämnen kan emissioner avges under flera år. Även om halterna är låga kan de lukta och upplevas irriterande. I inomhusluften finns också alltid damm och partiklar. En stor del av föroreningarna i inomhusmiljön kommer från människorna själva och våra produkter för personlig hygien som deodorant, schampo och kosmetika.

Ett fartygs luftkvalitet präglas nästan uteslutande av ämnen som har sitt ursprung i fartygets bränslen, smörjoljor och motoravgaser (Langer m.fl., 2014). Luften innehåller en komplex blandning av främst koldioxid, kolmonoxid, svaveldioxid, ozon, kväveoxider (NO och NO₂) men också aromatiska kolväten såsom bensen, toluen, etylbensen, xylener, raka alifatiska kolväten (med 6–20 kolatomer i kedjan) och polycykliska aromatiska kolväten (PAH).

INNEMILJÖ OCH HÄLSOEFFEKTER

I det här avsnittet ges en kort redogörelse av kända hälsoeffekter av de ämnen som har undersökts inom projektet, samt en beskrivning av regelverket som gäller för arbetsplatsens inomhusmiljö, kemiska arbetsmiljörisker och exponering för luftföroreningar.

Epidemiologiska och toxikologiska studier visar på samband mellan exponering för luftföroreningar och hälsoeffekter. Hur farligt det är att exponeras för ett visst ämne beror på hur skadligt eller giftigt ämnet är och hur stor dos som behövs för att det ska uppstå skadliga

effekter. Skadorna kan innebära antingen lokala eller systemiska hälsoeffekter. Lokala hälsoeffekter på kroppen kan exempelvis vara frätskador på huden, eller irritation i ögon eller luftvägar efter direktkontakt med ämnet. Systemiska hälsoeffekter uppkommer när exponeringen har lett till att ämnet tagits upp i ett eller flera organ via huden, andningsvägar eller genom förtäring. Det kan leda till akut förgiftning eller till skador på längre sikt, som exempelvis allergi eller cancer.

Gasformiga luftföroreningar

I det här avsnittet redogörs kort för de gasformiga luftföroreningar som omfattas av undersökningen: kväveoxider, svaveloxider, flyktiga organiska ämnen och PAH-ämnen. För varje luftföroreningar redogörs var de uppkommer ombord och vilka hälsoeffekter en ohälsosam exponering kan leda till.

Kväveoxider

Kväveoxider (NO_x) bildas i förbränningsprocesser och ingår bland annat i avgaser från förbränningsmotorer. Den primära produkten är NO med en mindre andel av NO_2 som också bildas genom mycket snabb omvandling av NO_2 under inverkan av ozon.

All typ av exponering för kväveoxider kan vara hälsoskadlig, beroende på koncentration, exponeringstid och exponering. Vissa symptom märks först efter en tid, medan andra uppkommer direkt. Inandning av kväveoxider kan orsaka förgiftning och vid hudexponering kan frätskador uppstå. Lungor och luftvägar påverkas bland annat genom vidgning av blodkärlen i lungorna, vilket kan utsätta astmatiker för kraftigare astmaanfall. Likaså kan kraftiga bröstsmärtor och akut andnöd vara symptom av kväveoxider.

NO_2 irriterar ögonen och luftvägarna, kan orsaka luftvägsinflammation, nedsatt lungfunktion och leda till nedsatt immunförsvar med ökad benägenhet för luftvägsinflammation (WHO, 2010). NO_2 påverkar även astmatiker och allergiker genom att öka känsligheten gentemot allergener (ämnen som orsakar allergi eller överkänslighet). Tester har genomförts där allergiker reagerat på en mycket liten dos av allergen, som i normalfall inte skulle påverka personerna, efter exponering för kvävedioxid (Staxler m.fl., 2001).

Arbetsmiljöverket beslutade 2018 att kraftigt sänka de hygieniska gränsvärdena för yrkesmässig exponering för NO₂. Nivågränsvärdet (tidsvägt medelvärde för 8 timmars arbetsdag) sänktes från 4 mg/m³ till 0,96 mg/m³ (4 000 µg/m³ till 960 µg/m³) och korttidsgränsvärdet (under en referensperiod på 15 minuter) sänktes från 10 mg/m³ till 1,9 mg/m³ (10 000 µg/m³ till 1 900 µg/m³). Gränsvärdet för NO₂ är avsett att ta hänsyn till den samlade effekten av de ämnen som förekommer i dieslavgaser (AFS 2018:1). Det är känt att dieslavgaser kan orsaka inflammatoriska förändringar i lungorna, lungcancer och hjärt-kärlsjukdom. I takt med att kunskapen om riskerna har ökat har därför internationella och svenska gränsvärden och hälsobaserade riktlinjer sänkts i flera omgångar under de senaste decennierna. Sedan 2012 klassificerar Världshälsoorganisationens (WHO) expertgrupp för cancerforskning (IARC) dieslavgaser riskgrupp 1A, samma som bland annat asbest och arsenik. Beslutet baseras på stort vetenskapligt stöd för att dieslavgaser är kopplade till ökad risk för lungcancer (IARC, 2012). Även halter runt halva gränsvärdet kan upplevas som irriterande för luftvägar och ögon (Taxell & Santonen, 2016).

Svaveloxider

Svaveldioxid (SO₂) bildas i förbränning av svavelhaltigt bränsle. SO₂ är hostretande, irriterar ögonen, kan orsaka luftvägsinflammation, nedsatt lungfunktion och nedsatt immunförsvar. I höga halter kan svaveldioxid orsaka andningsbesvär hos känsliga individer. Nivågränsvärdet över 8 timmars arbetsdag för SO₂ är 1,3 mg/m³ (1 300 µg/m³). Det skyddar dock inte astmatiker. Studier har visat att det krävs halter under halva gränsvärdet för att astmatiker inte ska reagera (AFS 2018:1).

Flyktiga organiska ämnen

Flyktiga organiska ämnen (VOC) har sina huvudsakliga källor inomhus. De avges från byggmaterial, inredning och kan också bildas vid matlagning. På ett fartyg är den största källan till VOC fartygets bränsle, både genom avdunstning och som komponent i avgaser samt färger och lösningsmedel.

Det kan finnas omkring 6 000 ämnen i inomhusluften och halten varierar mellan olika inomhusmiljöer. För att få en indikation på halten flyktiga organiska ämnen i inomhusluften anges den därför ofta som en summa av alla analyserade VOC, så kallade totalolväten (TVOC).

Flyktiga organiska ämnen medför hälsoeffekter vid kraftigt förhöjda halter, främst huvudvärk och irritation på grund av lukt.

Bensen är ett lättflyktigt organiskt ämne som många gånger ingår i brännolja. Ämnet tas upp lätt i människokroppen, antingen via inandningsluften eller genom hudkontakt. Bensen kan irritera ögonens och luftvägarnas slemhinnor, ge upphov till trötthet och i värsta fall ha en negativ inverkan på hjärtat. Bensen är placerat i riskgrupp 1, cancerframkallande för människor och kan ge leukemi (Rinsky m.fl., 1987).

Polycykliska aromatiska kolväten (PAH)

PAH (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons) är en grupp av flera hundra ämnen som bildas när organiska material hettas upp eller förbränns ofullständigt, vid underskott av syre. PAH finns bland annat i tobaksrök och är också beståndsdel i vissa bränslen.

Akuta och långvariga hälsoeffekter av PAH beror i huvudsak på hur exponeringen har skett (genom inandning, hudkontakt eller förtäring), hur länge och hur hög halten är. Det beror också på hur giftig PAH-föreningen är och den exponerade personens hälsotillstånd i övrigt (Kim m.fl., 2013). Kortvarig exponering för höga halter av PAH kan leda till irritation av hud och ögon, illamående och försämrad lungfunktion hos astmatiker. Långvarig exponering för låga halter av vissa PAH, bland annat benzo(a)pyren som undersöks särskilt i detta projekt, kan orsaka lungcancer. Precis som dieselavgaser och bensen är benzo(a)pyren placerat i riskgrupp 1. Det är ett av de äldsta kända carcinogena ämnena för yrkesmässig exponering. Redan på 1700-talet upptäcktes det att sotare drabbades av en särskild typ av cancer som kunde härledas till deras exponering för sot (Pott, 1776) och 1933 identifierades benzo(a)pyren som det ämne i sot och avgaser som kan orsaka cancer (Phillips, 1983). Benzo(a)pyren används ofta som markör för den totala PAH-exponeringen eftersom den i hög grad bidrar till hälsoeffekten av PAH (Choi m.fl., 2010).

Naftalen, ett annat PAH-ämne som undersöks särskilt i denna studie klassas som möjligtvis cancerframkallande hos människor (IARC grupp 2B). Naftalen uppkommer främst genom förbränningsprocesser och exponering för naftalen sker vanligen genom inandning av avgaser, lösningsmedel, smörjmedel, tobaksrök, eller konsumentprodukter som hårspray (Buckpitt m.fl., 2010).

Exponering för naftalen kan verka irriterande för ögon och slemhinnor och kan också ge upphov till hemolytisk anemi, ett tillstånd där de röda blodkropparna bryts ner (Preuss m.fl., 2003).

Partiklar

Luftburna partiklar (aerosoler) klassificeras på olika sätt, beroende på sin storlek. De hälsorelaterade storleksfraktionerna utgörs av inhalerbar, torakal och respirabel partikelfraktion (SS-EN 481):

- **Inhalerbar fraktion** är den mängd partiklar som man inandas genom näsa och mun.
- **Torakal fraktion** är den del av de inhalerbara partiklarna som passerar struphuvudet.
- **Respirabel fraktion** är de inhalerbara partiklar som når längst ner i luftvägarna, till lungornas alveoler (lungblåsor).

Eftersom partiklar kan ha olika form används aerodynamisk diameter för att uttrycka deras storlek. PM_{10} betecknar massan av partiklar i luften som är mindre än $10\ \mu\text{m}$ och $PM_{2,5}$ partiklar mindre än $2,5\ \mu\text{m}$. Storleksfraktionen PM_{10} hamnar mellan inhalerbart och respirabelt och $PM_{2,5}$ är mindre än respirabelt damm. Nanopartiklar definieras som ett objekt med minst en dimension (längd, bredd, höjd) i intervallet $1 - 100\ \text{nm}$.

Många partiklar vi andas in kan påverka hälsan. Exempelvis genom att irritera näsa, svalg och luftvägar och förvärra astma. Partiklar som innehåller allergiframkallande ämnen kan leda till en utvecklad sensibilisering eller allergi. Högre halter av partiklar ökar också risken för cancer. Risken för skadliga hälsoeffekter beror på partikelstorlek, koncentrationen av partiklar, dess kemiska sammansättning, samt exponeringstid. Längre exponeringstid innebär en ökad risk för hälsoeffekter. Eftersom besvär ofta uppträder efter en längre tids exponering kan det vara svårt att se uppfatta riskerna med den dagliga exponeringen. Riskerna för yrkesmässig exponering för nanopartiklar har rönt allt större uppmärksamhet under senare år men det är fortfarande oklart hur pass skadliga de är och det saknas för närvarande hygieniska gränsvärden.

I ett fartygs inomhusluft härrör partiklar framför allt från avgaser i tilluften (Wu m.fl., 2018). Sekundära partiklar bildas i luften från utsläpp av bland annat SO₂ och NO_x (Finlayson-Pitts och Pitts, 2000). IMO:s bestämmelser innehåller för närvarande inga kvantitativa utsläppsstandarder för PM. Däremot ingår utsläpp av partiklar i europeiska standarder för lastbilar, icke-vägmaskiner och fartyg på inre vattenvägar. En framtida reglering av PM-utsläpp kan kräva utveckling av PM-reduceringsteknik för marina motorer.

Termiskt klimat

Hur det termiska klimatet upplevs beror på lufttemperatur, strålningstemperatur och luftfuktighet. Det påverkas också av vilken typ av arbete som utförs, om det är stillasittande eller rörligt, samt hur väl anpassad klädseln är för det arbete som ska göras.

Kyla, värme och drag kan ge upphov till indirekt och direkt hälsopåverkan. En temperatur mellan 20–24 grader Celsius och en relativ luftfuktighet mellan 30–70% upplevs av de flesta som en bra miljö. För hög eller för låg temperatur kan upplevas obehagligt och påverkar såväl fysisk som mental arbetskapacitet. Direkta effekter vid varmt klimat är bland annat huvudvärk och trötthet. Kallt klimat kan ge upphov till ledbesvär och lungsjukdomar. Hjärt- och kärlsjukdomar är representerade både vid varmt respektive kallt klimat. Indirekta konsekvenser är koncentrationssvårigheter som kan bidra till en ökad olycksrisk. När kroppen utsätts för termisk belastning ökar också upptaget av luftföroreningar då vi behöver andas mer.

Relativa luftfuktigheten inomhus är kopplad till temperaturen. Värmer man upp kall uteluft så sjunker relativa luftfuktigheten (RF). RF är ett mått på hur mycket vattenånga som luften kan hålla vid en viss temperatur. Vid RF över 70% ökar risken för mögeltillväxt och en ökad kvalstermängd. Vid torr luft torkar slemhinnor i ögon, näsa och hals ut. Det kan ge upphov till irriterade och torra ögon, torr hud och läppar, samt näsblod. Vid RF under 40% kan statisk elektricitet uppstå. Förutom att det är obehagligt för den som utsätts för urladdningen kan det ge upphov till störningar i elektroniska system.

Regler och riktlinjer

Arbetsmiljön på fartyg regleras i Sverige av Transportstyrelsens föreskrifter (TSFS 2019:56) och allmänna råd om arbetsmiljö på fartyg. Genom dessa föreskrifter sätts ett 40-tal av Arbetsmiljöverkets föreskrifter i kraft. Bland annat Arbetsmiljöverkets föreskrifter om kemiska arbetsmiljörisker (AFS 2011:19) och hygieniska gränsvärden (AFS 2018:1).

I korthet innebär arbetsmiljöreglerna att alla arbetsgivare är skyldiga att regelbundet undersöka och riskbedöma arbetsmiljön för att avgöra vilka åtgärder som krävs för att arbetet ska vara säkert. I enlighet med den preventionshierarki som föreskrivs i arbetsmiljölagen, ska åtgärderna för att minska de kemiska arbetsmiljöriskerna följa en 'åtgärdstrappa' – en prioritetsordning. Det innebär att risker ska elimineras och minimeras så långt det är möjligt.

Hygieniska gränsvärden anger den högsta godtagbara genomsnittshalten av ett ämne i luften på arbetsplatsen, mätt som personlig exponering och beräknat som ett tidsvägt medelvärde. Det finns hygieniska gränsvärden för cirka 500 ämnen i damm, rök, dimma, gas och ånga. Gränsvärdena utgör underlag för beslut om hur länge det är tillåtet att arbeta i en viss atmosfär, där typ av ämne och koncentration bestämmer arbetstiden. Gränsvärdena anges som nivå- eller korttidsgränsvärden (AFS 2018:1, 4§):

Nivågränsvärde (NGV) - Hygieniskt gränsvärde för exponering under en arbetsdag, normalt 8 timmar. Nivågränsvärdena är bindande och **får** inte överskridas. Till sjöss är det vanligt med längre arbetsdagar än 8 timmar. Då kan en schablonmetod användas för att beräkna halten där gränsvärdet multipliceras med $(8/x)$, där x är arbetstidens längd i timmar.

Korttidsgränsvärde (KGV) - Hygieniskt gränsvärde för exponering under en referensperiod av 15 minuter (för några ämnen 5 minuter). En exponering motsvarande ett 15 minuters korttidsgränsvärde bör inte förekomma under längre tid än 15 minuter per timme.

Utöver svenska lagkrav finns också internationella riktlinjer och standarder som gäller fartyg, bland annat från IMO, klassificeringsbolag, branschorgan och lastägare, som ofta ställer högre krav vad gäller arbetsmiljö och säkerhet ombord. För tankfartyg gäller den omfattande ISGOTT, International Safety Guide for Oil Tankers and Terminals (ICS/OCIMF/IAPH, 2020). Hygieniska gränsvärdena är satta för att passa industriella arbetsmiljöer där arbetstagarna

vistas under arbetspass på vanligtvis 8 timmar. Förhållande på fartyg är annorlunda eftersom de anställda både arbetar och bor ombord under längre tider än vad som normalt är fallet på en landbaserad arbetsplats. För att kunna relatera resultat uppmätta i denna studie tillämpar vi hälsobaserade riktvärden för inomhusluft utfärdade av Världshälsoorganisationen (WHO, 2005; 2010), samt av Umweltbundesamt (UBA, 2018), den tyska motsvarigheten till Naturvårdsverket. Dessa riktvärden gäller för bostäder och andra icke-industriella miljöer men används i denna rapport för att kunna relatera uppmätta halter i arbets- och boendemiljöer på fartyget. Dessa riktvärden är betydligt lägre än de hygieniska gränsvärdena och **bör** inte överskridas. De hygieniska gränsvärden och riktvärden som används i denna rapport är sammanställda i Tabell 1.

WHO:s expertgrupp *International Agency for Research on Cancer* (IARC) har placerat in närmare 1 000 ämnen (verksamma ämnen) i fem grupper beroende på hur cancerframkallande de anses vara. Riskgrupp för de ämnen som undersöks i denna studie framgår av kolumnen *IARC riskgrupp* i Tabell 1. Grupp 1 innebär att ämnet är cancerframkallande för människor och Grupp 2B att det möjligen är cancerframkallande för människor. Kolumnen *Medelvärdesperiod* anger vilken tidsperiod som avses för respektive gräns- och riktvärde.

Från och med 21 februari 2023 ska gränsvärdet för dieselexponering att bedömas genom mätning av elementärt kol (EC), i enlighet med EU-direktivet 2017/164 om indikativa yrkeshygieniska gränsvärden. Nivågränsvärdet för elementärt kol blir $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Elementärt kol finns främst i dieselavgaser och blir mer specifikt då risken för störningar från andra källor är mindre. I innemiljön på fartyg finns det dock få andra källor till NO_2 -exponering, så mätningarna som gjorts i detta projekt kan anses vara representativa för förekomsten av dieselavgaser. TVOC-halterna används för att ge en indikation på förekommande halter av organiska ämnen. Då det varierar stort vilka ämnen som ingår i TVOC, går det inte att dra några slutsatser om hälsoeffekter och det saknas hygieniskt gränsvärde. Men som jämförelse används här den tyska myndigheten Umweltbundesamts klassificering av TVOC-halter i innemiljöer: 1) $<300 \mu\text{g}/\text{m}^3$, anses som hygieniskt säkert; 2) $300\text{--}1\,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ som hygieniskt fortfarande säkert om riktvärden för innemiljö inte överskrids för enskilda ämnen eller ämnesgrupper; 3) $1\,000\text{--}3\,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ som hygieniskt märkbart; 4) $3\,000\text{--}10\,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ som hygieniskt alarmerande; 5) $10\,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ som hygieniskt oacceptabelt.

Tabell 1. Sammanställning av de hygieniska gränsvärden och rekommenderade riktvärden som används som referenser i denna studie.

Parameter	IARC riskgrupp	Riktvärde inommiljö	Gränsvärde arbetsmiljö	Medelvärdesperiod	Referens
<i>Bensen</i>	Grupp 1	1,7 µg/m ³		Hälsobaserat, hela livet	WHO, 2010
			1 500 µg/m ³	Nivågränsvärde (8h)	AFS 2018:1
			9 000 µg/m ³	Korttidsgränsvärde (15 min)	AFS 2018:1
<i>Benso(a)pyren</i>	Grupp 1	0,0012 µg/m ³		Hälsobaserat, hela livet	WHO, 2010
			2 µg/m ³	Nivågränsvärde (8h)	AFS 2018:1
			20 µg/m ³	Korttidsgränsvärde (15 min)	AFS 2018:1
<i>Metanol</i>			250 000 µg/m ³	Nivågränsvärde (8h)	AFS 2018:1
			350 000 µg/m ³	Korttidsgränsvärde (8h)	AFS 2018:1
			20 000 µg/m ³	Hälsobaserat, hela livet	(IRIS, 2017)
<i>Naftalen</i>	Grupp 2B	10 µg/m ³		1 år	WHO, 2010
			50 000 µg/m ³	Nivågränsvärde (8h)	AFS 2018:1
			80 000 µg/m ³	Korttidsgränsvärde (15 min)	AFS 2018:1
<i>NO₂ kvävedioxid</i> *	--	40 µg/m ³		1 år	WHO, 2010
			960 µg/m ³	Nivågränsvärde (8h)	AFS 2018:1
			1 900 µg/m ³	Korttidsgränsvärde (15 min)	AFS 2018:1
<i>NO kvävemonoxid</i>	--	inget			
			180 000 µg/m ³	Nivågränsvärde (8h)	AFS 2018:1
			900 000 µg/m ³	Korttidsgränsvärde (15 min)	AFS 2018:1
<i>SO₂ svaveldioxid</i>	--	20 µg/m ³		24 h	WHO, 2005
			1 300 µg/m ³	Nivågränsvärde (8h)	AFS 2018:1
			2 700 µg/m ³	Korttidsgränsvärde (15 min)	AFS 2018:1
<i>TVOC</i>	--	300 µg/m ³		Långtidsgenomsnitt	UBA 2018

* NO₂ används idag som dimensionerande ämne för yrkesmässig exponering av dieselavgaser (AFS 2018:1). Från och med 21 februari 2023 ska gränsvärdet för dieselexponering att bedömas genom mätning av elementärt kol (EC). Nivågränsvärdet blir då 0,05 mg/m³.

GENOMFÖRANDE

Projektet har genomförts med en så kallad *mixed methods*-ansats. Mätstrategier och undersökningsmetoder som utvecklats i tidigare projekt och som omfattar kunskap om vad, var och hur arbetet ska genomföras har tillämpats.

Genom stationära mätningar har förekomst och halter av gasformiga luftföroreningar i fartygets innemiljö undersökts. I vissa fall har mätningar även gjorts av partiklar. Provtagningen har kompletterats med mätning av besättningens personliga exponering för utvalda kemiska ämnen. I tillägg till de yrkeshygieniska mätningarna kompletteras med funktions- och uppgiftsanalyser för att undersöka arbetsförhållanden och arbetsuppgifter.

FARTYG SOM INGÅTT I STUDIEN

Tabell 2 visar en sammanställning över de fartyg som ingick i studien, vilket bränsle fartygen kördes på under provtagningen, typ av framdrivningsmaskineri, när på året undersökningen genomfördes på varje fartyg.

Tabell 2. Sammanställning av de fartyg som ingick i undersökningen.

Fartygstyp	Bränsle	Framdrivning	Datum
Isbrytare	ULSFO 0,2 % S	Dieselektrisk	2018-03-01 – 2018-03-08
RoPax	Litiumjonbatterier (kompletterat med dieselgeneratorer på miljödiesel < 0,045% S)	Elektrisk Hybriddrift	2019-03-09 – 2019-03-17
Oljetankfartyg	LNG1	Dual fuel, gasdrift	2019-07-08 – 2019-07-16
RoPax	LNG2	Dual fuel, gasdrift	2020-12-08 – 2020-12-13
RoPax	Metanol	Dual fuel, metanol och MDO	2021-08-27 – 2021-09-04
RoPax	HFO 2% S med skrubber	Dieselmekanisk	2021-09-09 – 2021-09-17

METODER FÖR PROVTAGNING OCH ANALYS AV LUFTFÖRORENINGAR

Fartygens innemiljö undersöktes med stationära undersökningar av nio olika utrymmen ombord. Inom varje utrymme gjordes mätningar av inneklimateparametrarna temperatur, luftfuktighet (RF) och koldioxid (CO₂), samt av koncentrationen av luftföroreningarna svaveldioxid (SO₂), kväveoxider (NO_x = NO + NO₂), totalhalt flyktiga organiska ämnen (TVOC) och polycykliska aromatiska kolväten (PAH). För jämförelse gjordes motsvarande provtagning av utomhusluften på däck. Provtagarna monterades i en speciell provhållare som efter överenskommelse med besättningen placerades på utvalda mätpunkter ombord.

Den personliga exponeringen undersöktes för luftföroreningarna NO₂, TVOC och PAH. På samtliga fartyg utom ett, omfattade undersökningen 10 personer ur besättningen.

Provtagarna monterades i en för ändamålet tillverkad 'brosch' som personalen bar utanpå kläderna i höjd med andningszonen.

Tabell 3 redogör för de utrymmen och befattningar som i förväg planerats ingå för att få så god spridning och representativitet som möjligt. De faktiska mätplatserna och befattningarna varierar något mellan fartygen. Det är beroende av hur fartyget är utformat och framför allt att det från besättningens sida givetvis var helt frivilligt att delta i studien.

Tabell 3. Förvalda mätpunkter på fartyg för stationär mätning och funktioner från besättning för personburen mätning.

Stationär provtagning Temp., RH, CO ₂ , NO _x , SO ₂ , TVOC, PAH	Personburen provtagning NO ₂ , TVOC, PAH
Separatorrum	Seniorbefäl maskin
Huvudmaskinrum	Juniorbefäl maskin
Maskinkontrollrum	Maskinmanskap
Byssan	Seniorbefäl däck
Mäss	Juniorbefäl däck
Bryggan	Kockstewart
Hytt	Däcksmanskap, dag
Dagrum eller liknande	Däcksmanskap, vakt
Bildäck (om tillämpligt)	Däcksmanskap, vakt
Utomhus	Intendentur

Temperatur, RF och CO₂ registrerades kontinuerligt med en Wöhler CDL210 (Wöhler Technik GmbH). Det är en loggande sensor som ställdes in för en tidsupplösning på 2 minuter.

Både stationär och personburen provtagning av luftföroreningar gjordes med så kallade diffusiva provtagare. Arbetsprincipen för diffusiv (passiv) provtagning är molekylär diffusion av gaser vid konstant hastighet. Gasmolekylerna diffunderar in i provtagaren där de kvantitativt samlas upp under provtagningstiden. Resultaten visas som medelvärde för halter summerade över provtagningstiden.

IVL:s diffusiva provtagare användes för mätning av SO₂, NO_x och NO₂. Efter provtagningen har proverna analyserats på IVL:s laboratorium med våtkemiska metoder. Mer detaljer om principer för diffusiv provtagning och analysmetoder finns beskrivna i Ferm och Rohde (1997), samt Ferm (2001).

För passiv provtagning av VOC användes rör innehållande Tenax[®] adsorbentmedium (Tenaxrör, modell N9307005, Perkin-Elmer, Waltham, MA, USA). VOC analyserades som summa totalhalter av flyktiga organiska ämnen i provet (TVOC) och kvantifierades med gaskromatograf kopplad till masspektrometer (GC/MS; GC 6890, MS 5973N, Agilent, USA). Enligt internationell praxis uttrycks TVOC i toluenekvivalenter. Det innebär att beräkningarna har gjorts som om alla ämnen var enbart toluen. Förfarandet ger en uppfattning om totalhaltens storlek. Analysen har också omfattat en ämnesspecifik kvantifiering av bensen för att kunna jämföra halten med gränsvärden och hälsobaserade riktlinjer.

PAH uppmättes med passiv specialprovtagare bestående av polyuretanskum (PUF) (Strandberg m.fl., 2018). Provtagaren är cylindrisk, ungefär 10 cm lång, 2 cm i diameter och med en upptagningsarea på 77 cm². Under provtagningen bärs PUF-provtagaren i en särskild skyddsbehållare av metall med en nätstorlek på 1 mm. Före provtagningen renas provtagaren genom lakning i ett organiskt lösningsmedel. Provet har sedan analyserats genom att provtagarna extraherats (lakats ur) i ett organiskt lösningsmedel och analyserats med gaskromatograf kopplad till masspektrometer (GC/MS). För detaljerad beskrivning av instrument och analysmetod, se Bohlin m.fl. (2010).

PAH-halten bestämdes för 32 specificerade PAH-ämnen. Här ingår de 16 PAH-ämnen som prioriterats av US EPA (en federal miljöskyddsmyndighet i USA), samt 16 alkylerade PAH-ämnen. I rapporten kvantifieras och presenteras, förutom summa 32 PAH-ämnen, även de individuella PAH-ämnena naftalen och benso(a)pyren. Relativ cancerframkallande potential kan beräknas som benso(a)pyren toxiska ekvivalenter med hjälp av toxiska ekvivalensfaktorer (TEF) från vetenskaplig litteratur. TEF är en faktor som jämför ett individuellt PAH-ämnets toxicitet med benso(a) pyren. TEF finns för 16 PAH ämnen specificerade av US EPA (Wise m.fl., 2015).

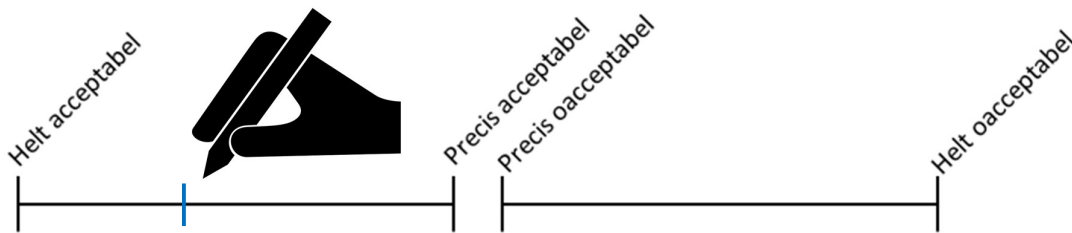
Ombord LNG-fartygen togs ytterligare luftprover på utvalda mätpunkter med avseende på halten metan. Luften pumpades in i gastäta teflonpåsar och metan i prover analyserades på en gaskromatograf med flamjoniseringsdetektor (Varian-450 GC-FID).

I det fall partiklar mättes användes en mini-Wras (Grimm Mini-WRAS 1371) som placerades ut under cirka 30 minuter i olika utrymmen på däck, i maskin och i inredningen. Instrumentet mäter och övervakar damm och nanopartiklar i realtid.

ENKÄTUNDERSÖKNING OM UPPLEVD LUFTKVALITET

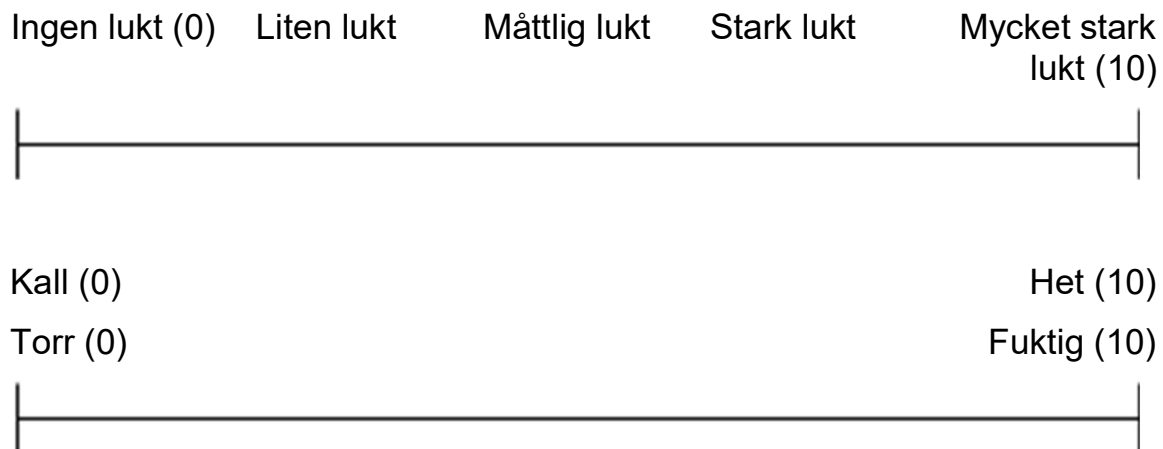
Besättningens upplevelse av luftkvalitet och termisk komfort ombord undersöktes genom en enkel enkät utvecklad för ändamålet. Enkäten delade ut till de personer som arbetade under mätperioden. I vissa fall svarade också personer från utbytesbesättningen. Enkäten omfattar fyra frågor som besvaras för både arbetsplatsen och för den egna hytten.

Den första frågan handlar om att bedöma acceptansen av luftkvalitet i allmänhet på en kontinuerlig skala (Figur 2). Denna skala rekommenderas för otränade respondenter som inte är vana att bedöma luftkvaliteten inomhus (Wargocki, 2004). Svaren kodas mellan +1 (helt acceptabel) och -1 (helt oacceptabel).



Figur 2. Enkätfråga om acceptans av luftkvalitet. Helt acceptabelt: +1, helt oacceptabelt: -1.

De följande tre frågorna handlar om upplevelsen av lukt och bedömning av den termiska komforten och luftens fuktighet. Denna bedömning gjordes på en horisontell visuell analog skala (VAS), se exempel i Figur 3. Svaren kodades på en skala mellan 0 och 10. I figurens exempel kodas svaren så att ingen lukt = 0 och mycket stark lukt = 10. På motsvarande sätt kodas upplevelsen av kall temperatur som 0 och het temperatur som 10, samt torr luft som 0 och fuktig luft som 10.



Figur 3. Exempel på enkätfrågor som besvaras på en horisontell visuell analog skala. Svaren kodas till ett numerärt värde från 0–10.

STATISTISKA ANALYSER

Resultaten har också analyserats med statistiska metoder. *Mann-Whitney U-test* används för parvis bedömning av statistiskt signifikanta skillnader av medianvärden. Ett ensidigt *t-test* har använts för att testa om uppmätta medelvärden värden i maskinutrymmen skiljer sig signifikant från värden uppmätta i övriga utrymmen. För en jämförelse mellan fartygen har skillnader i uppmätta värden mellan de sex fartygen beräknats genom ett *Kruskal-Wallis-test* baserat på medianvärden. Statistisk signifikans har definierats som $p \leq 0,05$ och innebär att den skillnad som observeras inte är slumpmässig.

BEDÖMNING AV ARBETSMILJÖ OCH SÄKERHET

Undersökningen av hur bränslebytet påverkar arbetsförhållanden, arbetsuppgifter och användandet av resurser för tid, material och liknande genom observationer, intervjuer och dokumentanalyser. Denna datainsamling ligger sedan till grund för uppgiftsanalyser, ett systematiskt sätt att beskriva uppgifter i olika människa–maskinsystem (Stanton, 2006). En uppgiftsanalys beskriver hur sysslor utförs och kopplingen mellan olika sysslor. Den kan också beskriva vem som utför arbetet och under vilka förhållanden som det görs. Uppgiftsanalyser är ett bra verktyg för att kunna påvisa de behov och krav som behöver vara uppfyllda för att uppgifterna ska kunna gå att utföra på ett säkert och effektivt sätt. Metoden har utvecklats under ett stort antal år och används inom många industrier, inklusive kärnkraft, offshore och transportbranschen.

FORSKNINGSETISKA ÖVERVÄGANDEN

I enlighet med Vetenskapsrådets (2017) forskningsetiska principer har forskningsarbetet inom projektet strävat efter en rimlig balans mellan två centrala intressen. Dessa utgörs dels av forskarnas kunskapsintresse och vilja att bidra till lärande och utveckling på individ- och samhällsnivå, dels av människors och organisationers rätt till integritet. Sjöfarten är en relativt liten bransch i Sverige. Redogörelsen för deltagande rederier, fartyg och personer hålls därför medvetet på en övergripande nivå för att ingen ska kunna identifieras mot sin vilja.

RESULTAT OCH DISKUSSION

I det här kapitlet presenteras en sammanfattning av projektets resultat, strukturerat efter forskningsfrågorna. Inledningsvis presenteras resultaten som beskriver de olika alternativens effekter på fartygets innemiljö och besättningens personliga exponering. De följs av resultaten från enkätundersökningen, en redogörelse för identifierade effekter på arbetsmiljö och säkerhet och hur dessa kan sättas i ett arbetsmiljöperspektiv.

EFFEKTER PÅ INNEMILJÖ OCH EXPONERING

Temperatur, relativ luftfuktighet och koldioxid

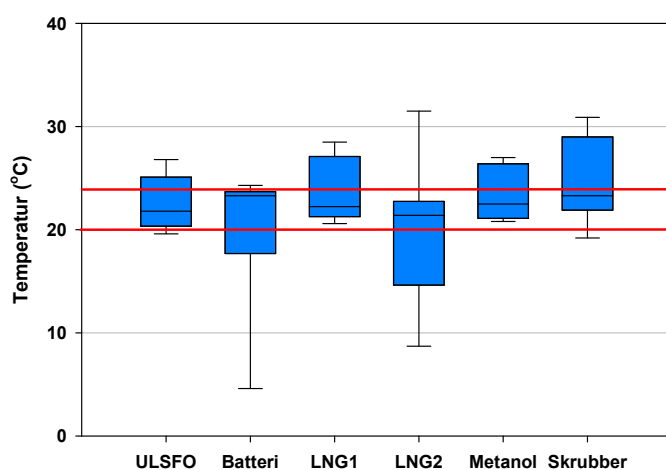
Tabell 4 redovisar medianvärden för stationärt uppmätt temperatur, RF och CO₂. Medianvärdena baseras på samtliga mätpunkter på alla undersökta fartyg. När alla fartygs resultat jämförs genom ett Kruskal-Wallis-test ser vi att det är statistiskt signifikanta skillnader i relativ luftfuktighet på de undersökta fartygen men inte vad gäller temperatur eller CO₂-halter. Signifikanta skillnader för en variabel kännetecknas här av ett p-värde <0,05.

Tabell 4. Medianvärden för temperatur, RF och CO₂ för samtliga mätpunkter på alla fartyg. Statistiskt signifikanta skillnader kännetecknas av p-värden <0,05.

	Temperatur (°C)	Luftfuktighet (%)	CO ₂ (ppm)
ULSFO	21,8	17	435
Batteri	23,3	25	428
LNG1	22,3	47	436
LNG2	21,4	29	479
Metanol	22,5	50	463
Skrubber	23,3	48	440
Kruskal-Wallis p-värde	0,497	<0,001	0,067

Medianvärden för temperatur, relativ luftfuktighet (RH) och koldioxidhalter (CO₂) från alla undersökta utrymmen på respektive fartyg, visas i Figur 4, Figur 5 och Figur 6.

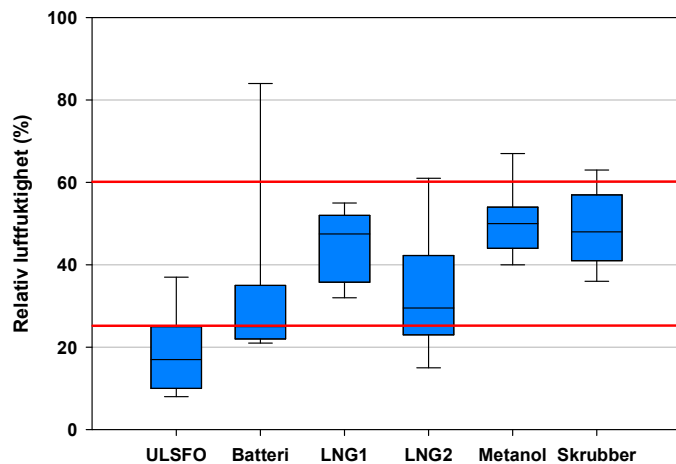
Som illustreras i Figur 4, låg temperaturerna i cirka 60% av fallen inom 20–24 °C som är Arbetsmiljöverkets rekommenderade inomhustemperatur för arbetsplatser (AFS 2020:1, allmänna råd till §124). I cirka 25% av fallen var temperaturen högre. Som kunde förväntas uppmättes de högsta temperaturerna i fartygens maskinrum.



Figur 4. Temperatur på fartygen i alla utrymmen. De röda linjerna markerar Arbetsmiljöverkets rekommenderade riktvärden för inomhustemperatur, 20–24 °C.

Luftfuktigheten hölls för det mesta inom de 25 – 60% som rekommenderas för innemiljöer (SS-EN 16798-1:2019). Ett undantag var fartyget med ULSFO-bränslet som genomgående hade låg luftfuktighet ombord (Figur 5). Låg luftfuktighet orsakar komfortproblem och obehag, såsom torra slemhinnor, torra händer och törst. Vid RF under 40% kan det också uppstå problem med statisk elektricitet. Utöver att det kan vara obehagligt med de stötar som uppstår kan det också orsaka skador på elektronisk utrustning.

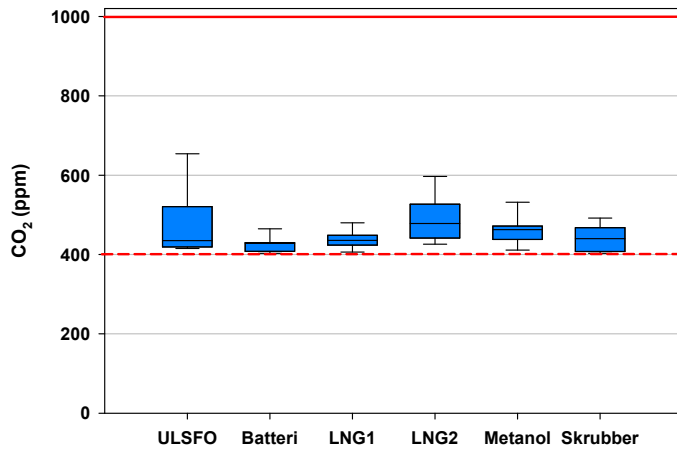
Luftfuktigheten varierar med årstiden och temperaturen. Vintertid är luftfuktigheten vanligtvis låg eftersom luften inte kan 'hålla' fuktigheten vid låga temperaturer. Ju kallare det är, desto lägre RF. Om luften värms, sjunker också luftfuktigheten.



Figur 5. Relativ luftfuktighet på fartygen i alla utrymmen. De röda linjerna markerar rekommenderade riktvärden för inomhus RF 25–60%.

Som kunde förväntas uppmättes också de lägsta RF-värdena under de mätningar som genomfördes under vinterperioden (ULSFO, batteri och LNG2). Högre värden uppmättes på ro-pax fartygens bildäck (batteri, LNG2, metanol och skrubber). De skillnader i luftfuktighet som ses i Tabell 4 kan därför snarare relateras till årstiden, än till någon påverkan av fartygens bränslen. Skillnaden mellan mätningarna som gjordes under sommar- respektive vinterperiod var starkt statistiskt signifikant (t-test, $p = 001$). Genomgående var luftfuktigheten lägre i maskinutrymmen jämfört med övriga utrymmen på alla fartyg, oavsett bränsletyp.

Halterna av CO_2 var mycket låga på samtliga fartyg och nära den atmosfäriska bakgrundshalten (Figur 6). Folkhälsomyndigheten rekommenderar att CO_2 -halten i inomhusluft inte överstiger 1 000 ppm (FoHMFS, 2014:18). Den halten har inte överskridits i någon mätpunkt på de undersökta fartygen. Det tyder på att fartygens utrymmen är välventilerade, något vi också har observerat i tidigare undersökningar.

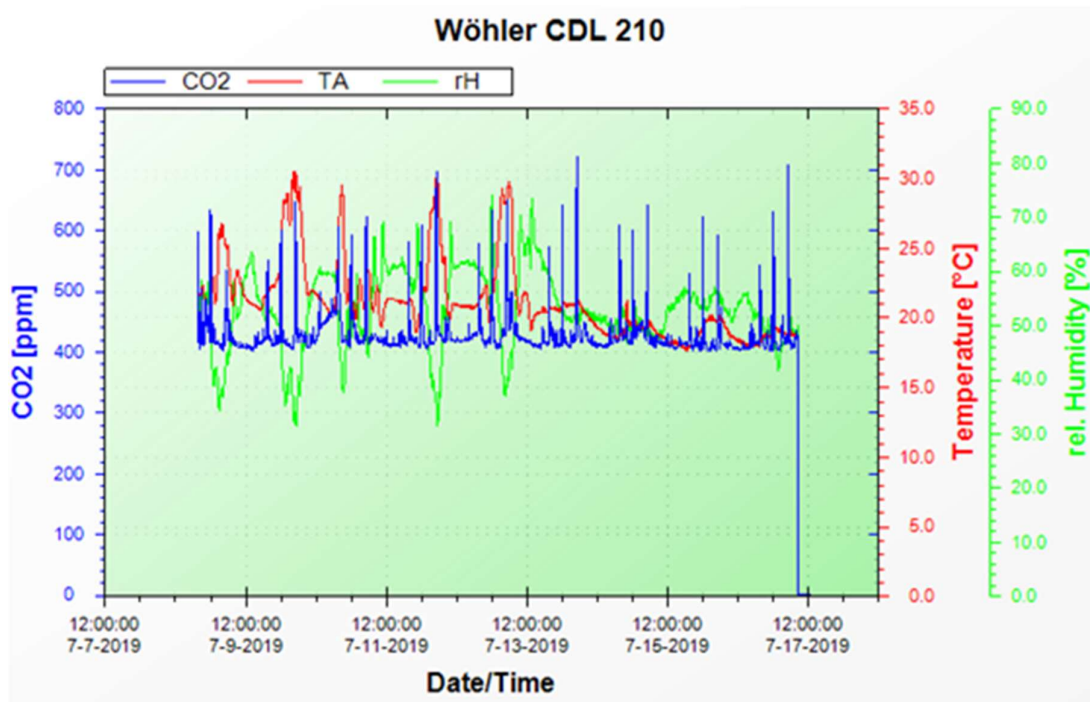


Figur 6. CO₂ halter på fartygen i alla utrymmen. Rak röd linje markerar riktvärde för inomhusmiljö 1 000 ppm; streckad röd linje markerar global bakgrundshalt om 400 ppm.

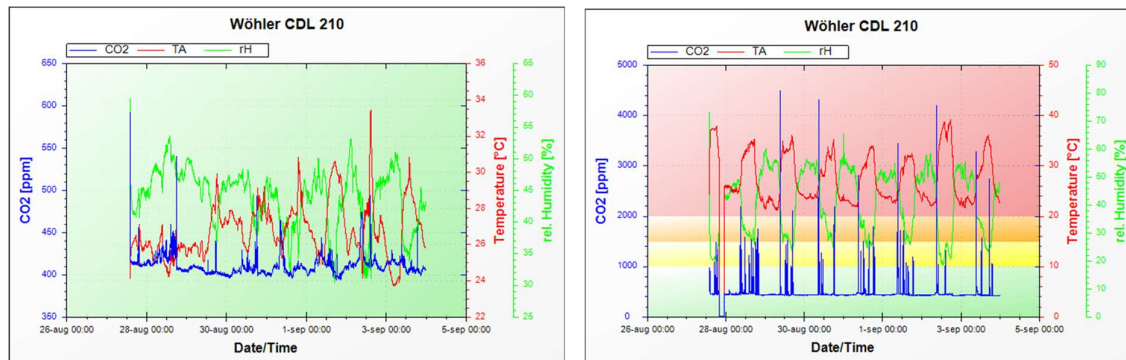
En mätning av luftomsättningen per timme (ACR; Air Change Rate) gjordes på ett av tidigare undersökta fartygen. ACR uppmättes då till mellan 40 – 80 ACR h⁻¹ (rumsvolym per timme) i maskinrummet och mellan 2,5 – 10 ACR h⁻¹ i övriga utrymmen. Den avsevärt högre halten i maskinrummet (pannrum, separatorrum) beror på att lufttillförseln är dimensionerad för motorerna. Som jämförelse föreskriver Folkhälsomyndigheten (2014:18) en luftomsättning på 0,5 ACR h⁻¹ för bostäder.

I inomhusmiljöer är människan den största källan till CO₂, cirka 4% av vår utandningsluft består av CO₂. Ett exempel på hur CO₂-halten kan variera i olika inomhusmiljöer beroende på mänsklig belastning illustreras i Figur 7 som visar CO₂-variationen i en fartygsmäss. Det syns tydligt hur CO₂-halten stiger i samband med att besättningen samlas för gemensamma måltider och fika.

I maskinutrymmen kan förhöjda värden tyda på avgasläckage. Figur 8 visar skillnader mellan två likadant utformade maskinrum på samma fartyg där det ena maskinrummet troligen har ett visst läckage av avgaser men det andra har inte det.



Figur 7. Den blå linjen visar CO₂-halter i massen. Halterna är låga. Topparna inträffar vid besättningens gemensamma måltider vid frukost, lunch och middag.



Figur 8. Blå linjerna visar CO₂-halten i två maskinrum. Extremtopparna i den högra bilden indikerar avgasläckage från motorer. Observera att y-axeln har olika skalor (CO₂ [ppm]). Till vänster visas CO₂ i 0–650 ppm och till höger i 0–5000 ppm.

Skillnader i temperatur, RH och CO₂-halter mellan maskinrum och övriga utrymmen undersöktes med ett ensidigt t-test (Tabell 5). Antagandet för den statistiska jämförelsen var att temperaturer och CO₂-halter var högre och RH var lägre i maskinrummen än i övriga utrymmen. Statistiskt signifikant skillnad indikeras här av p <0,05.

Tabell 5. p-värden från ensidigt t-test av medelvärden för temperatur, RH och halter CO₂ i maskinutrymmen och övriga utrymmen för alla fartyg. Statistisk signifikans kännetecknas av p <0,05 (i fet stil).

	Temperatur	RH	CO ₂
ULSFO	0,041	0,126	0,235
Batteri	0,118	0,135	0,448
LNG1	0,002	0,0003	0,066
LNG2	0,448	0,344	0,483
Metanol	0,0001	0,025	0,318
Skrubber	0,015	0,005	0,215

Som framgår av Tabell 5 var temperaturen betydligt högre i maskinrummen än i övriga utrymmen på fartygen med ULSFO, LNG1, metanol och skrubber. RH var betydligt lägre på fartygen med LNG 1, metanol och skrubber. Halterna av CO₂ skilde sig inte signifikant mellan maskinrum och övriga utrymmen på alla fartyg.

Sammanfattningsvis kan vi konstatera följande beträffande temperatur, RH och CO₂ på de undersökta fartygen:

- Bränsletypen har ingen generell påverkan på innetemperaturen ombord. Som förväntat är den ofta högre i maskinutrymmen än i övriga utrymmen.
- Relativ luftfuktighet ombord påverkas av årstiden. Lägsta värden uppmättes under vintertid.
- Koldioxidhalterna är genomgående mycket låga och nära den globala atmosfäriska bakgrundshalten (400 ppm) på alla fartyg. Det tyder på god ventilation ombord.

Luftföroreningar i fartygens innemiljö

I det här avsnittet presenteras och diskuteras resultaten från de stationära mätningarna för ämne för ämne. Alla uppmätta halter i samtliga mätpunkter på de sex fartygen låg under Arbetsmiljöverkets hygieniska gränsvärden (AFS 2018:1). De flesta är också under WHO:s eller andra myndigheters rekommenderade riktvärden för innemiljöer.

Medianvärden för samtliga mätpunkter på alla fartyg sammanfattas i Tabell 6. Högsta medianvärden markeras i rött och de lägsta markeras i blått. Medianvärdena för SO₂, NO₂, NO, TVOC och bensen anges i enheten µg/m³. För PAH, naftalen och B(a)P anges medianvärdena i enheten ng/m³. Statistiskt signifikanta skillnader kännetecknas av p-värden <0,05.

Tabell 6. Medianvärden av uppmätta halter för samtliga mätpunkter på alla fartyg. Statistisk signifikans kännetecknas av p <0,05 (i fet stil).

	SO ₂	NO ₂	NO	TVOC	Bensen	PAH	Naftalen	B(a)P
ULSFO	0,89	22	13	553	1,2	276	57	0,018
Batteri	0,30	19	7,0	72	0,40	95	7,4	0,011
LNG1	0,30	17	4,6	363	0,35	475	90	0,024
LNG2	0,37	10	4,2	125	1,60	185	22	0,041
Metanol	0,20	20	17	101	0,30	100	4,3	0,026
Skrubber	0,20	16	4,6	77	0,30	280	14	0,017
Kruskal-Wallis p-värde	0,020	0,397	0,020	<0,001	<0,001	0,014	<0,001	0,004

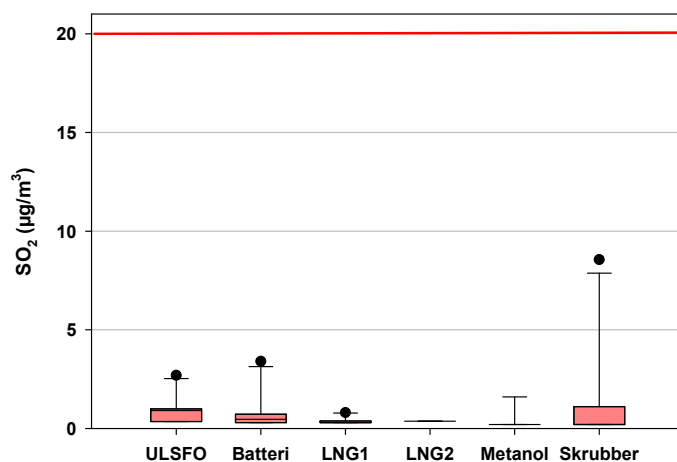
En jämförelse mellan alla fartyg med Kruskal-Wallis-test visar skillnader i alla variabler (halter av luftföroreningar), förutom koncentrationen av NO₂. Signifikanta skillnader för en variabel kännetecknas av ett p-värde <0,05. Resultaten tyder på att typ av bränsle spelade en roll på de undersökta fartygen.

Fartyget med ULSFO (3AUItraLS) var det högst kontaminerade med avseende på SO₂ och NO₂ från bränsleavgaser och TVOC från emissioner från bränslet. De lägsta halterna uppmättes till största del på det batteridrivna fartyget.

Skillnader mellan uppmätta halter av luftföroreningar som observerades på de två LNG-drivna fartygen kan spåras till lasten. Uppmätta halter av PAH samt naftalen, ett PAH-ämne, var högre på oljetankfartyget än på ropax-fartyget. Även TVOC-halten från oljeavdunstningen var förhöjd.

Uppmätta halter på ropax-fartygen med metanol och skrubber var låga. Det finns en misstanke om att det kan ha varit en avgasläcka i ett av maskinrummen på det metanol-drivna fartyget under mätperioden. Det skulle kunna förklara en något förhöjd halt av NO från motoravgaser.

Förekomsten av SO₂ i inomhusmiljön kan förknippas med förbränningsprodukter i motoravgaserna. Uppmätta medianhalter i samtliga utrymmen på alla fartyg visas i Figur 9. Alla mätvärden var långt under det hygieniska gränsvärdet på 1 300 µg/m³ (nivågränsvärde) och även lägre än riktvärdet för inomhusmiljöer på 20 µg/m³ för 24-timmars medelvärde.

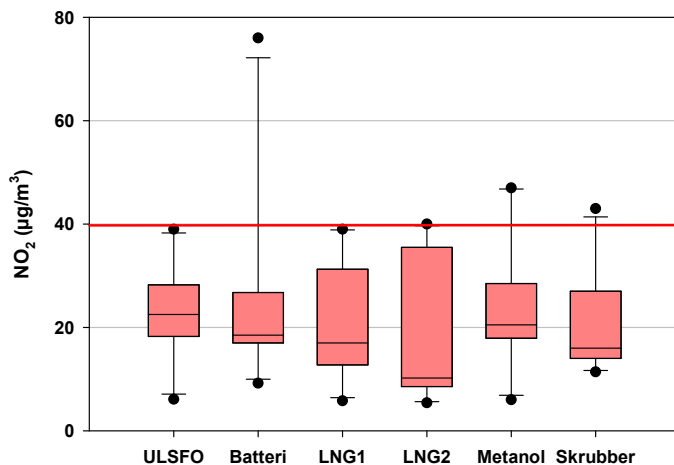


Figur 9. SO₂-halter i samtliga utrymmen på alla fartyg. Röd linje markerar riktvärde för inomhusmiljöer, 20 µg/m³.

Som kunde förväntas uppmättes de högsta mätvärdena i fartygens maskinrum. På LNG2-fartyget har låddiagrammet reducerats till ett streck som betyder halterna låg under mätmetodens detektionsgräns.

Även förekomsten av kvävedioxid (NO_2) kan förknippas med förbränningsprodukter i motoravgaser. Som framgår av Figur 10 var samtliga mätvärden på alla fartyg långt under det hygieniska gränsvärdet på $960 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (nivågränsvärde) och för det mesta även under riktvärdet för inomhusmiljön på $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (årsmedelvärde).

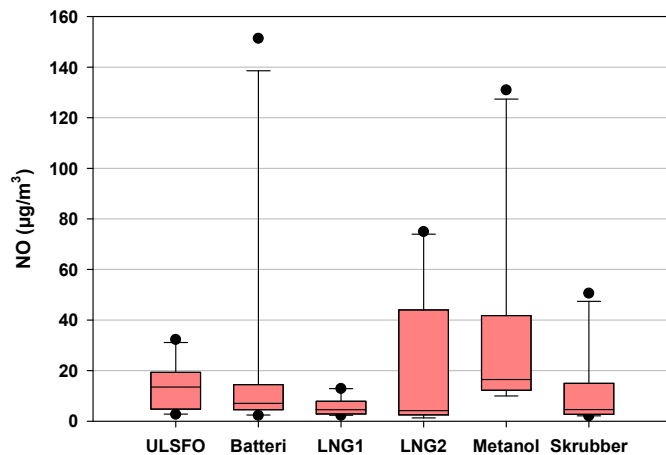
Generellt uppmättes högre halter i fartygens maskinrum, oavsett bränsletyp. Det högsta värdet uppmättes dock på det batteridrivna fartygets bildäck och är sannolikt orsakat av lastbilsavgaser.



Figur 10. NO_2 -halter i samtliga utrymmen på alla fartyg. Röda linje markerar riktvärdet för inomhusmiljö på $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

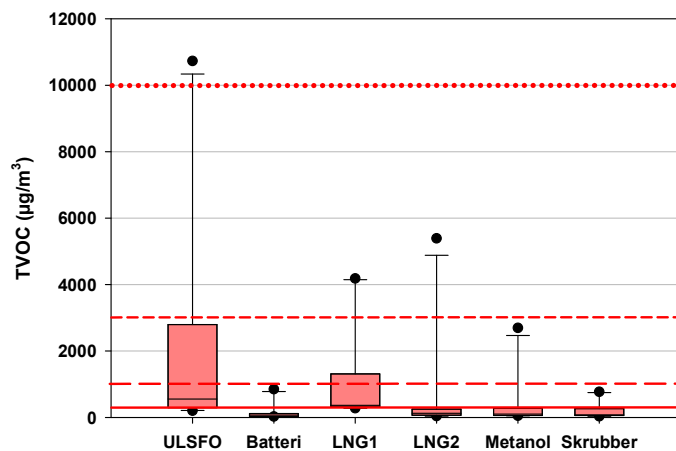
Kvävemoxid (NO) är den primära kväveoxid som bildas i förbränningsprocesser. Som illustreras av Figur 11 är uppmätta NO -halter i samtliga utrymmen på alla fartyg långt under det hygieniska gränsvärdet på $180\,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (nivågränsvärde). Det finns inget riktvärde för NO i inomhusmiljön. De högsta NO -värdena uppmättes på ropax-fartygens bildäck och de näst högsta värdena i maskinrum samt separatorrummet på det batteridrivna fartyget.

De höga NO halterna på bildäcken visar på vikten av att upprätthålla bra ventilation i dess utrymmen på fartyg.



Figur 11. NO-halter i samtliga utrymmen på alla fartyg.

Halterna av flyktiga organiska ämnen (TVOC) på alla fartygen visas i Figur 12. I Sverige saknas hygieniskt gränsvärde för totalhalten flyktiga organiska ämnen. Däremot finns det gränsvärden för enskilda kolväteföreningar, som exempelvis bensen. Som framgår av Tabell 1 finns det också rekommenderade riktvärden för TVOC i innemiljön, som anger gränser baserade på hygienisk (o)säkerhet.



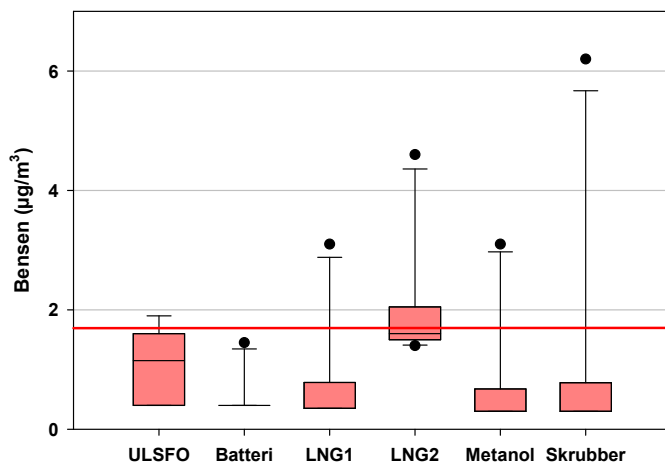
Figur 12. TVOC-halter i samtliga halter på alla fartyg. Röd heldragen linje markerar $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$, röd långsträckt linje $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$, röd kortsträckt linje $3000 \mu\text{g}/\text{m}^3$, och röd prickad linje markerar $10000 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Halter över $10000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ anses som hygieniskt oacceptabelt.

För att sätta resultaten i relation till dessa rekommendationer är gränserna inlagda i Figur 12. Den röda heldragna linjen markerar den 300 µg/m³ som är den TVOC-halt som kan anses hygieniskt säker. Röd långstreckad linje markerar 1 000 µg/m³, som anses säkert så länge riktvärdena inte överskrids för enskilda ämnen eller ämnesgrupper.

Den röda kortstreckade linjen anger den hygieniskt märkbara gränsen, 3000 µg/m³, och den röda prickade linjen den hygieniskt alarmerande gränsen om 10 000 µg/m³. Halter över 10 000 µg/m³ anses som hygieniskt oacceptabelt.

Flyktiga organiska ämnen avdunstar från bränslen och smörjmedel. Genomgående uppmättes de högsta TVOC-halterna i fartygens separatorrum och de näst högsta i andra maskinutrymmen. Även vissa förrådsutrymmen, som kemikalierummet på ULSFO-fartyget, förrådet på LNG1-fartyget, samt på två av ropax-fartygens bildäck hade förhöjda halter.

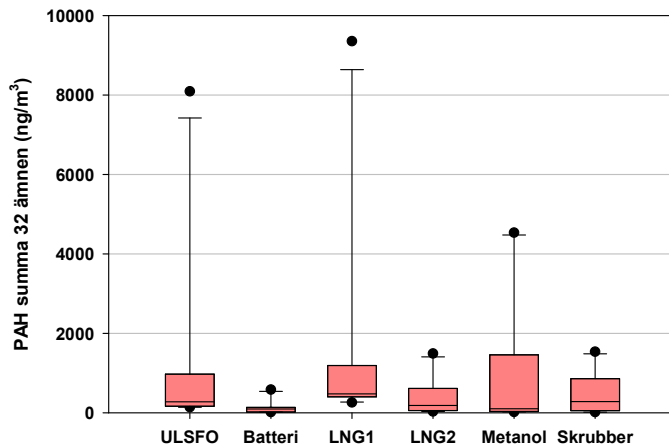
Halterna av bensen i samtliga utrymmen på alla fartyg visas i Figur 13. Bensen är ett flyktigt organiskt ämne som är cancerframkallande för människor. Samtliga mätvärden var långt under det hygieniska gränsvärdet på 1 500 µg/m³ (nivågränsvärde) och för det mesta även under det hälsobaserade riktvärdet för livslång exponering på 1,7 µg/m³.



Figur 13. Bensenhalter i samtliga utrymmen på alla fartyg. Röd linje markerar det hälsobaserade riktvärdet för livslång exponering på 1,7 µg/m³.

De högsta värdena uppmättes i fartygens separatorrum, samt på ropax-fartygens bildäck. Bensenhalterna på det batteridrivna fartyget låg under mätmetodens detektionsgräns och markeras därför ett sträck i stället för en stapel i låddiagrammet.

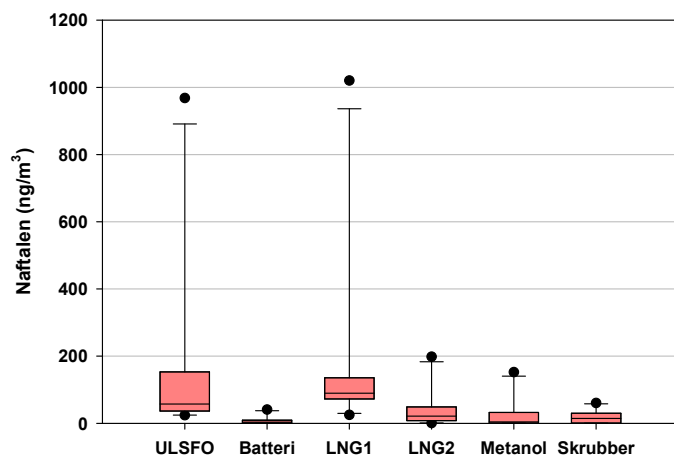
Polycykliska aromatiska kolväten (PAH) är produkter från ofullständig förbränning samt finns i och dunstar från bränslen i olika utsträckning. Halterna av PAH (summan av 32 PAH-ämnen) i samtliga utrymmen på alla fartyg visas i Figur 14. Eftersom PAH är en samling av många ämnen kan det inte sättas ett gräns- eller riktvärde. De högsta PAH-halterna påvisades i alla fartygens separatorrum. De utstickande värden bland de högsta härstammar from ULSFO-fartygets separatorrum och från LNG1-fartygets förråd.



Figur 14. Summan av 32 PAH-ämnen i samtliga utrymmen på alla fartyg. Observera att halterna anges i enheten ng/m³.

Uppmätta halter av naftalen på alla fartyg visas i Figur 15. Alla halter låg mycket under det hygieniska nivågränsvärdet på 50 000 µg/m³ = 50 000 000 (femtio miljoner!) ng/m³. De låg även under riktvärdet för inomhusmiljö på 10 µg/m³ = 10 000 ng/m³. Naftalen är ett av de 32 PAH-ämnena som analyseras i provet och det är ofta halten naftalen som drar upp halterna av 32 PAH-summan.

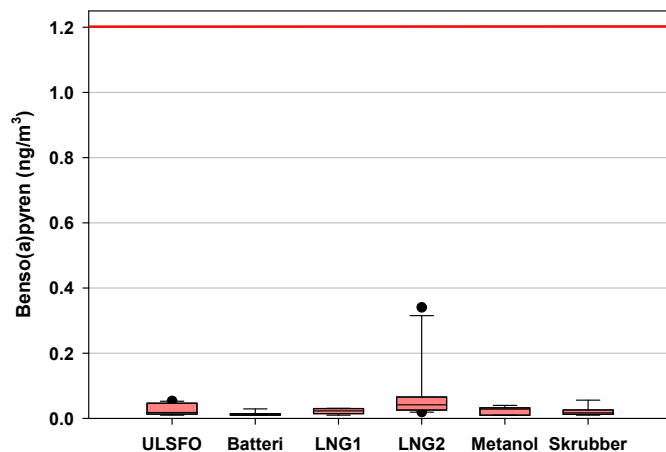
I likhet med PAH-halterna i Figur 14 var naftalenhalterna högst i fartygens separatorrum, samt i förrådet på LNG1-fartyget. Men observera att även de högsta värdena fortfarande var på en nivå av en tiondedel av riktvärdet.



Figur 15. Naftalenhalter i samtliga utrymmen på alla fartyg. Observera att halterna anges i enheten ng/m^3 .

Halterna av benso(a)pyren (B(a)P) i samtliga utrymmen på alla fartyg visas i Figur 16. Alla B(a)P halter låg mycket under det hygieniska nivågränsvärdet på $2 \mu\text{g/m}^3 = 2000 \text{ ng/m}^3$, samt också under riktvärdet för inomhusmiljö på $1,2 \text{ ng/m}^3$. Det värde som sticker ut är B(a)P-halten i maskinrummet på LNG2. Detta värde är ett avvikande värde och troligen ett resultat av slumpen (testat för så kallade 'outliers').

B(a)P-halterna på det batteridrivna fartyget låg mycket nära eller under mätmetodens detektionsgräns och markeras därför med ett streck i stället för en stapel i låddiagrammet. Generellt påvisades förhöjda halter av SO_2 , NO_2 och NO från motoravgaser samt TVOC från bränslen och smörjmedel samt PAH, inklusive naftalen, från både bränslen och motoravgaser i fartygens maskinrum och separatorrum.



Figur 16. Benso(a)pyrenhalter i samtliga utrymmen på alla fartyg. Observera att halterna anges i enheten ng/m³.

Tabell 7 visar resultaten av en statistisk jämförelse mellan halterna av luftföroreningar i maskinutrymmen (maskinrum, separatorrum, maskinkontrollrum), och övriga utrymmen (brygga, byssan, mäss, hytt, dagrum och liknande). Bildäcken på ropax-fartygen, förrådsutrymmen, samt utomhusluft var utelämnade från beräkningen eftersom luftföroreningarna där kommer från andra källor än från det egna fartygsbränslet.

Tabell 7. p-värden från ett ensidigt t-test av medelvärden för de enskilda luftföroreningarna i maskinutrymmen och övriga utrymmen på alla fartyg. Statistisk signifikans kännetecknas av p < 0,05 (i fet stil).

	SO ₂	NO ₂	NO	TVOC	Bensen	PAH	Naftalen	B(a)P
ULSFO	0,122	0,178	0,240	0,0001	0,009	0,052	0,055	0,003
Batteri	0,372	0,371	0,279	0,087	0,204	0,115	0,111	0,268
LNG1	0,022	0,0002	0,004	0,277	0,043	0,045	0,037	0,067
LNG2	0,500	0,061	0,084	0,154	0,167	0,078	0,165	0,112
Metanol	0,134	0,379	0,305	0,114	0,293	0,027	0,060	0,067
Skrubber	0,0923	0,051	0,074	0,070	0,178	0,001	0,071	0,170

Maskinrummet var mera förorenat än övriga utrymmen på ULFSO-fartyget, med avseende på TVOC, inklusive bensen, och benso(a)pyren. Så var även fallet på oljetankfartyget LNG1 med avseende på SO₂, NO₂, NO, bensen och naftalen, samt på metanol- och skrubberfartygen med avseende på PAH. Att inte fler skillnader mellan maskinutrymmen och övriga utrymmen är signifikanta kan bero på att halterna i maskinrummen generellt är låga.

Halter metan var i samma nivå som atmosfäriska bakgrundshalter <5 ppm på samtliga mätplatser på LNG-fartyg.

Sammanfattningsvis kan vi konstatera följande, vad gäller resultaten från mätningarna av luftföroreningar i fartygens innemiljö:

- Samtliga halter låg mycket under Arbetsmiljöverkets hygieniska gränsvärden (AFS 2018:1). De flesta var även lägre än de hälsobaserade riktlinjer som använts för jämförelse.
- Som kunde förväntas var maskinutrymmen ofta mera kontaminerade än andra utrymmen ombord. Särskilt med avseende på flyktiga organiska ämnen och PAH-ämnen avdunstade från bränslen och smörjmedel, eller SO₂ och NO₂ från motoravgaser.
- Förhöjda halter av luftföroreningar som uppmätts på fartyg med renare bränslen som LNG och metanol, kan troligen förklaras av att tilluften ombord kontamineras av fartygets last på oljetankfartyg, eller oavsiktliga läckage i maskinrum.

Personlig exponering

I det här avsnittet presenteras och diskuteras resultaten från de personburna mätningarna ämne för ämne. Alla uppmätta halter för samtliga personer låg under Arbetsmiljöverkets hygieniska gränsvärden (AFS 2018:1). De flesta är också under WHO:s eller andra myndigheters hälsobaserade rekommendationer. Även om inga personburna mätningar genomfördes på batterifartyget så ligger kolumnen 'batteri' kvar, för att få samma format som för de stationära mätningarna.

Det är viktigt att påpeka att i denna undersökning mäts endast exponeringen som sker via luften och inandning. Upptag av vissa av dessa ämnen sker också via huden.

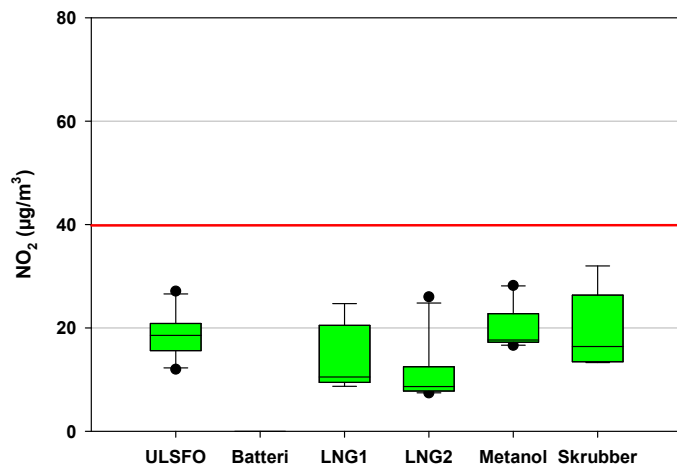
Tabell 8 visar medianvärden för den personlig exponering som undersökts, tillsammans med resultaten av det statistiska Kruskal-Wallis-testet som undersöker skillnader för besättningarnas exponering mellan fartygen. Ett p-värde <0.05 tyder på att fartygets bränsletyp spelar roll för personalens exponering. Så är fallet för alla luftföroreningar men i olika omfattning. Högsta medianvärden för de enskilda luftföroreningarna anges med röda tecken och lägsta medianvärden med blå tecken.

Tabell 8. Medianvärden för personlig exponering för luftföroreningar för alla mätpunkter på alla fartyg. Värden för NO₂, TVOC och bensen anges i µg/m³. PAH, naftalen och B(a)P) anges i ng/m³ Statistiskt signifikanta skillnader kännetecknas av p <0,05 (i fet stil).

	NO ₂	TVOC	Bensen	PAH	Naftalen	B(a)P
ULSFO	19	1600	0.9	520	76	0,089
Batteri	---	--	--	--	--	--
LNG1	11	598	0.8	680	100	0,019
LNG2	9	518	1.5	210	20	0.18
Metanol	18	290	0.3	110	5.6	0.05
Skrubber	16	250	0.3	100	0.6	0.05
Kruskal-Wallis p-värde	0,002	0,012	<0,001	0,008	<0,001	0,003

Bland alla besättningar var personalen på UPFSO fartyget mest exponerade för NO₂ och TVOC, personalen på oljetankfartyget (LNG1) för PAH inklusive naftalen och besättningen på LNG2-fartyget för B(a)P. De lägsta exponeringarna påvisades för personalen på skrubberfartyget och till viss del på de andra fartygen fast för olika ämnen och ämnesgrupper.

Som framgår av Figur 17 låg alla exponeringar under riktvärdet för NO₂, 40 µg/m³ (markerat i figuren med röd linje). Alla uppmätta halter låg med mycket god marginal under det hygieniska gränsvärdet på 960 µg/m³.

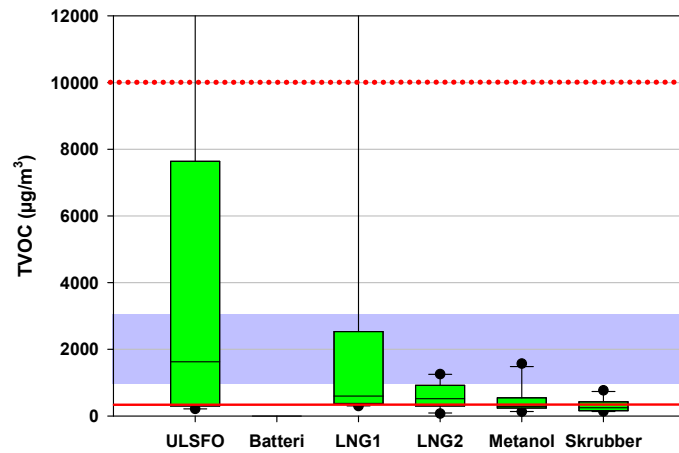


Figur 17. Personlig exponering för kvävedioxid för alla personer (n=50) på alla fartyg. Röd streckad linje visar riktvärdet för god inomhusluftskvalitet på 40 µg/m³.

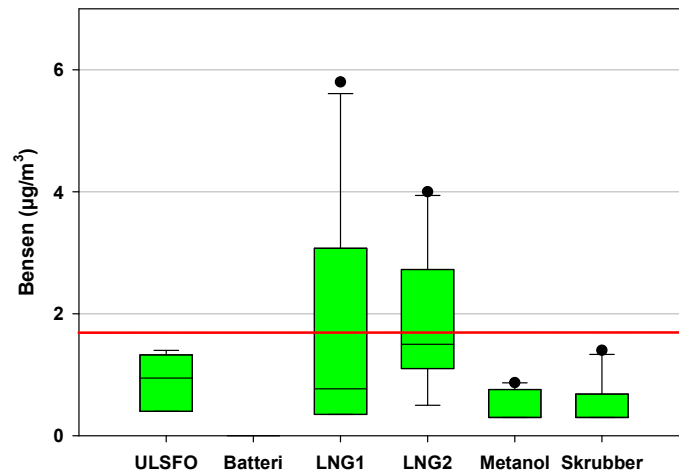
Som illustreras av låddiagrammen i figuren varierar fartygens NO₂-halter både mellan de olika fartygen (vissa fartyg har högre medianvärden än andra) och inom fartygen, där olika personer ombord exponeras för olika höga halter. Högsta exponeringar för NO₂ uppmättes för fartygsingenjörer på ULSFO- och LNG1-fartygen samt för matroser på de andra fartygen.

Figur 18 visar uppmätta halter av TVOC för alla personer på alla fartyg. Som tidigare nämnts finns inga gränsvärden för TVOC. Halter mellan 1–3 mg/m³ (1 000 – 3 000 µg/m³) bör inte överskridas i inomhusmiljöer där människor vistas stadigvarande (alltså längre än enstaka dagar). Även om halterna över 10 mg/m³ (10 000 µg/m³) anses som hygieniskt oacceptabelt kan dessa halter förekomma under särskilda situationer, till exempel under vissa typer av arbeten på fartygen så som renovering, rengöring och målning.

Däcks- och maskinmanskap var mest exponerade för flyktiga organiska ämnen på alla fartyg. Det högsta uppmätta TVOC-värdet, som vida översteg riktvärdet på 10 000 µg/m³, påvisades för en matros som utförde målningsarbeten (21 000 µg/m³), en däckselev som utsattes för avdunstningar från bränslet (15 000 µg/m³) på ULFSO-fartyget, samt för en motorman på LNG1-fartyget som utförde målningsarbeten (21 000 µg/m³).



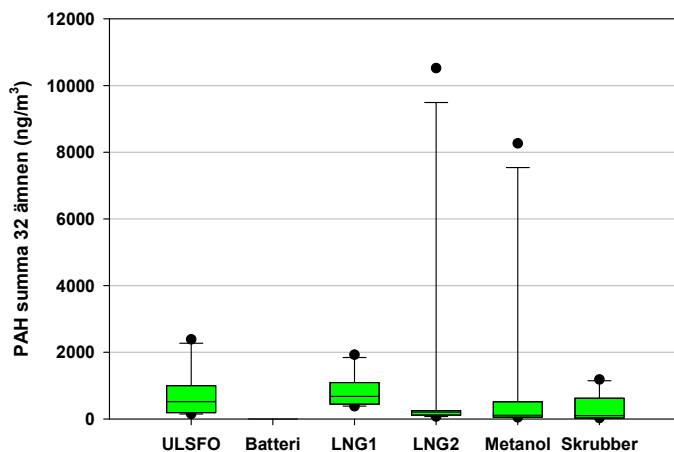
Figur 18. Personlig exponering för TVOC för samtliga personer (n=50) på alla fartyg. Röd rak linje visar långtidsriktvärde 300 µg/m³. Röd prickad linje visar halter som är hygieniskt oacceptabla. Den lila boxen visar det haltområde som inte bör överskridas för inomhusmiljöer där människor stadigvarande vistas.



Figur 19. Personlig exponering för bensen för samtliga personer (n=50) på alla fartyg. Röd linje visar WHO:s riktvärde för livslång exponering på 1,7 µg/m³.

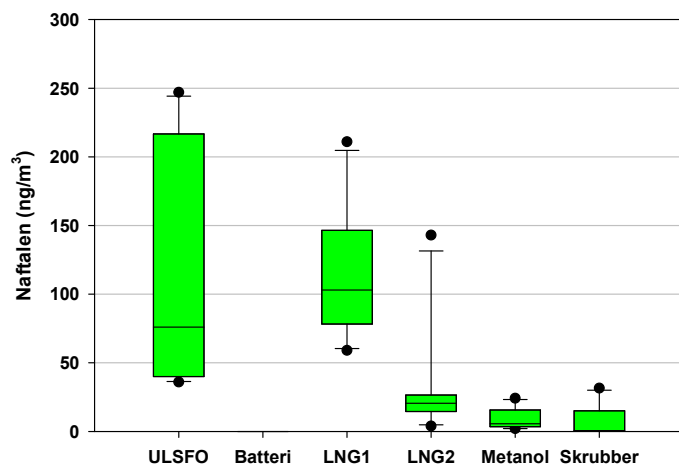
Halterna av bensen (Figur 19) låg långt under det hygieniska gränsvärdet på 1 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Som framgår av figuren låg de flesta exponeringar under riktvärdet för bensen, 1,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (markerat i figuren med en röd linje). Halterna över riktvärdet observerades hos sex personer (12%). De högsta exponeringar för bensen uppmättes för en motorman och en matros på LNG1-fartyget, för en matros och två styrmän på LNG2-fartyget samt för en matros på skrubber-fartyget. WHO:s hälsobaserade riktvärde på 1,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ för god luftkvalitet inomhus härstammar från bedömningen av risken för leukemi på 1 av 100 000, under hela livet och för alla i befolkningen, inklusive känsliga populationsgrupper. Riktvärdet är alltså inte tänkt att direkt tillämpas för bedömning av yrkesmässig exponering utan används här i jämförande syfte. Tidigare studier har visat att yrkesmässig exponering även för lägre halter av bensen under gränsvärdet kan ge andra typer av hälsobesvär utöver cancer, bland annat sömnsvårigheter, yrsel och huvudvärk (Huang m.fl., 2016).

Figur 20 visar exponering för polycykliska aromatiska kolväten (summa av 32 PAH ämnen). Observera att de uppmätta halterna av PAH samt benso(a)pyren och naftalen här redovisas i enheten ng/m^3 till skillnad från de tidigare ämnena som redovisades i $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

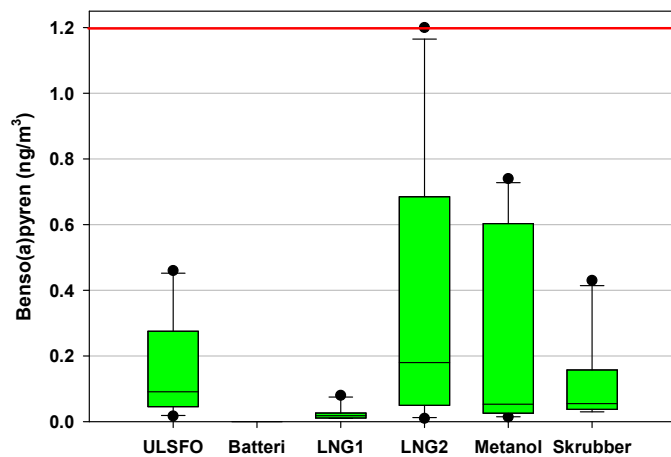


Figur 20. Personlig exponering för PAH (summa av 32 ämnen) för alla personer (n=50) på alla fartyg. Halterna anges i enheten ng/m^3 .

I likhet med TVOC, finns det inga riktvärden för den samlingen av PAH ämnen. Extremvärden har observerats för en motorman på LNG2-fartyget (11 000 ng/m³) samt en fartygsingenjör på det metanoldrivna fartyget (8 200 ng/m³). Det kan tyda på tillfälliga arbetsuppgifter.



Figur 21. Personlig exponering för naftalen för samtliga personer (n=50) på alla fartyg. Halterna anges i enheten ng/m³.



Figur 22. Personlig exponering för benso(a)pyren för alla personer (n=50) på alla fartyg. Halterna anges i enheten ng/m³.

Exponeringen för naftalen (Figur 21) låg med mycket god marginal under det hygieniska gränsvärdet på 50 000 µg/m³ = 50 000 000 ng/m³ i samtliga mätningar. Det utgör fem storleksordningar högre än medianvärdena av de uppmätta halterna. Samtliga halter ligger också under WHO:s hälsobaserade riktvärde på 10 000 ng/m³. Högst exponering observerades för en fartygsingenjör på ULSFO-fartyget, samt för maskinmanskap på båda LNG-fartygen.

Uppmätta halter av benso(a)pyren (Figur 22) låg med mycket god marginal under det hygieniska gränsvärdet på 2 000 ng/m³ i alla mätningar samt under WHO:s hälsobaserade riktvärde på 1,2 ng/m³ i nästan alla mätningar på samtliga fartyg. WHO:s värde härstammar från bedömningen av risken för cancer på 1 av 10 000, under hela livet och för hela befolkningen, inklusive känsliga populationsgrupper. Högsta värden uppmättes för en matros på LNG2-fartyget (1,2 ng/m³), fartygingenjörer på ULSFO- och metanol-fartyget, samt maskinmanskap på skrubberfartyget.

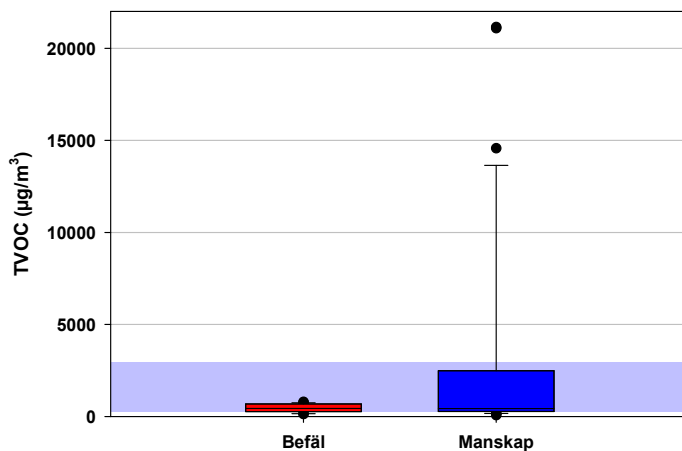
Den personliga exponeringen var långt under hygieniska gränsvärden och de flesta även under riktvärden för allmänna inomhusmiljöer. Fartygsingenjörer, matrosar och maskinmanskap var mest exponerade. Resultaten av exponeringsmätningarna jämfördes för **personalkategorierna** befäl respektive manskap (Tabell 9), samt för personal som arbetar inom de olika **avdelningarna** däck, maskin och intendentur, både befäl och manskap (Tabell 10).

Tabell 9. Medianhalter för personlig exponering på alla fartyg för personalkategorierna befäl respektive manskap, samt p-värden från statistiska tester. Halter för NO₂, TVOC och bensen anges i µg/m³ och halter för PAH, naftalen, B(a)P anges i ng/m³. Statistiskt signifikanta skillnader kännetecknas av p-värden <0,05.

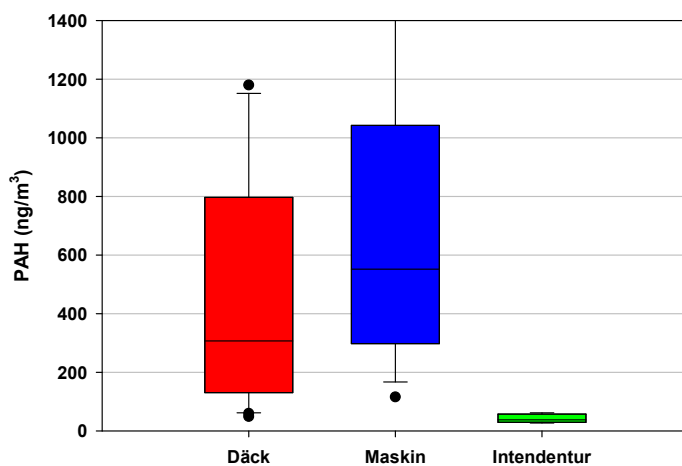
Personalkategori	NO ₂	TVOC	Bensen	PAH	Naftalen	B(a)P
Befäl	14	437	0,40	359	38	0,052
Manskap	17	432	0,79	168	14	0,056
Mann-Whitney p-värde	0,289	0,332	0,424	0,150	0,060	0,435

Baserat på p-värdet från Mann-Whitney U-test för parvisa jämförelser av medianer ses inga statistiskt signifikanta skillnader mellan befäl och manskap, även om medianerna kan tyckas olika mellan kategorierna. Statistisk signifikans av skillnaden kännetecknas av $p < 0,05$.

Figur 23 visar ett exempel på personlig exponering för TVOC för befäl respektive manskap. Även om medianvärden är lika ($437 \mu\text{g}/\text{m}^3$ för befäl och $432 \mu\text{g}/\text{m}^3$ för manskap) är vissa befattningar, framför allt motormän och matroser, i allmänt betydligt mera exponerade.



Figur 23. Personlig exponering för TVOC för befäl ($n=20$) och manskap ($n=30$) för samtliga alla fartyg. Den lila boxen visar det område som enligt UBA anses hygieniskt säkert med avseende på TVOC halter.



Figur 24. Personlig exponering för PAH för avdelningarna däck ($n=25$), maskin ($n=16$) och intendentur ($n=9$), alla fartyg.

Figur 24 visar exponering för PAH (summa 32 ämnen). Motsvarande låddiagram för de andra luftföroreningarna är mera monotona. Det fanns skillnader i exponering för PAH, naftalen och benso(a)pyren för personalen i de olika avdelningarna.

Totalt sett över alla fartyg uppvisar maskinavdelningen de högsta halterna av de analyserade PAH-ämnena (Figur 24), följt av däck- och intendenturavdelningarna. Skillnaden i exponeringen kan troligen härröras till maskinpersonalens högre exponering för bränsle, smörjoljor och avgaser i sitt arbete.

Intendenturpersonalen exponeras avsevärt och signifikant lägre än personalen i de andra två avdelningarna; skillnaderna mellan däck- och maskinavdelning var inte signifikanta. det vill säga att de inte påvisar några uppseendeväckande skillnader.

Medianhalter av alla luftföroreningarna för avdelningar däck, maskin och intendentur presenteras i Tabell 10. Här användes ett Kruskal-Wallis-test för jämförelse av tre medianer för den statistiska signifikansen av skillnader. Ett p-värde <0,05 tyder på att skillnaden är riktig.

Tabell 10. Medianhalter för personlig exponering på alla fartyg per avdelning däck, maskin och intendentur, samt p-värden från statistiska tester. Halter för NO₂, TVOC och bensen anges i µg/m³ och halter för PAH, naftalen, B(a)P) anges i ng/m³. Statistiskt signifikanta skillnader kännetecknas av p-värden <0,05 (i fet stil).

Avdelning	NO ₂	TVOC	Bensen	PAH	Naftalen	B(a)P
Däck	16	444	0,67	234	36	0,082
Maskin	18	699	0,83	693	49	0,051
Intendentur	13	287	0,30	56	3,0	0,029
Kruskal-Wallis p-värde	0,133	0,719	0,632	<0,001	<0,001	<0,001

Slutligen kan följande sammanfattas om besättningens personliga exponering för luftföroreningar:

- Den personliga exponeringen för enskilda luftföroreningar var olika men det ses inga systematiska skillnader, med avseende på de olika driftsalternativen som undersökts.
- Samtliga uppmätta halter låg mycket under Arbetsmiljöverkets hygieniska gränsvärden (AFS 2018:1). De flesta var även lägre än rekommenderade riktvärden för inomhusmiljö, eller inom gränser för vad som anses vara hygieniskt säkra halter.
- Förhöjd exponering observerades för TVOC på ULSFO-fartyget och bensen på båda LNG fartygen. Dessa resultat är troligen relaterade till arbetsuppgifter snarare än fartygens inomhusmiljö och bränsle.
- Skillnaden mellan exponering för befäl och manskap var inte statistiskt signifikant.
- Maskinrumspersonal, både befäl och manskap, är generellt exponerade för högre halter än övrig besättning ombord.

RESULTAT ENKÄTUNDERSÖKNING

I Tabell 11 ses en sammanställning av svaren från enkätundersökningen. Totalt besvarades enkäten av 94 personer på fem av de sex fartygen som omfattas av undersökningen. På ett av fartygen bor besättningen till största del hemma under sin tjänstgöring varpå de inte kan svara på upplevelser av inomhusmiljön i hytten. Enkäten lämnades ut både till de personer som bar personliga provtagare och till andra i besättningen som var ombord vid första mättillfället. I de flesta fall har delar av besättningen bytts ut under mätperioden vilket gör det svårt att uppskatta svarsfrekvensen. På passagerarfartygen kan besättningens storlek variera under en vecka och det har varit svårare att nå samtliga. Av praktiska och ekonomiska skäl är det inte möjligt att låta alla personer ur besättningen bära personliga provtagare på samtliga fartyg. Därför är det fler enkätsvar än mätningar.

Samtliga enkätsvar utvärderades med avseende på hur luftkvaliteten upplevs dels på arbetsplatsen, dels i den egna hytten. Först presenteras resultaten för alla personer på alla fartyg, följt av de skillnader och likheter som kan ses mellan befäl och manskap, samt mellan de olika avdelningarna ombord.

Tabell 11. Sammanställning av antal besvarade enkäter per fartyg/bränsletyp, uppdelat per avdelning och befattning.

Fartyg	Antal enkäter	Däck	Maskin	Intendentur	Befäl	Manskap
ULSFO	17	10	7	0	8	9
Batteri *	0	0	0	0	0	0
LNG 1	10	6	4	0	6	4
LNG 2	17	8	8	1	9	8
Metanol	27	16	8	3	7	20
Skrubber	23	10	10	3	5	18
Totalt	94	50	37	7	35	59

* Enkätundersökningen genomfördes inte på fartyget med batteridrift.

Resultat summerat för alla fartyg

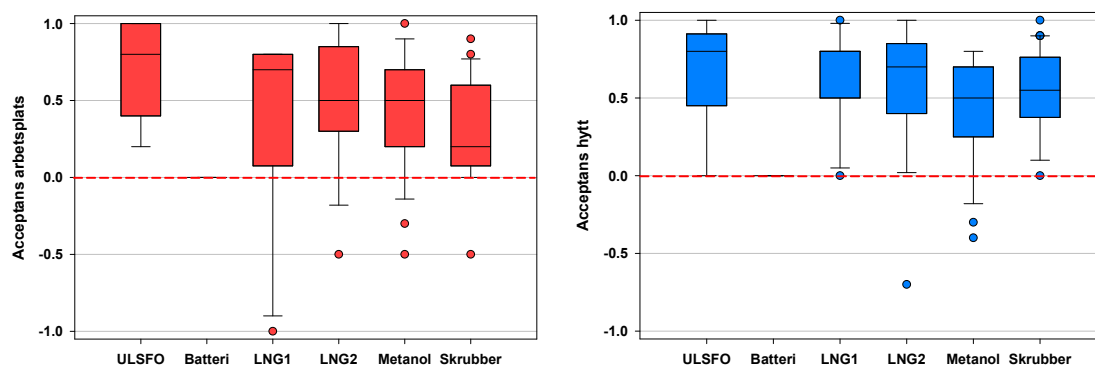
I detta avsnitt presenteras besättningens generella upplevelse av luftkvalitet, luktintensitet, temperatur och luftfuktighet (termisk komfort) på sin arbetsplats, respektive hytt. Även om enkätundersökningen inte genomfördes på batterifartyget så finns det representerat i diagrammen i enlighet med tidigare figurer som visar resultat per fartyg.

Tabell 12 visar en sammanställning av enkätsvaren. Skalan för upplevelse av luftkvalitet sträcker sig från +1 (helt acceptabel) till -1 (helt oacceptabel). Noll på upplevelseskalan delar dessa två åsikter och tolkas som att luften är precis acceptabel.

Tabell 12. Medianvärden för enkätsvaren om acceptansen av luftkvalitet, luktintensitet, temperatur och luftfuktighet på arbetsplatsen och i den egna hytten.

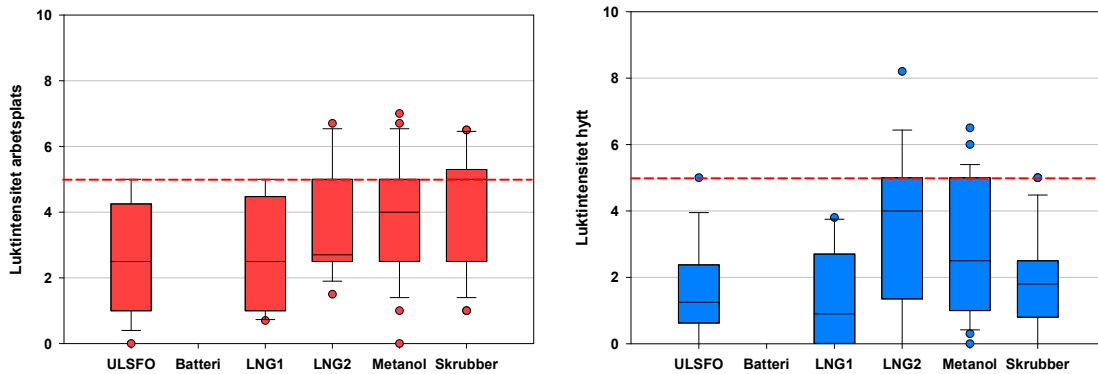
Bränsle	Arbetsplats				Hytt			
	Q1 accept	Q2 lukt	Q3 temp	Q4 fukt	Q1 accept	Q2 lukt	Q3 temp	Q4 fukt
ULSFO	0.8	2.5	5.0	0.90	0.8	1.3	5.0	1.25
Batteri	---	---	---	---	---	---	---	---
LNG1	0.7	2.5	5.0	4.5	0.8	0.9	5.0	2.0
LNG2	0.5	2.7	5.0	2.4	0.7	4.0	5.0	1.8
Metanol	0.5	4.0	5.0	1.1	0.5	2.5	5.0	1.0
Skrubber	0.2	5.0	3.7	1.5	0.6	1.8	5.0	1.0

Som framgår av Figur 25 upplevs luftkvaliteten ombord generellt sett som acceptabel (ett värde mellan 0 och +1) både på arbetsplatsen och i den egna hytten. Skillnaden i upplevelsen av luftkvalitet mellan arbetsplatsen och hytten för alla besättningar på alla fartyg var inte statistiskt signifikant (median arbetsplats: 0,5; median hytt 0,6; Mann-Whitney $p = 0,119$).



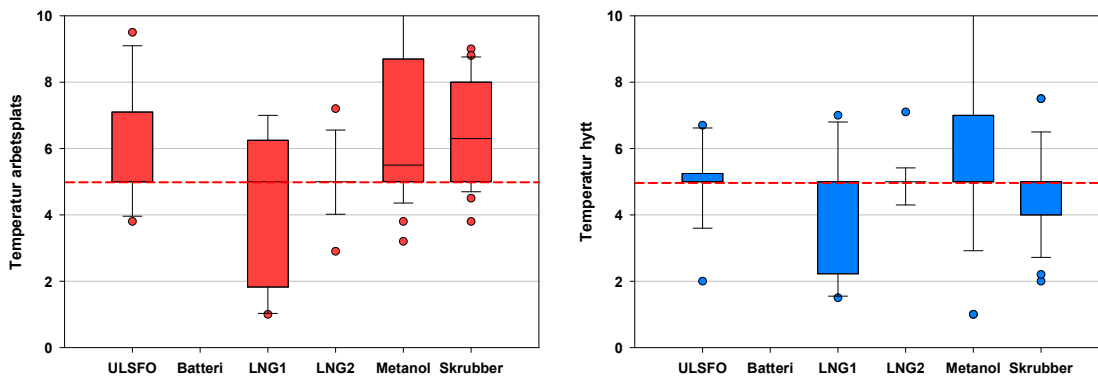
Figur 25. Sammanställning av besättningens upplevda luftkvalitet på arbetsplatsen (vänster), respektive i den egna hytten (höger). Röd streckad linje visar neutral upplevelse av luftkvaliteten.

Figur 26 visar upplevd luktintensitet på en skala mellan 0 (ingen lukt) till 10 (mycket stark lukt). Röd streckad linje i figuren motsvarar en upplevelse av måttlig lukt. Även i detta avseende ses en generell nöjdhet med luktintensiteten. Det är endast enstaka värden över den streckade linjen som tyder på upplevelse av "stark lukt", främst från de som arbetar i maskinutrymmen eller i byssan vilket kan bero på de processer och arbetsuppgifter som pågår i dessa utrymmen som alstrar luftföroreningar. Mer lukt upplevs på arbetsplatsen än i hytten. Skillnaden i upplevelsen av luktintensitet mellan arbetsplatsen och hytten för alla besättningar på alla fartyg var statistiskt signifikant (median arbetsplats: 3,5; median hytt 2,0; Mann-Whitney $p < 0,001$).



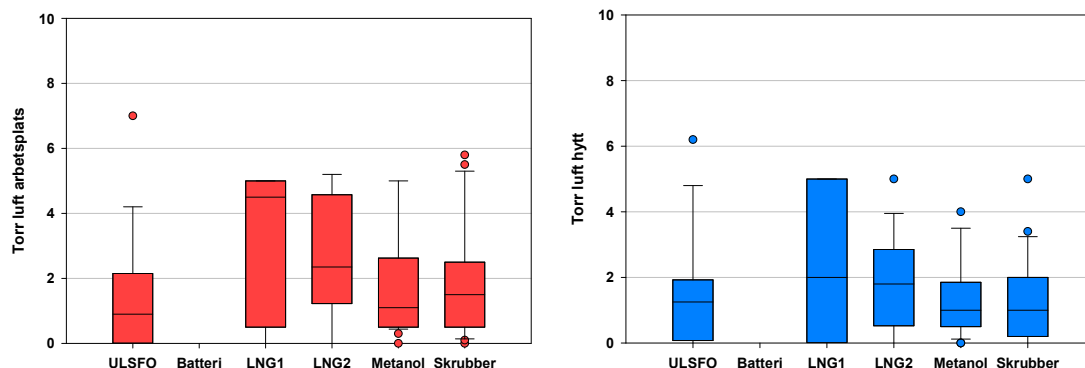
Figur 26. Upplevd luktintensitet på arbetsplatsen (till vänster) respektive i hytten (till höger). Röd streckad linje representerar "mätlig lukt".

Temperaturen upplevdes för det mesta från neutral till kall (Figur 27). Skillnaderna mellan arbetsplats och hytt var statistiskt signifikanta (Mann-Whitney $p = 0,001$) trots samma medianvärden för både arbetsplats (0,5) och hytt (0,5). Temperaturen upplevdes varmare på LNG1-fartyget, både på arbetsplatser och i hytter även om den uppmätta temperaturen inte visade några större skillnader (Tabell 4 och Figur 4).



Figur 27. Upplevd temperatur på arbetsplatsen (till vänster) respektive i hytten (till höger). Röd streckad linje visar neutral temperatur.

Luften upplevdes generellt som torr (Figur 28). Skillnaden i upplevd luftfuktighet mellan arbetsplats (median 1,5) och hytt median (1,0) var inte statistiskt signifikant (Mann-Whitney $p = 0,099$) som betyder att luftfuktighet inte upplevdes olika.



Figur 28. Upplevd luftfuktighet på arbetsplatsen (till vänster) respektive i hytten (till höger).

Upplevd luftkvalitet per personalkategorier

Medianvärden för svaren från enkätundersökningen fördelade på personalkategorier befäl och manskap visas i Tabell 13. Inga statistiskt signifikanta skillnader kunde påvisas för upplevelse av luftkvalitet, luktintensitet, temperatur och luftfuktighet mellan kategorierna. Det betyder att den subjektiva uppfattningen av dessa variabler av både befäl och manskap var liknade varandra. I likhet med den personliga exponeringen visades inte heller några skillnader mellan befäl och manskap i den personliga exponeringen för luftföroreningar (Tabell 9).

Tabell 13. Medianvärden för upplevd luftkvalitet på arbetsplats och hytt, fördelad på personalkategori. Statistiskt signifikanta skillnader kännetecknas av p-värden $<0,05$.

Personalkategori	Arbetsplats				Hytt			
	Q1 accept.	Q2 lukt	Q3 temp.	Q4 fukt	Q1 accept.	Q2 lukt	Q3 temp.	Q4 fukt
Befäl	0,5	2,7	5,0	2,0	0,6	2,5	5,0	1,5
Manskap	0,5	4,0	5,0	1,3	0,6	2,0	5,0	1,0
Mann-Whitney p-värde	0,779	0,368	0,674	0,529	0,582	0,575	0,190	0,303

Upplevd luftkvalitet per avdelning

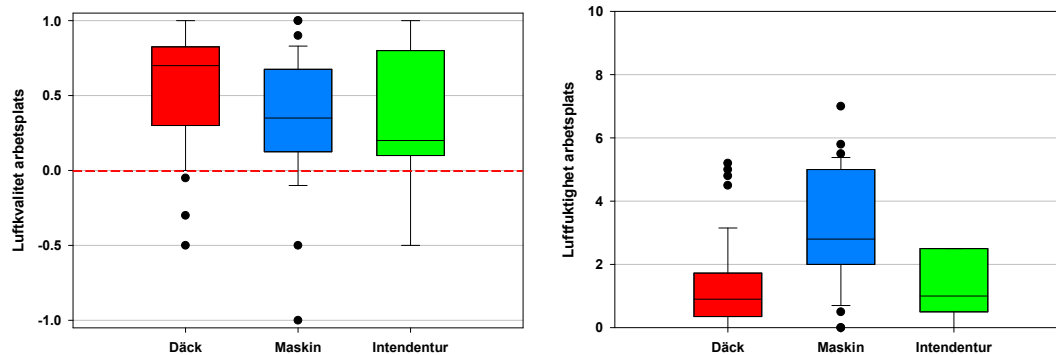
Resultat från enkätundersökningen fördelade på avdelningarna däck, maskin och intendentur visar olika uppfattningar av upplevelser hos personalen i de tre avdelningarna.

Luftkvalitet och luktintensitet upplevdes olika av personalen i de tre olika avdelningarna (Tabell 14). Även om luftkvaliteten upplevs som acceptabel i hög grad av personalen i alla avdelningarna både på arbetsplats och i hytt så rapporterar intendenturpersonalen något lägre grad av acceptans. Skillnaderna kan delvis förklaras den faktiska luftkvaliteten som karakteriseras av uppmätta halter av luftföroreningar men sannolikt finns det andra orsaker till detta resultat. Tidigare forskning visar att en individs subjektiva upplevelse av luftens kvalitet också påverkas av andra parametrar, framför allt psykosociala arbetsmiljöfaktorer än de som berör själva inommiljön (Brauer & Mikkelsen, 2010; FoHMFS, 2014:18; Hult m.fl., 2017; Langer m.fl., 2018).

Tabell 14. Medianvärden för upplevd luftkvalitet på arbetsplats och hytt, fördelad på avdelning. Statistiskt signifikanta skillnader kännetecknas av p-värden <0,05 (i fet stil).

Avdelning	Arbetsplats				Hytt			
	Q1 accept.	Q2 lukt	Q3 temp.	Q4 fukt	Q1 accept.	Q2 lukt	Q3 temp.	Q4 fukt
Däck	0,7	2,5	5,0	0,9	0,6	2,0	5,0	0,8
Maskin	0,4	5,0	6,0	2,8	0,7	2,0	5,0	1,9
Intendentur	0,2	5,0	7,0	1,0	0,5	2,5	5,0	1,5
Kruskal-Wallis p-värde	0,030	0,005	0,156	<0,001	0,244	0,599	0,812	0,008

Luktintensitet på arbetsplatsen upplevdes bäst av däckspersonalen och luftfuktighet av maskinpersonalen. Skillnader i upplevelse av luftfuktigheten, både på arbetsplats, och hytt, var tydligast av de 4 undersökta parametrar (luftkvalitet, luktintensitet, temperatur och luftfuktighet). Det var ingen skillnad i den upplevda temperaturen mellan avdelningarna. I hytterna upplevdes olika bara luftfuktighet, sämst i däcksavdelningen.



Figur 29. Upplevd luftkvalitet (till vänster) och luftfuktighet (till höger) på arbetsplatsen för däck- (n=50), maskin- (n=37), och intendentur (n=7) avdelningarna.

Figur 29 illustrerar ett exempel på skillnader i upplevelsen av luftkvalitet och luftfuktighet mellan avdelningarna på arbetsplatsen.

Slutligen kan följande sammanfattas om personalens upplevelse av arbetsmiljö och inommiljö:

- Luftkvaliteten ombord upplevdes generellt som god, både på besättningens respektive arbetsplatser och i de egna hytterna.
- Upplevelsen av temperaturen varierade osystematiskt mellan fartygen.
- Majoriteten av de som besvarat enkäten upplever att luften är torr ombord, både på arbetsplatserna och i hytten.
- Befäl och manskap rapporterar likvärdiga upplevelser av inommiljön.
- Intendenturpersonalen var något mindre nöjda med luftkvaliteten på arbetsplatsen än personal inom däck- och maskinavdelningarna.

BEDÖMNING AV ARBETSMILJÖ OCH SÄKERHET

Att tänka efter före vid förändringar som påverkar arbetsmiljön

Varje driftalternativ som undersökts i det här projektet har sina unika egenskaper och risker. Dessa kräver särskild hänsyn vid utformning av system, rutiner för drift och underhåll, utbildning och träning, samt nödrutiner. Oavsett vilket alternativ som övervägs är det centralt att även arbetsmiljöaspekter beaktas så tidigt som möjligt i processer för planering och projektering. Dessa behöver omfatta inte bara till risker för allvarlig skada, utan även se till att det går att utföra arbetsuppgifter på ett tillfredsställande sätt under hela fartygets livslängd, med så liten risk för ohälsa och olycksfall som möjligt. Det kräver en systematisk genomlysning av arbetsmiljöer och arbetsuppgifter under såväl drift, underhåll som i nödsituationer.

Arbetsmiljölagen lägger stor vikt vid planeringens betydelse för en god arbetsmiljö. På svenska arbetsplatser är det ett lagkrav att förändringar av verksamheten som kan påverka arbetsmiljön ska riskbedömas (AFS 2001:1). Riskbedömningen ska göras tillsammans med arbetsmiljöombud och den personal som berörs av förändringen. Detta gäller även svenskflaggade fartyg. För fartyg som inte omfattas av svensk arbetsmiljölagstiftning kan denna typ av riskbedömning göras för att det är en god idé, om än inte ett uttalat lagkrav. Det handlar om att upptäcka risker för att kunna åtgärda dem medan det fortfarande är möjligt.

Brister i utformningen av arbetsplatser och system riskerar att leda till att den som ska utföra uppgiften:

- tillbringar för mycket tid med att lösa arbetsuppgiften, vilket i sin tur leder till mindre tid över för andra uppgifter.
- utför arbetet på ett felaktigt sätt, vilket kan leda till skada på personer, utrustning och miljö.
- blir stressad och osäker, vilket minskar förmågan att lösa uppgifter.
- inte vet hur man utnyttjar olika funktioner i de system som ska användas, vilket gör att nyttan inte kommer någon till godo.

Väl utformade arbetsplatser och system leder å andra sidan till att uppgiften kan utföras på ett säkert och effektivt sätt, minskad inlärningstid för att kunna utföra uppgiften, samt ett ökat engagemang och ökad nöjdhet hos dem som ska utföra uppgiften. I förlängningen leder det också till lägre utvecklingskostnader.

Ju tidigare man befinner sig i arbetet med utvecklandet av nya arbetsplatser, desto större är möjligheterna att genomföra ändringar. Samtidigt är då kostnaderna för dessa ändringar låga. Möjligheten att kunna påverka och ändra brister i ett systems utformning minskar med tiden, samtidigt som kostnaderna för att ändra något ökar.

Ett fartyg är ett komplext människa-maskinsystem av med många aktörer, funktioner och arbetsuppgifter. I projektets analys har det varit därför nödvändigt att begränsa sig till det som besättningen har upplevt som det mest centrala i deras arbete och det med begränsad detaljrikedom. Följande variabler har bedömts för de olika driftalternativen, i den mån de varit tillämpliga: brandfarlighet, hälsorisker vid hantering, syreundanträngande, arbetsuppgifter och -belastning, samt särskilda utbildningskrav för besättningen.

Under intervjuer med besättningsmedlemmar bekräftas det som också framgår av exponeringsmätningarna; att det till största del är maskinpersonalens arbete som påverkas av valet av framdrivningssystem och bränsle. Det är framför allt kopplat till de arbetsuppgifter som berör fartygens bränslesystem och framdrivning på olika sätt, men även arbete med annan kringutrustning som länsvatten- och sludgehantering, och inte minst allmän rengöring av maskinutrymmen.

Arbetsmiljö- och säkerhetsaspekter

I Tabell 15 redovisas en översiktlig sammanställning av brandfarlighet och hälsorisker för petroleumbaserade bränslen, LNG och metanol. Lagring och hantering av brandfarliga bränslen ombord, inte minst i maskinutrymmen där heta ytor är en påtaglig riskfaktor. Läckande olja som kommer i kontakt med heta är den vanligaste orsaken till maskinrumsbränder (EMSA, 2021). Brandfarligheten uttrycks här genom flampunkt och brännbarhetsområde. För att begränsa risken för tankexplosioner och ångor som antänds, har IMO förbjudit användning av eldningsolja med en flampunkt under 60°C.

Tabell 15. Sammanställning över brandfarlighet och hälsorisker för bränslealternativen HFO, ULSFO, MDO, LNG och metanol.

	HFO/ULSFO	MDO	LNG	Metanol
Allmän beskrivning	Tung eldningsolja med karaktäristisk lukt.	Brandfarlig vätska med karaktäristisk lukt.	Brandfarlig gas. Kyld kondenserad. Naturligt luktfri men luktämne kan vara tillsatt.	Mycket brandfarlig och giftig vätska. Färglös och lättflyktig. Krävs höga halter innan lukt kan uppfattas.
CAS	68476-33-5	68334-30-5	8006-14-2	67-56-1
Brandfarlighet	Ej brandfarlig men brännbar. Brandfarliga ångor kan bildas vid temperaturer under flampunkten.	Brandfarlig vätska och ånga.	Extremt brandfarlig Gasen är brandfarlig. Kan bilda explosiva blandningar med luft. Gasläckage antänds mycket lätt.	Mycket brandfarlig
Flampunkt	60°C	60°C	- 188 °C (kokpunkt -162 °C)	11°C
Brännbarhetsområde	0,5–5,0 vol-%	0,6–7 vol-%	4,2–16 vol-%	6–36 vol-%
Hälsorisker	Farligt vid inandning. Kan ge cancer. Misstänks kunna skada det ofödda barnet. Kan orsaka organskador genom lång eller upprepad exponering. Irriterar huden.	Farligt vid inandning. Kan ge cancer. Kan orsaka organskador genom lång eller upprepad exponering. Kan vara dödligt vid förtäring om det kommer ner i luftvägarna. Irriterar huden.	Ingen förgiftningsrisk. <i>Kondenserad</i> gas kan orsaka svåra köldskador. Syreundanträngande i slutna utrymmen. Höga koncentrationer kan orsaka förlamning, medvetslöshet och kvävning. Kvävning kan inträffa utan förvarning.	Förgiftningsrisk vid hudkontakt, inandning och förtäring. Tas upp snabbt genom huden. Vid kraftig hudexponering finns risk för allvarlig förgiftning med acidosis, blindhet, medvetslöshet och svår allmänpåverkan. Symptom kommer efter flera timmars fördröjning. Irriterande på hud, ögon och slemhinnor.

Till skillnad från konventionella eldningsoljor riskerar gaser eller vätskor med en betydligt lägre flampunkt att skapa en explosiv gasatmosfär i slutna utrymmen. Av de alternativ som visas i tabellen är samtliga bränslen att betrakta som giftiga utom naturgas. Metanol är akut giftigt, både vid förtäring och hudexponering. Däremot är det inte cancerframkallande.

Arbetsuppgifter kopplade till bränsle eller energibärare

Fartygen som ingår i den här undersökningen har alla system för att köra på petroleumbaserade bränslen, om än i olika omfattning och driftstatus. Det är därför få arbetsuppgifter som helt har försvunnit med de olika alternativen. Däremot ses betydande skillnader i hur ofta olika arbetsmoment behöver utföras och i någon mån under vilka förhållanden.

Resultaten av de stationära och personburna exponeringsmätningarna visar generellt låga halter för de luftföroreningar som undersökts. Däremot ses ibland något förhöjda halter i maskinutrymmen, särskilt separatorrum, samt för maskinpersonal. Det är tydligt att vissa maskinrumsarbeten är förknippade med högre exponeringsrisk. Det är bland annat arbeten med och vid huvudmaskiner och separatorer, filter- och oljebytten som innebär direktkontakt med oljor. Men även arbeten med indirekt kontakt med bränslet, som hantering av länsvatten och sludge.

När motorerna kan köras på renare bränsle än HFO visar jämförelser att mekaniskt och kemiskt slitage på motorerna minskar. Slitage ger försämrade bränsleekonomi, ökar behovet av förebyggande och avhjälpande underhåll, samt ökar risken för oplanerade driftsstopp. Vid en jämförande undersökning mellan likvärdiga bilfartyg, där ett av fartygen under 18 månaders tid körde huvudmotor, hjälpmaskiner och pannor på MDO, påvisades betydande skillnader i serviceintervall (EMSA, 2007, pp. 49-52). I Tabell 16 ses några exempel på hur serviceintervallen förlängdes för fartygets huvudmotor vid drift på MDO(<1%S), jämfört med HFO (IFO 380, 3–5%S).

Tabell 16. Exempel på serviceintervall för huvudmotor vid drift på HFO respektive MDO (EMSA, 2007).

Serviceintervall (driftstimmar)	HFO	MDO
Kolvar	12 000	18 000
Brännoljeseparatorer, rengöring	2 000	4 000
Turboladdare, rengöring	3 gånger/vecka	1 gång/vecka
Bränsleventiler	4 000	6 000
Avgasventiler	6 000	9 000

Samma försök visar också att sludgeproduktionen halverades. Motsvarande cirka 1% av den totala bunkerförbrukningen genereras som sludge (oljeslam) vid drift på HFO. En minskad sludgevolym innebär vinster ur flera perspektiv. I tillägg till att det är miljömässigt fördelaktigt, innebär det också minskade kostnader för att lämna sludge och oljehaltigt länsvatten i land, samt minskad arbetstid för att hantera sludgen ombord. Det innebär också färre arbetsmoment med risk för förhöjd exponering för skadliga luftföroreningar.

En av de största förändringarna från långtidsförsöket uppgavs vara att rengöringsarbetet generellt tog mindre arbetstid i anspråk (EMSA, 2007, p. 51). Det är något vi ser som gemensam nämnare även för de driftalternativ som undersökts i den här studien. HFO är det bränslealternativ som kräver mest tid för rengöring, både för maskindelar, durkar, spilltråg och liknande. Det kräver ofta mer eller starkare rengöringskemikalier också.

Buller, vibrationer och fysisk belastning

Andra arbetsmiljöfaktorer som i varierande utsträckning påverkas av val av driftalternativ är buller, vibrationer, fysisk belastning och värmbelastning.

Bland de alternativ som vi har undersökt uppvisar det batteridrivna fartyget störst skillnader i buller och vibrationer ombord, framför allt när fartyget körs helt på batteridrift. Med dagens teknik kan det vara svårt att komma ner under hörselskadliga nivåer i konventionella maskinrum. Långvarig exponering för buller, även under hörselskadliga nivåer, har en negativ inverkan på såväl vårt kardiovaskulära som vårt metabola system. Det innebär bland annat en ökad risk för stressrelaterade hälsobesvär, hjärt- och kärlsjukdomar, samt diabetes

typ 2 (Basner m.fl., 2014). Exponering för buller, även under hörselskadliga ljudtrycksnivåer, påverkar också sömn, uppmärksamhet och prestationsförmåga (Ljungberg m.fl., 2004). Talmaskerande och störande buller kan öka risken för missförstånd och felhandlingar om larm eller instruktioner inte uppfattas korrekt. Eftersom kolmonoxid (CO), en förbränningsprodukt i avgaser, är ett så kallat *ototoxiskt* ämne så ökar risken för hörselskador vid samtidig exponering för både avgaser och buller (Fechter m.fl., 2000). Även långvarig exponering för helkroppsvibrationer har liknande hälsorisker. Tidigare studier visar på samband mellan helkroppsvibrationer och kardiovaskulära sjukdomar, neuropatier (skador på nerver) och belastningsbesvär (Krajnak, 2018). Ombord de andra fartygen i studien har det vidtagits andra typer av åtgärder som, även om de primärt syftat till att minska bränsleförbrukning och utsläpp av föroreningar till omgivningsmiljön, också har bidragit till att minska exponeringstiden för buller och vibrationer. De andra ropax-fartygen och isbrytaren ansluts till elnätet iland när de ligger till kaj, vilket kortar tiden då hjälpmaskinerna behöver vara i drift. Innovativa designlösningar för tankfartygets skrovform och propeller medverkar också till sänkta bullernivåer.

Belastningsfaktorer är en av de vanligaste orsakerna till arbetssjukdomar i arbetslivet; både i land och till sjöss (Arbetsmiljöverket, 2021:3; Hult m.fl., 2017; Skepp & Bäckström, 2018). Många manuella arbetsuppgifter ombord behöver utföras stående och gående, ibland i påfrestande arbetsställningar, med kroppen böjd och vriden för att komma åt. Risken för belastningsskador ökar också när kroppen samtidigt exponeras för helkroppsvibrationer.

Ett återkommande arbetsmoment som ofta lyfts i diskussionerna med maskinpersonalen är rengöring och överhaling av brännolja- och smörjoljeseparatorer. Separatorerna är av olika typ, ålder och storlek på de fartyg som undersökts. För att illustrera med ett exempel visade en djupanalys med KIM-I (*Key Indicator Method*) för riskbedömning av manuell hantering) att en överhaling av en smörjoljeseparator involverade bland annat:

- arbetsställningar med framåtlutad kropp och stundtals ståendes på ett rör för att komma åt vid demontering och montering,
- tunga lyft (de tyngre delarna vägde mellan 14 och 60 kg),
- rengöring sittandes på huk, samt
- regelbunden förflyttning mellan separator, verktygstavla och arbetsyta.

Den manuella hanteringen och tunga lyften försvåras också av att delarna är hala och ibland kan vara svåra att få bra grepp om. Sammantaget resulterade analysen i ett flertal arbetsmoment inom riskområde 2–4 som innebär ökad till hög belastning.

För några av de undersökta driftalternativen har det tillkommit nya arbetsuppgifter och kunskapskrav som är specifikt relaterade till framdrivningen. Dessa redogörs för här i korthet.

LNG-drift

Naturgasen består vanligtvis av metan, kväve och en liten del etan och propan. LNG är flytande naturgas som bildas när naturgas kondenseras. För att underlätta lagring och distribuering av gasen kondenseras den i flera steg genom kylning till -162 grader vilket minskar gasvolymen cirka 600 gånger. För att gasen ska förbli flytande lagras den i speciella kryptankar. LNG är en klar, färglös och giffri vätska. Den är naturligt luktfri men luktämnen kan tillsättas för att underlätta upptäckt av läckage.

Användningen av LNG som bränsle i sjöfarten var inledningsvis begränsad till LNG-tankers som kunde använda den förångade lasten för ångturbindrift. Idag har användningen av dual fuel-motorer ökat som kan köras på antingen LNG eller HFO/MDO. Vid LNG-drift används diesel som pilotbränsle för antändning, varför hanteringen av MDO inte helt försvinner. Den blir dock avsevärt lägre vid LNG-drift.

LNG-fartyg omfattas av den så kallade IGF-koden (International code of safety for ships using Gases or other low-flashpoint Fuels) som är en del av IMO:s säkerhetskonvention SOLAS. IGF är en tvingande standard för fartyg som använder sig av bränslen med låg flampunkt. Reglerna omfattar installation av maskiner, kringssystem och övervakningssystem vid nyinstallation eller konvertering. Syftet är att säkerställa att risken för ohälsa och olycksfall är samma eller lägre i förhållande till konventionell fartygsdrift. För personal som arbetar på fartyg som omfattas av IGF ställs särskilda krav på utbildning och träningen. Det finns två nivåer av specialbehörigheter beroende på arbetsuppgifter och ansvar.

De största arbetsmiljöriskerna vid hantering är dels syrebrist och risk för kvävning vid läckage i ett slutet utrymme, dels risken för svåra köldskador vid direktkontakt med flytande naturgas.

Batteridrift

Eldrivna fartyg har varit i drift sedan tidigt 1900-tal, exempelvis har eldrivna passagerarbåtar trafikerat sjön Königssee i Bayern sedan år 1909. Då sjösattes den Siemensbyggda *Akkumulator* som kunde transportera 38 personer (Desmond, 2017, p. 56). Intresset för elektrisk framdrivning av fartyg svalnade dock avsevärt när förbränningsmotorerna gjorde entré. Laddningsbara batterier har däremot använts ombord för bland annat reservkraft, startmotorer och radioutrustning. På senare tid har utvecklingen tagit stora kliv och idag används både batterihybridssystem och helt elektrifierade lösningar. Elektrisk framdrivning kan betraktas som utsläppsfri, under förutsättning att elektriciteten kommer från förnybara källor. En avgörande begränsning är dels att energin behöver lagras i relativt dyra batterier, dels att låg energitäthet innebär att det främst är ett alternativ för kortare sjöresor. Helt elektrisk framdrivning för oceangående fartyg, eller kustsjöfart över längre sträckor bedöms för närvarande inte vara praktiskt genomförbart.

Fartyget i den här studien har litiumjonbatterier som kan ge över 4 MWh vid ren batteridrift. Batterier, styr- och reglerutrustning och transformatorer finns i särskilda utrymmen på däck. Laddning sker via elnätet iland och ansluts upp med en helautomatisk robotarm. Under servicearbeten på batterierna, eller om laddningen inte räcker till, används dieselgeneratorerna som körs på miljödiesel.

För den här typen av fartyg är elsäkerhet och brandsäkerhet ombord två nyckelfrågor. Det avser riskreducerande åtgärder, vilken typ av brandbekämpning och annan nödlägesberedskap som krävs i olika situationer (se bland annat Andersson m.fl. (2018) och (Lighthouse, 2021a) för en detaljerad sammanställning). Men på motsvarande sätt som för användningen av andra typer av energibärare och driftsystem på fartyg är utvecklingen av internationella, harmoniserade regelverk för batteridrivna fartyg fortfarande i sin linda. Det är framför allt klassificeringssällskapen som leder arbetet med att ta fram standarder och rekommendationer. I Sverige har Transportstyrelsen tagit fram riktlinjer som innehåller övergripande säkerhetsprinciper för batteri- och hybriddrivna fartyg (Transportstyrelsen, 2021b).

På batterifartyget hade vi möjlighet att göra jämförande mätningar av innemiljö och arbetsmiljöförhållanden före och efter konverteringen till batterihybriddrift. Resultaten visar att

det inte är några arbetsuppgifter som helt försvunnit då dieselgeneratorerna fortfarande är i drift. Däremot upplevs arbetsuppgifterna mer omväxlande. Med färre gångtimmar behövs överhalning, filter- och oljebyten göras mer sällan. Med renare olja behöver separatorerna tas mer sällan och delarna är mindre nedsmutsade. Det gör att rengöringen utförs under en kortare tid vilket minskar antal exponeringstillfällen och tiden för exponering. Nya arbetsuppgifter har tillkommit som berör utveckling och optimering av batteridriften, samt för att hantera laddningsroboten.

Mediantemperaturerna i både separatorrummet och i övriga maskinutrymmen minskade med cirka 10 grader till mellan 21–24 °C. Det kan till viss del bero på att mätningarna gjordes under olika årstider med olika sjövattemperaturer men till största del beror det sannolikt på att dieselmotorerna körs mer sällan. Den lägre temperaturen leder till minskad värmebelastning, vilket i sin tur har positiva effekter på hälsa, kognitiv förmåga och säkerhet (Pilcher m.fl., 2002).

Även den relativa luftfuktigheten i maskinutrymmena minskade, från 47 till 25 %, men det beror sannolikt på den kallare årstiden. När kall utomhusluft tas in på fartyget och värms upp, fälls samtidigt fukt ut vilket gör luften torrare. Tidigare genererade också dieselgeneratorerna restvärme som togs till vara för uppvärmning via värmeväxlare. I dag används energieffektiva värmepumpar.

Metanoldrift

Metanol kan framställas av naturgas, biomassa eller syntetiskt. Metanol är den enklaste alkoholen och har bred användning som ett kemiskt basmaterial. Metanol har bra förbränningsegenskaper och är den alkohol som för närvarande har nått längst i utvecklingen av användning som fartygsbränsle. Det är flytande vid rumstemperatur och relativt enkelt att hantera. Metanol bryts ned snabbt och är giftigt vid höga koncentrationer eller förtäring. Som tidigare nämnt har metanol ett högt ångtryck och avdunstar därför snabbt. Vid ett läckage eller spill i ett slutet utrymme kan det innebära att det inte nödvändigtvis bildas en pöl på durken utan att metanolen snabbt förgasas och blandas med luften. Detta kan leda till att en tillräckligt hög koncentration av metanol finns i luften för att en explosion ska uppstå vid exempelvis en gnistbildning. Ur brandsynpunkt är det svårare att upptäcka en metanolbrand jämfört med en brand i MDO, men de släckmedel som används ombord är ungefär desamma

för båda bränslena. Då metanol är vattenlösligt och svårantändlig vid utspädning med vatten, kan brand vid misstänkt läckage förebyggas genom att dränka området i vatten. I november 2020 godkände IMO:s sjösäkerhetskommitté interimistiska riktlinjer för fartyg som använder metanol som bränsle (MSC.1/CIRC.1621). Riktlinjerna utgör en internationell säkerhetsstandard för hur system ska utformas så att bunkring och övrig hantering kan utföras på ett säkert sätt.

Metanolfartyget är utrustat med dual fuel-motorer och under mätperioden kördes det till största del på MDO. Ur arbetsmiljöperspektiv har omställningen från HFO till MDO inneburit motsvarande förändring av arbetsuppgifter och arbetsbelastning som tidigare beskrivits. Möjligheten att köra på metanol innebär extra bunkrings-operationer, övervakning och underhåll av nya systemkomponenter som installerats specifikt för metanoldriften. Metanol behöver dock inte system för värmning eller separering.

Riskerna med metanol innebär att besättningen behöver personlig skyddsutrustning för att utföra vissa arbeten. Det kan i sig innebära en ökad fysisk belastning, särskilt när flera olika skydd behöver användas i kombination.

Skrubber

En skrubberanläggning "tvättar" förbränningsavgaserna från i huvudsak svaveloxider. I viss utsträckning reduceras även partiklar och PAH från avgaserna (Fridell & Salo, 2016; Winnes m.fl., 2020). Skrubbern medför dock en något ökad bränsleförbrukning. Under mätperioden kördes fartyget på HFO med 2%S. Det innebär att de arbetsförhållanden och -uppgifter som tidigare beskrivits relaterade till brännoljehantering inte har förändrats. Däremot har det tillkommit uppgifter för drift och underhåll av skrubberanläggningen.

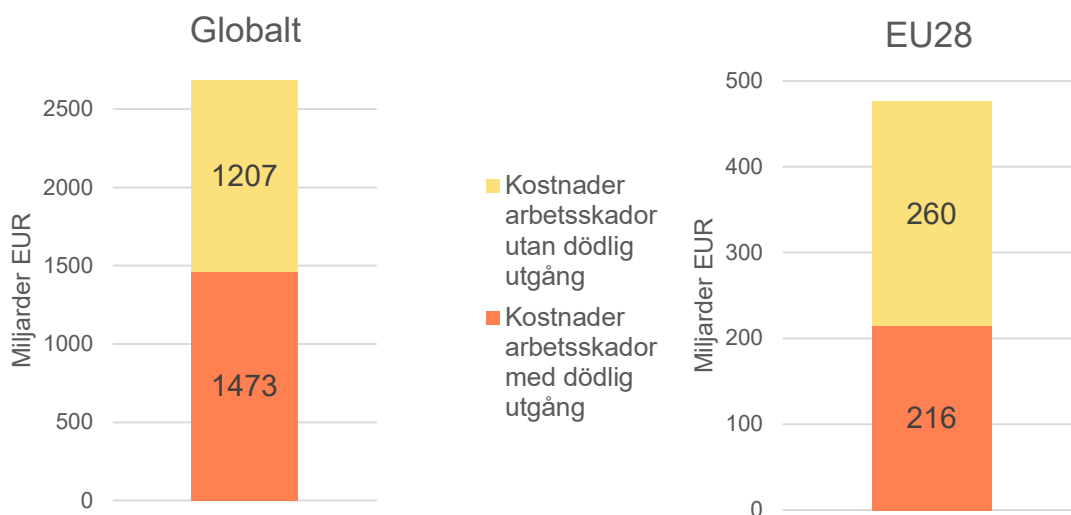
Arbetsmiljöekonomiska uppskattningar

Förmågan att utföra ett arbete påverkas av hur arbetsmiljöer, arbetsuppgifter och utrustning är utformade. Dåliga arbetsmiljöer och dåligt anpassade system kan därför få konsekvenser för såväl den enskilde medarbetaren, organisationen, som samhället i stort. På individnivå ökar bland annat risken för ohälsa och olycksfall, nedsatt arbetsförmåga och bristande arbetsmotivation. På företagsnivå kan ohälsa och olycksfall leda till kostnader för kort- och långtidssjukskrivning och personalomsättning. De största kostnaderna för brister i arbetsmiljön kan dock relateras till produktionsbortfall och kvalitetsbristkostnader (Abrahamsson, 2000; Goggins, 2008; Strömberg m.fl., 2017). På samhällsnivå innebär arbetsrelaterade olyckor, sjukdomar och besvär, till kostnader för hälso- och sjukvård, för tidig pension och förlorade arbetsår. Internationella arbetsorganisationen (ILO) har under 20 års tid beräknat kostnader för arbetsolyckor och arbetssjukdomar på samhällsnivå. Den modell som används baseras på uppskattningar av funktionsjusterade levnadsår (DALY - disability adjusted life years) som orsakas av sjukdomar och skador med och utan dödlig utgång. DALY beräknas som summan av YLL (Years of Life Lost), levnadsår som förlorats på grund av för tidig dödlighet och YLD (Years Lived with Disability) levnadsår för personer som lever med arbetssjukdom (Ekvation 1):

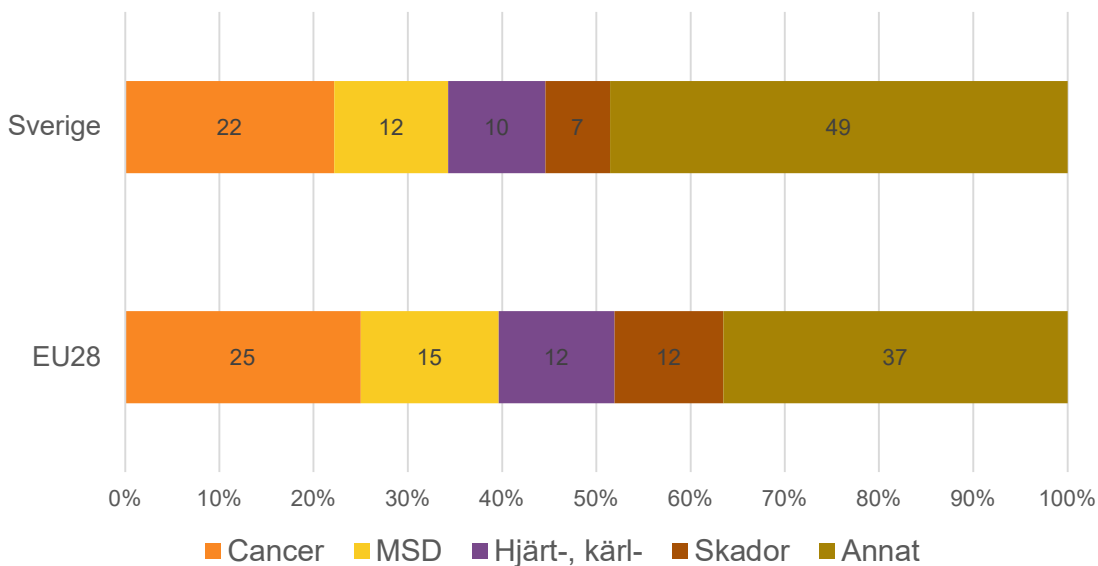
$$\begin{aligned} DALY \text{ (Disability Adjusted Life Years)} \\ = YLL \text{ (Years of Life Lost)} + YLD \text{ (Years Lived with Disability)} \end{aligned}$$

Ekvation 1. Funktionsjusterade levnadsår (DALY) beräknas som summan av YLL (levnadsår som förlorats på grund av för tidig dödlighet) och YLD (levnadsår för personer som lever med arbetssjukdom).

Som framgår av Figur 30 uppskattas samhällets kostnader för arbetsrelaterade olyckor och sjukdomar uppgå till 2 680 miljarder euro globalt, varav cirka 476 miljarder euro inom EU28 (EU-OSHA, 2017). Det motsvarar 3,3 % av EU-ländernas BNP. I både Sverige och EU28 utgörs arbetssjukdomarna till största del av cancer och hjärt-kärlsjukdomar (Figur 31). Dessa står också för närmare 80% av alla dödsfall som orsakas av arbetsrelaterad ohälsa (EU-OSHA, 2017). Ur ett globalt och nationellt samhälleligt perspektiv finns det alltså goda argument för att vidta åtgärder som främjar arbetsmiljö och hälsa.



Figur 30. Samhällskostnader för arbetsrelaterad ohälsa, globalt och för EU28



Figur 31. Orsaker till arbetsrelaterade sjukdomar (%) i Sverige och EU28.

Den arbetsrelaterade dödligheten vi ser idag orsakas av både nuvarande och tidigare arbetsmiljöer och arbetsförhållanden. I Arbetsmiljöverkets kunskapssammanställning (2019:3) redogörs för den arbetsrelaterade dödligheten uttryckt i absoluta tal (antal personer) i Sverige utifrån typ av exponering. Av de arbetsmiljöaspekter som lyfts i denna rapport innehåller sammanställningen uppgifter om exponering för motoravgaser, buller och fysisk belastning.

Antal arbetsrelaterade dödsfall på grund av motoravgaser beräknas till 547 personer per år i Sverige (Tabell 17) och orsakas av ischemisk hjärtsjukdom och lungcancer. Risken för lungcancer på grund av dieselavgaser antas bero på koncentration och exponeringstid.

Tabell 17. Beräknat antal arbetsrelaterade dödsfall per år, kvinnor och män, 15 år och äldre (Arbetsmiljöverket 2019:3).

Faktor	Kvinnor	Män	Totalt
Motoravgaser	223	324	547
Buller *	338	439	777
Ihållande fysiskt tungt arbete *	0	1 548	1 548

* För buller och ihållande fysiskt tungt arbete är sambanden mer osäkra.

Betydelsen av arbetsrelaterat buller och ihållande fysiskt tungt arbete för en ökad dödlighet är mer osäker. Det är känt att buller ökar risken att drabbas av hjärt- och kärlsjukdom. Den exakta mekanismen är inte känd men sömnstörning kan vara en relevant faktor. Sannolikt är det den kumulativa dosen av hörselskadande buller (> 75 dB(A)) som ökar risken. Utifrån de osäkerheter som finns uppskattas arbetsplatsbuller orsaka närmare 780 dödsfall per år.

Även sambanden mellan ihållande fysiskt tungt arbete och för tidig död är osäkra, särskilt varför kvinnor inte skulle ha en ökad risk. Att arbetet är ihållande fysiskt tungt innebär att arbetstagare inte hinner få tillräcklig återhämtning, vilket framför allt påverkar risken för hjärt- och kärlsjukdom negativt.

Sjöfartens arbetsplatser kännetecknas av en samtidig exponering för flera kända riskfaktorer. Det väcker frågan om vad och vilka som ska prioriteras – de som utsätts för värst exponering, eller det som förbättrar för många, även om risken i sig kan bedömas vara måttlig?

När beslut ska fattas om lämpliga åtgärder för att förbättra arbetsmiljön, är det viktigt att förstå hur arbetsmiljöns effekter på hälsan kan beskrivas olika beroende på hur och vad vi mäter. Inom sjöfarten har säkerhetsarbetet traditionellt fokuserat på preventiva och mitigerande åtgärder för att förhindra sjöolyckor och personolycksfall. När säkerheten endast mäts i olycksfall blir många av de faktorer som har avgörande betydelse för ohälsa, välbefinnande och arbetsprestation osynliga.

I europeisk yrkessjöfart anges fall- och halkolyckor som den vanligaste orsaken till personolyckor med och utan dödlig utgång under 2020 (EMSA, 2021). I svensk yrkessjöfart under 2020 anges *mänsklig faktor* som den största övergripande faktorn som orsakat personolyckor (Transportstyrelsen, 2021a). När ohälsan mäts i termer av långtidssjukskrivning (över 60 dagar), framstår i stället muskuloskeletala och psykiska diagnoser som betydelsefulla för svensk yrkessjöfart (Hult m.fl., 2017; Österman m.fl., 2020). Tillsammans utgör de över 60 % av alla diagnostyper för långa sjukskrivningar men är samtidigt ovanliga dödsorsaker i jämförelse med cancer och hjärt- och kärlsjukdomar. Jämfört med befolkningen i stort har svenska sjömän en ökad mortalitet för kranskärls- och cerebrovaskulär (Eriksson m.fl., 2020). För manliga sjömän under 46 år var den ökade mortaliteten signifikant. Svenska sjömän, både kvinnor och män, har också en ökad risk för lungcancer jämfört med den allmänna befolkningen (Forsell m.fl., 2022). Risken är nästan dubbelt så hög för män som arbetat som maskinmanskap. Hos manliga sjömän ses också en ökad risk för totalcancer.

Mot bakgrund av ovanstående blir det tydligt att arbetsmiljö- och säkerhetsarbetet förutsätter en helhetssyn som omfattar både preventiva åtgärder och ett långsiktigt hälsofrämjande arbete. I uppskattningarna på samhällsnivå är dock de kostnader som arbetsgivarna bär för arbetsskador inte med i beräkningen, vilket gör att den faktiska kostnaden är ännu högre.

Det är inte meningsfullt att försöka beräkna kostnadsnytta av arbetsmiljöåtgärder för ett 'genomsnittligt' fartyg. Det är många faktorer och variabler som spelar in, orsakssamband är svårfångade vilket gör det svårt att särskilja effekter. I stället redogörs här för typiska kostnader och hur de kan uppskattas för arbetsmiljöekonomiska utvärderingar.

Arbetsmiljö och arbetsförhållanden utgör en integrerad del av företagets verksamhet (Rose m.fl., 2013). Beroende på om arbetsmiljön är utformad så att den stödjer medarbetarnas förutsättningar att utföra sitt arbete, ses både systemeffekter och mänskliga effekter. Systemeffekter kan utgöras av förändringar i produktivitet, effektivitet eller kvalitet. Mänskliga effekter kan utgöras av smärta, koncentrationssvårigheter, trötthet eller sjukdom. Om brister i arbetsmiljön leder till sjukskrivning uppstår synliga, faktiska utgifter för exempelvis sjuklön, resor och lön till ersättare. Dessa kostnader är dock i allmänhet mindre än de indirekta kostnader som följer av brister i arbetsmiljön och som inte syns på något särskilt konto i resultaträkningen. En svensk studie rapporterar ett genomsnittligt produktionsbortfall på 30-40 % för medarbetare som upplever arbetsmiljöproblem (Lohela-Karlsson m.fl., 2018). En kombination av arbetsmiljö- och hälsoproblem rapporteras ge ännu större effekt på prestationen.

I Tabell 18 redogörs för exempel på synliga och osynliga kostnader och konsekvenser som kan uppstå (eller undvikas) till följd av arbetsmiljöbrister. Kostnaderna redovisas inom områdena sjukfrånvaro, sjuknärvaro, produktionsbortfall, kvalitetsbrister, underhåll, personalomsättning och övriga kostnader för företagsledning och arbetsgivarens varumärke.

När medarbetares prestanda diskuteras lyfts ibland invändningen att det inte är så betydelsefullt vad en medarbetare jobbar med på arbetstid, självkostnaden för befattningen är densamma (summan av direkta kostnader för lön, semester och arbetsgivaravgifter, samt indirekta omkostnader). Den invändningen kan möjligen vara relevant i de fall det råder en övertalighet på personalsidan men under fartygsbesöken i det här projektet har det inte getts uttryck för någon systematisk överkapacitet. Värdet av arbetad tid – bidraget till verksamheten – kan många gånger vara högre än självkostnaden (Johanson & Johrén, 2017). Upplevelsen att det arbete som görs är värdeskapande och bidrar till personlig och professionell utveckling kan också påverka sjömäns arbetsmotivation och vilja att stanna ombord och i yrket (Baum-Talmor & Kitada, 2022).

Tabell 18. Exempel på kostnader relaterade till arbetsmiljöbrister (baserat på Johanson & Johrén, 2017; Mynak, 2019; Rose m.fl., 2013)

Område	Kostnad
Sjukfrånvaro	Kvarvarande kostnader för den som är borta Försäkringar, resor, läkarbesök, medicin Kostnader för ersättare Administrativa kostnader Rehabiliterings- och behandlingskostnader för sjukskriven person, chef och administration Förlorad produktivitet hos ersättare och under rehabiliteringsperioder Kostnader för att återgå i arbete efter sjukskrivning
Sjuknärvaro	Produktivitetsbortfall eller kvalitetsbrister för person med ohälsa Produktivitetsbortfall eller kvalitetsbrister för kollegor som hjälper person med ohälsa Effekter på arbetsmotivation och kreativitet
Produktionsbortfall	Produktionsstopp eller reduktion på grund av arbetsmiljöproblem Reducerad produktivitet i samband med arbetsskada Reducerad produktivitet för personer med ohälsa eller smärta som begränsar Reducerad produktivitet i arbetsgrupp omkring en med ohälsa Reducerad produktivitet för chef för en person med ohälsa Reducerad produktivitet på grund av mindre erfarna ersättare
Kvalitetsbrister	Felhandlingar orsakade av bristande utformning av system eller arbetsmiljöer Felhandlingar på grund av ohälsa, värk, trötthet och liknande Felhandlingar under arbete i felaktiga arbetsställningar Felhandlingar orsakade av tidsbrist Felhandlingar orsakade av nyanställd ersättare Svinn eller skrotkostnader för kvalitetsbrister Kostnader för förseningar till följd av olycka
Underhåll	Reparationskostnader för utrustning som skadats i olycka Reparationskostnader som följd av att system är svåra att underhålla Kostnader för att lösa problem inbyggda i existerande system
Personalomsättning	Administration och rekryteringskostnader Återbesättningskostnader Utbildningskostnader för ny medarbetare Tidsåtgång hos erfarna medarbetare för att vägleda ersättare Kostnader för ökad svårighet att anställa
Företagsledning och arbetsgivarevarumärke (employer branding)	Ledningen lägger tid på arbetsmiljörelaterat administrativt arbete Tidsåtgång vid olycksfallsundersökningar Tidsåtgång vid rapportering och diskussion av anställdas skador eller dåliga hälsa Tidsåtgång vid hantering av kvalitets- och produktivetsrelaterade förluster Skadat anseende på grund av kvalitetsbrister Skadat anseende på grund av olyckor Skadat anseende på grund av missnöjd personal Skadad trovärdighet utifrån hållbarhets- eller CSR-perspektiv (Corporate Social Responsibility)

Överfört till våra exempel på hur arbetsmiljö och arbetsuppgifter har förändrats för framför allt maskinrumspersonal i samband med byte av driftsystem eller bränsle, så är det inte sannolikt att ett ökat serviceintervall för motorer och minskat behov av rengöring av separatorer och maskinutrymmen leder till minskat personalbehov. Det är redan förhållandevis få personer i maskinbesättningarna. Snarare innebär det en positiv arbetsväxling och arbetsutvidgning för personalen. Även om rengöringsarbeten är nog så viktiga för drift- och brandsäkerhet och trivsel, så upplevs de onekligen inte alltid som särskilt lustfyllda eller utvecklande.

Slutligen kan följande sammanfattas om bedömningen av arbetsmiljö och säkerhet:

- Alla driftalternativ har egenskaper och risker som kräver särskild hänsyn vid utformning av system, rutiner för drift och underhåll, utbildning och träning, samt nödrutiner. Riskbedömningar behöver omfatta både risker för allvarlig skada, ohälsa och att arbetsuppgifter kan utföras på ett tillfredsställande sätt.
- Samtliga flytande bränslen är att betrakta som giftiga utom naturgas. Metanol är akut giftigt, både vid förtäring och hudexponering. Däremot är det inte cancerframkallande.
- Eftersom fartygen fortsatt har system för att köra på petroleumbaserade bränslen har få arbetsuppgifter försvunnit helt. Däremot ses skillnader i hur ofta olika arbetsmoment behöver utföras och under vilka förhållanden.
- Inget av driftalternativen innebär minskade direkta kostnader för personal.
- Minskat behov av rengöring av komponenter och maskinutrymmen innebär minskad exponering för farliga ämnen och att arbetstid kan läggas på andra uppgifter som upplevs mer värdeskapande.
- Brister i arbetsmiljön som kan leda till ohälsa och olycksfall ger ekonomiska konsekvenser på individ-, företags- och samhällsnivå.
- Eftersom många arbeten ombord innebär en samtidig exponering för flera kända riskfaktorer krävs en helhetssyn som omfattar preventiva åtgärder och ett långsiktigt hälsofrämjande arbete. Det är inte tillräckligt att rikta åtgärder endast mot de värsta exponeringarna.

KUMULATIVT RISKINDEX

Den grundläggande principen för riskbedömning av kemiska arbetsmiljörisker är baserad på arbetsgången i det systematiska arbetsmiljöarbetet: undersökning, riskbedömning, åtgärder och uppföljning. Exponeringen för luftföroreningar på fartyg innebär en samtidig påverkan från flera olika ämnen som kan ha likartade effekter, en så kallad additiv hygienisk effekt. Vissa kemiska ämnen kan också förstärka andra ämnens effekter, bland annat har till exempel tobaksrök visats ha additiv och i en del fall till om med synergistisk effekt vid samtidig exponering för vissa ämnen (Pope m.fl., 2004). Förstärkande effekter kan också förekomma vid samtidig exponering för buller och värme men detta är ingenting som har undersökts särskilt i denna studie.

Som stöd för att kunna bedöma och värdera risken för ohälsa som exponeringen för NO₂, bensen, benso(a)pyren och naftalen utgör inte var för sig utan tillsammans, använder vi en modell som beskrivs av (Ragas m.fl., 2011) för boendemiljöer. Vi har tillämpat detta tillvägagångssätt så att vi kan väva samman de uppmätta halterna av de enskilda ämnena till en siffra – ett kumulativt riskindex. Kumulativt riskindex är baserat på kvoter mellan uppmätta värden och rekommenderade hälsobaserade riktvärden som summeras (Ekvation 2) och definieras som en sammanvägd summa av halterna för de enskilda ämnena eller komponenter som ingår i exponeringen (USEPA, 1986).

Som referensvärden har följande värden använts från Tabell 1:

NO ₂ :	40 µg/m ³	Benso(a)pyren:	0,0012 µg/m ³
Bensen:	1,7 µg/m ³	Naftalen:	10 µg/m ³ .

$$KR = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{Standard_i}$$

Ekvation 2. Kumulativt riskindex, uttryckt som summa av de ingående exponeringskomponenterna. KR = Kumulativt Riskindex, n = antal ämnen ($n = 4$), C_i = uppmätt halt av ämne i ; $Standard_i$ = referensvärde för ämne i .

Med den modifierade exponeringsmodellen får vi ett kumulativt riskindex som kan användas för att bedöma, värdera och framför allt jämföra exponeringar vid olika bränsletyper och som underlag när beslut ska fattas om olika interventioner och åtgärder.

NO₂, bensen, benso(a)pyren och naftalen valdes för beräkningen av indexet därför att det finns **hälsorelaterade** referensvärden (Tabell 1). Samma tillvägagångssätt tillämpades för beräkning av indexet med de nämnda ämnens halter både från stationära mätningar (fartygens inommiljö) och från exponeringsmätningar (besättningens personliga exponering).

Indexet används alltså i denna studie som ett **verktyg** för att jämföra de olika bränsletyper i samband med besättningens hälsa. TVOC och PAH togs inte med i indexet då dessa ämnesgrupper består av ett större antal ämnen (olika i båda grupperna) och därför kan man av naturliga skäl inte sätta upp ett hälsobaserat riktvärde. Halter TVOC kan bedömas enligt den 'hygieniska acceptansen' (UBA, 2018) och halter av PAH kan jämföras bara relativt till varandra i meningen 'mer' eller 'mindre'.

För att kunna jämföra riskindex för fartygspersonal i denna undersökning och relatera exponeringen ombord till vad vi normalt exponeras för i vår hemmiljö så har index också beräknats för normalbefolkningen i Sverige, baserat på det fåtal studier som finns. Yazar m.fl. (2011) har undersökt exponeringen för NO₂, bensen och benso(a)pyren för 20–40 personer i Stockholm. Från andra svenska studier har erhållits ytterligare uppgifter för bensen och NO₂ (Hagenbjörk-Gustafsson m.fl., 2014; Langer & Bekö, 2013), samt för naftalen från Åkerström m.fl. (2009) som baseras på 36 mätningar i Göteborg. En kombination av exponeringen (medianhalter) från dessa fyra svenska studier gav ett intervall för riskindex för normalbefolkningen mellan 1,07 – 1,54.

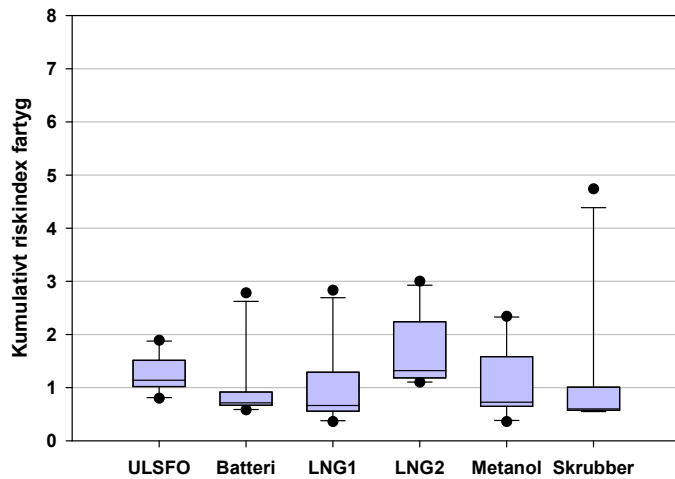
En annan yrkeskategori som i sitt arbete utsätts för de luftföroreningarna som studerats inom denna studie är personer som arbetar i restaurangkök. Kumulativt riskindex har beräknats för de lägsta och högsta exponeringshalterna för de respektive luftföroreningarna NO₂, benso(a)pyren och naftalen från en exponeringsstudie av kökspersonal i fyra olika typer av svenska restauranger (Lewné m.fl., 2017). I det här fallet ligger intervallet för riskindex mellan 1,40 – 2,25.

Tabell 19. Medianvärden för kumulativt riskindex från stationära och personliga mätningar. Statistisk signifikans kännetecknas av p <0,05 (i fet stil).

Bränsle	KR stationärt	KR personligt
ULSFO	1.14	1.26
Batteri	0.71	---
LNG1	0.66	1.00
LNG2	1.31	1.46
Metanol	0.72	0.86
Skrubber	0.60	0.69
Kruskal-Wallis p-värde	0,011	0,047

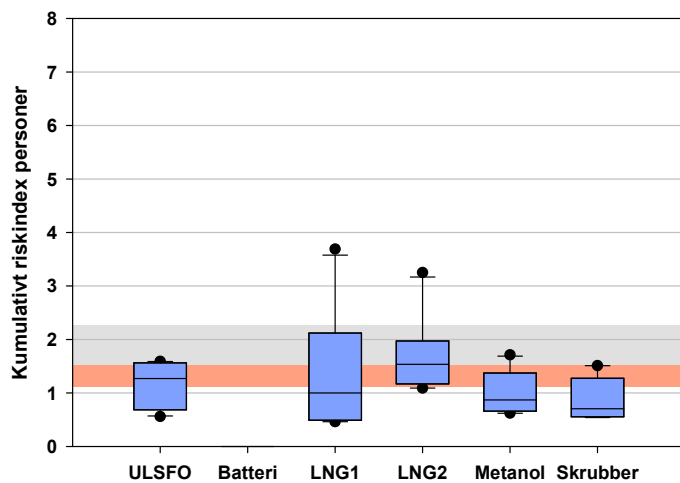
Tabell 19 visar Kumulativt riskindex (KR) över alla fartygsbränslen beräknat från stationära mätningar och från data för personlig exponering. KR baserat på halter i fartygens innemiljö och baserat på nivåer av den personliga exponeringen var högt linjärt korrelerade, med en korrelationskoefficient $R^2 = 0,9078$ ($R^2 = 1,000$ för en perfekt linjär korrelation). Detta innebär att riskindexet baserat på stationära mätningar kan användas för jämförelsen av hälsoeffekter i fartygens innemiljö för de olika bränsletyperna.

KR beräknat från halter från de stationära mätningarna på alla fartygen visas i Figur 32. Resultat från Kruskal-Wallis test för jämförelse av medianvärden visar att bränsletypen spelar roll för storleken av indexet ($p = 0,011$ för fartygens innemiljö; $p = 0,047$ för personlig exponering). Även om det statistiska testet tyder på skillnaden i indexet mellan fartygen kan vi inte se någon tydlig trend mot lägre KR för fartygen med de per definition renare bränslen (batteri, LNG, metanol) jämfört med tjockolja (ULSFO och HFO med skrubber). Effekten av renare bränslen för fartygens innemiljö blir inte så tydlig för att dessa fartyg fortfarande använder sig av 'hjälplosningar' i form av tjockolja eller marin diesel. Halterna uppmätta i separatorrum och på bildäcken ingår i översikten som visas i diagrammet och som motsvarar de extrema toppar för respektive bränsle. Det är dessa utrymmen som i princip tar ut effekten av mindre förorenande bränslen för fartygens innemiljö.



Figur 32. Kumulativt riskindex per bränsletyp från stationära innemiljömätningar

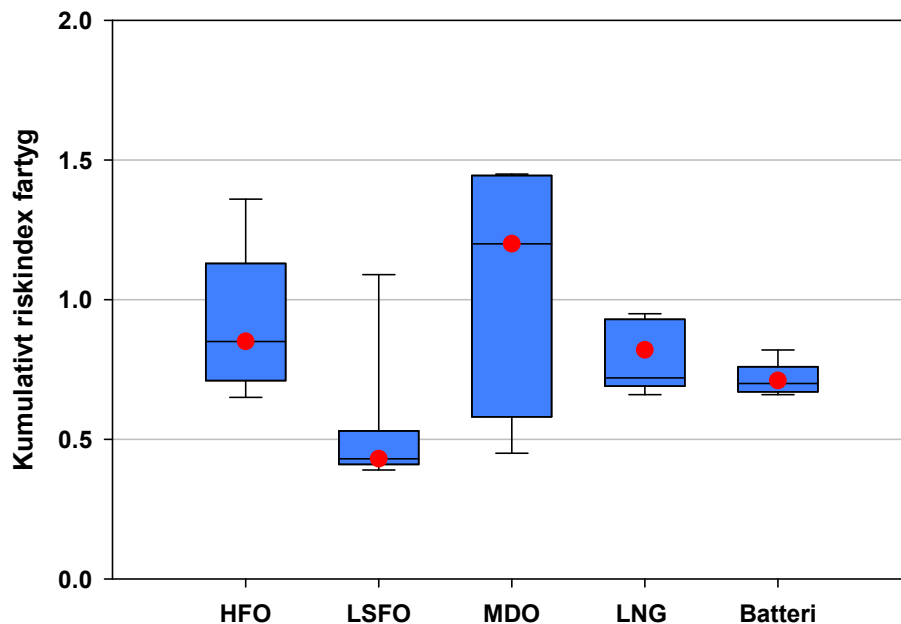
Figur 33 visar hur risker kopplade till den personliga exponeringen för NO₂, bensen, benso(a)pyren och naftalen för besättningarna i denna studie förhåller sig till normalbefolkningens exponering inomhus i hemmiljöer (aprikosfärgade fält). Det är uppenbart att även andra yrkesgrupper utsätts för farliga luftföroreningar mer i sitt arbete än i hemmet och här ser vi att majoriteten av fartygspersonalens exponeringar ligger på likartade nivåer som personalen i ett svenskt restaurangkök (grå fältet). Skillnader mellan de olika driftsalternativen var också riktiga för storleken av indexet ($p = 0,047$).



Figur 33. Kumulativt riskindex per bränsletyp från mätningar av personlig exponering.

Högsta KR kunde relateras till arbetsuppgifter utförda framför allt av fartygsingenjörer, maskinmanskap och matroser, så som rengöring av separatorer eller annan hantering av tjockolja eller marindiesel. I fortsättningen används KR från stationära mätningar för att illustrera hälsopåverkan av olika bränslen från våra tidigare studier. Undersökningen av luftföroreningarna i inomhusmiljöer genomfördes i vissa fall på samma fartyg som konverterade till ett nytt bränsle.

Figur 34 visar KR för likande typ av fartygen, kryssningsfartygen och ro-pax fartygen med olika bränslekvaliteter. HFO med 1%S och lågsvavligt RMB 0,1%S användes som bränsle på kryssningsfartyg och MDO, LNG samt batteri på ro-pax fartyg. Data från ett av våra tidigare projekt (Langer m.fl., 2015) tillsammans med data från det batteridrivna fartyget från denna studie användes i KR beräkningen. Mätdata från separatorrummet och bildäcket har uteslutits från riskindexet för att klargöra effekten av själva bränslet utan ovidkommande påverkan av andra faktorer. Batteriet och det lågsvavliga bränslet visade sig att vara de bättre alternativen från hälsosynpunkt. Höga KR för MDO kan relateras förhöjda halter och avdunstning av PAH från bränslet som vi hade påvisat i en vetenskaplig artikel (Langer m.fl., 2020).



Figur 34. Kumulativt riskindex från inomhusmätningar på ro-pax eller kryssningsfartyg. Resultat från bildäcken är uteslutna. Röda cirklar visar medianvärden.

Den stora variationen i storlek, funktion och last tillsammans med deras alternativa bränslen och 'hjälpbränslen' gjorde resultaten från denna studie något förbryllande. Det gick nämligen inte att påvisa effekten av själva bränslen på fartygens innemiljö och personalens exponering för de studerade luftföreningar på ett tydligt och systematiskt sätt. Ett betydligt bättre tillvägagångssätt är att undersöka effekter av en övergång till ett renare eller från miljösynpunkt vänligare bränsle, på fartygens innemiljö och personalens exponering för farliga kemikalier, på samma fartyg eller åtminstone på samma typ av fartyg.

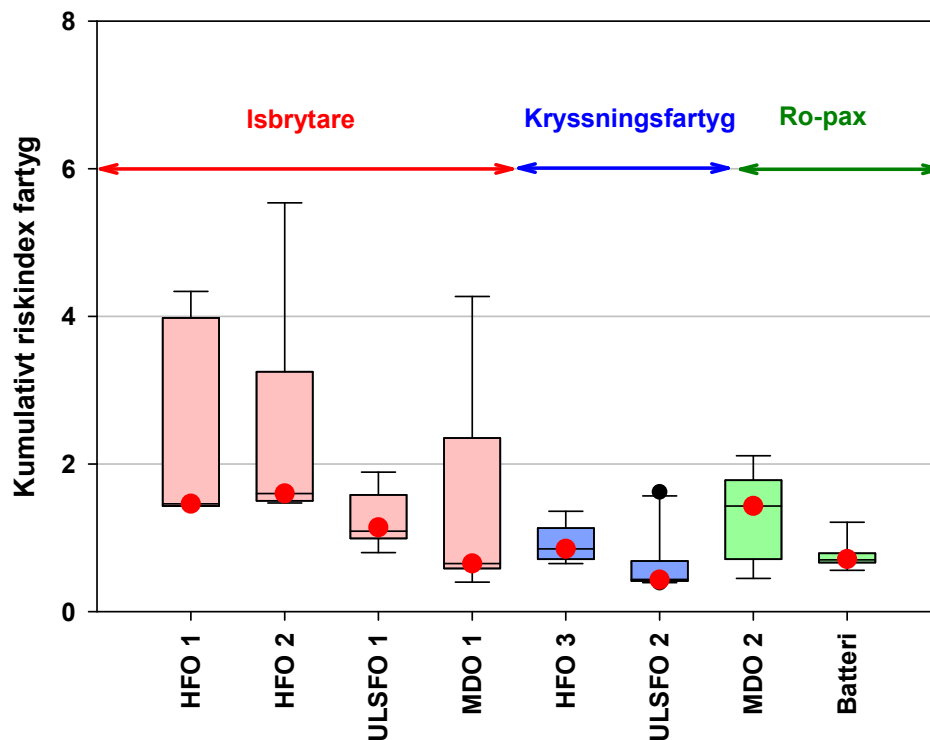
Vi har använt resultat från ett av våra tidigare studier om fartygs innemiljö, tillsammans med resultat från denna studie, för att påvisa effekten av olika bränslealternativen på fartygens innemiljö, uttryckt som den Kumulativa Riskindexet. Resultat visas i Tabell 20 och Figur 35.

Tabell 20. KR medianvärden för innemiljö på samma fartyg eller samma typ av fartyg med olika bränslen.

Fartyg	Fartyg	Bränsle	Kumulativt Riskindex
HFO 1	Isbrytare 1	HFO 1%S	1.46
HFO 2	Isbrytare 1	HFO 1%S	1.60
ULSFO 1	Isbrytare 2	3AUltraLS	1.14
MDO 1	Isbrytare 1	MDO	0.65
HFO 3	Kryssningsfartyg	HFO 1%S	0.85
ULSFO 2	Kryssningsfartyg	RMB 0,1%S	0.43
MDO 2	Ro-pax fartyg	MDO	1.43
Batteri	Ro-pax fartyg	Batteri	0.71

Effekten av övergången från HFO 1%S till ett lågsavligt bränslealternativ som till MDO har blivit i ett exempel från två isbrytarna liknande i storlek och funktion. Mätkampanjer med HFO 1%S utfördes under vinter 2013 (HFO 1) och sommaren 2013 (HFO 2), med MDO under sommaren 2016 (MDO1) och med 3AUltraLS från denna studie under vinter 2018.

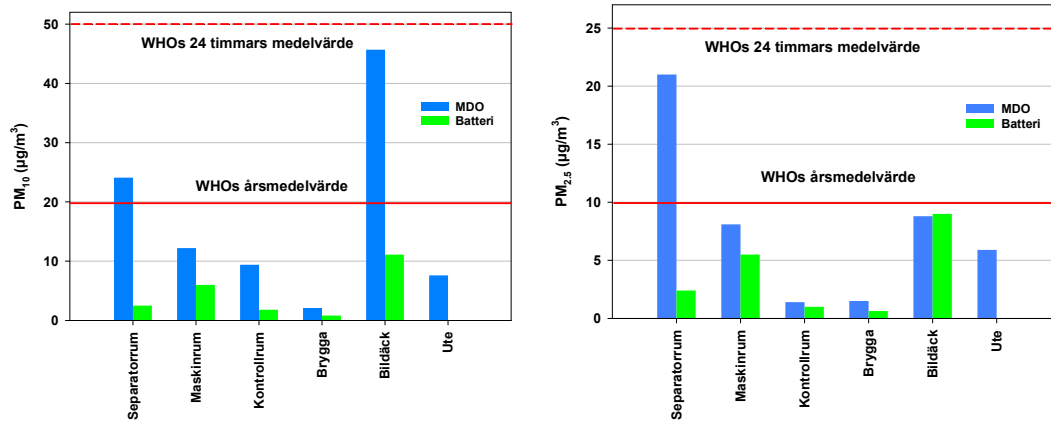
Riskindexet för ULSFO har minskat till ~ 75% av riskindexet för HFO och det har mer än halverats för MDO. Bytet från HFO till dess lågsavliga alternativet på Kryssningsfartyget och från MDO till batteriet på ro-pax fartyget resulterade i halvering av riskindexet för fartygens innemiljö.



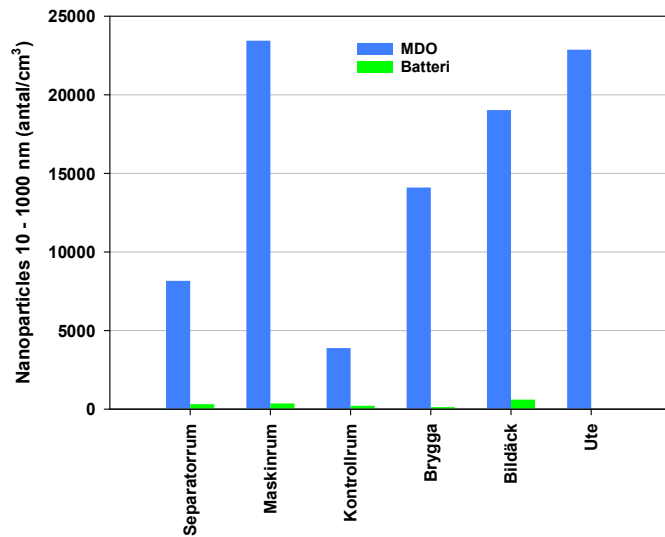
Figur 35. Kumulativt riskindex från inommiljömätningar på samma fartyg eller samma typ av fartyg, som genomförde bränslebyte. Röda cirklar: medianvärden.

I tillägg till de andra undersökningarna fick vi också tillfälle att mäta halter av partiklar på ett ropax-fartyg före och efter konvertering till batterihybriddrift. Vid första mättillfället kördes fartyget på miljödiesel under hela mätkampanjen (Langer m.fl., 2015). Vid det andra mättillfället gick fartyget till största del på batteridrift med enstaka gångtimmar på dieselgeneratorerna för att komplettera laddningen.

Halter av partiklar PM_{10} , $PM_{2.5}$ och nanopartiklar i storleksintervallet 10 – 1000 nm visar en nedgång i separatorrummet, maskinrummet och kontrollrummet under driften med batteri jämfört med driften med MDO. Minskning är mycket uppseendeväckande framför allt för halterna av nanopartiklar. Halterna från bildäcket presenteras men det är andra faktorer än fartygets bränsle som påverkar halterna (Figur 36 och Figur 37).



Figur 36. PM₁₀ (vänster bild) och PM_{2.5} (höger bild) på ro-pax fartyget under driften med MDO respektive batteri. Enheten är µg/m³.



Figur 37. Nanopartiklar (partikelstorlek 10 – 1000 nm) på ro-pax fartyget under driften med MDO respektive batteri. Enheten är antal partiklar/cm³ luft.

Slutligen kan följande sammanfattas om jämförelsen av kumulativt riskindex för de olika driftsalternativen:

- Olikheter i fartygen funktion, storlek, konstruktion och användning av sekundära bränslen gjorde bedömningen av huvudbränslen på innemiljön och personalens exponering något otydlig. Effekten av de ur miljösynpunkt renare bränslena blev inte så påtaglig i fartygens innemiljö.
- Batteri, lågsvavligt bränslet och LNG var bättre alternativ än tjockolja och MDO på fartyg med liknande funktion (kryssningsfartyg, ropax-fartyg)
- Byte till renare bränslen på samma fartyg eller fartyg med samma konstruktion och funktion visade en klar förbättring av innemiljön.
- Jämförelse av partikelhalter före och efter konvertering till batteridrift visade betydande skillnader i halter av framför allt nanopartiklar.

SLUTSATSER

Från resultaten av fartygens inomhusmätningar, personalens exponering och det hälso-relaterade riskindexet kan det sammanfattningsvis konstateras att det inte ses någon tydlig och konsekvent skillnad mellan de undersökta driftsalternativen, under de förhållanden som rådde då mätningarna genomfördes.

Generellt hade inte de olika alternativen någon påverkan på temperaturer och CO₂-halter ombord. Däremot sågs en tydlig sänkning av maskinrumstemperaturen i det fartyg som konverterat till batteridrift, jämfört med när dieselgeneratorerna var i drift. CO₂-halter var nära den globala atmosfäriska bakgrundshalten på alla fartyg, vilket tyder på god ventilation ombord. Temperaturerna var för det mesta inom rekommenderade riktlinjer för inomhusmiljö och upplevdes som neutral. Även luftfuktigheten hölls för det mesta inom det intervall som rekommenderas för inomhusmiljöer men den påverkas också av årstiden med lägre värden under vinter. Däremot upplevde en majoritet av den tillfrågade personalen att luften är torr ombord, både på arbetsplatser och i den egna hytten.

Samtliga uppmätta halter från stationära mätningar i fartygens inomhusmiljö låg mycket under Arbetsmiljöverkets hygieniska gränsvärden. De flesta var även lägre än de hälsobaserade riktlinjer som används som jämförelse med allmänna inomhusmiljöer. Maskinutrymmen var ofta mera kontaminerade än andra utrymmen ombord, särskilt med avseende ämnen avdunstade från bränslen och smörjmedel (TVOC, PAH) eller ämnen från motoravgaser (SO₂ och NO₂). Bränslen som används i övrigt för hjälp motorer bidrog osystematiskt till förhöjda halter av luftföreningar även på fartyg med relativt renare bränslen, som LNG och metanol. De förhöjda halterna kan förklaras av att tilluften ombord kontamineras av fartygets last på oljetankfartyg, oavsiktliga läckage i maskinrum, samt en större andel av drift med hjälpbränsle än det primära bränslet. Ofta visades högre halter av luftföroreningar på bildäcken. Det har inte något samband med fartygsbränslet men belyser ändå vikten av en god ventilation på bildäck så att personalens exponering blir så låg som möjligt.

Halterna av luftföroreningar för besättningens personliga exponering låg också mycket under Arbetsmiljöverkets hygieniska gränsvärden. De flesta var även lägre än rekommenderade riktvärden för inomhusmiljö, eller inom gränser för vad som anses vara hygieniskt säkra halter.

Förhöjd exponering observerades för maskinmanskaper i samband med arbetsuppgifter kopplade till fartygens bränslesystem. I övrigt sågs ingen skillnad i personlig exponering mellan befäl och manskap.

Resultaten från enkätundersökningen av personalens upplevelse av arbetsmiljö och inommiljö visar att luftkvaliteten ombord generellt upplevdes som god, både vad gäller arbetsplatserna och i de egna hytterna. Befäl och manskap hade en likvärdig upplevelse av inommiljön men intendenturpersonalen var mera missnöjda med luftkvalitet, temperatur och luftfuktighet på arbetsplatsen än däck- och maskinmanskaper.

Hälsorelaterat kumulativt riskindex kunde inte särskilja de primära bränsletypen. Bedömningen av hälsoaspekten i fartygens inommiljö blir otydlig på grund av olikheterna mellan fartygens funktion, storlek, konstruktion och framför allt användningen av sekundära bränslen. För fartygen med samma eller liknande funktion så som kryssningsfartyg och ropax-fartyg var batteridrift, lågsvavligt bränslet och LNG bättre alternativ än tjockolja och MDO. En mycket klar förbättring för inommiljö och den efterföljande exponeringen, uttryckt i det hälsorelaterade indexet, påvisades dock för samma fartyg eller samma typ av fartyg, som resultat av bränslebyte till ett renare alternativ.

Alla driftalternativ har egenskaper och risker som kräver särskild hänsyn vid utformning av system, rutiner för drift och underhåll, utbildning och träning, samt nödrutiner. Riskbedömningar behöver därför omfatta både risker för allvarlig skada, ohälsa och att arbetsuppgifter kan utföras på ett tillfredsställande sätt.

Samtliga flytande bränslen är att betrakta som giftiga utom naturgas. Metanol är akut giftigt, både vid förtäring och hudexponering. Däremot är det inte cancerframkallande. Eftersom fartygen fortsatt har system för att köra på petroleumbaserade bränslen har få arbetsuppgifter försvunnit helt och inget av driftalternativen innebär minskade direkta kostnader för personal. Däremot ses skillnader i hur ofta olika arbetsmoment behöver utföras och under vilka förhållanden. Med renare bränslen följer ett minskat behov av rengöring av komponenter och maskinutrymmen. Det innebär i sin tur en minskad exponering för farliga ämnen och att arbetstid kan läggas på andra uppgifter som upplevs mer värdeskapande.

Eftersom många arbeten ombord innebär en samtidig exponering för flera kända riskfaktorer krävs en helhetssyn som omfattar preventiva åtgärder och ett långsiktigt hälsofrämjande arbete. Det är inte tillräckligt att rikta åtgärder endast mot de värsta exponeringarna.

Sammanfattningsvis visar resultaten av denna kartläggning att det inte finns en enda bästa lösning som passar alla fartyg, oavsett typ, last eller trad. Oavsett vilket driftsalternativ som väljs innebär det högre kostnader än den konventionella lösningen med förbränningsmotorer på tung brännolja. Troligen kommer sjöfartens energiomställning att behöva ekonomiska incitament och harmoniserade regelverk för att påskynda utvecklingen av lösningar som är hållbara ur ett livscykelperspektiv och samtidigt kommersiellt gångbara. För ett hållbart och attraktivt arbetsliv i en hållbar sjöfart behöver framtidens lösningar även säkerställa att drift och underhåll kan utföras på ett tillfredsställande sätt med så liten risk för ohälsa och olycksfall som möjligt.

REFERENSER

- Abrahamsson, L. (2000). Production economics analysis of investment initiated to improve working environment. *Applied ergonomics*, 31, 1-7.
- AFS 2001:1 *Systematiskt arbetsmiljöarbete*. Stockholm: Arbetsmiljöverket.
- AFS 2011:19 *Kemiska arbetsmiljörisker*. Stockholm: Arbetsmiljöverket.
- AFS 2018:01 *Hygieniska gränsvärden*. Stockholm: Arbetsmiljöverket.
- AFS 2020:1 *Arbetsplatsens utformning*. Stockholm: Arbetsmiljöverket.
- Ahlgren, F., & Österman, C. (2015). *A social sustainability perspective on an environmental intervention to reduce ship emissions*. Paper presented at the 47th Annual Nordic Ergonomics Society Conference Creating Sustainable Work Environments, Lillehammer, Norway.
- Andersson, P., Arvidson, M., Evegren, F., et al. (2018). *Lion Fire: Extinguishment and mitigation of fires in Li-ion batteries at sea*.
- Arbetsmiljöverket. (2019:3). *Kunskapssammanställning 2019: 3: Arbetsrelaterad dödlighet – delrapport 1. Beräkning av antalet dödsfall 2016 uppdelat på olika exponeringar i arbetet*. Stockholm: Arbetsmiljöverket.
- Arbetsmiljöverket. (2021:3). *Arbetsorsakade besvär 2020*. Stockholm: Arbetsmiljöverket.
- Basner, M., Babisch, W., Davis, A., et al. (2014). Auditory and non-auditory effects of noise on health. *The Lancet*, 383(9925), 1325-1332.
- Baum-Talmor, P., & Kitada, M. (2022). Industry 4.0 in shipping: Implications to seafarers' skills and training. *Transportation research interdisciplinary perspectives*, 13, 100542.
- Bilgili, L. (2021). Life cycle comparison of marine fuels for IMO 2020 Sulphur Cap. *Science of the total Environment*, 774, 145719.
- Bohlin, P., Jones, K. C., Levin, J.-O., et al. (2010). Field evaluation of a passive personal air sampler for screening of PAH exposure in workplaces. *Journal of Environmental Monitoring*, 12(7), 1437-1444.
- Brauer, C., & Mikkelsen, S. (2010). The influence of individual and contextual psychosocial work factors on the perception of the indoor environment at work: a multilevel analysis. *International archives of occupational and environmental health*, 83(6), 639-651.
- Brynolf, S., Fridell, E., & Andersson, K. (2014). Environmental assessment of marine fuels: liquefied natural gas, liquefied biogas, methanol and bio-methanol. *Journal of Cleaner Production*, 74, 86-95.
- Brynolf, S., Taljegard, M., Grahn, M., et al. (2018). Electrofuels for the transport sector: A review of production costs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1887-1905.
- Buckpitt, A., Kephelopoulos, S., Koistinen, K., et al. (2010). Naphthalene. In *WHO Guidelines for Indoor Air Quality: Selected Pollutants*. Geneva: World Health Organization.

- Choi, H., Harrison, R., Komulainen, H., *et al.* (2010). Polycyclic aromatic hydrocarbons. In *WHO Guidelines for Indoor Air Quality: Selected Pollutants*. Geneva: World Health Organization.
- Corbett, J. J., Winebrake, J. J., Green, E. H., *et al.* (2007). Mortality from ship emissions: a global assessment. *Environmental science & technology*, 41(24), 8512-8518.
- Desmond, K. (2017). *Electric boats and ships: a history*: McFarland.
- DNV. (2020). *Energy Transition Outlook 2020. A global and regional forecast to 2050*. Retrieved from Høvik, Norway:
- EMSA. (2007). *FINAL REPORT. Study on Ships producing reduced quantities of ships generated waste – present situation and future opportunities to encourage the development of cleaner ships*. Retrieved from
- EMSA. (2021). *Annual overview of marine casualties and incidents 2021*. Lisbon: European Maritime Safety Agency (EMSA).
- Englert, D., Losos, A., Raucci, C., *et al.* (2021). *The Role of LNG in the Transition Toward Low-and Zero-Carbon Shipping*. Washington, DC: World Bank
<https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/35437>
- Eriksson, H. P., Forsell, K., & Andersson, E. (2020). Mortality from cardiovascular disease in a cohort of Swedish seafarers. *International archives of occupational and environmental health*, 93(3), 345-353.
- EU-OSHA. (2017). *An international comparison of the cost of work-related accidents and illnesses*. Bilbao: Europeiska arbetsmiljöbyrån (EU-OSHA).
- EU. (2016/802). Europaparlamentets och rådets direktiv (EU) 2016/802 om att minska svavelhalten i vissa flytande bränslen (kodifiering). Europaparlamentet, Europeiska unionens råd
- EU. (2017/164). *Kommissionens direktiv (EU) 2017/164 av den 31 januari 2017 om en fjärde förteckning över indikativa yrkeshygieniska gränsvärden*.
- Eyring, V., Isaksen, I. S. A., Berntsen, T., *et al.* (2010). Transport impacts on atmosphere and climate: Shipping. *Atmospheric Environment*, 44(37), 4735-4771.
- Fechter, L. D., Chen, G.-D., Rao, D., *et al.* (2000). Predicting Exposure Conditions that Facilitate the Potentiation of Noise-Induced Hearing Loss by Carbon Monoxide. *Toxicological Sciences*, 58(2), 315-323.
- Ferm, M. (2001). *The theories behind diffusive sampling*. In Proceedings from the International Conference on Measuring Air Pollutants by Diffusive Sampling, Montpellier, France.
- Ferm, M., & Rodhe, H. (1997). Measurements of air concentrations of SO₂, NO₂ and NH₃ at rural and remote sites in Asia. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 27(1), 17-29.
- FN. (2019). *UN Secretary-General's Roadmap for Financing the 2030 Agenda for Sustainable Development 2019-2021: UN Sustainable Development Goals*.
- FoHMFS. (2014:18). *Folkhälsomyndighetens allmänna råd om ventilation*. Stockholm: Folkhälsomyndigheten.

- Forsell, K., Björ, O., Eriksson, H., *et al.* (2022). Cancer incidence in a cohort of Swedish merchant seafarers between 1985 and 2011. *International archives of occupational and environmental health*.
- Fridell, E., & Salo, K. (2016). Measurements of abatement of particles and exhaust gases in a marine gas scrubber. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 230(1), 154-162.
- Goggins, R. W. a. S. P. a. N. G. L. (2008). Estimating the effectiveness of ergonomics interventions through case studies: Implications for predictive cost-benefit analysis. *J Safety Res*, 39(3), 339--344.
- Hagenbjörk-Gustafsson, A., Tornevi, A., Andersson, E. M., *et al.* (2014). Determinants of personal exposure to some carcinogenic substances and nitrogen dioxide among the general population in five Swedish cities. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 24(4), 437.
- Huang, Z., Chen, K., Lai, G., *et al.* (2016). Epidemiological study on the health effects and biomarkers discovery in workers exposed to occupational low concentration of benzene. *Toxicology Letters*, 258, S88-S89.
- Hult, C., Österman, C., Praetorius, G., *et al.* (2017). *Intendenturpersonalens arbetsmiljö: arbetsmiljö, arbetsupplevelser, motivation och sjukskrivningar på passagerarfartyg*. Kalmar: Linnéuniversitetet.
- ICS/OCIMF/IAPH. (2020). *International Safety Guide for Oil Tankers and Terminals (ISGOTT 6)* London: Witherby's.
- IMO. (2018). *IMO and Sustainable Development. How international shipping and the maritime community contribute to sustainable development*. London: International Maritime Organization (IMO).
- IMO. (2019). *Consistent Implementation of MARPOL Annex VI, 2019 ed.* London: International Maritime Organization (IMO).
- IMO. (2022). Special Areas under MARPOL.
<https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Special-Areas-Marpol.aspx>
- IRIS. (2017). Integrated Risk Information System/Methanol toxicological review.
<https://www.epa.gov/iris>
- Johanson, U., & Johrén, A. (2017). *Personalekonomi idag*. Stockholm: Liber AB.
- Kim, J., de Dear, R., Cândido, C., *et al.* (2013). Gender differences in office occupant perception of indoor environmental quality (IEQ). *Building and Environment*, 70(Supplement C), 245-256.
- Krajnak, K. (2018). Health effects associated with occupational exposure to hand-arm or whole body vibration. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*, 21(5), 320-334.
- Langer, S., & Bekö, G. (2013). Indoor air quality in the Swedish housing stock and its dependence on building characteristics. *Building and Environment*, 69, 44-54.
- Langer, S., Moldanová, J., Bloom, E., *et al.* (2014). Indoor environment onboard the Swedish icebreaker Oden. In: Hong Kong.

- Langer, S., Moldanova, J., & Österman, C. (2015). *God innemiljö på svenska fartyg. IVL-rapport B 2242*. Stockholm: IVL Svenska Miljöinstitutet.
- Langer, S., Österman, C., Strandberg, B., *et al.* (2018). Riskbedömning av svenska sjömäns yrkesmässiga exponering för toxiska luftföroreningar: Mätningar och enkätundersökning. In: IVL Svenska Miljöinstitutet.
- Langer, S., Österman, C., Strandberg, B., *et al.* (2020). Impacts of fuel quality on indoor environment onboard a ship: From policy to practice. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 83, 102352.
- Lewné, M., Johannesson, S., Strandberg, B., *et al.* (2017). Exposure to Particles, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, and Nitrogen Dioxide in Swedish Restaurant Kitchen Workers. *Annals of work exposures and health*, 61(2), 152-163.
- Lighthouse. (2021a). *Electric Light – Lätta elfartyg*. Retrieved from Göteborg:
- Lighthouse. (2021b). *NRIA Sjöfart 2021. Nationell agenda för sjöfartsforskning och -innovation*. Göteborg: Lighthouse.
- Ljungberg, J., Neely, G., & Lundström, R. (2004). Cognitive performance and subjective experience during combined exposures to whole-body vibration and noise. *International archives of occupational and environmental health*, 77(3), 217-221. doi:10.1007/s00420-003-0497-7
- Lohela-Karlsson, M., Nybergh, L., & Jensen, I. (2018). Perceived health and work-environment related problems and associated subjective production loss in an academic population. *BMC Public Health*, 18(1), 257. doi:10.1186/s12889-018-5154-x
- Mandin, C., Bonvallot, N., Kirchner, S., *et al.* (2009). Development of French indoor air quality guidelines. *CLEAN—Soil, Air, Water*, 37(6), 494-499.
- Mynak. (2019). *Arbetshälsoekonomiskt analysverktyg*. Retrieved from
- Phillips, D. H. (1983). Fifty years of benzo(a)pyrene. *Nature*, 303, 468. doi:10.1038/303468a0
- Pilcher, J. J., Nadler, E., & Busch, C. (2002). Effects of hot and cold temperature exposure on performance: a meta-analytic review. *Ergonomics*, 45(10), 682-698. doi:10.1080/00140130210158419
- Pope, C. A., Burnett, R. T., Thurston, G. D., *et al.* (2004). Cardiovascular mortality and long-term exposure to particulate air pollution: epidemiological evidence of general pathophysiological pathways of disease. *Circulation*, 109(1), 71-77.
- Pott, P. (1776). CHIRURGICAL OBSERVATIONS relative to the CATARACT, the POLYPUS of the NOSE, the CANCER of the SCROTUM, the different Kinds of RUPTURES, and the MORTIFICATION of the TOES and FEET. *The Weekly entertainer and west of England miscellany*, 5(129), 622-625.
- Preuss, R., Angerer, J., & Drexler, H. (2003). Naphthalene—an environmental and occupational toxicant. *International archives of occupational and environmental health*, 76(8), 556-576.
- Ragas, A. M., Oldenkamp, R., Preeker, N., *et al.* (2011). Cumulative risk assessment of chemical exposures in urban environments. *Environment international*, 37(5), 872-881.

- Regeringskansliet. (2015). *Att förändra vår värld: Agenda 2030 för hållbar utveckling. Svensk översättning av FN:s Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development*. Stockholm: Regeringskansliet.
- Rehmatulla, N., Parker, S., Smith, T., *et al.* (2017). Wind technologies: Opportunities and barriers to a low carbon shipping industry. *Marine Policy*, 75, 217-226.
- ReUseHeat. (2021). Accessible Urban Waste Heat. <https://www.reuseheat.eu/>
- Rinsky, R. A., Smith, A. B., Hornung, R., *et al.* (1987). Benzene and leukemia. *New England journal of medicine*, 316(17), 1044-1050.
- Rose, L. M., Orrenius, U. E., & Neumann, W. P. (2013). Work Environment and the Bottom Line: Survey of Tools Relating Work Environment to Business Results. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 23(5), 368-381. doi:10.1002/hfm.20324
- SFS. (1974:152). *Kungörelse (1974:152) om beslutad ny regeringsform*. Stockholm: Sveriges Riksdag.
- Skepp, E., & Bäckström, T. (2018). *Arbets-skador i svenska sjöfarten åren 2014-2016*. Examensarbete inom teknik, hälsa och arbetsmiljöutveckling, avancerad nivå (15 hp)). Kungliga tekniska högskolan, Stockholm.
- SS-EN. (16798-1:2019). SS-EN 16798-1:2019 Byggnaders energiprestanda - Ventilation för byggnader- Del 1: Indataparametrar för inomhusmiljö för konstruktion och bestämning av byggnaders energiprestanda gällande luftkvalitet, termiskt klimat, belysning och akustik - Modul M1-6. Stockholm: SIS, Swedish Standards Institute.
- SSI. (2021). *Roadmap to a sustainable shipping industry*. London, UK: Sustainable Shipping Initiative.
- Stanton, N. A. (2006). Hierarchical task analysis: Developments, and applications, and extensions. *Applied ergonomics*, 37(1), 55--79.
- Staxler, L., Järup, L., & Bellander, T. (2001). Hälsoeffekter av luftföroreningar. En kunskapssammanställning inriktad på vägtrafiken i tätorter. Rapport från Miljömedicinska enheten 2001:2.
- Strandberg, B., Julander, A., Sjöström, M., *et al.* (2018). Evaluation of polyurethane foam passive air sampler (PUF) as a tool for occupational PAH measurements. *Chemosphere*, 190, 35-42.
- Strömberg, C., Aboagye, E., Hagberg, J., *et al.* (2017). Estimating the effect and economic impact of absenteeism, presenteeism, and work environment-related problems on reductions in productivity from a managerial perspective. *Value in Health*, 20(8), 1058-1064.
- Sweship. (2020). *Svensk sjöfart: nyckeltal 2019-2020*. Göteborg: Föreningen Svensk sjöfart.
- Taljegard, M., Brynolf, S., Grahn, M., *et al.* (2014). Cost-effective choices of marine fuels in a carbon-constrained world: results from a global energy model. *Environmental science & technology*, 48(21), 12986-12993.
- Taxell, P., & Santonen, T. (2016). 149. *Diesel Engine Exhaust*. Retrieved from Göteborg: Transportstyrelsen. (2021a). *Säkerhetsöversikt sjöfart 2020*. Norrköping: Transportstyrelsen.

- Transportstyrelsen. (2021b). *TSG 2018-735. Transportstyrelsens riktlinjer för batteri-och hybriddrivna fartyg. Version 02. 2021-02-20.*
- UBA. (2018). German Committee on Indoor Guide Values. <https://www.umweltbundesamt.de/en/topics/health/commissions-working-groups/german-committee-on-indoor-guide-values#textpart-1>
- UNCTAD. (2021). *Review of Maritime Transport 2021*. Geneva: United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD).
- USEPA. (1986). *Guidelines for health risk assessment of chemical mixtures. Fed Regist 51(185), 34014–25.*
- Van, T. C., Ramirez, J., Rainey, T., *et al.* (2019). Global impacts of recent IMO regulations on marine fuel oil refining processes and ship emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment, 70*, 123-134.
- Vetenskapsrådet. (2017). *God forsknings sed*. Stockholm: Vetenskapsrådet.
- Wargocki, P. (2004). Sensory pollution sources in buildings. *Indoor Air, 14(7)*, 82-91.
- WHO. (2005). *Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulphur dioxide. Global Update 2005. Summary of risk assessment*: World Health Organization.
- WHO. (2010). *World Health Organization. Selected pollutants. WHO indoor air quality guidelines*. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe.
- Winnes, H., Fridell, E., & Moldanová, J. (2020). Effects of Marine Exhaust Gas Scrubbers on Gas and Particle Emissions. *Journal of Marine Science and Engineering, 8(4)*, 299.
- Wise, S. A., Sander, L. C., & Schantz, M. M. (2015). Analytical Methods for Determination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) — A Historical Perspective on the 16 U.S. EPA Priority Pollutant PAHs. *Polycyclic Aromatic Compounds, 35(2-4)*, 187-247.
- Wu, D., Li, Q., Ding, X., *et al.* (2018). Primary Particulate Matter Emitted from Heavy Fuel and Diesel Oil Combustion in a Typical Container Ship: Characteristics and Toxicity. *Environmental science & technology, 52(21)*, 12943-12951.
- Yazar, M., Bellander, T., & Merritt, A.-S. (2011). Personal exposure to carcinogenic and toxic air pollutants in Stockholm, Sweden: A comparison over time. *Atmospheric Environment, 45*, 2999-3004.
- Zetterdahl, M., Moldanová, J., Pei, X., *et al.* (2016). Impact of the 0.1% fuel sulfur content limit in SECA on particle and gaseous emissions from marine vessels. *Atmospheric Environment, 145*, 338-345.
- Åkerström, M., Johannesson, S., Bergemalm-Rynell, K., *et al.* (2009). *Allmänbefolkningens exponering för bensen, toluen, xylener och naftalen i Göteborg 2006*. Göteborg: Västra Götalandsregionens Miljömedicinska Centrum. Arbets- och miljömedicin.
- Österman, C., Hult, C., & Praetorius, G. (2020). Occupational safety and health for service crew on passenger ships. *Safety science, 121*, 403-413.