

Antti Holopainen

**MATALAN LEIMAHDUSPISTEEN  
POLTTOAINEIDEN KÄYTTÖ ALUK-  
SILLA**

**Ammoniakki**

Opinnäytetyö

Merenkulun ylempi ammattikorkeakoulututkinto

Merenkulun johtamisen koulutus (ylempi amk)

2025



**Kaakkois-Suomen  
ammattikorkeakoulu**

Tutkintonimike	Merenkulun ylempi ammattikorkeakoulututkinto
Tekijä/Tekijät	Antti Holopainen
Työn nimi	Matalan leimahduspisteen polttoaineiden käyttö aluksilla - Ammoniakki
Toimeksiantaja	XAMK
Vuosi	2025
Sivut	67 sivua
Työn ohjaaja(t)	Joel Paananen

## TIIVISTELMÄ

Merenkulun päästöjen säätelyn tiukentuessa vaihtoehtoisten polttoaineiden käytön kiinnostavuus kasvaa ja ammoniakki on osoittautunut yhdeksi potentiaalisimmista vaihtoehtoista täyttämään yhä kiristyvät päästövaatimukset. Ammoniakki on potentiaalinen osa merenkulun polttoaineiden vihreää siirtymää ja se on vahvasti sidoksissa vihreän vedyn tuotantoon.

Ammoniakin potentiaalista ja käytöstä merenkulun polttoaineena on julkaistu viimeisen viiden vuoden aikana useita tutkimuksia sekä selvityksiä. IMO on julkaissut vuoden 2025 alussa ammoniakin käytöstä merenkulun polttoaineena väliaikaisohjeistuksen, joka harmonisoi ammoniakin käytön teknisiä vaatimuksia.

Teknisten vaatimusten selkiytyessä ammoniakin käyttö merenkulun polttoaineena edellyttää riittävän koulutuskokonaisuuden rakentamista.

Tämä tutkimus kokoaa viimeisimmän tiedon ammoniakin turvallisesta käytöstä ja sen potentiaalista merenkulun polttoaineena. Katsaukseen valitut tutkimukset ja selvitykset antavat merkittävää informaatiota ammoniakin käytöstä merenkulun polttoaineena ja haasteista, joita siihen kohdistuu.

Tämän kirjallisuuskatsauksen perusteella voidaan muodostaa kokonaiskuva ammoniakin turvallisesta käytöstä merenkulun polttoaineena sekä rakentaa koulutuskokonaisuus aiheesta. Katsaus korostaa työturvallisuutta vahvistavien toimintatapojen hallintaa ja henkilöturvallisuuteen liittyvien laitteiden käytön osaamisvaatimuksia ammoniakkikäyttöisillä aluksilla.

Katsauksessa nostetaan esiin myös jatkotutkimusaiheita, joiden tulokset voivat parantaa ammoniakin turvallista käyttöä merenkulun polttoaineena etenkin poikkeustilanteesta johtuvan altistumisen ehkäisemiseksi.

**Asiasanat:** ammoniakki, koulutus, merenkulku, osaamisvaatimukset, polttoaine, turvallisuus

Degree title	Master of Maritime Management
Author (authors)	Antti Holopainen
Thesis title	Onboard use of low flashpoint maritime fuels - Ammonia
Commissioned by	XAMK
Time	2025
Pages	67 pages
Supervisor	Joel Paananen

## ABSTRACT

As maritime emission regulations tighten, the interest in alternative fuels is growing, and ammonia has proven one of the most promising alternatives for fossil fuels to meet the regulatory requirements. Ammonia has the potential to be a major component in the green fuel transition of the maritime sector, when linked to the green hydrogen production.

In recent years numerous studies and reports have been published on the potential and use of ammonia as a maritime fuel. At the beginning of 2025, the IMO released interim guidelines on the use of ammonia as a maritime fuel. These guidelines aim to harmonize the technical requirements related to its use.

While the technical requirements are being set for ammonia as a maritime fuel, the training and competence requirements however require thorough review for the development of adequate training programs.

This study presents a literature review of the latest research on the safe use and potential of ammonia as a maritime fuel. The selected literature has offered the most up-to-date and relevant information on the challenges involved in the use of ammonia as a maritime fuel.

As a result, this study offers a comprehensive insight into the current knowledge on the use of ammonia as a maritime fuel, providing material for educational purposes. The review emphasizes the importance of safe operational work practices and competencies related to safety equipment on board ammonia-fuelled vessels

Additionally, this study offers topics for further research on improving safety onboard ammonia-fuelled vessels, particularly in preventing human exposure to ammonia gas in abnormal operating conditions.

**Keywords:** ammonia, training, maritime, competence requirements, fuel, safety

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
1.1	Tutkimuksen rakenne .....	6
2	TUTKIMUSMENETELMÄT .....	8
2.1	Kirjallisuuskatsaus .....	9
2.2	Aineistonkeruu .....	10
2.3	Tutkimustehtävän rajaus ja tutkimusongelmat .....	11
3	AMMONIAKKI MERENKULUN POLTTOAINEENA .....	12
3.1	Ammoniakin ominaisuudet.....	13
3.1.1	Syttymis- ja räjähdysvaarat.....	14
3.1.2	Höyrynpaine ja lämpötila .....	15
3.1.3	Korroosio, reaktiivisuus ja liukoisuus veteen .....	16
3.2	Ammoniakin säätely merenkulussa .....	16
3.3	Myrkyllisyys ihmiselle.....	17
3.4	Vaikutukset ympäristöön.....	21
3.5	Ammoniakin potentiaali merenkulun polttoaineena .....	22
3.6	IGF-koodin ja luokituslaitosten ohjeistusten eroavaisuudet.....	25
3.7	Ammoniakin käytön inhimillinen näkökulma .....	27
4	KOULUTUS AMMONIAKKIA POLTTOAINEENA KÄYTTÄVILLÄ ALUKSILLA.....	29
4.1	Turvallisuus ja henkilökohtaiset suojavälineet.....	29
4.2	Työterveys ja turvallisuustoimenpiteet.....	29
4.3	Aluksen rakenne ja järjestelmät.....	31
4.3.1	Polttoainejärjestelmä ja syöttö .....	33
4.3.2	FPR ja TCS.....	35
4.3.3	Polttoainesäiliöt.....	36
4.3.4	Ammoniakkiputkistot.....	37
4.4	Järjestelmien hallinta .....	37
4.4.1	Suunnittelun perusteet.....	38

4.4.2	Toiminnalliset vaatimukset.....	39
4.5	Aluksen polttoainetäydennys .....	41
4.5.1	Polttoaineen täydennysasema.....	41
4.6	Päästöjen hallinta .....	44
4.7	Riskienarviointi ja vaarojen ehkäisy.....	47
4.7.1	Aluejako aluksella .....	48
4.7.2	Turvalliset työtavat.....	49
4.7.3	Suojavarusteiden käyttö .....	51
4.8	Huolto ja kunnossapito .....	53
4.8.1	Laitteiden eristäminen, tyhjentäminen ja käyttöönotto.....	54
4.9	Hätätilannehallinta .....	55
4.10	Palontorjunta.....	56
4.11	SIMOPS.....	58
5	YHTEENVETO .....	59

## LÄHDELUETTELO

## 1 JOHDANTO

Merenkulun kasvihuonekaasupäästöjen rajoittamiseksi on asetettu kunnianhimoisia tavoitteita ja Euroopan unionin alueelle kohdistuu uutta lainsäädäntöä. Näiden toimien seurauksena on merenkulkualalla alettu etsimään vaihtoehtoja konventionaalisille aluspolttoaineille. Yhtenä potentiaalisena vaihtoehtona pidetään ammoniakkia. Tämä tutkimus on tehty vastaamaan kysymykseen, mitä ammoniakkikäyttöisten alusten miehistölle tulisi kouluttaa ammoniakin erityispiirteistä alusten turvallisen operoinnin varmistamiseksi. Samoin tutkimus selvittää, miten ammoniakkia säädellään merenkulun polttoaineena sekä min-kälaisia vaatimuksia säätely asettaa alusten suunnittelulle ja käytölle. Tutkimuksen tavoitteena on koota tämänhetkinen tieto ja kartoittaa ammoniakin potentiaalia merenkulun tulevaisuuden polttoaineena.

Aiheesta on tehty viimeisen noin viiden vuoden aikana laajasti tutkimusta, joka on keskittynyt sekä ammoniakin potentiaaliin hiilivapaana polttoaineena että sen turvalliseen käyttöön merenkulussa. Yleisesti voidaan todeta, että tämänhetkinen ammoniakin potentiaaliin merenkulun polttoaineena liittyvä tutkimus käsittelee yleisesti merenkulun vihreää siirtymää ja arvioi usein ammoniakin tuotannon järjestelyjä sekä polttoaineeksi valmistetun ammoniakin hintaa. Ammoniakin turvallista käyttöä merenkulun polttoaineena käsittelevät tutkimukset kuvailevat ammoniakin myrkyllisyydestä johtuvia riskejä ja niiden varotoimia. Säätelyn osalta IMO:n alakomitean Carriage of Cargoes and Containers julkaisema väliaikaisohjeistus ammoniakin käytöstä aluspolttoaineena asettaa vaatimukset alusten suunnittelulle ja toiminnallisuuksille. Edellä mainittu tutkimus kokoaa yhteen sekä ammoniakin potentiaaliin että turvalliseen käyttöön liittyvien tutkimusten ja selvitysten merkittävimmät johtopäätökset, sekä kuvaillee väliaikaisohjeistuksen sisältämiä vaatimuksia ammoniakkikäyttöisille aluksille.

### 1.1 Tutkimuksen rakenne

Tämä kirjallisuuskatsaus koostuu johdannosta, tutkimusmenetelmän kuvauksesta, tutkimuksen tuloksista ja niiden analyysistä. Tutkimusmenetelmä luvussa kuvaillaan, kuinka aihetta lähestytään ja mitä kriteerejä käytetään kirjal-

lisuuskatsauksen aineiston rajaamisessa. Tavoitteena on kerätä aineistoa siten, että sen perusteella voidaan koota selkeä ja informatiivinen kokonaisuus ammoniakkin käytöstä aluspolttoaineena.

IMO:n julkaisemat väliaikaisohjeet ammoniakkia polttoaineena käyttäville aluksille ohjaavat tutkimuksen teknisiin vaatimuksiin keskittyvää osaa. Kyseisen ohjeistuksen valmistelun aikana ja ennen sitä on julkaistu runsaasti muita tutkimuksia ja selvityksiä, jotka koskevat ammoniakkin käyttöä aluspolttoaineena. Kirjallisuuskatsaus koostaa edellä mainitun olemassa olevan tiedon.

Tutkimus koostuu kolmesta osasta, joissa kuvaillaan alustekniikan vaatimuksia ja turvallisuutta ammoniakkikäyttöisissä aluksissa sekä hiilettömien ja vähähiilisten polttoaineiden säätelyä merenkulussa. Tutkimukset ja selvitykset, joita tässä työssä on tarkasteltu antavat kattavan kuvan alan tämänhetkisestä tilanteesta. Tutkimuksessa tarkastellaan ammoniakkin myrkyllisyyteen liittyviä riskejä sekä niitä seikkoja, joilla terveyshaittoja voidaan vähentää. Tutkimusongelma on selvittää, mitä vaatimuksia alusten suunnittelun ja käytön osalta kohdistuu ammoniakkikäyttöisiin aluksiin sekä mitä ammoniakkin käytöstä polttoaineena tulisi kouluttaa alushenkilöstölle.

Luvussa kolme tarkastellaan ammoniakkin ominaisuuksia ja käsitellään sen vaarat ja potentiaali merenkulun polttoaineena. Lisäksi kuvataan ammoniakkin luokittelu sekä tarkastellaan sen myrkyllisten ominaisuuksien vaikutuksia ihmisiin ja ympäristöön. Ammoniakkikäyttöisiin aluksiin liittyvää säätelyä tarkastellaan nykyhetken osalta sekä tarkastellaan, kuinka säätely on muodostunut nykyiseen muotoon. Hiilidioksidipäästöjen säätelyn muodostumista tulevien vuosien osalta tarkastellaan yleisellä tasolla ja sen vaikutuksia pohditaan osana suurempaa kokonaisuutta.

Luvussa neljä tarkastellaan ammoniakkin käyttöä polttoaineena, alusten suunnittelua ja toiminnallisuuksia säädösten ja vaatimusten näkökulmasta. Samoin tarkastellaan olemassa olevan tiedon perusteella suosituksia osaamisvaatimuksista ja muista henkilöstölle koulutettavista asioista. Luvussa nostetaan tutkimusten ja selvitysten rinnalle ammoniakkiteollisuuden tunnettuja käytäntöjä varmentamaan ja arvioimaan tutkimustietoa.

Yhteenvedossa tarkastellaan tutkimuksen tuloksia ja arvioidaan toimeksianton tavoitteiden täyttymistä. Yhteenvedo koostaa ja analysoi tutkimuksen tiedon ja pyrkii korostamaan merkittävimpiä tutkimuksen havaintoja.

## 2 TUTKIMUSMENETELMÄT

Tutkimusmenetelmä on kuvaileva kirjallisuuskatsaus, joka käsittelee ammoniakkin käyttöä, sen koulutusvaatimuksia ja potentiaalia merenkulun polttoaineena kokonaisvaltaisesti. Kuvaileva kirjallisuuskatsaus on määritelmän mukaan yleiskatsaus, jossa tutkittavaa ilmiötä pystytään kuvailemaan laaja-alaisesti ilman tarkkoja rajauksia tai aineiston valintaan liittyviä metodisia sääntöjä (Salminen 2011, 6). Tutkimusta on suunnattu aiemmin julkaistujen yleiskatsausten ja selvitysten merkittävimpien havaintojen pohjalta esittelemään tärkeimmät aiheet, jotka määrittävät ammoniakkin käyttöä merenkulun polttoaineena. Aiemman tutkimus- ja selvitystiedon perusteella tärkeimmäksi tarkasteltavaksi aiheeksi valikoitui ammoniakkin käytön turvallisuus, joka on vahvasti sidoksissa koulutuksellisten näkökulmien kanssa. Samoin aiemman tiedon perusteella merkittävänä aiheena on ammoniakkin vahva side vihreään siirtymään, jota katsauksessa käsitellään aiheesta tehtyjen tutkimusten ja selvitysten perusteella.

Turvallisuuden näkökulmasta katsaus käsittelee ammoniakkia merenkulun polttoaineena sekä teknisten vaatimusten että osaamisen vaatimusten osalta. Teknisten vaatimusten osalta katsaus käsittelee IMO:n julkaisemia väliaikaisohjeita sekä luokituslaitosten aiemmin tekemiä ohjeistuksia ammoniakkin käyttöisille aluksille. Luokituslaitosten tekemät ohjeistukset perustuvat aiemmin tehtyihin selvityksiin ja täten ne ovat osaltaan toimineet ohjaavana aineistona IMO:n väliaikaisohjeistukselle. Osaamisen vaatimuksia katsaus tutkii MMMCZCS:n (Mærsk Møller Mc-Kinney Center for Zero Carbon Shipping) tekemien selvitysten ja kyselytutkimuksen perustella. MMMCZCS on merenkulun vihreän siirtymän kiihdyttämistä varten vuonna 2020 perustettu voittoa tavoittelematon tutkimus- ja kehityslaitos (Mærsk Møller Mc-Kinney Center for Zero Carbon Shipping 2025).

Sekä tekniikkaan että osaamiseen liittyvien seikkojen osalta on myös tehty akateemisia tutkimuksia, jotka tarkastelevat ammoniakikäyttöisten alusten erityispiirteitä ja ratkaisuja tarkemmin. Käytettävää tutkimusmateriaalia on rajattu siten, että katselmukseen on otettu mukaan materiaalia noin viimeisen viiden vuoden ajalta. Tutkimusartikkelien vaatimuksena on julkaisu vuoden 2020 aikana ja sen jälkeen. Tämä kriteeri on valittu osittain vuonna 2021 EU:n Fit for 55 säädösehdotuspaketin julkaisun johdosta, sillä sen vaikutuksesta kiinnostus vähähiilisiä polttoaineita kohtaan on kasvanut merkittävästi. Toisaalta rajaus myös palvelee viimeisimmän tekniikan käsittelyä ja nykyaikaisia kestäväen kehityksen periaatteita, kuten päästöjen laskentaa well-to-wake-periaatteella.

Tutkimuksen ajankohtaa voidaan pitää onnistuneena, sillä tekniikkaan liittyvää tutkimustietoa, joka on tehty tukemaan IMO:n väliaikaisohjeiden valmistamista, on ollut saatavilla runsaasti ja sen on hyvin ajantasaista. Samoin muutamien edellisvuoden aikana tehty työ kaupallisten toimijoiden ja luokituslaitosten toimesta on tuonut aiheeseen liittyen paljon tietoa ja ratkaisuja. IMO:n väliaikaisohjeet on julkaistu alkuvuodesta 2025.

## **2.1 Kirjallisuuskatsaus**

Tässä työssä käytetty tutkimusmenetelmä on kvalitatiivinen, eli laadullinen. Kvalitatiivisen tutkimuksen tunnuspiirteitä ovat muun muassa tutkimuksen kokonaisvaltaisuus ja tiedon koonti todellisessa tilanteessa, sekä laadullisten metodien käyttö aineiston hankinnassa. Tieto on useiden aiheeseen liittyvien tutkimusdokumenttien ja taustaselvitysten diskursiivinen analyysi. (Hirsjärvi ym. 2007, 160.) Kuvaileva kirjallisuuskatsaus käsittelee viimeisintä tutkimustietoa ammoniakkin käytöstä aluspolttoaineena. Katsaus sisältää tutkimustietoa noin viiden viime vuoden ajalta niin turvallisuuteen kuin tekniikkaan ja käyttöön liittyvistä aiheista. Tiedonhankinnan syventämiseksi ja hyvän yleiskuvan saavuttamiseksi on tietoa hankittu myös osallistumalla webinaareihin ja keskusteluihin alan ammattilaisten kanssa. Näin hankittua tietoa on käytetty suuntaamaan tutkimusta merkittävimpiin seikkoihin ja nostamaan esiin ne aihealueet, jotka vaativat mahdollisesti lisätutkimusta.

Kirjallisuuskatsaus on tehty osittain käyttäen Googlen NotebookLM-tekoälysovellusta. Kyseiselle tekoälysovellukselle on ominaista se, että käyttäjä valitsee itse materiaalin, josta sovellus etsii tietoa ja täten käytettävä sisältö on täysin käyttäjän hallinnassa. Käytetty tekoälysovellus ei ole tuottanut tekstiä tähän tutkimukseen, vaan sitä on käytetty apuna Kaakkurista haetun tutkimustiedon tarkastelussa. Sovellus toimii siten, että se vastaa sille annettuihin kysymyksiin lyhyesti ja aina viitaten sille annettuun materiaaliin. Tyypillisesti sovellus vastaa muutamalla ranskalaisella viivalla ja näiden lyhyiden vastausten perusteella on tutkimustyötä voitu kohdentaa täsmällisesti kulloinkin käsiteltyyn aihepiiriin. Tutkimuksen tarkoitus on kartoittaa tämänhetkistä säätelyä ja viimeisintä tutkimustietoa ammoniakkin aluspolttoainekäytössä, sekä selvittää, kuinka edellä mainittu vaikuttaa merenkulkualan koulutukseen.

## **2.2 Aineistonkeruu**

Tiedonkeruu on aloitettu loppuvuodesta 2024 ja se on jatkunut käytännössä työn valmistumiseen saakka noin maaliskuulle 2025 saakka. Kirjallisuuskatsauksen tutkimusartikkelit ovat peräisin pääasiassa e-kirjastopalvelu Kaakkurista. Haku suoritettiin rajaamalla julkaisujen aika viimeisimpään noin neljään vuoteen vuodesta 2024 ja käyttämällä vain vertaisarvioitua materiaalia. Pääasiassa hakusanoina on käytetty ”ammonia”, ”safety”, ”maritime”, ”fuel” ja ”shipping”. Tutkimusartikkeleita löytyi runsaasti ja julkaisujen määrästä pystyi näkemään aiheen kiinnostavuuden kasvaneen yhä kiihtyvällä vauhdilla viimeisen noin neljän vuoden aikana. Tutkimusartikkeleista olen rajannut ulos sellaiset tekstit, jotka kuvailevat hyvin yksityiskohtaisesti jonkin yksittäisen teknisen komponentin toimintaa. XAMK:n Kotkan kampuksen kirjaston kokoelmaa on käytetty teknisten alojen oppimateriaalin hankintaan ja alustekniikan perustietoa on hankittu e-kirjoista.

Perustietoa ammoniakista ja sen ominaisuuksista on kerätty korkeakoulujen käyttöön tehdyistä fysiikan ja kemian oppikirjoista. Työterveyslaitoksen ja muutaman muun englanninkielisen maan vastaavien virastojen ohjeistuksista on ammennettu tietoa etenkin ammoniakkin terveyteen ja ympäristöön liittyvistä vaikutuksista. Säätelyn pohjaa alusten teknisiin ratkaisuihin liittyen ovat tehneet useat merenkulun luokituslaitokset ja heidän tekemäänsä työtä on käytetty vertailukohteena väliaikaisohjeisiin.

Vetyperäisten polttoaineiden valmistukseen ja tuotantoketjuihin liittyvää tietoa on kerätty akateemisten tutkimusten lisäksi valtioneuvoston julkaisemasta selvityksestä vetytalouden potentiaalista Suomessa. Muita hyödyllisiä yleiskatsauksia ovat olleet selvitykset ammoniakkin käytöstä aluspolttoaineena Itämeren alueella, sekä synteesianalyysit, joissa on koottuna useita esiselvitystasoisia tutkimuksia aiheesta. Yleiskatsaukset ovat muodostaneet kattavan kokonaisuuden vetytaloudesta ja merenkulun polttoaineiden vihreästä siirtymästä, jota on pyritty myös kuvaamaan tässä työssä.

Johdattelevana julkaisuna on käytetty IGF-koodia ja sen mallikursseja, jotka kuvailevat LNG-käyttöisten alusten koulutuksen vaatimuksia. Julkinen aineisto on kerätty kansainvälisen merenkulkujärjestön IMO:n ja sen alakomiteoiden julkaisuista IMODOCS-sivustolta, sekä Maersk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping (MMMCZCS) internet-sivuilta. IMODOCS-arkisto on julkinen, mutta sinne pääsyn ehtona on järjestelmään rekisteröityminen. MMMCZCS-järjestön julkaisut käsittelevät erittäin laajasti uusien merenkulun polttoaineiden käyttöönottoa ja osaa järjestön julkaisuista on käytetty sellaisenaan IMO:n alakomiteoiden, kuten Sub-Committee on Human Element, Training and Watchkeeping (HTW), julkaisuissa. Yleistä kaasumaisten polttoaineiden käyttöön, varastointiin ja ominaisuuksiin liittyvää materiaalia on kerätty myös eri oppaista ja muista yleisluontoisista julkaisuista.

### **2.3 Tutkimustehtävän rajaus ja tutkimusongelmat**

Tutkimus on rajattu koskemaan ammoniakkia merenkulun mahdollisena polttoaineena. IGF-koodi määrittää suuremman kehyksen kaasumaisten ja muiden matalan leimahduspisteen polttoaineiden käyttöön merenkulkualalla. Koodin päätarkoitus on selventää LNG:n käyttöä aluspolttoaineena ja koodissa määritellään ehdot kyseisten alusten suunnitteluun ja rakentamiseen. IMO on julkaissut ammoniakkin käytölle merenkulun polttoaineena väliaikaisohjeet, jotka mahdollisesti tulevaisuudessa liitetään osaksi IGF-koodia. Ammoniakin ollessa kaasumainen polttoaine ovat monet vaatimukset hyvin samankaltaisia kuin mitä IGF-koodissa määrätään LNG:lle. Ammoniakki omaa vahvan potentiaalilin merenkulun tulevaisuuden polttoaineena sen hiilettömyyden ansiosta.

Ammoniakki on kuitenkin ihmisille myrkyllinen yhdiste ja se tuo haasteen sen yleistymiselle.

Tutkimuskysymykset ovat seuraavat. Mitä ammoniakin käytöstä aluspolttoaineena tulee kouluttaa alusten miehistöille, kuinka ammoniakin käyttöä aluspolttoaineena säädellään ja minkälainen potentiaali ammoniakilla on merenkulun polttoaineena vihreän siirtymän näkökulmasta? Tutkimus pyrkii vastaamaan edellä mainittuihin kysymyksiin tarkastelemalla tämänhetkistä tutkimustietoa ammoniakin polttoainekäytöstä merenkulussa.

### 3 AMMONIAKKI MERENKULUN POLTTOAINEENA

Kemianteollisuudessa ammoniakki on hyvin tunnettu ja sitä käytetään pääasiassa lannoiteteollisuuden raaka-aineena. Ammoniakin potentiaali tulevaisuuden aluspolttoaineena liittyy sen luonnostaan hiilettömään kemialliseen koostumukseen  $\text{NH}_3$ . Ammoniakkia myös pidetään yleisesti hyvänä vedyn kuljettimena (hydrogen carrier). Termi *vedyn kuljetin* tarkoittaa tässä tapauksessa sitä, että kolme vetyatomia on sitoutunut yhteen typpiin ja muodostavat seoksen (ammoniakki), jonka energiatiheys on korkeampi kuin pelkän vedyn. Samoin ammoniakin ominaisuuksien takia sen nesteyttäminen ja siitä syystä myös kuljettaminen on helpompaa kuin pelkän vedyn. (Sivill ym. 2022, 143.) Ammoniakin luonnollinen hiilettömyys korostaa sen potentiaalia merenkulun tulevaisuuden polttoaineena päästöjen säätelyn kiristyessä. EU:n merenkulun päästöjen säätelyn vaikutus ulottuu myös polttoaineiden valmistukseen. Tämä lisää vihreän vetytalouden kiinnostavuutta polttoaineiden valmistuksessa. Täten vihreästä vedystä jatkojalostettu ammoniakki voi ainakin teoriassa tuoda täysin hiilettömän polttoaineen merenkulkuun.

Ammoniakki on hyvin tunnettu yhdiste merikuljetuksissa. Sitä kuljetetaan vuosittain noin 18–20 miljoona tonnia ja käsitellään noin 120 satamassa maailman laajuisesti (MMMCZCS 2024b, 6). Merikuljetukset tehdään pääasiassa sekä LPG- että ammoniakkisäiliöaluksilla. Ammoniakkiteollisuuden toimijoiden mukaan ammoniakkibulkkiä on valmistettu yli sadan vuoden ajan ja merikuljetuksia on tehty yli 60 vuotta (Society for Gas as a Marine Fuel 2023, 13). Tämän takia voidaan olettaa ammoniakin ominaisuuksien olevan riittävän tunnettuja,

jotta ammoniakkin turvallinen käyttö merenkulun polttoaineena voisi olla mahdollista toteuttaa.

Aluspolttoaineena ammoniakki suhtautuu verrokkeihin seuraavasti. MGO:n (Marine Gas Oil) energiatiheys on  $35,7 \text{ GJ/m}^3$ , LNG:n vastaavasti on  $22,2 \text{ GJ/m}^3$ , ammoniakkin  $11,4 \text{ GJ/m}^3$  ja vedyn  $8,5 \text{ GJ/m}^3$  (Jang ym. 2023, 3). Ammoniakin ollessa noin kolmasosa MGO:n energiatihydestä on ammoniakki-käyttöisen aluksen kuljetettava mukanaan noin kolminkertainen määrä polttoainetta verrattuna vastaavaan MGO-käyttöiseen alukseen. Samoin neste-mäistä vetyä tulisi kuljettaa noin nelinkertainen määrä. Ammoniakin käytöstä aluspolttoaineena on siis vaikutuksia alusten polttoaineen täydennysten tiheyteen tai polttoaineen säilytyskapasiteetin muutokseen. Jang ym. viittaa tutkimuksessaan myös aiemmin tehtyyn laskelmaan, jossa ammoniakkin säilytyksen hinnaksi laskettiin  $0,5 \text{ \$/kg}$ , kun taas vedyn säilytyskustannus oli  $15 \text{ \$/kg}$ . (Jang ym. 2023, 3.) Tämä viittaa siihen, että ammoniakkin käyttöön aluspolttoaineena liittyvät kustannukset olisivat myös huomattavasti pienemmät kuin vedyn.

### 3.1 Ammoniakin ominaisuudet

Ammoniakki koostuu yhdestä typpiatomista ja kolmesta siihen sitoutuneesta vetyatomista ( $\text{NH}_3$ ). Epäorgaanisista massatuotantokemikaaleista ammoniakia valmistetaan maailmassa toiseksi eniten. Aineen pääkäyttöaloja ovat lannoitteet, räjähteet ja muiden kemikaalien tuotanto, joista tärkein yksittäinen kemikaali on typpihappo. Vakio-olosuhteissa ammoniakki on väritön ja myrkyllinen kaasu, jonka erityispiirre on pistävä haju. (Lehtonen ym. 2008, 184.) Ammoniakin myrkyllisyys esitetään AEGL- ja HTP-arvoilla, jotka kuvaavat ihmisen altistumista ympäröivässä ilmassa oleville ammoniakkipitoisuuksille tietyssä ajassa. Arvot perustuvat pitkäaikaiseen tutkimukseen aineiden myrkyllisyydestä ihmisille ja eläimille.

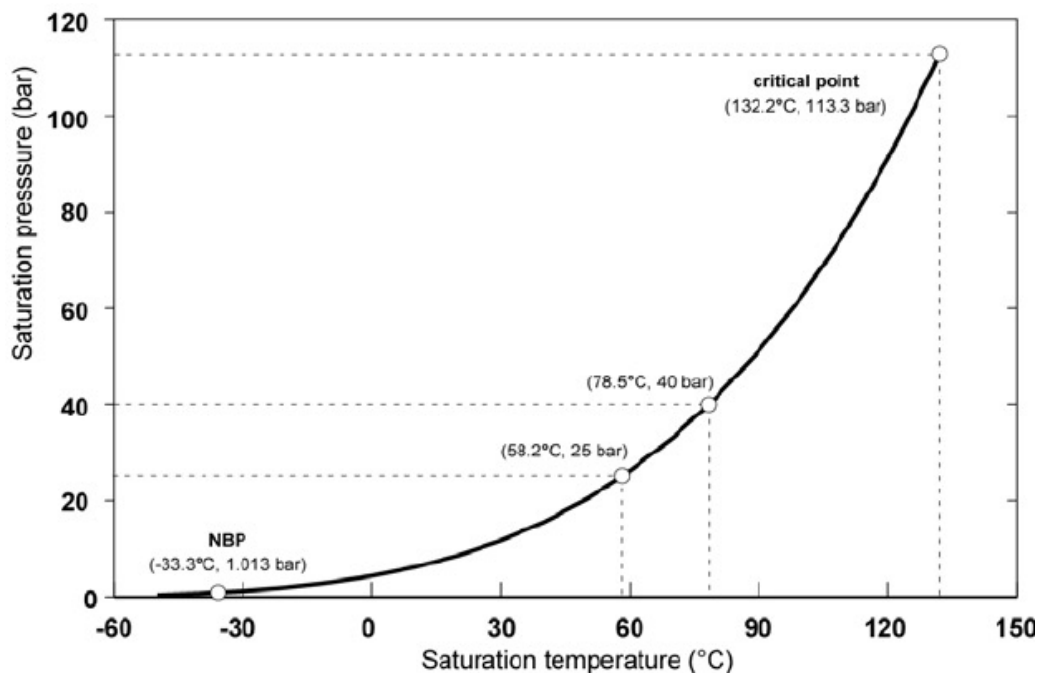
Taulukko 1. Ammoniakin fysikaaliset ominaisuudet (Lappalainen 1987; Työterveyslaitos 2025a; Stene 2008)

sulamispiste	-77,7 °C
kiehumispiste	-33,3 °C
itsesyttymislämpötila	650 °C
räjähdyalue	16–28 til % kaasua ilmassa
tiheys	0,771 kg/m <sup>3</sup> (0 °C 1 atm)
suhteellinen tiheys	0,597 ilman = 1 (0 °C 1 atm)
nesteen tiheys	681,9 kg/m <sup>3</sup> (-33,3 °C)
kriittinen piste	132,4 °C (113,5 bar)
liukoisuus veteen	898 g/l 0 °C ja 529 g/l 25 °C

### 3.1.1 Syttymis- ja räjähdysvaarat

Ammoniakki on palava kaasu, joka normaaliolosuhteissa syttyy syttymisrajojen sisällä ulkoisen lähteen vaikutuksesta. Ammoniakki voi muodostaa allaspalon, jossa altaan pinnalle höyrystyvä kaasu pitää paloa yllä niin kauan kun altaassa on palavaa ainetta. Räjähdyvaaran sijaan käytetään termiä Flash fire. Tämä johtuu ammoniakin alhaisesta palamisnopeudesta, jolloin varsinaista räjähdysilmiötä ei tapahdu, kuten esimerkiksi tapahtuu useiden hiilivetyjen kanssa. BLEVE- ilmiö on mahdollinen palotilanteessa, jos ammoniakkia säilytetään paineastiassa. (Jang ym. 2023, 3.) Toisaalta ammoniakin palovaarallisuutta pidetään huomattavasti vähäisempänä kuin muiden merenkulun polttoaineiden. Tämä johtuu mm. korkeasta itsesyttymispisteestä (650 °C), sekä minimisyttymisenergiasta. Minimisyttymisenergia ammoniakilla on 8,0 MJ, joka on huomattavasti korkeampi kuin esimerkiksi LNG:n 0,28 MJ tai metanolin 0,14 MJ. Samoin ammoniakin palamisnopeus (0,07 m/s) on matalampi kuin verrokeilla LNG (0,37) ja metanoli (0,36 m/s). (Jang ym. 2023, 3.)

Kuva 1. Ammoniakin höyrynpaine suhteessa lämpötilaan (Stene 2008)



### 3.1.2 Höyrynpaine ja lämpötila

Ammoniakki höyrystyy normaaliolosuhteissa ja yhdestä litrasta nestemäistä ammoniakkia muodostuu noin 750 litraa ammoniakkikaasua (Työterveyslaitos 2025a, luku 1). Kuvassa 1 esitetään ammoniakin höyrynpaine suhteessa lämpötilaan. Kuvasta voidaan havainnoida lämpötilan ja paineen vaikutuksia aineen olomuotoon. Normaali ilmanpaineessa aineen on oltava  $-33,3\text{ °C}$ , jotta se pysyy nestemäisenä. Samoin  $58,2\text{ °C}$ :ssa aine vaatii 25 baarin paineen pysyäksään nestemäisenä. (Stene 2008, luku 2.) Pidemmälle tulkittuna voidaan todeta että, ammoniakin varastointi aluksen kannella sijaitsevassa säiliössä maailman laajuisessa liikenteessä ilman jäähdytystä vaatisi paineastialta noin 20 baarin paineenkeston. Kuvassa esitetään myös ammoniakin kriittinen piste, joka on  $132,2\text{ °C}$ :ssa  $113,3\text{ baarin}$  paineessa. Kriittisellä pisteellä tarkoitetaan sitä, että aineen ylittäessään tämän pisteen kaasumaisen ja nestemäisen olomuodon muutosta ei voida havaita. Samoin se tarkoittaa sitä, että kaasu ei nesteydy sen ylittäessä tämän lämpötilan riippumatta siitä, kuinka paljon painetta siihen kohdistetaan. (Suvanto 2005, 436.)

### 3.1.3 Korroosio, reaktiivisuus ja liukoisuus veteen

Ammoniakki aiheuttaa voimakasta korroosiota kuparille, messingille ja sinkki-seoksille. Näitä metalleja tulisi välttää komponenteissa ja järjestelmissä, joihin ammoniakki pääsee vaikuttamaan suoraan. Korroosion voimakkuuden määrittää olosuhde, jossa reaktio tapahtuu. Olosuhdetta heikentäviä tekijöitä ovat esimerkiksi ilmankosteus ja erilaisten suolojen vaikutus reaktioalueella. Toisaalta ammoniakki vaikuttaa materiaaleihin myös jännityskorroosion muodossa. Tyypillisesti vaikutus esiintyy hiili-mangaaniteräksessä ja nikkelteräksessä, joiden käyttöä tulee tästä syystä välttää järjestelmissä, jotka sisältävät ammoniakkia. Jännityskorroosion havaitseminen on hankalaa, sillä ilmiötä ei välttämättä voida havaita visuaalisesti. Keinot, joita voidaan käyttää ilmiön ehkäisemiseksi ovat materiaalivalinnat ja kappaleiden lämpökäsittely hitsauksen jälkeen. (Jang ym. 2023, 4.)

Ammoniakki reagoi voimakkaasti, happojen, hapettimien ja halogeenien kanssa. Jotkin reaktiot edellä mainittujen kanssa voi kehittää lämpöä ja muodostaa räjähtäviä seoksia. Ammoniakki syövyttää mm. kuparia, alumiinia sekä sinkkiä ja näiden seoksia. (Työterveyslaitos 2025a, luku 1.3.)

Ammoniakki liukenee veteen tehokkaasti ja reaktiosta vapautuu lämpöä. Taulukon 1 mukaan yksi litra 25 °C:ista vettä voi liuottaa itseensä noin puoli kiloa ammoniakkia. (Työterveyslaitos 2025a, luku 1.2.)

## 3.2 Ammoniakin säätely merenkulussa





Ammoniakin merikuljetuksia säätelee vakiintuneet merenkulkujärjestö IMO:n yleissopimukset, jotka säätelevät kaikkea merenkulkua. Näitä yleissopimuksia ovat mm. SOLAS, STCW ja MARPOL, jotka määrittävät mm. yleisestä merenkulun turvallisuudesta, hätätilanahallinnasta, miehityksestä ja koulutuksesta sekä ympäristön suojelusta. Pakattujen vaarallisten aineiden merikuljetuksista määrää IMDG-koodi. Nestemäisten kemikaalien kuljetuksesta määrää IBC-koodi, josta löytyy vaatimukset ammoniakkivesi liukselle, joskin kuljetusmuoto on harvinainen. Merikuljetuksena ammoniakkia kuljetetaan pääasiassa kaasumaisena irtolastina, joiden turvallisuudesta määrää IGC-koodi.

IGF-koodi määrittelee vaatimukset aluksille, jotka käyttävät polttoaineena kaasumaisia tai muita matalan leimahduspisteen polttoaineita. Koodia on sen julkaisun (2016) jälkeen täydennetty liittein, jotka tarkentavat vaatimuksia tiettyjen polttoaineiden osalta. Lisäosat on julkaistu IMO:n merenkulun turvallisuuskomitean (MSC) kiertokirjeenä. Nämä IMO:n pääkomiteoiden julkaisut ovat väliaikaisohjeita (Interim guidelines), jotka eivät ole lain näkökulmasta sitovia. Kuitenkin lisäosat on valmisteltu siten, että ne voidaan myöhemmin liittää osaksi IGF-koodia ja täten saattaa lainvoimaisiksi jäsenvaltioiden lainsäädännössä.

### 3.3 Myrkyllisyys ihmiselle

ECHA (European Chemicals Agency) määrittää ammoniakille (CAS 7664-41-7) neljä vaaraluokkaa. Tämän lisäksi ECHA on vahvistanut aineelle neljä vaaralauseketta. Tämän välttämättömän luokittelun lisäksi aineen tuottajat ja maahantuojat käyttävät muutamia yleisiä vaaralausekkeitä kuvaamaan tuotteen vaaroja riippuen sen käyttötarkoituksesta. Alla olevaan taulukkoon on lihavoitu välttämättömät ECHA:n CPL-asetuksen mukaiset luokitukset ja harmonisoidut vaaralausekkeet.

Taulukko 2. Ammoniakin CLP-asetuksen mukaiset vaaraluokat (ECHA 2025)

<b>Ammoniikki, Ammonia anhydrous, NH<sub>3</sub>, CAS 7664-41-7, UN 1005</b>			
CPL00-luokka			
<b>GHS04,</b> Paineenalainen kaasu	<b>GHS05,</b> Syövyttävä	<b>GHS06,</b> Välitön myrkyllisyys	<b>GHS09,</b> Vaarallinen ympäristölle
			
Vaaraluokka	H-lauseke	Vaaraluokka	H-lauseke
<b>Skin Corr. 1B</b>	<b>H314</b>	Aquatic Chronic 2	H411
<b>Aquatic Acute 1</b>	<b>H400</b>	Press. Gas. (Liq.)	H280
<b>Flam. Gas 2</b>	<b>H221</b>	Eye Dam. 1	H318
<b>Acute Tox. 3</b>	<b>H331</b>	STOT SE 3	H335

Hengitettynä ammoniakki on erittäin vaarallista ihmisille ja tarpeeksi suuressa pitoisuudessa hengitettynä se voi johtaa tukehtumiseen. Altistumisen vakaavuuden määrittää ammoniakkikaasun ilmassa oleva pitoisuus ja altistumisaika. Pitoisuuden määrittelyssä käytetään yleensä yksikköä *ppm* (parts per million). Se esittää jonkin aineen osuuden seoksessa. Tässä tapauksessa sillä tarkoitetaan ammoniakkikaasun pitoisuutta ympäröivässä ilmassa. OVA-ohjeistuksessa ammoniakkin pitoisuudelle ilmassa annetaan seuraavat muunkertoimet huoneenlämmössä: 1 ppm = 0,71 mg/m<sup>3</sup> ja toisin 1 mg/m<sup>3</sup> = 1,41 ppm (Työterveyslaitos 2025a, luku 1.2).

Pitoisuuden ja ajan yhdistetty vaikutus esitetään taulukossa 3, jossa on nähtävissä sekä yhdysvaltalainen AEGL-arvo (Acute exposure guideline levels) ja Suomessa käytetty työterveyslaitoksen määrittämä HTP (haitalliseksi tunnettu pitoisuus). AEGL-tasoja on kolme, joista ensimmäinen (AEGL 1) on vähäisin ja tarkoittaa haittoja ja oireita, joiden vaikutus lakkaa, kun altistuminen päättyy. AEGL 2 tarkoittaa pysyvää tai muuten vakavaa terveyshaittaa tai oireita, joka vähentää kykyä suojautua altistumiselta. Asteikon vakavin taso on AEGL 3, joka tarkoittaa hengenvaarallista terveyshaittaa tai kuolemaa. HTP-arvot kuvaavat pienintä pitoisuutta työpaikan ilmassa, jonka on arvioitu aiheuttavan terveydellistä haittaa. (Työterveyslaitos 2025c, luku 1.6.) HTP-arvoja tulkittaessa on huomioitava, että ne ovat Valtioneuvoston asettamia ja siten sitovia sekä se että, arvojen tulee olla kohtuudella saavutettavissa työpaikoilla.

Taulukko 3. Ammoniakin vaikutus ihmiseen eri pitoisuuksin (EPA 2024; Työterveyslaitos 2025a)

Raja-arvo	10 min	30 min	60 min	8 h	15 min
AEGL 1	30 ppm	30 ppm	30 ppm	30 ppm	-
AEGL 2	220 ppm	220 ppm	160 ppm	110 ppm	-
AEGL 3	2700 ppm	1600 ppm	1100 ppm	390 ppm	-
HTP	-	-	-	20 ppm	50 ppm
Alempi sytymisraja	160 000 ppm				

Raja-arvot perustuvat laajoihin tutkimuksiin, joita on tehty sekä hallitussa ympäristössä että onnettomuustilanteissa arvioituihin altistumisiin. Ensin mainituissa tutkimuksissa altistumisrajat ovat olleet alhaiset (5–500 ppm) verrattuna

onnettomuuksiin, joissa altistuminen erittäin suurille pitoisuuksille (<50 000 ppm) on ollut mahdollista. Tutkimusten perusteella on arvioitu, että normaali-väestölle muutaman minuutin kestävä altistus noin 10 000 ppm pitoisuudelle nostaa kuoleman riskin korkeaksi. Samoin akuutisti korkeille pitoisuuksille altistuttaessa vaaraa aiheuttaa myrkyllisyyden lisäksi myös hengityselimiä, silmiä ja ihoa syövyttävä ominaisuus. (Comittee on Acute Exposure Guideline 2007 64–66.) Näin ollen on huomioitava, että vakavan altistumisen aikana tapahtuvat vammat voivat olla niin merkittäviä, että henkilön evakuoiminen raittiiseen ilmaan ei ole riittävä toimi hengen pelastamiseksi. Tämän johdosta vakavan ammoniakkialtistuksen ensiaputarpeet eroavat selkeästi suljetusta ja mahdollisesti hapettomasta tilasta henkilön evakuoimisesta, jota voidaan pitää tunnettuna merenkulun riskinä. Terveysviranomaisten asettamien raja-arvojen alittaminen on hyvä pitää suunnittelun perustana sekä tekniikalle että ohjeistuksille merenkulun ympäristössä.

Ammoniakkiteollisuuden kaupalliset toimijat ovat koonneet tietoa ja julkaisseet omia ohjeistuksiaan, joiden voidaan olettaa perustuvan sekä tutkittuun tietoon että kokemukseen. Näiden ohjeistusten tarkastelu on tärkeää, jotta ammoniakkin käyttäytymistä ja käsittelyn vaatimuksia voidaan ymmärtää paremmin.

Ammoniakkiteollisuuden julkaisun mukaan ammoniakkipitoisuuden nousu ihmiselle vaaralliseksi ympäröivässä ilmassa edellyttää aina suuren ja äkillisen vuodon. Toimijoiden esityksissä myös korostuu turvallisena pidetyn alle 100 ppm ja vaarallisen yli 1600 ppm:n välinen olosuhde. Tästä on todettu, että henkilö joutuessaan 400–700 ppm:n olosuhteeseen ilman suojarusteita pyrkii luontaisesti poistumaan olosuhteesta hengitysteiden ja silmien ärsytyksen seurauksena. Tämän kaltaisen altistumisen kestäessä 30–60 minuuttia ei altistumisesta koeta aiheutuvan pysyviä vammoja. (Society for Gas as a Marine Fuel 2023, 31.) Ohjeistus ei ota kantaa vuotojen prosessiolosuhteisiin, mutta on ymmärrettävä, että ammoniakkivuodon vakavuuteen vaikuttaa mm. aineen ja ympäristön lämpötila sekä aineen mahdollinen paineenalaisuus. Samoin on huomioitava, tapahtuuko vuoto ulko- vai sisätiloissa.

Myrkytysoireet hengitysteitse ovat mm. hengenahdistus, rintakipu, keuhkoputkien supistuminen ja vakavimmassa tapauksessa keuhkoödeema. Ihokosketuksesta voi aiheutua vakavia kemiallisia palovammoja, punoitusta, turvotusta

haavautumia ja paleltumia. Silmiin joutuessaan ammoniakki voi aiheuttaa kipua, tavallista runsaampaa kyynelvuotoa, punoitusta ja useita muita vakavia silmävammoja. (Laursen ym. 2022, 15.)

Työterveyslaitos ohjeistaa hengitysteitse ammoniakille altistuneen ensiavuksi uhrin laittamista puoli-istuvaan asentoon raittiiseen ilmaan. Vakavammassa tapauksessa hengityksen jo pysähtyneenä ohjeistetaan antamaan tekohengitystä mieluiten palkeella ja sydämen ollessa pysähtynyt on lisäksi annettava painantaelvytystä. Silmiin tulleet roiskeet ohjeistetaan huuhtelemaan haalealla juoksevalla vedellä vähintään noin 20 minuutin ajan. Ihokosketuksessa ohjeistetaan riisumaan likaantuneet vaatteet ja huuhtelemaan vahingoittunutta aluetta vähintään 15 minuuttia. Riisutut vaatteet ohjeistetaan laittamaan muovisäkkiin ja suljetuissa tiloissa uhria avustavan henkilön tulisi suojautua suojarahkoin ja käyttää hengityssuojainta. Tämän lisäksi Työterveyslaitos edellyttää, että henkilö toimitetaan lääkärin tutkimukseen kyseisten tapausten seurauksena. (Työterveyslaitos 2025a, luku 4.3.)

Työterveyslaitoksen OVA-ohjeistuksen mukaan ammoniakialtistuksen lääketieteelliseksi hoidoksi hengityksen, verenkierron ja sokin hoitoon annetaan seuraavat ohjeet. Kurkunpään turvotuksen vähentämiseksi suositellaan annettavaksi adrenaliini-inhalaatioaerosolia ja tarvittaessa myös lääkinnän mahdollistamiseksi henkilön intubointia. Ohjeistus suosittelee myös salbutamolia ja terbutaliinia muihin hengitysteiden oireisiin, kuten keuhkoputkien supisteluun ja yskään. Suurille pitoisuuksille altistuneille tulisi antaa keuhkopöhön varalta kortikosteroidi-inhalaatioaerosolia useamman päivän ajan. Erittäin voimakkaaseen altistumiseen voitaisiin antaa systeemisteroideja. (Työterveyslaitos 2025a, luku 4.4.) Altistumistilanteessa annettavan ensiavun osalta varautuminen aluksilla on mahdollisesti nykyisellään kunnossa, mutta lääkityksen ja hoitovälineiden tarkastelu voi olla tarpeellista. Samoin STCW:n mukaisen lääkinnällisen koulutuksen kokonaisvaltaisempi osaamiskokonaisuuksien tarkastelu voi olla tarpeen. Samoin ennen koulutusvaatimusten muuttumista voi olla perusteltua järjestää erillistä lääkinnällistä koulutusta ammoniakikäyttöisten alusten henkilöstölle varustamon puolesta.

### 3.4 Vaikutukset ympäristöön

Ammoniakin joutuessa veteen sen esiintymismuoto on joko ammoniakki ( $\text{NH}_3$ ) tai ammonium-ioni ( $\text{NH}_4^+$ ). Tasapainoreaktion lopputulokseen vaikuttaa veden pH-arvo. Happamassa ja neutraalissa vedessä reaktiosta muodostuu enemmän ammonium-iona ( $\text{NH}_4^+$ ). Ammoniakki on erittäin myrkyllinen vesieliöille, kun taas ammonium-ionin myrkyllisyys on merkittävästi vähäisempi. On myös todettu, että kylmään veteen ( $< 10\text{ °C}$ ) vuotanut ammoniakki muodostaan enemmän myrkyllistä ammonium-iona. OVA-ohjeista käy ilmi myös ammoniakin ja sen hajoamistuotteiden vesistöjä rehevöittävä vaikutus.

(Työterveyslaitos 2025a, luku 3.)

EMSA:n vuonna 2022 julkaisemassa tutkimuksessa päädytään ammoniakin meriympäristöön kohdistuvien haittavaikutusten osalta siihen johtopäätökseen, että meriympäristö olisi haavoittuvaisempi kuin makean veden ympäristö. Tämän syyksi tutkimus nostaa kaksi päätelmää. Ensinnäkin merivesi on emäksistä, jonka seurauksena myrkyllistä ionisoimatonta ammoniakkia ( $\text{NH}_3$ ) muodostuu enemmän kuin makeassa vedessä. Toiseksi aiemmat tutkimukset viittaavat siihen, että merieliöstö on herkempää ammoniakin haittavaikutuksille kuin makeanveden eliöstö. (Laursen ym. 2022, 33.)

Sen lisäksi, että ammoniakki on myrkyllistä merieliöille, on hyvä tarkastella ammoniakin ominaisuuksia vuototilanteessa. Ng ym. ovat tutkimuksessaan todenneet seuraavaa. Ammoniakin osuessa veteen se alkaa kiehumään ja leviää nopeasti veden pinnalla. Ammoniakin höyrystyminen on eksoterminen ilmiö, jossa muodostuu lämpöä, joka voi kiihdyttää höyrystymistä entisestään. Höyrystymisen seurauksena ympäröivään ilmaan muodostuu kaasupilvi, jonka koko määräytyy mm. päästön suuruudesta. Saman aikaisesti nestemäinen ammoniakki jäähdyyttää veden pintaa ja voi muodostaa veden pinnalle jäätä, joka heikentää ammoniakin sekoittumista veteen. Lopulta jäähtymisilmiö heikenee ammoniakin veteen sekoittumisen ja ilmaan höyrystymisen johdosta. Tutkimustuloksissa on arvioitu, että noin 30–40 % veteen päässeestä ammoniakista höyrystyy ilmaan ja noin 60–70 % sekoittuu veteen. Tutkimuksessa havaittiin myös, että ammoniakkipäästö leviää veden päällä huomattavasti nopeammin kuin maalla. Tämä ilmiö myös tehostaa kaasupilven muodostumista. Kaasupilven leviäminen aiheuttaa vaaraa ympäristölle ja sen vaikutusalue voi

olla merkittävä. (Ng ym. 2023, 2–3.) Tutkimus, johon yllä viitataan, on tehty Singaporen olosuhteissa, joten voi olla aiheellista tehdä lisää tutkimusta ammoniakkin päästötilanteesta arktisissa olosuhteissa. Esimerkiksi ammoniakkipäästön tapahtuessa jääolosuhteissa, ilman lämpötilan ollessa alle  $-25^{\circ}\text{C}$ , ammoniakkipäästö voisi muodostaa altaita ja täten torjuntatoimet voisivat erota merkittävästi.

Jang ym. esittää tutkimuksessaan ”Regulatory gap analysis for risk assessment of ammonia-fuelled ships”, että vuotanutta ammoniakkipäästöä voitaisiin aluksilla poistaa ympäröivästä ilmasta käyttäen vettä. Tutkimuksessa jatketaan myös, että tämän ilmiön seurauksena ammoniakkipäästö ja veden seos voi muodostaa ilmaa raskaamman pilven, joka on otettava huomioon käytettäessä vettä vuotaneen ammoniakkin torjunnassa. (Jang ym. 2024, 4.)

Ammoniakin ominaisuutta liueta veteen on tutkittu pidemmälle Y. Kojiman toimesta tutkimuksessa ”Safety of ammonia as a hydrogen energy carrier”. Tutkimuksessa todetaan, että vettä käytetään olennaisena osana ammoniakkin vuotojenhallintaa teollisuudessa. Tutkimuksessa myös osoitetaan, että lisäämällä veteen zirkoniumfosfaattia (zirconium phosphate) voidaan vaarallista ammoniakkipäästöä ilmassa laskea merkittävästi enemmän kuin pelkällä vedellä. Tutkimuksessa ehdotetaan vastaavaa järjestelyä otettavaksi käyttöön aluksen konehuoneessa tapahtuvan vuodon hallitsemiseksi. (Kojima 2023.)

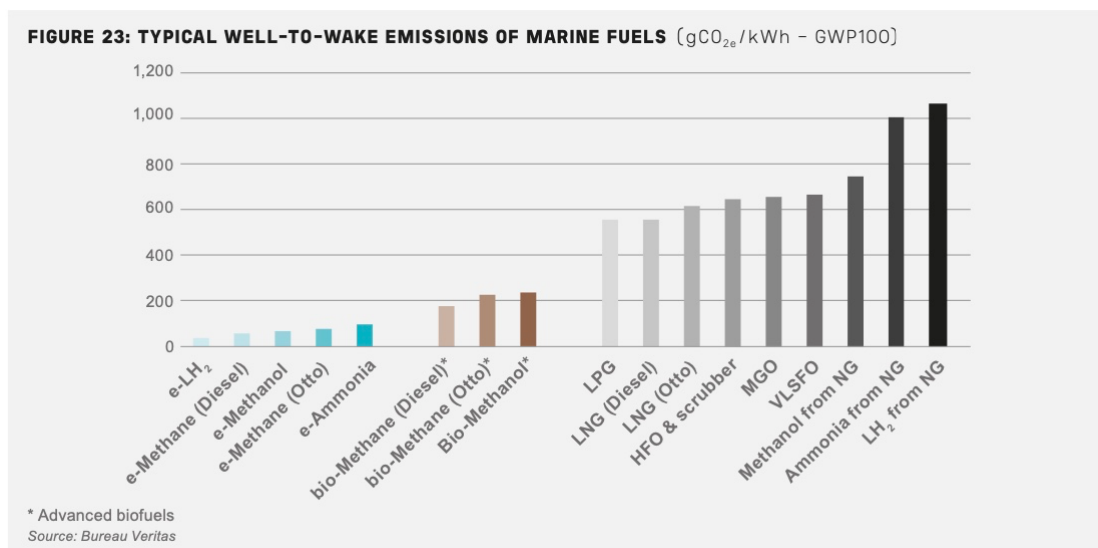
### **3.5 Ammoniakin potentiaali merenkulun polttoaineena**

Ammoniakki voi olla potentiaalinen suuren mittaluokan polttoaine tulevaisuuden merenkulussa. Ammoniakin tärkein ominaisuus merenkulun polttoaineena on sen hiilettömyys. IMO on linjannut maailman laajuiset merenkulun päästötavoitteet Pariisin ilmastosopimusta mukaillen (IMO s.a.). Myös mitä MARPOL-yleissopimuksessa määrätään vaikuttaa merkittävästi merenkulun ympäristöpäästöihin. MARPOL yleissopimuksen liite VI määrittää päästörajoitukset mm. kasvihuonekaasuille (GHG), rikkidioksidille ( $\text{SO}_2$ ) ja typen oksideille ( $\text{NO}_x$ ). (IMO, 2025.) Sen lisäksi Euroopan unioni on sitonut omat tavoitteet lainsäädännöllä (FuelEU Maritime) ja ne ovat osin tiukemmat kuin IMO:n asettamat tavoitteet. Tavoitteista voidaan todeta, että niiden saavuttaminen pitkällä

aikavälillä edellyttää merkittäviä muutoksia merenkulkualalla käytettäviin polttoaineisiin ja niiden tuotantotapaan. Tässä muutoksessa hiilettömät polttoaineet, kuten ammoniakki ja vety, joita voidaan valmistaa teoriassa hiilivapaasti, voivat omalta osaltaan helpottaa päästötavoitteiden saavuttamista.

IMO:n 2023 asettama päästövähennys kasvihuonekaasuille (GHG) on vuodelle 2030 20 % vähennys (tavoite 30 %) vuodelle 2040 70 % vähennys (tavoite 80 %) ja vuodelle 2050 tavoite on olla hiilineutraali. Lisäksi tavoitteeseen kuuluu vähintään 5 % lisäys (tavoite 10 %) vähähiilisten tai hiilettömien polttoaineiden käyttöönottoon vuodelle 2030. (MEPC.377(80) 2023.) FuelEU Maritime pyrkii rajoittamaan polttoaineiden GHG-intensiteettiä, eli koko elinkaaren aikaisia kasvihuonekaasupäästöjä (well-to-wake). FuelEU Maritime mukaiset tavoitteet on jaettu aina tulevalle viidelle vuodelle edelleen kiristyen siihen saakka, kunnes vuonna 2050 saavutetaan 80 %:n vähennys kasvihuonekaasupäästöihin. Lisäksi tavoitteeseen kuuluu ETS-järjestelmä, joka on käytetyn polttoaineen hiilidioksidipäästöjen maksujärjestelmä. Lisäksi lainsäädäntö tuo vaatimuksen osalle aluksista liittyä maista tulevaan sähköverkkoon laiturissa olon ajaksi. (European Union s.a.)

Well-to-wake-laskentaperiaate huomioi myös polttoaineen valmistuksesta johtuvat kasvihuonepäästöt. Tällöin harmaan, eli maakaasusta valmistetun ammoniakin tai mustan, eli hiilestä valmistetun ammoniakin käyttö polttoaineena ei laske kasvihuonekaasujen määrää, vaan lisää niitä verrattuna konventionaalisiin polttoaineisiin (Bureau Veritas 2022, 32). Kuva 1 on Bureau Veritaksen tekemästä selvityksestä ja siinä esitetään vertailulaskelmat eri polttoaineiden well-to-wake hiilidioksidipäästöistä. Kuvasta voidaan selkeästi havaita, kuinka merkittävä ero ammoniakin valmistustavalla on sen päästöihin. Tämän johdosta ammoniakin potentiaali merenkulun polttoaineena piilee sen tuotantomenetelmässä. Vihreä ammoniakki, tai e-Ammoniakki, on valmistettu lisäämällä ilmassa olevaa typpeä uusiutuvalla, kuten aurinko- tai tuulienergialla valmistettuun vetyyn.



Kuva 1. Eri polttoaineiden kokonaishiili-intensiteetti (Bureau Veritas 2022)

Edellä mainitut tavoitteet ovat pääasiassa yhdenmukaisia, mutta on huomattava, että IMO:n GHG-päästötavoitteet eivät ole tällä hetkellä yhtä selvät kuin EU-asetuksen mukaiset päästörajat. FuelEu Maritime lainsäätö on periaatteessa well-to-wake-perusteinen ohjausjärjestelmä, joka pyrkii rajoittamaan merenkulun polttoaineiden kokonaishiili-intensiteettiä. Lainsäädännön sisältämä ETS-järjestelmä on hiilidioksidipäästöjen (CO<sub>2</sub>) päästökaupan maksujärjestelmä. Voidaan todeta, että perinteistä polttoainetta käyttävän aluksen piirissä olevan aluksen on maksettava vero käytettävän polttoaineen kokonaishiilipäästöistä ja sen jälkeen kompensoitava käytetyn polttoaineen päästörajan ylittävä osuus ETS-järjestelmän mukaisesti. Järjestelmä ohjaa hiilivapaiden ja vähähiilisten polttoaineiden käyttöön, kuten myös niiden valmistuksen hiiliniukkuuteen. Säätelyn jatkuvasti kiristynvä lisäkustannus konventionaalisia polttoaineita käyttäviä aluksia kohtaan tuo uusiutuvien polttoaineiden suhteellista käyttökustannusta alaspäin. Kuitenkin on huomattava, että ammoniakkin ja muiden vähähiilisten polttoaineiden hinnan kehitys riippuu myös useista muista tekijöistä ja arviot hintojen kehityksestä eroavat toisistaan.

Tutkimuksessa, jossa arvioitiin IMO:n 2023 päästöjä vähennysstrategian seurauksia merenkulun polttoaineiden hintojen kehityksessä, todettiin polttoainekustannusten yleisesti nousevan seuraavien kahden vuosikymmenen aikana. E-ammoniakin ja biometanolin arvioitiin ohittavan ensimmäisenä konventionaaliset polttoaineet käyttökustannuksissa ja tämän arvioitiin tapahtuvan

2040-luvulla. Tutkimuksessa nostettiin esiin myös kysymys siitä, onko markkina kuitenkaan valmis vielä silloin. Merenkulun polttoaineiden hintojen nousun arvioitiin pysähtyvät 2050-luvulla, jolloin myös aiemmin uusiin polttoaineisiin tehtyjen sijoitusten nähtiin tekevän tuottoa. (Zhao ym. 2024, 11.) Hintojen kehityksen tutkimus jatkuu lähitulevaisuudessa todennäköisesti vahvana, sillä vihreälle siirtymälle välttämättömien suurinvestointien oikea-aikainen toteutus vaikuttaa merkittävästi niiden onnistumiseen.

Valtioneuvoston julkaisema selvitys ”Vetytalous – mahdollisuudet ja rajoitteet” korostaa tavoitteiden asettamisen lisäksi laajempia poliittisia toimia, jotka johtaisivat perusteltuihin vaikutuksiin sen sijaan, että ne vääristäisivät kilpailua tai johtaisi päästökehityksen kannalta ei toivottuihin ratkaisuihin (Sivill ym. 2022, 211–212). Tämän kaltainen ohjaus, joka ulottuu sekä konventionaalisten polttoaineiden säätelyyn että infrastruktuuriin kohdistuvien investointipäätöksiin, voi ennakoida sitä, että ammoniakki aluspolttoaineena otettaisiin alkuvaiheessa käyttöön rajatussa ympäristössä, jossa sekä säätely että markkinat tukisivat toisiaan.

### **3.6 IGF-koodin ja luokituslaitosten ohjeistusten eroavaisuudet**

On yleisesti tunnistettu, että IGF-koodi ei nykyisellään täytä ammoniakin turvallisen käytön vaatimuksia merenkulun polttoaineena. Tästä syystä useat luokituslaitokset ovat itsenäisesti julkaisseet alusten suunnittelua tukevia ratkaisuja ammoniakkikäyttöisille aluksille. IMO:n julkaisema väliaikaisohjeistus ammoniakin käytöstä aluspolttoaineena perustuu aiemmin tehtyihin edellä mainittuihin ohjeistuksiin, tutkimuksiin ja selvityksiin. Aiemmin ohjeistuksen puuttuessa kaupalliset toimijat ovat hyväksyttäneet omat suunnitelmansa poikkeusmenettelyin. Luokituslaitosten ohjeistukset perustuvat IGF-koodiin, joten ne ovat pääasiassa samansuuntaisia. Jang ym. toteaa tutkimuksessaan, että vaikka ohjeistuksissa on eroja ovat kaikki osapuolet samanmielisiä turvallisuuden tärkeydestä ammoniakkia polttoaineena käyttävillä aluksilla (Jang ym. 2023, 12). IMO:n väliaikaisohjeistus harmonisoi vaatimuksia ja on mielenkiintoista nähdä kuinka vaatimukset muotoutuvat tulevaisuudessa ja mitkä asiat eritoten aiheuttavat keskustelua.

Ymmärtääksemme paremmin nykyistä säätelyä on hyvä tarkastella aiempia luokituslaitosten ohjeistuksia. Jang ym. tekemässä tutkimuksessa ”Regulatory gap analysis for risk assessment of ammonia-fuelled ships” vertaillaan eri luokituslaitosten ohjeistuksia toisiinsa ja IGF-koodiin. Tutkimuksen havainnoista vähintään seuraavat seikat olivat keskustelun alla väliaikaisohjeita valmisteltaessa. Yksi keskeisistä kysymyksistä oli aluksen konehuonekonsepti. IGF-koodi määrittelee kohdassa A-1 5.4.1.1-2 konehuoneen turvallisuuden joko kaasuvapaaksi tai hätäpysäytys-suojatuksi alueeksi. Kaasuvapaa konehuone tarkoittaa sitä, että yhden vaurion takia ei ole mahdollista, että polttoainekaasua johtuisi konehuoneeseen. Hätäpysäytyksellä suojattu konehuone sen sijaan perustuu polttoaineen syötön katkaisuun ja järjestelmien alasajoon, siten että hetkellisesti konehuoneessa on mahdollisesti vaarallinen olosuhde. (IMO 2016, 16.) Tutkimuksen mukaan luokituslaitosten mielestä ainoa hyväksytty konehuonekonsepti on kaasuvapaa konehuone. Tämän lisäksi ABS (American Bureau of Shipping) vaatii omissa ohjeissaan myös konehuoneeseen etävalvonta mahdollisuutta. Samoin polttoaineen valmisteluhuoneen (fuel preparation room) sijaintiin liittyen ABS on linjannut, että sen on sijaittava konehuoneen ulkopuolella. Kun taas BV (Bureau Veritas) linjasi sijainnista, että se on sijoitettava erilliselle alueelle.

Toinen merkittävä seikka, joka aiheutti eriäviä linjauksia, oli turvallisena pidetty ammoniakkikaasun pitoisuus ilmassa. Tutkimus nosti esiin, että IGF-koodi ei lainkaan tunnista myrkyllisen polttoaineen käyttöä aluksilla. Luokituslaitosten linjaukset myös erosivat toisistaan ilmassa olevan ammoniakkipitoisuuden osalta. Esimerkiksi ABS:n mukaan turvallisena pidetty pitoisuus oli 25 ppm ja RINA piti hyväksyttävänä 50 ppm:n pitoisuutta. Myös polttoainejärjestelmän avainkomponenttien välisiä etäisyyksiä on linjattu hieman eri lailla. Esimerkiksi polttoainesäiliön ylipaineventtiilin (PRV) ulospuhallusaukon sijainnista on määrätty IGF-koodissa siten, ettei se saa olla lähempänä kuin 10 metriä asuintilojen ilmanvaihdon sisäänotosta, kun taas polttoaineen myrkyllisyyden takia ABS määrää etäisyydeksi yli 25 metriä ja Korean Register vaatii minimi etäisyydeksi vähintään 15 metriä. (Jang ym. 2023, 18–19.)

Samoin Jang ym.:iden tekemässä gap-analyysissä nousee esiin tarve suunnitella vaarallisten ja ei vaarallisten tilojen välille ilmalukkoja, jotka takaavat kaasutiiveyden eri tilojen välillä. Samoin eroavaisuuksia löytyi vuotojen hallintaan

liittyvien valuma-aldaiden ja pilssien mitoituksen sekä tuuletusjärjestelmän tehokkuuden osalta. Analyysissä nostetaan myös esiin mahdolliset kaasumaisen ammoniakkin havaitsemisen ja leviämisen estämisen järjestelmät, jotka perustuisivat kaasunhaistajasensorien ja vesiverhojärjestelmän yhteistoimintaan. Gap-analyysin suosituksissa ammoniakkikäyttöisille aluksille ehdotetaan prosessiteollisuudesta tuttuja toimintatapoja, kuten dynaamisia riskienarviointeja ja simuloiteja potentiaalisten riskien tunnistamiseksi ja vähentämiseksi. (Jang ym. 2023, 18–19.) Voidaan olettaa, että turvallisuuskeskeisellä alalla kuten merenkulussa olisi kykyä ottaa käyttöön uusia tekniikoita, jotka edellyttävät käyttäjältä korkeaa turvallisuustietoisuutta ja -kulttuuria.

### **3.7 Ammoniakin käytön inhimillinen näkökulma**

Ammoniakin käyttö merenkulun polttoaineena tuo myrkyllisyyden osalta mukanaan muutoksia olemassa oleviin toimintatapoihin tai kokonaan uusia tapoja toimia. Muutos konventionaalisista polttoaineista suoraan ammoniakkiin on mahdollisesti suurempi kuin siirtyminen LNG-käyttöisestä aluksesta ammoniakkikäyttöiseen alukseen. Muutos on todennäköisesti suurin koneosastolla, mutta se vaikuttaa myös koko miehistöön ja sen osaamisvaatimukseen. Uudet toimintatavat voivat olla joko osittain tai jo ennestään tuttuja esimerkiksi vaarallisten aineiden kuljetuksiin erikoistuneilla aluksilla ja varustamoilla. Myös alukset, joissa käytetään polttoaineena LNG:tä, voivat olla paremmissa lähtökohdissa osaamisen vaatimusten osalta kuin perinteisiä polttoaineita käyttävät alukset. Vastaavuuksista huolimatta on selvää, että muutos tulee koskettamaan laajasti koko laivaväkeä sekä varustamoita. Tästä syystä alusten miehistön laadukas koulutus ja perehdytys tulee olemaan merkittävässä osassa vähentämään työskentelyn riskejä turvallisten toimintatapojen kautta.

Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping (MMMCZCS) teetti usean eri varustamon merihenkilöstölle kyselytutkimuksen, jossa selvitettiin suhtautumisesta ammoniakkikäyttöisiin aluksiin. Yhtenä tuloksena kyselystä oli varovaisen positiivinen ajatus työskentelystä ammoniakkikäyttöisellä aluksella. Ehdoksi kuitenkin nousi kattavan lisätiedon saaminen aiheesta sekä teoria että käytännön koulutuksin. Samoin polttoainejärjestelmien turvallisuus ja erinomainen luotettavuus nousivat esiin välttämättöminä osatekijöinä, kun kysymyksessä oli halukkuus työskennellä ammoniakkikäyttöisellä aluksella. Kun

vastaajilta kysyttiin, mistä tietystä asiasta he halusivat lisätietoa, oli selvästi eniten vastauksia saanut asia ammoniakkin vaikutus ihmisiin ja ympäristöön. Samoin kun kysyttiin, mistä asiasta he tarvitsisivat eniten koulutusta, nousi vastauksissa tärkeimmiksi vuotojen hallinta, hätätilannehallinta ja riskien arviointi. (MMMCZCS 2024b, 31–34.) Kyselyn tulokset antavat hyvän katsauksen siihen mitä asioita koulutettavat pitävät tärkeänä oppia ja mikä toisi heille parhaiten varmuutta ja valmiuksia toimia uudenlaisessa alusympäristössä. Samoin tutkimuksesta voidaan tulkita vaade selkeälle ja kattavalle koulutuskokonaisuudelle. Vastauksissa korostui myös henkilöturvallisuuteen liittyvät aiheet. Tähän liittyen voidaan todeta, että annettavan koulutuksen onnistumisen kannalta koulutuksen selväsanaisuus ja toimintatapojen kuvaamisen yksiselitteisyys ovat merkittäviä seikkoja.

Riskinarvioinnin näkökulmasta inhimillistä tekijää on arvioitu Lloyds Registerin Maritime Decarbonisation Hub (MHD) ja MMMCZSC tekemässä selvityksessä. Inhimillisen tekijän analyysi osoitti korkean turvallisuustason edellytykseksi henkilöiden kompetenssin, dokumentoidut prosessit ja ohjeet, työturvallisuuden tuntemuksen ja prosessiturvallisuuden tuntemuksen. Selvityksen mukaan työtehtävät, joihin ammoniakkin käytöllä on eniten vaikutuksia, ovat ne, joissa on suora mahdollisuus altistua ammoniakille kuten aluksen polttoaineen täydennys ja laitteiston erottaminen sekä muut huoltotyöt. Poikkeus- tai vaaratilanteessa ammoniakkin myrkyllisyyteen liittyvät riskit vaikuttivat lähes kaikkien toimintaan aluksella. Ammoniakki voi aiheuttaa suoraan vaaratilanteen tai muu vaaratilanne voi vaikuttaa ammoniakkijärjestelmään. Esimerkiksi tulipalo voi levitessään vaurioittaa ammoniakkijärjestelmää siten, että tulipalon lisäksi on huomioitava myrkyllisen kaasun vaarat. Tämä voi arvion mukaan vaikuttaa jälleen henkilöstön vaaratilanteessa tekemään riskinarviointiin ja sitä kautta päätöksentekoon. Samoin selvityksessä kannustetaan yhtiöitä tarkastamaan systemaattisesti omat käytäntönsä ammoniakkikäyttöisten alusten käyttöönottoa varten. (Lloyd's Register Maritime Decarbonisation Hub & MMMCZCS 2023, 46.) Työskentelyn tueksi ammoniakkikäyttöisille aluksille on rakennettava puitteet, jotka varmistavat turvallisen työskentelyn. Puitteiden olisi hyvä kattaa työntekijöiden osaamisen varmistaminen ja oppimisen tukeminen samoin kuin luoda toimintaohjeet sisältävät prosessikuvaukset.

## **4 KOULUTUS AMMONIAKKIA POLTTOAINEENA KÄYTTÄVILLÄ ALUKSILLA**

### **4.1 Turvallisuus ja henkilökohtaiset suojavälineet**

Turvallisuuden tason määrittämiseen ja turvallisen ympäristön rakentamiseen teollisuudessa liittyy nykypäivänä aina jonkin tasoista riskienhallintaa. Riskit, joilta halutaan suojautua, voivat olla eri ympäristöissä hyvinkin vaihtelevia. Samoin menetelmät, jotka on luotu vähentämään riskipotentiaalia. Merenkulussa riskienhallinnalla on pitkät perinteet. Riskienhallintaa on kehitetty turvaamaan aluksen kulkua, lastia sekä miehistöä. Merenkulkuala myös kehittyy jatkuvasti ja samoin teknologiat, joiden avulla jokapäiväiset tehtävät toteutetaan. Viimeisimmät selvitykset liittyen uusien polttoaineiden käyttöönottoon korostavat riskienhallinnan merkitystä aluksella tapahtuvien operatiivisten töiden henkilöturvallisuuden varmistamisessa. Tämä tarkoittaa sitä, että monet vaarallisten aineiden valmistukseen, varastointiin ja kuljetukseen liittyvät riskien hallinnan keinot voivat arkipäiväistyä myös aluksilla, joiden kuljetettava lasti ei sitä välttämättä edellytä. Nämä menetelmät tulisivat koskemaan aluksen polttoainetta ja sen hallintaa.

### **4.2 Työterveys ja turvallisuustoimenpiteet**

Työterveyteen liittyen suurin vaara kohdistuu ammoniakkin myrkyllisyyteen, sen riskin tunnistamiseen ja siltä suojautumiseen. Työterveyslaitoksen OVA-ohje kuvailee ammoniakkin terveyshaittoja seuraavasti. Ärsytysoireet alkavat pienistä pitoisuuksista noin 20–25 ppm:n tasoista. Hengitysteiden ja silmien välittömät ärsytysoireet alkavat noin 400–700 ppm:n tasossa. Henkilön altistuminen yli 5000 ppm:n pitoisuudelle voi aiheuttaa hengenvaarallisia seurauksia, kuten kurkunpään turvotuksen tai keuhkopöhön. Ihokosketuksessa nestemäiselle ammoniakille altistuessa vaarana on paleltumat, ihon ärsytys tai syöpyminen. Ammoniakki roiskeiden joutuessa silmiin seurauksena voi olla silmän vakava syöpyminen ja mahdollisesti siitä seuraava sokeutuminen, ellei ensiapua anneta välittömästi. On myös havaittu että, toistuva altistuminen ammoniakkihöyryille voi kehittää joillekin henkilöille sopeutumista, jolloin suuremmat noin 70 ppm pitoisuudet eivät aiheuta henkilölle selviä oireita. Ammoniakki ei kerääntyy elimistöön vaan erittyy ulos elimistöstä pääasiassa virtsan mukana ammoniumsuoloina ja ureana. (Työterveyslaitos 2025a, luku 2.)

Vaatimukset henkilökohtaisten suojainten käyttöön ammoniakilta suojautumiseen olisi määriteltävä selvästi ja niiden tulisi vastata tiettyä suojautumisskenaariota. Tällöin aluksella työskentelevien henkilöiden voi olla helpompi hahmottaa suojautumistarve eri työtehtävissä tai liikkeessa aluksen eri osastoilla, joissa on mahdollista altistua. Samoin selkeät vaatimukset suojautumisen osalta voivat edelleen mahdollistaa vaatimusten tarkoituksen mukaisen jatko- jaottelun. Toisin sanoen suojautumisvaatimus vastaisi kulloinkin suoritettavaa tehtävää.

Hengitysteiden ja silmien altistuminen ammoniakkikaasulle voidaan estää käyttämällä kokonaamaria, jossa on ammoniakkisuodatin K2 tai ABEK (Työterveyslaitos 2025a, luku 5). Muutoin normaalityöskentelyssä ammoniakkikäyttöisellä aluksella riittää teollisuuden standardien mukaiset työvarusteet. Riskevaarallisiksi todetuissa työtehtävissä voidaan hengityssuojaimen lisäksi käyttää suojakäsineitä, jotka suojaavat pieniltä ammoniakkiroiskeilta. Työtehtävissä, jotka pitävät sisällään merkittävän altistumisvaaran on suositeltavaa käyttää asianmukaista kemikaalisuojapukua. Eri valmistajat käyttävät suojapuvuissaan useita soveltuvia rekisteröityjä materiaaleja, mutta yleisesti ammoniakkikaasulta suojautumiseen suositellaan butyylikumista valmistettuja pukuja. (Työterveyslaitos 2025a, luku 5.) Nestemäiseltä ammoniakilta suojauduttaessa on lisäksi otettava huomioon puvun kylmänkesto. Kaikki ammoniakkikaasulta suojaavat puvut eivät välttämättä sovellu nestemäiseltä ammoniakilta suojautumiseen puutteellisen kylmänkeston takia. Hengityksen suojauksessa on myös huomioitava kokonaamarin suodatinpatruunoiden käyttöikä ja maksimipitoisuudet, joilta ne suojaavat.

Suojavälinevaatimus eri altistumisskenaarioihin voi olla hyvin erilainen. Täten henkilökohtaisten suojavälineiden asianmukainen käyttö tulisi ohjeistaa eri tilanteisiin sopivaksi. Alan kaupallisten toimijoiden (The Society for Gas as a Marine Fuel) esityksen mukaan jaottelu on tehty seuraavasti. Taso 1 on hätätilanteen mukainen varustus, jossa henkilöiden on välttämätöntä mennä vuotoalueelle ja suojauduttava mahdollisimman hyvin. Suojavarustevaatimus on koko vartalon peittävä kemikaalisuojapuku ja paineilmalaitte. Taso 2 on määritetty henkilöille, jotka joutuvat mahdollisesti kosketuksiin ammoniakin kanssa, esimerkiksi kiinnittäessään polttoainetankkia. Tason 2 suojavarustevaatimus on

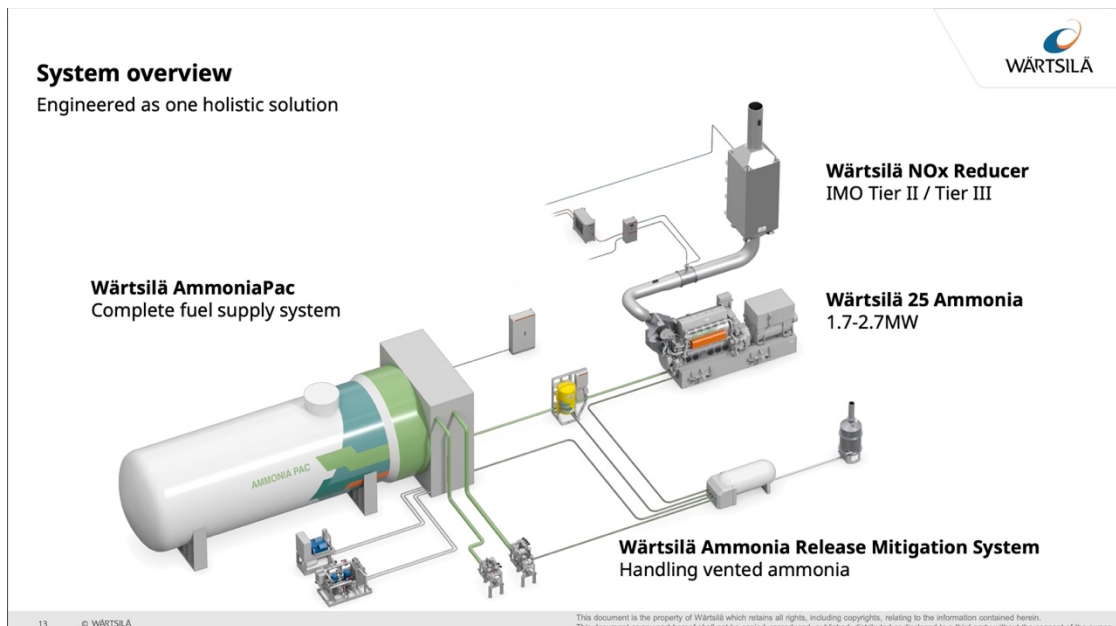
kevyt kemikaalipuku ja kokonaamari soveltuvilla suodatinpatruunoilla. Taso 3 on määritelty koskemaan henkilöitä, jotka kulkevat esimerkiksi vahtikierroksiltaan potentiaalisesti vaarallisiksi määritellyillä alueilla. Tähän on katsottu riittävän mukana kannettava kevyempi hengityssuojain ns. puolinaamari, joka voidaan tarvittaessa pukea päälle. (Society for Gas as a Marine Fuel 2023, 33.) Edellä kuvatut tasot tuovat selkeyttä toimintaan, mutta saattavat jättää jotain tilanteita huomioimatta ja tästä syystä voi olla asianmukaista määrittää suojautumistasot, jotka perustuvat ilmassa olevan ammoniakkikaasun pitoisuuden mittaamiseen. Esimerkkinä voidaan pitää joitain huolto- ja kunnossapitotöitä, joissa voi joutua työskentelemään olosuhteissa, jotka eivät vastaa em. tasoja. Samoin voi olla järkevää varautua muuttuvaan olosuhteeseen, jossa ennalta suunniteltu työskentelyolosuhde muuttuu kesken työn vaaralliseksi työn suorittajalle.

IGF-koodissa määritellään kattavasti kiinteiden kaasujenilmaisimien tarve ja tarkoitus. Koodi ei kuitenkaan ota huomioon ammoniakkin myrkyllistä ominaisuutta. Kuitenkin koodin soveltaminen myrkyllisyyden havaitsemiseksi voisi olla yksi ratkaisu ilman kaasupitoisuuden jatkuvaan seurantaan. Tämän lisäksi henkilöturvallisuuden varmistamiseksi on perusteltua käyttää sopivia kannettavia kaasunhaistajia henkilöillä, jotka työskentelevät tiloissa, joissa altistuminen on mahdollista.

### **4.3 Aluksen rakenne ja järjestelmät**

IGF-koodi asettaa rajat LNG-käyttöisten alusten suunnittelun periaatteisiin ja järjestelmän toiminnalle. Ammoniakkikäyttöisten alusten osalta hyvin monet periaatteet ovat yhteneväisiä IGF-koodin vaatimusten kanssa. Eroavaisuuksia tulee päästöjen hallinnan osalta ja ammoniakkin myrkyllisyyden hallinnan osalta. Yleistäen voidaan todeta, että nykypäivänä ammoniakkikäyttöisen aluksen voima tuotetaan dual fuel -polttomoottorin avulla. Tulevaisuudessa on mahdollista käyttää myös yksipolttoainejärjestelmiä polttomoottorin avulla tai erilaisia polttokennojärjestelmiä, joilla voitaisiin korvata polttomoottori. Samoin voidaan todeta, että nykyiset ammoniakkimoottorit on suunniteltu käyttämään pilot-polttoaineena dieseliä palamisen edistämiseksi. Vaihtoehtoisesti pilot-polttoaine voitaisiin mahdollisesti korvata erillisellä polttoaineen sytytysjärjestelmällä. Ratkaisut riippuvat paljolti laitevalmistajien tuotannosta sekä tilaajien

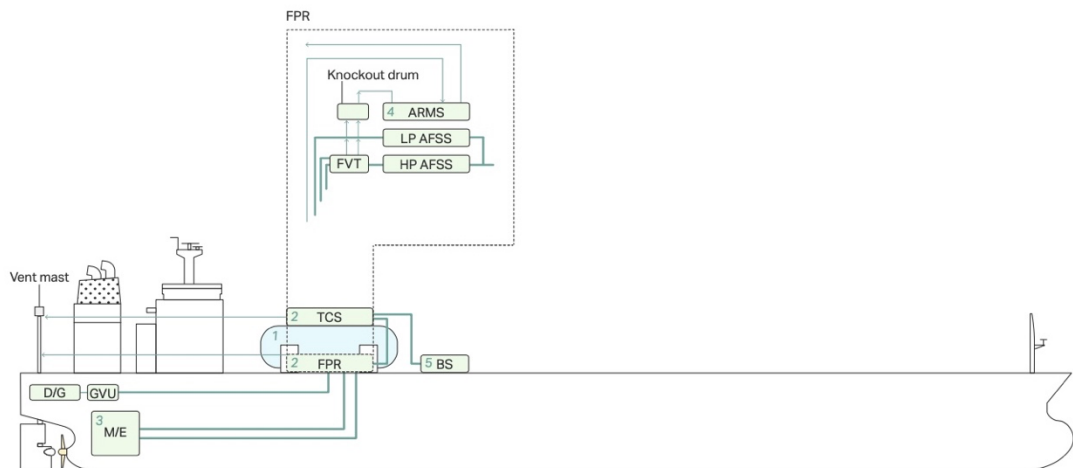
vaatimuksista. Kuvassa 2 on esitetty ammoniakkikäyttöisen aluksen voimantuoton järjestely Wärtsilä AmmoniaPac -kokonaisratkaisun mukaisesti. Kokonaisuuteen kuuluu polttoainesäiliö ja siinä kiinteästi oleva FRP, polttoaineen syöttöä säätelevä ohjausyksikkö sekä voimakone. Tämän lisäksi järjestelmään kuuluu pakokaasujen käsittelyjärjestelmä, jolla voidaan pienentää typenoksidien pääsyä ilmakehään kuten myös moottorissa palamattoman ammoniakkin jäämiä (ammonia slip). Edellä mainittujen lisäksi kuvassa on myös ammoniakkin ulospuhallukseen (venting) liittyvä Wärtsilä Ammonia Release Mitigation System -laitteisto, jonka avulla voidaan käsitellä ulospuhallettava ammoniakkipäästö. Yleisesti voidaan todeta, että järjestelmän suunnittelulla ja kokoonpanolla voidaan vaikuttaa merkittävästi turvallisuussuositusten täyttämiseen ja alusten yleiseen turvallisuuteen. Mitä enemmän järjestelmän komponentteja saadaan sijoitettua rajatuille alueille, sitä vähemmän yleisissä tiloissa on potentiaalista vaaraa aiheuttavia komponentteja ja tällöin turvallisuutta voi olla helpompi hallita.



Kuva 2. Ammoniakkikäyttöisen aluksen polttoainejärjestelmä kuvaus (Wärtsilä 2025)

Yleisesti voidaan todeta, että aluksen polttoainejärjestelmän suunnittelulla voidaan vaikuttaa aluksen turvalliseen käyttöön merkittävästi. Lloyd's Registerin Maritime Decarbonisation Hubin ja MMMCZCS:n yhteisprojektissa Recommendations for Design and Operation of Ammonia-Fueled Vessels Based on Multi-disciplinary Risk Analysis nostaa esiin useita suosituksia ja havaintoja,

jotka perustuvat heidän luomaansa kvantitatiiviseen riskinarviomenetelmään. Riskinarviointimenetelmä perustuu suunnittelutyökaluun, johon voidaan lisätä mallinnuksia ja muita haluttuja kriteereitä. Tärkeitä tutkimuksen havaintoja liittyen alusten operatiiviseen poikkeus- tai hätätilannehallintaan olivat mm. tilojen tuuletuksen riittävä kapasiteetti, myrkyllisten alueiden ja tilojen kulun rajoittaminen minimiin ja valvonta ja ammoniakkikaasuhälytysten kategorisointi ja erottaminen muista hälytyksistä. Tilojen riittäväksi tuuletuskapasiteetiksi arvioitiin 45 ilmanvaihtokertaa tunnissa. Tämän arvioitiin tutkimuksessa riittävän pitämään ammoniakkipitoisuuden alle leimahduspisteen, muttei riittävänä pitämään ilman ammoniakkipitoisuutta alle ihmiselle turvallisen rajan. (Lloyd's Register Maritime Decarbonisation Hub & Mærsk Mc-Kinney Center for Zero Carbon Shipping 2023, 29, 33.) Myös Jang ym.:iden tekemästä tutkimuksesta selviää, että eri luokituslaitokset ovat tehneet omia suosituksiaan koneellisen tuuletuksen riittävästä mitoituksesta. Luokituslaitoksista ABS, DNV ja KR esittävät samankaltaisia arvioita riittävästä ilmanvaihdosta kuin edellä mainittu tutkimus (Jang ym. 2023, 17).



Kuva 3. Polttoainejärjestelmän pääkomponentit (MMMCZCS 2024a)

#### 4.3.1 Polttoainejärjestelmä ja syöttö

Ammoniakkikäyttöisen aluksen polttoainejärjestelmää voidaan havainnoida kuvassa 3, joka löytyy MMMCZCS:n tekemässä selvityksessä ”Emerging Ship Design Principles for Ammonia Fueled Vessels”. Polttoainejärjestelmän (fuel supply unit) tehtävä on ottaa polttoaine tankista ja valmistella se sopivaksi moottoria varten. Riippuen toimintaperiaatteesta järjestelmän tehtäviin voi

kuulua polttoaineen lämpötilan ja paineen muokkaaminen ja syötön ohjaaminen ja varmistaminen moottorille. FSU:n voidaan löyhästi määrittellen sisältävän seuraavat järjestelmät: TCS (tank connection space) ja FPR (fuel preparation room), jotka sijaitsevat erikseen määrittelyssä erillisissä tiloissa. Järjestelmät sisältävät polttoainepumput, lämmönvaihtimet, venttiilit, suodattimet, ohjausyksikön ja muut tarvittavat laitteet. Väliaikaisohjeiden mukaan TCS tulisi suunnitella mm. siten, että se olisi erotettu FPR:stä ja käynti sinne olisi suojattu vesiverhojärjestelmällä. Pää- ja apukoneet sijaitsevat konehuoneessa. (MMMCZCS 2024a, 22.)

Polttoainejärjestelmään kuuluu myös GVU (gas valve unit), jonka tehtävä on ohjata kaasumaisen polttoaineen syöttöä halutusti. Lisäksi järjestelmään kuuluu ARMS-laitteisto (ammonia release mitigation system), joka tehtävä on ammoniakkin päästöjen vähentäminen käsittelemällä mm. ammoniakkin typpituuletuksesta johtuvat päästöt. Järjestelmät voivat myös sisältää seuraavia laitteita, jäähdytysjärjestelmä, jolla voidaan palauttaa kaasumainen ammoniakki takaisin nestemäiseen muotoon, ammoniakkikäyttöinen kattila tai muu kaasun polttoyksikkö. Pakokaasujen ja tuuletukseen liittyviin järjestelmiin (ARMS) kuuluvat lisäksi ammoniakkiputkistot, tuuletusmasto ja inertkaasujärjestelmä. (MMMCZCS 2024a, 22–25.) Laittevalmistajat toimittavat tällä hetkellä omia konseptejään, mutta voidaan todeta, että tulevaisuudessa järjestelmien lopullinen kokoonpano voi vakiintua säädösten yhtenäistyessä ja tekniikan kopioituessa laitevalmistajalta toiselle. Lähivuosien aikana on mahdollista, että järjestelmiä rakennetaan mahdollistamaan ammoniakki osittaisena käyttövoimana, esimerkiksi vain yhdessä koneessa. Pääkoneet ovat alkuvaiheessa todennäköisesti multi- tai dual fuel -moottoreita, mikä tarkoittaa, että moottorissa voidaan käyttää ammoniakkin lisäksi muita konventionaalisia polttoaineita.

IMO:n väliaikaisohjeista voidaan nostaa seuraavat merkittävät vaatimukset ammoniakkikäyttöisille aluksille. Polttoaineen syöttö tulisi toimia siten, ettei ammoniakkikaasua tuuleteta suoraan ilmaan normaaleissa olosuhteissa, tai ennalta tunnetussa poikkeustilanteessa. Väliaikaisohjeissa todetaan myös, että laitteistoon kohdistuva yksittäinen vaurio ei saa johtaa suoraan vuotoon ympäröivään tilaan. Käytöstä johtuvat päästöt on myös käsiteltävä ARMS-laitteistolla. (Sub-Committee on Carriage of Cargoes and Containers 2025, 3–4.)

Lisäksi järjestelmissä, joissa polttoaineena on pelkästään ammoniakki, on polttoaineen syöttö varmennettava siten, että yhdestä säiliöstä tuleva polttoainesyöttö moottorille on kahdennettava. Täten myös yhden polttoaineen tapauksessa on polttoainesäiliöitä oltava vähintään kaksi. Jos polttoainesäiliö on C-tyypin säiliö, riittää kahdennettu TCS. (Sub-Committee on Carriage of Cargoes and Containers 2025, 25.)

Polttoaineen syötön määräyksistä voidaan väliaikaisohjeistuksesta nostaa seuraavia seikkoja. Polttoainesäiliöistä lähtevät polttoainelinjat on suunniteltava siten, että rintaventtiilien tulisi sijaita mahdollisimman lähellä polttoainesäiliötä ja venttiileitä tulee pystyä ohjaamaan myös etäkäytöllä. Polttoainesyötön päälinjan venttiiliä (master fuel valve) on pystyttävä ohjaamaan etäkäytöllä useasta eri paikasta, mutta se on myös pystyttävä sulkemaan käsin. Lisäksi polttoainesyötön päälinjan venttiin tulee sijaita konehuoneen ulkopuolella, mahdollisimman lähellä järjestelmän osaa, jossa polttoaineen lämpötilaa nostetaan. Jokainen polttoaineen käyttäjä, esimerkiksi moottori tai kattila tulee olla mahdollista eristää järjestelmästä erillisellä käsiventtiilillä. Tämä voidaan saavuttaa esimerkiksi kahdella perättäisellä turvasuunta-kiinni-venttiilillä, joiden välissä on turvasuunta-auki-valutusventtiili. Tilanteessa, jossa polttoaineen pääventtiili sulkeutuu automaattisesti, on automaation tuuletettava polttoainelinjat tyhjiksi ARMS:n kautta. (Sub-Committee on Carriage of Cargoes and Containers 2025, 25.)

#### **4.3.2 FPR ja TCS**

FPR:n vaatimukseen voidaan väliaikaisohjeistuksesta nostaa seuraavat kohdat. Sisään- ja uloskäynnin on aina tapahduttava ilmalukon kautta, jos alueelle ei voi kulkea avoimelta kannelta. Sisäänkäyntien yhteydessä on oltava vesiverhojärjestelmä, joka voidaan käynnistää turvalliselta alueelta. Vuotojen havaitsemisen ja hallinnan osalta tilassa on kyettävä havaitsemaan ja pysäyttämään mikä tahansa vuoto. Suurin mahdollinen vuotoskenaario on määriteltävä ja tilan on kyettävä kestämään mikä tahansa määritellyistä vuotoskenaarioista sekä mahdollistettava henkilöiden turvallinen sisäänmeno vuototilanteessa. (Sub-Committee on Carriage of Cargoes and Containers 2025, 9.)

TCS:n osalta on väliaikaisohjeissa määritelty mm. seuraavat vaatimukset. Kulku tilaan on estettävä kaasutiiviillä laipalla, jos tilaan ei ole itsenäistä kulkua avoimelta kannelta. Laitteiston on sijoitettava kaasutiiviissä tilassa, joka on varustettu itsesulkeutuvalla ovella. (Sub-Committee on Carriage of Cargoes and Containers 2025, 10.)

### 4.3.3 Polttoainesäiliöt

Polttoainesäiliöiden luokittelussa käytetään samoja vakiintuneita periaatteita, kuin mitä esimerkiksi IGF-koodissa on määrätty LNG:n osalta. Säiliöiden luokittelu on tyyppin A-, B- ja C-säiliöt sekä membraanitankki, joista ensimmäiset ovat itsenäisiä aluksen rakenteista ja viimeinen on osa aluksen rakennetta. A- ja B-säiliöt soveltuvat jäähdytetyn ammoniakkin säilytysjärjestelmäksi ja niiden paineenkestosta on määrätty, ettei sen tulisi ylittää 0,7 baaria. C-tyypin säiliö on itsenäinen, mikä tarkoittaa, että se on erillään aluksen rungosta. C-tyypin säiliö voitaisiin suunnitella kestävämmän huomattavasti korkeampaa painetta kuin A- ja B-tyypin säiliöt. Membraanitankki on osa aluksen runkoa, jossa kaasutiiveys saavutetaan käyttämällä laipioiden eristekerroksessa olevaa kalvoa. Kaikilta, paitsi C-tyypin säiliöiltä, vaaditaan sekundaarinen ulkoinen rakenne vuotojen hallitsemiseksi. (IMO 2016, luku 6.)

Väliaikaisohjeissa todetaan polttoaineen säilytyksen osalta, että ammoniakki on varastoitava jäähdytettynä normaali ilmanpaineessa. Lämpötilan osalta väliaikaisohjeistus tarkentaa, että ammoniakki tulee olla säiliössä vähintään -30 °C:sta. Säiliön tai säiliötilan sekä TCS:n tulee olla kaasutiiviitä viereisiin tiloihin nähden, pois lukien C-tyypin säiliö. Kaasutiiveys viereisiin tiloihin koskee mitä tahansa tilaa paitsi asuin-, huolto-, sähkö- ja valvomotiloja. Väliaikaisohjeistus kieltää säiliötilojen ja TCS:n olevan kiinteästi edellä mainittujen tilojen viereissä. Käytännössä tilojen on oltava erotettu toisistaan vähintään kahdella laipiolla. Samoin se, mitä IGF-koodissa on määrätty siirrettävistä säiliöistä ei koske ammoniakkikäyttöisiä aluksia, sillä siirrettävää polttoainesäiliötä ei tulisi niissä käyttää. (Sub-Committee on Carriage of Cargoes and Containers 2025, 12, 19.)

Ohjeistuksen vaatimusten seurauksia pohdittaessa, esimerkiksi aluksen polttoainesäiliötyypin valintaa tehdessä, vaikuttavat siihen rakennuskustannusten

lisäksi mm. aluksen suunniteltu reitti. Kuten aiemmin mainittu, ammoniakki-käyttöinen alus tarvitsee noin kolme kertaa suuremmat polttoainesäiliöt vastaavaan MGO-käyttöiseen alukseen verrattuna. A- ja B-tyyppin säiliöt voivat mahdollistaa suuremman polttoainemäärän verrattuna C-tyyppin säiliöön. Valintaan voi vaikuttaa myös C-tyyppin polttoainesäiliön vakiintunut käyttö LNG-käyttöisissä aluksissa ja mahdollisesti sen yksinkertaisemmat vaatimukset sijoitteluun aluksella.

#### **4.3.4 Ammoniakkiputkistot**

Väliaikaisohjeistus määrää ammoniakkiputkistojen osalta mm. seuraavia seikkoja. Putkistot on järjesteltävä siten, että niiden ei tulisi olla lähempänä kuin 800 mm aluksen kyljestä, eikä niiden tule kulkea asuin-, huolto-, sähkö- tai valvomotilojen läpi. Väliaikaisohjeistuksessa määritellyn kaasuvapaan konehuoneen konseptiin kuuluu periaate, jonka mukaan laitteistoon kohdistuvan yksittäisen vaurion seurauksena ei tule muodostua vaaratilannetta. Tämän periaatteen mukaan konehuoneessa tai muussa samoin määritellyssä tilassa on ammoniakkiputkiston oltava joko kaksivaippainen tai sen pitää sijaita kaasutiiviissä putkitunnelissa. Avoimilla kansilla ja muilla erikseen määritetyillä alueille, joissa ammoniakkiputkistoilla on riski mekaaniselle vauriolle, on putkistot suojattava. Putkiston paineenkeston nestemäiselle ammoniakille on oltava vähintään 18 baaria, joka vastaa noin 45 °C:isen ammoniakkin höyrynpainetta. Kaasumaisen ammoniakkin putkiston paineenkesto on oltava vähintään 10 baaria. Putkiston kylmävaikutus aluksen runkoon on otettava huomioon ja putkisto on eristettävä aluksen rungosta tarvittaessa. Toiminallisuuden varmistamiseksi putkisto on suunniteltava siten, että se voidaan tarpeen vaatiessa tyhjentää tehokkaasti. (Sub-Committee on Carriage of Cargoes and Containers 2025, 6–7, 19.) Ammoniakkijäämät putkistossa voivat aiheuttaa altistumisvaaran henkilöstölle putkistoon kohdistuvien huoltotöiden aikana.

#### **4.4 Järjestelmien hallinta**

Väliaikaisohjeistus määrittää ammoniakki-käyttöisen aluksen suunnittelun perustan siten, että sen on saavutettava vastaava turvallisuuden ja luotettavuuden taso kuin konventionaalisia polttoaineita käyttävät alukset. Ammoniakin

myrkyllisyydestä johtuvat haitat on kyettävä minimoimaan laitteiston suunnittelun ja toiminnallisuuksien keinoin. (Sub-Committee on Carriage of Cargoes and Containers 2025, 4.)

#### 4.4.1 Suunnittelun perusteet

Ohjeistus määrittelee useita suunnittelun perusteita, joista voidaan erikseen nostaa seuraavat seikat. Polttoainelaitteisto on suojattava ulkopuoliselta mekaaniselta vauriolta. Vuodon havaitsemisen tai turvajärjestelmän vikaantumisen seurauksena on käynnistettävä haittaa minimoivat toimet, jotka eivät kuitenkaan saa johtaa aluksen käyttövoiman menettämiseen. Samoin suunnittelussa on otettava huomioon vaarallisten (hazardous) ja myrkyllisten alueiden (toxic areas) sekä myrkyllisten tilojen (toxic spaces) kulun rajoittaminen. Myrkyllinen alue tarkoittaa aluetta, jossa on, tai voidaan olettaa olevan, ammoniakkikaasua. Myrkyllinen tila tarkoittaa suljettua tai lähes suljettua tilaa, jossa on, tai voidaan olettaa olevan, ammoniakkikaasua. (Sub-Committee on Carriage of Cargoes and Containers 2025, 29.)

Myrkylliseksi alueeksi aluksella voitaisiin todeta esimerkiksi ulkokannella sijaitseva polttoaineen täydennysasema vähintäänkin polttoaineen vastaanottamisen aikana. Myrkylliseksi tilaksi voitaisiin asettaa esimerkiksi FPR ja TCS. On myös huomioitava, että IGF-koodissa vaarallinen alue määritellään räjähdysvaaralliseksi alueeksi, mikä vaikuttaa laitteiden ja komponenttien sähköturvallisuuden kyseisellä alueella.

Lisäksi väliaikaisohjeistuksessa määritellään, että polttoainejärjestelmät tulee suunnitella siten, että normaalioperoinnissa ammoniakkikaasun ulospuhaltamista suoraan ilmaan voidaan välttää. Aluksen tavanomainen operointi pitää sisällään kaikki toiminnot, paitsi tilanteet, joissa alusturvallisuuden takia on välttämätöntä puhalltaa kaasua suoraan ilmaan. Alukselle on järjestettävä kiinteä kaasun- ja nestemäisen vuodon havaitsemisjärjestelmä jokaiselle alueelle. Lisäksi järjestelmä on rakennettava siten, että yksittäinen vaurio järjestelmässä tai sen yksittäisessä komponentissa ei aiheuta suoraa vaaratilannetta. (Sub-Committee on Carriage of Cargoes and Containers 2025, 3–4.)

#### 4.4.2 Toiminnalliset vaatimukset

Toiminnalliset vaatimukset täydentävät väliaikaisohjeissa suunnittelun vaatimuksia tulkinvaraisissa tilanteissa. Polttoainesäiliöiden osalta sanotaan, että ne on sijoitettava siten, että karille ajon tai yhteentörmäyksen seurauksena sijoittelusta ei koidu lisävaaraa. Polttoainejärjestelmä on suunniteltava siten, että vuodot pystytään ottamaan talteen tai ne voidaan päästää turvallisesta pisteestä ilmaan. Lisäksi kulkutiet aluksen eri osastojen välillä on toteutettava siten, ettei vaarallisia kaasuja pääse sellaisille alueille, jotka eivät ole suunniteltu siihen. Samoin järjestelmä on aina suojattava tarpeen mukaan ulkoiselta mekaaniselta vaikutukselta. Vastaavasti aluksen polttoainejärjestelmään liittyvän turvajärjestelmän aktivoituminen ei saisi johtaa käyttövoiman menetykseen. Tilat, joissa sijaitsee polttoainejärjestelmiä, tulisi olla suunniteltu siten, että niissä tapahtuva vuoto ei johtaisi räjähdykseen tai ihmisen altistumiseen ammoniakille. (Sub-Committee on Carriage of Cargoes and Containers 2025, 3–4.)

Ulkokannelle sijoitettujen tilojen suunnittelussa on väliaikaisohjeiden mukaan huomioitava se, että niiden luonnollinen ilmanvaihto estää ammoniakkikaasun kerääntymisen tilaan. Hengenpelastukseen liittyvien laitteiden tulee olla sijoitettu selkeästi myrkyllisten tilojen ja alueiden ulkopuolelle. Samoin on sijoitettava asuin- ja huoltotilojen ilmanvaihtojärjestelmän sisäänotto- ja ulospuhallusaukot sekä kulkutiet aluksen asuintiloihin. (Sub-Committee on Carriage of Cargoes and Containers 2025, 6.)

Konehuoneen järjestelyistä väliaikaisohjeistuksessa todetaan, että sen tulee olla suunniteltu siten, että tila on kaasuvapaa kaikissa tilanteissa. Yksittäisen vaurion ei tule aiheuttaa polttoainevuotoa konehuoneessa ja kaikkien polttoaineputkistojen on oltava kaasutiiviitä. (Sub-Committee on Carriage of Cargoes and Containers 2025, 8.)

Lisäksi määrätään, että polttoainesäiliöiden ja niitä suoraan ympäröivien tilojen sekä TCS:n ja kaikkien muiden tilojen, joihin voi kohdistua polttoaineen laajenemisesta johtuva paineen nousu on suojattava ylipaineventtiilein. Turvajärjestelmien tulisi olla itsenäisiä muusta paineensäätöjärjestelmästä. Tämän lisäksi polttoainesäiliöt tulee varustaa kahdella erillisellä ylipaineventtiilillä

venttiilien huollon mahdollistamiseksi. Samoin säiliöt on suojattava alipaineen vaikutukselta, jos on mahdollista, että säiliöön voi kohdistua alipainetta. Muita ylipaineventtiileihin liittyviä vaatimuksia ovat mm. säänkesto talviolosuhteissa, lämmönkesto palotilanteessa ja ohjeistukset niiden järjestelmästä erottamiseen. Ylipaineventtiilien on purettava paine tuuletusjärjestelmään, jonka tulee olla esteetön, eikä se saa kerätä vettä tai lunta. Purkupään tulee olla vähintään 6 metrin korkeudessa ja sen tulee sijaita vähintään 25 metrin päässä asuin-, huolto-, valvomo- ja muiden ei-vaarallisiksi luokiteltujen tilojen ilmanvaihtoventtiileistä. Laitteisto pitää suunnitella ja suojata siten, että sinne ei pääse keräytymään nestettä eikä muita ulkopuolisia kappaleita. (Sub-Committee on Carriage of Cargoes and Containers 2025, 13–14.)

Polttoaineen lämpötilan ja paineenhallinnan vaatimukset, jotka poikkeavat IGF-koodista ovat seuraavat. Polttoaineen lämpötila on oltava vähintään -30 °C:ista. Tämä tulee saavuttaa väliaikaisohjeistuksen mukaan kaasun uudelleen nesteyttämisenä, polttoaineen jäädyttämisenä tai boil-over-kaasun (BOG) hallittuna polttamisena. Menetelmän on kyettävä ylläpitämään polttoaineen lämpötilaa myös tilanteessa, jossa konevoimaa ei käytetä propulsioon. Ympäristön lämpötilan vaikutukset on huomioitava maailmanlaajuiseen liikennöintiin siten, että oletettu veden lämpötila on 32 °C ja ilman 45 °C. Jäähdytyslaitteistojen sisältämien kylmäaineiden tulee olla yhteensopivia ammoniakkin kanssa, jotta epätoivottuja reaktioita ei muodostu niiden sekoittuessa. Laitteiston toiminnan on oltava varmistettu siten, että yksittäisen vaurion tilanteessa polttoaineen lämpötilaa tai painetta tulee pystyä kontrolloimaan jollakin erillisellä keinolla. Vaihtoehtoisesti järjestelmä voi olla kahdennettu. (Sub-Committee on Carriage of Cargoes and Containers 2025, 19–20.)

Väliaikaisohjeistus määrittelee, että pilssit ja valuma-altaat tulee olla eriytetty sellaisista tiloista, joihin ammoniakkin ei tule päästä. Samoin vuototilanteet tulee pystyä havaitsemaan vuodon tapahtuessa. Valuma-altaat tulee myös eriyttää aluksen rungosta ei-toivotun lämmön johtumisen takia ja niiden on oltava mitoitettu kohteeseen erillisen riskinarvioinnin perusteella. (Sub-Committee on Carriage of Cargoes and Containers 2025, 9.)

Väliaikaisohjeistuksen vaatimukset koneellisen ilmastoinnin mitoituksen osalta perustuvat suoraan IGF-koodin osan Part A-1 kappaleeseen 13 (Sub-

Committee on Carriage of Cargoes and Containers 2025, 30). Kyseisessä kappaleessa määrätään ilmanvaihdon mitoituksesta aluksen eri osissa. Mitoitusvaatimus on aluksen FPR:ssa ja TCS:ssa 30 ilmanvaihtokertaa tunnissa (IGF-Code 2016, 72–75).

Kulkuteistä mainitaan, että eri alueiden välillä olevat kulkutiet tulee suunnitella siten, että vaarattomalta alueelta ei ole suoraa kulkua vaaralliselle tai myrkylliselle alueelle. Lisäksi kulku inertöityihin tiloihin on estettävä, samoin on estettävä inertkaasun pääsy viereisiin tiloihin. Kyseisiin tiloihin sisäänmeno esimerkiksi tarkastus toimenpiteitä varten on pystyttävä suorittamaan käyttäen täyttä kemikaalisuojavarustusta ja tilasta on pystyttävä pelastamaan loukkaantuneita henkilöitä. Ohjeistuksesta voidaan tulkita, että eri tavoin määriteltyjen alueiden väliin tulisi rakentaa ilmalukko, jos käynti ei ole mahdollista ulkokannelta. Ilmalukon on toimittava siten, että kaasut eri tilojen välillä eivät voi sekoittua. Tämän takia ilmalukon on oltava ylipaineessa viereisiin tiloihin nähden ja se on voitava tarvittaessa tuulettaa. Ilmalukon molemmilla puolilla on oltava indikaattorit, jotka osoittavat ovien aukiasennon. Ilmalukon ylipaineen lakatessa on siitä tultava hälytys ja ilmalukon käytön tulee olla rajoitettu, kunnes ylipaine saadaan palautettua. (Sub-Committee on Carriage of Cargoes and Containers 2025, 10–11.)

#### **4.5 Aluksen polttoainetäydennys**

Polttoaineen täydennysjärjestelmän vaatimukseen kuuluu samat suunnittelun peruseriaatteen kuin muihinkin polttoaineen käsittelyyn liittyviin järjestelmiin. Laitteiston on saavutettava yhtäläinen turvallisuus kuin konventionaalisilla polttoaineilla. Laitteisto tulee suunnitella siten, että kaasun ulospuhallus pystytään välttämään normaalissa käytössä. Laitteiston käytön on oltava turvallista ja sen toiminnallisuuden on oltava luotettavaa. (Sub-Committee on Carriage of Cargoes and Containers 2025, 3.)

##### **4.5.1 Polttoaineen täydennysasema**

Polttoaineen täydennysasema on suunniteltava ohjeistuksen mukaan siten, että polttoainevuodon tapahtuessa siitä aiheutuva haitta alukselle ja sen miehistölle olisi mahdollisimman pieni. Aseman tulee sijaita siten, ettei sen vaikutusalueella ole asuin-, kone-, huolto- tai valvomotilojen ilman sisäänottoa tai

suoraa kulkua kyseisiin tiloihin. Polttoaineen täydennysputkiston ei tule myöskään kulkea kyseisten tilojen läpi. Polttoaineen täyttöyhde ja siihen liittyvä putkisto tulee suunnitella siten, ettei siihen kohdistuvasta vauriosta koidu haittaa aluksen polttoainejärjestelmälle. Samoin se on saatava tyhjennettyä ja inertöityä käytön jälkeen. Polttoaineen täyttöasemalla tapahtuvat vuodot on pystytävä keräämään ja aluksen rungon rakenteet on suojattava vuodon kylmävaikutukselta. (Sub-Committee on Carriage of Cargoes and Containers 2025, 22.)

Aluksen polttoaineen täydennysletkun on sovellettava väliaikaisohjeistuksen mukaan ammoniakkin vaikutukselle sekä lämpötilalle. Polttoaineen täydennysletkun on kestettävä vähintään viisi kertaa se paine, joka siihen kohdistuu normaalisti polttoainetäydennyksen aikana. Visuaalisesti tehtävän kunnon tarkkailun on oltava säännöllistä ja sen painetestausta on suoritettava vähintään viiden vuoden välein. Liitos polttoaineen täyttöyhteen tulee olla sellainen, että se voidaan kiinnittää ja irrottaa ilman vuotoja. Tämä voidaan saavuttaa käyttämällä tarkoitukseen sopivia liittimiä tai suunnittelemalla ja ohjeistamalla järjestely siten, että liitoksen irrotus onnistuu ilman vuotoja. Samoin liitokseen on sisällytettävä hätäirrotusjärjestely joko laivan tai polttoaineen toimittajan päähän. (Sub-Committee on Carriage of Cargoes and Containers 2025, 22–23.)

Lisäksi polttoaineen täydennysputkisto on pystyttävä sulkemaan polttoaineen täyttöyhteen läheisyydestä sekä käsin että etänä polttoaineen täyttöjärjestelmästä. Täyttöjärjestelmän hätäpysäytys tulee olla mahdollista sekä automaattisesti että käsin käyttäen hätäpysäytyslinkkiä (Bunkering safety link, BSL) tai vastaavaa järjestelmää. Jos polttoaineen vastaanottaminen on mahdollista aluksen molemmilta sivuilta, on hallitsematon polttoaineen siirtyminen estettävä sille puolelle alusta, josta polttoainetta ei oteta. Polttoaineen täydennyksen aikana syntyvät kaasut on pystyttävä hallitsemaan joko käyttäen polttoainejärjestelmää tai kaasunpalautuslinjaa. Polttoaineen täydennyksen jälkeen käytetty putkisto on saatava tyhjäksi ammoniakkipäästä. Putkiston suunnittelussa on myös kiinnitettävä huomiota siihen, että putkisto voidaan turvallisesti todeta tyhjäksi. Samoin, jos järjestelmään on rakennettu näytteenottoyhde, on sen käyttö pystyttävä toteamaan turvallisesti ennen sen venttiileiden avaamista. (Sub-Committee on Carriage of Cargoes and Containers 2025, 23–24.)

Polttoaineen täydennysaseman tulisi ohjeistuksen mukaan täyttää seuraavat vaatimukset. Täydennysasema on pystyttävä eristämään aluksen muista vaarallisista tai myrkyllisistä alueista. Nämä alueet on määriteltävä ja niiden eristämisestä toisistaan on oltava suunnitelma. Myös aseman kaasujen havaitseminen ja tuuletus on osoitettava riittäväksi. Samoin on määriteltävä tarvittavat toimet polttoaineen täydennysaseman vuotojen hallintaan. Aseman valvonta on järjestettävä, joko suoralla näköyhteydellä tai videovalvonnalla. Polttoaineen täydennysasemalla tapahtuvien vuotojen leviämisen estämisen varalle on rakennettava riittävät mekaaniset suojat. Alueella on myös pystyttävä työskentelemään täysissä turvavarusteissa. (Sub-Committee on Carriage of Cargoes and Containers 2025, 8–9.)

Käytännössä polttoaineen täydennysoperaatio ammoniakikäyttöisellä aluksella voidaan todeta olevan lähes vastaavaa kuin LNG-käyttöisellä aluksella. On kuitenkin huomioitava, että LNG:n polttoaineen täydennysoperaatiota on standardoitu pitkälle mm. riskienhallinnan, laaduntarkastuksen ja yleisten käytäntöjen osalta, jotka eivät välttämättä sovellu aina ammoniakin kanssa toimittaessa. Kuitenkin voidaan olettaa, että laitteisto, jota käytetään, on jokseenkin samankaltainen kuin mitä European Maritime Safety Agency kuvailee julkaisussaan ”EMSA Guidance on LNG Bunkering”. Kuvauksen mukaan, alukseen liitetään polttoaineletku käyttämällä ”tipatonta” esim. QC/DC -liitintä (quick connect / disconnect coupling). Häätäirrotusta varten polttoaineen täydennyslinjassa tulisi olla hätäirrotusliitin (ERC, emergency release connection). Käsitteilyn helpottamiseksi polttoaineletkuun tulisi mahdollisesti asentaa kraanankiinnityspiste ns. pad-eye. Riippuen siitä, mistä polttoaine alukseen pumpataan, voi käytössä olla myös kaasunpalautuslinja. Tässä tapauksessa kaasunpalautuslinjan liitoksissa tulisi olla samat edellä mainitut turvaominaisuudet kuin polttoaineen täydennyslinjassa. Polttoaineen täydennysoperaation hätäpysäytystä hallittaisiin Bunkerin Safety Linkillä, joka yhdistää sekä aluksen että polttoaineen toimittajan hätäseispiirit. (European Maritime Safety Agency 2018, 62.)

Society for Gas as a Marine Fuel (SGMF), joka koostuu ammoniakin kaupallisista toimijoista, nostaa omassa julkaisussaan joitain ammoniakkipolttoaine täydennykseen liittyviä huomioita, jotka eroavat LNG:n polttoaine täydennyk-

sen toimintaperiaatteista. Ensinnä ammoniakkin ollessa noin  $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ :ta, ei polttoainetäydennysletkun tarvitse olla yhtä vahvasti lämpöeristetty kuin LNG:lle tarkoitettuna letkun. Tämän seurauksena mainitaan, että letkun käsittely on mahdollisesti helpompaa kuin vahvasti eristetyn LNG-letkun. Tekstissä nostetaan myös ero ammoniakkin bulk-laivauksien ja LNG:n polttoainetäydennyksen toimintaperiaatteen osalta. Ammoniakkibulk-kuljetuksissa toimitaan IGC-koodin mukaan, jossa todetaan lastaus- tai purkuoperaation aloituksen yhteydessä tehtävästä painetestistä, että se tehdään typen sijaan käyttäen ns. lämmintä ammoniakkikaasua. Näin toimien polttoainelinjoja ei tehdä kaasupaaksi, vaan ne pyritään jatkuvasti pitämään ammoniakkikaasulla. (Society for Gas as a Marine Fuel 2023, 36–38.) Näistä jälkimmäinen huomio voi muuttaa polttoaineen täyttöön liittyviä toimintatapoja siinä tapauksessa, jos alukset ottavat polttoainetta esimerkiksi ammoniakkiterminaaleilta.

Kansainvälisesti tunnustettua ammoniakkin polttoainekäyttöön liittyvää laatuspesifikaatiota ei tällä hetkellä ole olemassa, mutta niiden tarve on tunnistettu ja niitä kehitetään yhteistyössä luokituslaitosten, standardointilaitosten ja IMO:n kesken (MMMCZCS 2024a, 20). MMMCZCS tunnistaa koulutustarpeita arvioivassa selvityksessä ”Ammonia Phase 3 Scenario Evaluations”, että epäpuhtaudet, kuten typpi, kosteus ja metallipartikkelit, vaikuttavat heikentävästi ammoniakkin polttoaineominaisuuksiin ja säilytykseen (MMMCZCS 2025, 73). Voidaan kuitenkin olettaa, että polttoaineeksi käytettävälle ammoniakille luodaan tulevaisuudessa omat standardit.

#### **4.6 Päästöjen hallinta**

Puhuttaessa aluksen päästöistä tarkoitetaan niillä usein hiilidioksidi-, typenoksididi- tai rikkipäästöjä, jotka muodostuvat, kun fossiiliperäinen polttoaine palaa moottorissa. Ammoniakin koostuessa vedystä ja tpeestä edellä mainittuja rikki- ja hiilidioksidipäästöjä ei muodostu. Toisaalta käytettäessä dual fuel -moottoreita fossiilinen pilot-polttoaine tuottaa vähäisen määrän hiiliperäisiä päästöjä. Ammoniakkikäyttöisen aluksen merkittävimmät päästöt ovat typenoksidien ( $\text{NO}_x$ ), dityppioksidin ( $\text{N}_2\text{O}$ ) ja palamattoman ammoniakkin ( $\text{NH}_3$ ) muodostamat päästöt. Näistä  $\text{N}_2\text{O}$  (ilokaasu) on voimakas kasvihuonekaasu, joka kuormittaa ympäristöä merkittävästi. (MMMCZCS 2024a, 48.)

Nykyisissä laivamoottoreissa käytetään pakokaasussa olevien typpi- ja rikki-päästöjen leikkaamiseksi pakokaasujen kierrätysjärjestelmiä (Exhaust Gas Recirculation) sekä pakokaasunkäsittelylaitteita kuten SCR (Selective Catalytic Reduction). SCR-järjestelmällä on mahdollista poistaa NO<sub>x</sub>-päästöjä merkittävästi, etenkin vähärikkisistä polttoaineista. Laitteisto toimii siten, että pakokaasuun sekoitetaan joko ammoniakkia tai urea-vesiliuosta, joka sitten kulkeutuu katalyytin läpi ja muuttuu vedeksi ja typeksi. (Latarche 2020, 97–98, 105–106.) Vastaavia järjestelmiä käytetään ammoniakki dual fuel -moottoreissa, kuten esimerkiksi Wärtsilän Ammonia 25 (kuva 4).

ARMS-järjestelmää (Ammonia Release Mitigation System) käytetään kontrolloimaan operatiivisia ammoniakkipäästöjä. Näitä päästöjä voi muodostua mm. vuodoista polttoainejärjestelmässä, polttoaineen syötön ongelmista tai sen vaihdon seurauksena tehtävästä typpituuletuksesta (purging). Käytännössä tämä tekniikka on järjestelmätasolla uutta ja sillä pyritään estämään myrkyllisen ammoniakkipäästämistä suoraa ilmaan. Vastaavasti LNG-käyttöiset alukset voivat johtaa kyseiset päästöt suoraan ilmaan (MMMCZCS 2023, 21). ARMS-laitteistojen kokoonpano ja toimintaperiaatteet tulevat todennäköisesti kehittymään kun laitteistot yleistyvät. IMO:n väliaikaisohjeissa määrätään, että kaikki polttoainejärjestelmän operatiiviset päästöt tulee ohjata järjestelmään. Näihin päästöihin luetaan mm. polttoaineputkiston ylipaineesta johtuvat päästöt ja polttoainejärjestelmässä tehtävät typpituuletukset. Järjestelmän on kyettävä laskemaan ulospuhallettava ammoniakkipitoisuus alle 110 ppm:n. (Sub-Committee on Carriage of Cargoes and Containers 2025, 25–26.)

ARMS-järjestelmän komponenteista tai kokoonpanosta ei ole määräyksiä, mutta voidaan olettaa, että laitteisto koostuu mekaanisista pisaranerotimista ja erilaisista talteenottosäiliöistä, kuten esimerkiksi jotkin rikkipesurit. Järjestelmän vähimmäismitoituksesta ei ole tarkkoja laskennallisia arvoja, joten järjestelmän mitoitus perustuisi todennäköisesti laitevalmistajan laskelmiin. On myös hyvin mahdollista, että ARMS-järjestelmät tulevat käsittelemään myös muita päästöjä kuin mitä polttoainesyöttöjärjestelmä voi tuottaa. Nämä muut päästöt voisivat olla mm. suljetun tilan kaasujen poistotuuletuksen päästöjä tai suljettujen putkikuilujen tuuletuksesta tulevia päästöjä.

Päästöjen hallinnan osalta ammoniakkikäyttöisen aluksen kaasumasto on oleellinen osa aluksen turvallisuutta häiriötilanteessa, tai polttoainejärjestelmän kaasuvapaaksi tekemisessä. Väliaikaisohjeiden vaatimuksissa määritellään kaasumaston turvaetäisyydet ja muut toiminnalliset vaatimukset. Päästöjen hallinnan osalta väliaikaisohjeet kieltävät suoran ammoniakkikaasun ulospuhalluksen, paitsi hätätilanteessa. Ohjeistus ei suoraan ota kantaa esimerkiksi polttoainesäiliön kaasuvapaaksi tekemiseen ja siitä seuraavan ulospuhalluksen päästöihin. On kuitenkin mahdollista, että ARMS-järjestelmät suunnitellaan siten, että myös nämä päästöt voidaan hallita järjestelmän avulla. Jang ym. esittää tutkimuksensa ”Safety evaluation on ammonia-fueled ship: Gas dispersion analysis through vent mast” yhtenä päätelmänä, että kaikki ulos puhallettava ammoniakkikaasu olisi käsiteltävä ennen kaasumastoon johtamista. Tutkimuksen havainnoissa korostuu ulkoisen olosuhteen vaikutus, jopa niin suureksi, että maston sijoittelun merkitys aluksella heikentyy. Tutkimuksessa tehty mallinnus osoittaa, että useissa erilaisissa olosuhteissa tehty ammoniakkin ulospuhallus voi muodostaa asuintilojen läheisyyteen selvästi haitallisia ammoniakkipitoisuuksia. (Jang ym. 2024, luku 7.)

Toisaalta Kim & Jeong kertovat omassa CFD-mallinnukseen perustuvassa tutkimuksessaan myrkyllisten pitoisuuksien muodostumisen olevan vähäisiä alukselle ja sen ympäristölle. Tutkimuksessa selvitettiin ammoniakkikäyttöisen aluksen kaasumastosta tulevan suoran ammoniakkikaasupäästön vaikutuksia alukseen ja sen suunniteltuja liikennereittejä ympäröivään asutukseen sekä satamaan. Mallinnus on tehty tilanteesta, jossa aluksen neljä metriä korkeasta kaasumastosta vapautuu käsittelemätöntä ammoniakkikaasua kahdeksan baarin paineella. Tapahtuma mallinnettiin Busanin sataman ja siihen liittyvien liikennereittien lähistöllä olevien asutusalueiden olosuhteita vastaaviksi. (Kim ym. 2024, 14.)

Voidaan olettaa, että joissakin olosuhteissa ammoniakkin alhaisen hajukynnyksen seurauksena kaasun suora ulospuhaltaminen voidaan havaita aistinvaraisesti aluksen kannella. Se kuinka suuria pitoisuuksia kannelle voi muodostua vaatii edelleen lisää tutkimusta, jotta tuloksista saadaan yhtenäisiä. Väliaikaisohjeiden rajoitus ulospäästettävän kaasun 110 ppm:n pitoisuudesta voi ylittää hajukynnyksen ja täten myös käsitelty ulos puhallettava kaasu voi olla

mahdollista havaita aluksen kannelta. Nämä havainnot voivat johtaa henkilöstön epätietoisuuteen havaitsemansa ammoniakkikaasun vaarallisuudesta, puhumattakaan mahdollisista aluksen matkustajien tekemistä havainnoista. Tämän takia voi olla perusteltua sijoittaa aluksen kannelle riittävästi sensoreita ja niitä tukeva seurantajärjestelmä, jotta mahdolliset pienetkin altistumiset, tai havainnot voitaisiin selvittää mahdollisimman nopeasti tapahtuman jälkeen. Samoin voi olla järkevää määrittää joitain ulkoalueita myrkyllisiksi ja täten vähentää potentiaalisia altistumisia, jotka voisi aiheutua esimerkiksi polttoainejärjestelmän odottamattomasta häiriöstä. Samoin laitteistojen toimittajien voi olla järkevää tuottaa mallinnuksia käsittelyyn ja käsittelemättömän ammoniakkikaasun leviämisestä aluksella ja sen mahdollisista vaikutuksista miehistöön ja ympäröiviin alueisiin kuten satamaan.

Kaasumaisten päästöjen lisäksi alukselle voi muodostua veden ja ammoniakkin liuosta, joka muodostaa päästökuormaa. Tällaisia päästöjä voisi muodostua esimerkiksi putkirikkojen tai muiden vuotojen seurauksena polttoainesäiliöön liittyvissä laitteissa tai FPR:ssä. Samoin, jos aluksella käytetään ammoniakkikaasun leviämisen estämiseksi vesiverhojärjestelmää, on myös tästä mahdollista muodostua vastaavaa päästöä. Riippuen myös ARMS-järjestelmän kokoonpanosta ja toiminnasta voi olla mahdollista, että järjestelmä tuottaa toimissaan jatkuvasti jonkin verran ammoniakkivesiliuosta, joka tulee käsitellä aluksella tai toimittaa jatkokäsittelyyn.

#### **4.7 Riskienarviointi ja vaarojen ehkäisy**

Väliaikaisohjeissa todetaan, että ammoniakkikäyttöiselle alukselle on tehtävä kokonaisvaltainen riskienarviointi, jonka tarkoituksena on arvioida ammoniakkin käytöstä johtuvia riskejä laivaväkeen. Riskienarvioinnin tulisi sisältää kattava arviointi liittyen aluksen yleisjärjestelyyn, operointiin ja kunnossapitoon. Toisin sanoen kaikki ennalta tiedossa olevat toiminnot, joita aluksen turvallisen kulun ylläpito vaatii on arvioitava. Riskienarvioinnin on erityisesti otettava huomioon ammoniakkijärjestelmän luotettavuus ja mahdollisuudet eriyttää komponentteja vuototilanteessa. Vuototilanteiden osalta on myös tärkeää arvioida sen myrkylliset vaikutukset sekä potentiaalinen palo- ja räjähdysvaara. Riskienarvioinnin tulee johtaa siihen, että riskit, joita ei ole voitu suunnittelun ja toteutuksen osalta ehkäistä on esitettävä varautumiskeinoineen kirjallisesti. (Sub-

Committee on Carriage of Cargoes and Containers 2025, 4–5.) Prosessiturvallisuuden riskienhallinnan kirjallisuudessa esitetään erilaisia luokitteluja juuryistä, jotka ovat johtaneet prosessipoikkeamiin. Vuonna 2023 julkaistussa teoksessa ”Safety in Chemical Process Industries: A Comprehensive Assessment” jako esitetään seuraavasti. Puolet poikkeamiin johtavista tapauksista liittyvät inhimilliseen virheeseen prosessin operoinnissa. Kolmannes on pumpujen ja venttiilien vikaantumisesta johtuvaa ja loput liittyvät laitteiston suunnitteluun. (Fabbricino ym. 2023, 5.) Tämän takia on erittäin tärkeää huolehtia operoinnin ohjeistusten laadusta ja paikkansa pitävyydestä tilanteissa, joissa laitteiston käyttäjä on aktiivisena osana prosessiturvallisuutta.

#### **4.7.1 Aluejako aluksella**

Aluejaon tarkoitus ammoniakkipitoisella aluksella on mahdollistaa turvallinen työskentely laivaväelle. Käytännössä tämä tarkoittaa eri luokitusta olevien tilojen erottamista toisistaan kaasutiivillä laipioilla ja sijoittamalla vaaralliset laitteet siten, että niiden vikaantuessa vaaralliset kaasut eivät pääse turvaliseksi luokiteltuihin tiloihin.

Myrkylliseksi luokitellut alueet ja tilat noudattavat samankaltaista logiikkaa kuin IGF-koodissa esitetyt räjähdysvaaralliset alueet. Myrkylliset alueet ovat alueita, joiden ympäröivässä ilmassa on, tai saattaa olla ammoniakkipitoisuuksia. Alue määritellään etäisyyksinä potentiaaliseen vuoto pisteeseen. Esimerkiksi jokaisesta avoimella kannella sijaitsevasta ammoniakkiputkiston venttiilistä, laippaliitoksesta tai muusta potentiaalisesta vuoto kohdasta luokitellaan kaikki ala 10 metrin etäisyydellä myrkylliseksi alueeksi. (Sub-Committee on Carriage of Cargoes and Containers 2025, 28–29.) Myrkyllisten alueiden luokitteluun liittyy myös useita muita etäisyyteen liittyviä määräyksiä. Luokitteluun voidaan vaikuttaa pääasiassa aluksen suunnitteluvaiheessa. Yhtenä aluejakoa selkeyttävänä suunnitteluperiaatteena olisi sijoittaa polttoaineensyöttöjärjestelmän (FSU, fuel supply system) komponentit lähelle polttoainesäiliötä, kuten jo nyt useissa LNG-aluksissa on tehty. Tämän lisäksi ohjeistuksessa määrätään, että aluksen suunnitteluvaiheessa on osoitettava myrkyllisten alueiden dynaamiset rajat kaasun leviämisanalyysin kautta. Analyysissä on osoitettava, ettei leviämisen takia ole mahdollista, että kaasuturvallisten ja muiden erikseen määriteltujen alueiden ammoniakkipitoisuus ilmassa nouse yli 220 ppm:n.

Määräys on mahdollista toteuttaa, myös vaihtoehtoisella toteutuksella, jossa estetään myrkyllisen kaasun leviäminen turvallisille alueille esimerkiksi rakenteellisella ratkaisulla. (Sub-Committee on Carriage of Cargoes and Containers 2025, 30.)

Myrkyllisiä tiloja ovat esimerkiksi säiliöiden ja putkistojen sisätilat, TCS:n ja polttoainesäiliöiden toissijaiset suojarakenteet, eli kaksoisvaipat. Samoin kaikki suljetut ja osittain suljetut tilat, joissa on potentiaalinen vuotokohta, esimerkiksi putkistossa oleva laippa tai venttiili. (Sub-Committee on Carriage of Cargoes and Containers 2025, 29.) Voidaan todeta, että myrkyllisiin tiloihin tulisi käytännössä suhtautua siten, että niissä vallitsee aina ihmiselle haitallinen ammoniakkipitoisuus. Myrkyllisissä tiloissa tehtäviä kunnossapitotöitä suunniteltaessa on myös huomioitava se, että tilan ammoniakkipitoisuus voi muuttua kesken työskentelyn ja täten aktiiviset toimet ammoniakkipitoisuuden hallintaan tulisi olla jatkuvatoimisia.

Tämän lisäksi ohjeistuksessa määrätään, että alukselle on järjestettävä, joko yksi tai useampi turva-alue (safe haven), joihin kaikki aluksella olevat henkilöt voivat siirtyä suojaan ammoniakkivuodon seurauksilta (Sub-Committee on Carriage of Cargoes and Containers 2025, 30). Aluksen jakaminen eri alueisiin antaa mahdollisuuden suunnitella ja järjestää aluksen toiminnot siten, että ihmisten altistumista ammoniakille voidaan minimoida tehokkaasti. Määräys turva-alueesta kaikille aluksella oleville tuo matkustaja-alusten ympärille pohdinnan kuinka sitä voidaan noudattaa. Toisaalta voidaan pohtia, tuleeko ammoniakista minkälaisella aikataululla matkustaja-alusten polttoaine ylipäänsä. Yleisesti ottaen alustyyppistä riippumatta on ratkaistava myös alueiden välisen kulun valvonta ja sen ohjeistus. Alueilla saatavilla oltavien henkilökohtaisten suojaimeiden sijoittelu on myös yksi turvallisuustekijä, joka voi vaikuttaa merkittävästi käytännön turvallisuuteen. Yksi selkeä ratkaisu voisi olla alueiden rajaaminen rakenteellisesti, siten, että käynti myrkylliselle alueelle tapahtuisi aina suljetun oven kautta.

#### **4.7.2 Turvalliset työtavat**

Prosessiturvallisuuden riskien hallinnassa vaaran poistaminen on aina ensisijainen toimenpide. Ammoniakkiteollisuuden toimijat kuvaavat riskien hallintaa

seuraavasti. Riskin poistamisen ollessa mahdotonta on vaaraa pystyttävä vähentämään suunnittelun tai ohjeistuksen keinoin, jos edelleen jää riskipotentiaalia on vaaraa ehkäistävä henkilökohtaisilla suojarusteilla. Kuvauksesta tulee myös ilmi, että vaaran ehkäisyyn tehokkuus laskee mitä lähemmäs tullaan henkilökohtaisten suojainten käyttöä. Toisin sanoen vaaran poistaminen on tehokkain riskin vähennyskeino ja henkilökohtaiset suojaimet ovat vähintään tehokas keino riskin ehkäisyyn. (Society for Gas as a Marine Fuel 2023, 27.) Tätä periaatetta mukaillen on selvää, että kaikilla teollisuuden aloilla on riskipotentiaalia, jota ei voida kokonaan poistaa työntekijältä.

Työturvallisuus prosessiteollisuuden näkökulmasta noudattelee edellä mainittuja kohtia. Esimerkiksi ohjeistuksen tekeminen ja noudattaminen vaativat aktiivisia tekoja henkilöstöltä, toisin kuin esimerkiksi aluksen polttoainejärjestelmän sijoittelu, johon ei voida vaikuttaa käytännön työssä. Työturvallisuuden kokonaisuus perustuu ymmärrykseen laitteiden tai järjestelmien suunnittelun perusteista ja raja-arvoista sekä inhimillisen toiminnan vaikutuksesta prosessiin. Turvallisen työskentelyn varmistamiseksi aluksilla voidaan ammoniakkin käyttöön liittyvien töiden osalta tuoda avuksi prosessiturvallisuudesta tuttuja menetelmiä. Tarkastuslistoja voidaan käyttää tässä yhteydessä, esimerkiksi suljettuihin tai myrkyllisiin tiloihin mentäessä. MMMCZCS suosittelee tutkimuksessaan ”Ammonia Phase 3 Scenario Evaluations” seuraavia menetelmiä ammoniakkin vaarojen vähentämiseksi. Työkohtaisia riskinarvioita (Job Safety Assessment / Job Hazard Analysis) voidaan käyttää, kun työskennellään alueella, jossa on mahdollisuus altistua, tai järjestelmän osan kanssa, joka sisältää ammoniakkia. Laitteiden eristämiseen (segregation) huoltotöitä varten voidaan käyttää LOTO-menetelmää (Lock Out Tag Out), joka ohjaa työnsuorittajaa lukitsemaan järjestelmän osia ja täten estää virheoperointeja huollon kohteena oleville laitteille. Samoja menetelmiä tulisi käyttää, kun on tarkoitus rikkoa laitteiston eheys huoltoa tai tarkastusta varten. Selvityksessä myös muutoksenhallinta nähdään myös tärkeänä osana turvallisuutta. Muutokset, joita laitteistoihin tehdään, tulisi kirjata säännönmukaisesti ja kirjausten tulisi olla saatavilla henkilöstölle muutosten vaikutusten tunnistamiseksi ja laitteiston turvallisen käytön varmistamiseksi. Tutkimusryhmä suosittelee myös tutustumaan ammoniakkia käsittelevien laitosten tunnettuihin vaaratilanteisiin ja poikkeamiin, samoin kuin alan parhaisiin käytäntöihin. (MMMCZCS 2025, luku 4.)

### 4.7.3 Suojavarusteiden käyttö

Suojavarusteiden käyttö tulisi määritellä siten, että henkilöt ovat tietoisia siitä miltä riskeiltä käytettävillä varusteilla suojaudutaan ja milloin suojautumista vaaditaan. Henkilöiden altistumisen minimointi voidaan käytännössä saavuttaa hyvin pitkälle laadukkaalla alusten suunnittelulla ja toteutuksella. Kuitenkin laitteiden vikaantumisten tai inhimillisten virheiden estäminen täydellisesti on mahdotonta. Silloin henkilökohtaiset suojavarusteet ovat viimeinen este henkilön vahingoittumiselle. Vaarallisten aineiden kanssa työskentelevien henkilöiden tulisi kyetä käyttämään henkilökohtaisia suojaimia tehokkaasti ja ohjeiden mukaan. Samoin suojavarusteita tulisi olla saatavilla siten, että kaikille pystytään tarjoamaan vaadittu suojautumistaso. Tutkimuslaitos MMMCZCS julkaisussaan ”Ammonia Phase 3 Scenario Evaluations” on työturvallisuutta käsittelevässä osuudessa esittänyt oman ehdotuksen suojautumistasoihin. Ehdotus perustuu siihen, että kaikki aluksella tehtävät työt luokitellaan vaarallisuuden mukaan tasoille A, B ja C. Nämä tasot määrisivät riittävän suojautumistason. (MMMCZCS 2025, 41.) Tämänkaltainen määrittely on selkeä ja voi toimia hyvänä runkona työturvallisuuden varmistamiseksi. On kuitenkin huomattava, että pelkästään tämänkaltainen taulukointi voi olla käytännössä monimutkainen ja myös altis tulkinnalle. Työturvallisuuden tehostamiseksi ja altistusten rajoittamiseksi on hyvä pohtia suojausvaatimusten lisäksi myös ennen työn toteuttamista tehtävää riskinarviointia, jotta suojaustarve arvioitaisiin myös työkohteen ja -olosuhteen mukaan.

Henkilökohtaisten suojavarusteiden tulisi olla suunniteltu ammoniakkin varalle. Esimerkiksi useilla öljysäiliöaluksilla käytössä olevat henkilökohtaiset kaasumittarit, eivät välttämättä sovellu ammoniakkin vaaroilta suojautumiseen. Kaasumittareiden antureiden tulisi tunnistaa ammoniakkipitoisuus ympäröivästä ilmasta ja sen tulisi hälyttää, kun pitoisuus ylittää turvallisen rajan. Samoin kyseisten mittareiden olisi suositeltava tunnistaa ilmassa oleva hapen määrä, sillä ammoniakkijärjestelmiin kuuluu olennaisena osana typen käyttö inertkaasuna. Vuototilanne polttoainejärjestelmässä voisi täten periaatteessa johtaa kumpaan tahansa vaaratilanteeseen. Henkilökohtaisen kaasumittarin käyttö voi olla myös hyödyllinen merkkamaan henkilöstön altistumista haitallisille pitoisuuksille. Jatkuva haitallisille pitoisuuksille altistuminen voisi olla seurausta

joko aluksen heikosta suunnittelusta tai henkilöiden käyttäytymiseen perustuvasta tottumisesta ammoniakki altistumaan. Kummassakin tapauksessa altistumiseen tottuminen voi ajan myötä normalisoida haitallista altistumista. Henkilökohtaisten mittareiden lisäksi henkilöstön tulisi ymmärtää kiinteiden ja kannettavien kaasumittareiden käyttötarkoitus ja -kohteet. Samoin laitteiden hälytysrajat tulisi olla selvät henkilöstölle ja samoin toimenpiteet, kuinka hälytykseen tulee reagoida. Henkilökohtaisten kaasumittareiden testaus, huolto ja kalibrointi tulisi olla mahdollista suorittaa aluksella ilman ulkopuolista apua.

Kokomaskien osalta voidaan todeta, että ABEK2-suodattimin varustettu kokomaski suojaa ammoniakkikaasulta sekä hengitysteitä että silmiin kohdistuvaa haittaa. Suodatinpatruunoiden luokituksessa K tarkoittaa ammoniakkia ja sen johdannaisia ja 2 tarkoittaa 5000 ppm:n pitoisuuden suodatuskykyä. Luokitus perustuu EN 14387:2004 standardiin. (Vandeputte, 2023.) On todettava, että standardin mukaisen 5000 ppm:n rajaa on hyvä pitää teoreettisena ja suojautumisvaatimuksen tulisi perustua huomattavasti alempaan pitoisuuteen. Canadian Centre for Occupational Health and Safety (CCOHS) suosittelee moottoroitua kokomaskia, kun todennäköinen ammoniakkipitoisuus ilmassa nousee yli 250 ppm:n ja paineilmalaitetta yli 300 ppm:n pitoisuuksiin (Canadian Centre for Occupational Health and Safety 2023). Puolinaamari-mallisen suojaimen käyttöä voi olla asiallista pohtia kriittisesti, sillä ammoniakkikaasu ärsyttää hengitysteiden lisäksi myös silmiä. Silmien ärsytys tai korkeammasta pitoisuudesta johtuva voimakas kyynelehtiminen voisi siis haitata onnettomuustilanteessa henkilön kykyä poistua vaaralliselta alueelta.

Kemikaalisuojapukujen ja paineilmalaitteiden käyttö tulisi perustua samaan työkohtaiseen riskinarvioon kuin muutkin suojainvaatimukset. Töissä, joissa on potentiaalia kohdata korkeita ammoniakkipitoisuuksia, olisi suositeltavaa suojautua vakavimmalta skenaarionalta. Yksi esimerkki korkean suojautumisvaatimuksen työstä voisi olla polttoaineletkun kiinnitys, tai muu laipan avaus työ, jossa työskennellään avonaisen ammoniakkilinjan lähistössä ja jossa suunnitellut suojakertoimet työskentelyyn ovat alemmat kuin, jos laite olisi teknisesti eheä. Tämänkaltaiseen työhön tarvittavat suojavaarusteet on suositeltavaa olla kaasutiiviitä ja raittiin hengitysilman tulisi riittää alueelta poistumiseen vaaratilanteessa. Käytännössä tämä voisi tarkoittaa paineilmalaitteen käyttöä

soveltuvan kaasutiiviin kemikaalisuojapuvun kanssa. Eri suojavälinevalmistajilla on omat ratkaisut ja materiaalit vaatimusten täyttämiseen, mutta EN 943-1:20215 + A1:2019-standardi määrittää kaasutiiviiden kemikaalisuojapukujen eurooppalaiset vaatimukset ja EN 14605 määrittää kevyempien suojapukujen standardit (Työterveyslaitos 2025c).

#### **4.8 Huolto ja kunnossapito**

Huolto- ja kunnossapitotöiden osalta on määriteltävä työt, jotka voidaan tehdä itse, ja työt, joihin tarvitaan erikoisosaamista ja ulkopuolista apua. Tämän lisäksi turvallisen työskentelyn menetelmiä tulisi hyödyntää ammoniakkijärjestelmien huoltoja valmisteltaessa. Samoin henkilökohtaisten suojavälineiden käyttö olisi suositeltavaa määritellä selvästi. Ammoniakkikäyttöisiin aluksiin liittyy järjestelmiä ja laitteita, joita konventionaalaisia polttoaineita käyttävillä aluksilla ei ole. Näitä laitteita ovat tai voivat olla esimerkiksi ARMS-järjestelmä, kaksipolttoainemoottori tai polttoaineen lämpötilan hallintaan liittyvät laitteet. Tämä johtaa väistämättä siihen, että alusten käyttöönoton yhteydessä on henkilöstöä koulutettava laitevalmistajan toimesta, jotta riittävä osaaminen voidaan varmistaa. Osaamisen jatkuvuuden kannalta myös laitteiden toimintakuvaudet ja ohjeet tulisi olla ymmärrettävät ja helposti saatavilla.

Tämän lisäksi MMMCZCS nostaa selvityksessään ”Ammonia Phase 3 Scenario Evaluations” esiin useita seikkoja, joiden huomioiminen henkilöstön koulutuksessa olisi tärkeää sujuvan ja turvallisen toiminnan varmistamiseksi. Esimerkiksi varaosien hallinta aluksella ja toimitusketjun varmistaminen sekä millä ehdoilla tiettyjä laitteiston komponentteja voidaan korvata. Toisin sanoen mitkä osat tai komponentit voidaan korvata vastaavan spesifikaation ja mahdollisesti eri valmistajan osilla ja mitkä osat ovat oltava täysin identtisiä. Tämä voi liittyä selvityksen mukaan ammoniakin kanssa epäsopiviin materiaaleihin, tai yleisesti komponentin toiminnallisuuteen järjestelmässä. Samoin hätätilan-nehallintaan liittyvien komponenttien ja järjestelmien huoltoon liittyvät kyvyt tulisi olla määritelty samoin kuin huoltosuunnitelmat eri laitteille. Muita huomioita selvityksestä, jotka olisi huomioitava ovat esimerkiksi kaksoisvaippaputkistojen huoltoon liittyvät erityispiirteet. Automaatiojärjestelmien lisääntyminen aluksilla tulisi myös huomioida ja samalla sen huollon ja ylläpidon vaatimuk-

set. (MMMCZCS 2025, luku 11.) Kaksois- ja monipolttoainejärjestelmät lisäävät automaatiota aluksilla jo itsessään ja esimerkiksi ammoniakille tarvittavat lisäjärjestelmät, kuten ARMS, voivat monimutkaistaa järjestelmiä verrattuna konventionaalisia polttoaineita käyttäviin aluksiin.

#### **4.8.1 Laitteiden eristäminen, tyhjentäminen ja käyttöönotto**

Ammoniakkikäyttöisen aluksen huolto- ja kunnossapitotöissä on erikseen huomattava laitteiston tyhjentäminen, eristäminen ja käytöstä poisto sekä käyttöönotto. Osittain samat periaatteet pätevät kuin LNG-aluksilla, mutta erityisesti on huomioitava ammoniakin myrkylliset ominaisuudet. Laitteiden ja järjestelmien työkuntoon saattamiseksi sisältyy palavien ja myrkyllisten kaasujen poistaminen sekä laitteiston lämpötilan hallinta.

Ammoniakkisäiliön käytöstä poistoon ja tarkastuskuntoon saattamisen työvaiheista saadaan yksinkertaistettu malli, kun tarkastellaan ammoniakkiteollisuuden kaupallisten toimijoiden yhteisön julkaisua ”Ammonia Storage Tanks”. Säiliön käytöstäpoisto tehdään vaiheittain, jotta vältetään nopean lämpötilan nousun aiheuttamilta materiaaliongelmilta ja kosteuden muodostumiselta. Ensin säiliö tyhjennetään nestemäisestä ammoniakista niin tyhjäksi kuin mahdollista. Tämän jälkeen ammoniakkihöyryn annetaan lämmetä siten, että säiliön lämpötila ei nouse yli kahta celsiusastetta tunnissa. Lämmennytä höyryä voidaan kierrättää säiliössä höyrystymisen tehostamiseksi. Nestemäisen ammoniakin poistamisen jälkeen säiliötä tuuletetaan tyypellä, jotta palavat kaasut saadaan poistettua säiliöstä. Kun säiliön ilmatila todetaan turvalliseksi palavien kaasujen osalta, voidaan säiliö tuulettaa ilmalla, ja kun ilmatila sisältää riittävästi happea, voidaan säiliöön mennä. (Pattabathula ym. 2025.)

Samoin säiliön käyttöönotto kuvataan julkaisussa yksinkertaistetusti seuraavasti. Säiliön käyttöönotto on turvallisuuden ja materiaalien eheyden varmistamiseksi tehtävä vaiheittain. Alkutilanteessa säiliön sisätila on ympäröivässä ilmassa ja lämpötilassa. Säiliön turvallisen täyttämisen ehtona on säiliön sisätilan ilmatilan hapen määrän laskeminen. Tämä tehdään puhaltamalla typpeä säiliöön. Prosessin kulkua voidaan tarkkailla ja varmentaa seuraamalla hapen määrää säiliön ulostuloputkessa. Turvallinen hapen maksimimäärä säiliössä vaihtelee eri lähteiden mukaan, mutta yleisesti noin 4–5 til-% määrää pidetään

turvallisena. Tämän jälkeen säiliötä voidaan alkaa jäähdyttää nestemäisellä ammoniakilla. Jotta jäähdyttäminen tapahtuisi tasaisesti, säiliössä suositellaan tässä vaiheessa käytettäväksi säiliön jäähdytykseen käytettäviä suuttimia. Jäähdytysnopeudeksi suositellaan suurimmillaan 2 °C/h. Suositus perustuu materiaalivaurioiden ja jännityskorroosion (SCC) vaikutusten minimointiin. (Pattabathula ym. 2025.)

#### 4.9 Häätätilannehallinta

Ammoniakkionnettomuuden vaikutukset aluksella voivat olla hengenvaarallisia aluksen miehistölle tai aluksen satamassa ollessa myös maahenkilöstölle. MMMCZCS mainitsee selvityksessään ”Ammonia Phase 3 Scenario Evaluations” kymmenen kohdan listan vaaratilanteista, joihin tulisi varautua ammoniakkikäyttöisellä aluksella. Lista sisältää mm. yleiset toimintaohjeet vuotojen varalle, turvalaitteiden tuntemuksen, suunnitelmat hätätilanteisiin ja tulipaloihin varautuminen (MMMCZCS 2025, luku 12).

Yleisten toimintaohjeiden osalta selvityksessä esitetään koulutettavaksi eri hälytykset ja niihin vaaditut toimet. Erityisesti nostetaan esiin toiminta vuoto-tilanteessa, jossa suuresta ammoniakkivuodosta seurannut kaasupilvi voi vaikuttaa aluksen ulkopuolisiin tahoihin. Toisaalta tunnistetaan myös tarpeet toimintaohjeille satamassa tapahtuvaan ammoniakkivuotoon ja siltä suojautumiseen. Selvityksen mukaan hätätilanteita varten tehtyjen suunnitelmien tulisi sisältää mm. seuraavat skenaariot:

- Toiminta tilanteessa, jossa ammoniakkikaasun määrä sisäilmassa ylittää sallitun tason.
- Toiminta hätätilanteessa, joka tapahtuu myrkyllisellä alueella tai myrkyllisessä tilassa.
- Toiminta tilanteessa, jossa vuotava ammoniakki on joko nestemäistä tai kaasumaista.

Listaus ottaa myös kantaa aluksen hätätilannehallinnan rooleihin ja erityisosaamiseen niihin liittyen. (MMMCZCS 2025, luku 12.)

Vaaratilanteiden väliset vaikutukset tulisi selvityksen mukaan tunnistaa ja kirjoittaa auki toimintaohjeiksi, vaikka alkuperäinen vaaratilanne ei johtuisi ammoniakin ominaisuuksiin liittyvästä vaarasta. Tästä voisi olla esimerkkinä alusten yhteentörmäys, jossa ensisijainen vaaratilanne voi aiheuttaa potentiaali-

sen riskin aluksen ammoniakkijärjestelmään. Turvalaitteiden osalta selvityksessä korostetaan hyvin konkreettisia seikkoja, kuten palo- ja kaasunhaistaja-järjestelmän yleistuntemusta ja toiminnallisuuksien ymmärtämistä sekä hätäpysäytysjärjestelmän tuntemusta ja hätäseispainikkeiden sijoittelua. Vuotojen hallintaan selvitys suosittelee erittelemään vasteen erityyppisiin ja -kokoisiin vuotoihin ja huomioimaan etenkin veden käytön vuotojen hallinnan välineenä. Vesiverhoja selvityksessä suositellaan käytettäväksi suurehkoissa vuototilanteissa ulkotiloissa, kuten esimerkiksi polttoaineen täydennysasemalla ja aluksen evakuoinnin yhteydessä pelastusveneeseen siirryttäessä. Toisaalta suljetuissa tai sisätiloissa veden käyttöä suositellaan harkinnanvaraisesti, sillä vesisuihkun seurauksena nestemäinen ammoniakki kaasuuntuu voimakkaasti. (MMMCZCS 2025, luku 12.)

Vuototilanteiden hallintatoimet perustuvat paljolti aluksen suunnittelun aikana tehtyihin teknisiin ratkaisuihin. Kaasuturvallisilla alueilla, kuten konehuoneessa putkistoratkaisut perustuvat ns. kaksoisputkeen, jossa ammoniakki on putkessa putken sisällä. Sen sijaan esimerkiksi pilssien ja valuma-altaiden tyhjentäminen sekä kaasumaisen ammoniakin tuulettaminen suljetuista tiloista vuototilanteen jälkeen henkilöturvallisuutta vaarantamatta on aluksen henkilöstön osaamisen varassa. Tästä syystä ennalta suunnitellut harjoitukset, kuinka turvalaitteita käytetään, voisivat yksinkertaistaa hätä- tai vaaratilannehallintaa. Erityistä tarkkuutta tulisi noudattaa toiminnan ohjeistuksessa, joka koskee asuintilojen ammoniakkipitoisuuden nousua.

#### **4.10 Palontorjunta**

Ammoniikkiin liitetään aina CLP-asetuksen mukaisessa luokittelussa vaaralauseke H221, joka tarkoittaa ”Syttyvää kaasua”. Toinen paloturvallisuuteen liittyvä vaaralauseke, jota voidaan, käyttää on H280, joka tarkoittaa ”Sisältää paineenalaista kaasua; voi räjähtää kuumennettaessa”. (Euroopan komissio 2025.) Tämä tarkoittaa sitä, että ammoniakki voi muodostaa syttyvän seoksen, jonka on mahdollista syttyä ulkoisen lähteen tai erittäin korkean lämpötilan vaikutuksesta. Jang ym. vertailee tutkimuksessa ”Regulatory gap analysis for risk assessment of ammonia-fuelled ships” eri aluspolttoaineiden palovaarallisuutta. Tutkimus nostaa kolme tekijää, jotka erityisesti vaikuttavat aineen

palovaarallisuuteen. Tekijät ovat minimi syttymisenergia, laminaarinen palamisnopeus ja lämpöarvo. Esimerkiksi LNG:n minimi syttymisenergia on 0,28 MJ ja vastaavasti ammoniakilla se on 8,0 MJ. Laminaarinen palamisnopeus on LNG:llä 0,37 m/s ja LPG:llä 0,43 m/s, kun ammoniakilla arvo on 0,07 m/s. Tutkimus korostaa lämpöarvon vahvaa korrelaatiota syttymisherkkyyteen, joka LNG:llä (HHV 55,2 MJ/kg) on noin kaksinkertainen verrattuna ammoniakkiin (HHV 22,5 MJ/kg). Edellä mainituista seikoista johtuen tutkimuksessa todetaan ammoniakin palovaarallisuuden olevan selvästi vähäisempi kuin muilla matalan leimahduspisteen aluspolttoaineilla. (Jang ym. 2023, 3.)

Kaupalliset toimijat kuvailevat ammoniakin palo- ja räjähdysvaarallisuutta esityksessään ”Ammonia as a marine fuel, an introduction” seuraavasti. IGC-koodin mukaan ammoniakkia ei luokitella palavaksi tuotteeksi. Toimijoiden mukaan luokittelu pitää paikkansa vain ulkotilassa, sillä suljetuissa tiloissa tiedetään tapahtuneen ammoniakkiräjähdystä. Ulkotilassa olevaa ammoniakkiallasta pidetään esityksen mukaan lähes mahdottomana sytyttää. Samoin ammoniakkipalon ylläpitoa pidetään erittäin vaikeana ilman ulkoista ja jatkuvaa syttymislähdettä. (Society for Gas as a Marine Fuel 2023, 30.) Ammoniakin riskejä arvioitaessa voidaan edellä mainitun perusteella todeta, että paloriski on pienempi kuin myrkyllisyydestä aiheutuva riski, mutta paloriskiä ei voida täysin ohittaa.

Pienissä ammoniakkipaloissa voidaan sammutusmenetelmänä käyttää jauhe- ja hiilidioksidisammutinta. Suuremmissa paloissa suositellaan käytettäväksi vesisuihkua tai -sumua ja sammutusvaahtoa. Vesisuihkua käytettäessä on huomattava, että suora vesisuihku ammoniakkialtaaseen tai -vuotoon kiihdyttää höyrystymistä voimakkaasti. (Yadav & Jeong 2022.)

Vesisumua käytetään myös ammoniakkikaasun leviämisen rajoittamiseksi ja myös poistamaan ammoniakkikaasua ilmasta. Kojiman tekemästä tutkimuksesta ”Safety of ammonia as a hydrogen energy carrier” selviää, että aiemmin BV:n ja Total Energiesin yhteistyössä tekemä selvitys ehdotti automaattista vesisumujärjestelmää ammoniakkikäyttöisille aluksille, joka käynnistyisi automaattisesti, kun tilan ammoniakkikaasupitoisuus ilmassa ylittää 30 ppm:n rajan (Kojima 2023).

Voidaan siis todeta, että ammoniakkin paloriskit ovat vähäiset, ja tulipaloon varautumisen toimet, jotka riittävät dual fuel -moottoreiden tuomaan riskiin, todennäköisesti riittävät myös ammoniakkin palovaaran varalle. Samoin voidaan pohtia voisiko, joissain aluksen tiloissa olla perusteltua varautua vuototilanteessa ammoniakkipitoisuuden nopeaan laskemiseen vesisumun ja tuuletuksen keinoin. Tätä pohdittaessa olisi myös vettä sisältävän ammoniakkiuoksen keräämisen järjestelyt mietittävä toimiviksi. Tulipalotilanteessa on myös varauduttava siihen, että tilassa on tulipalon vaarojen lisäksi myös todennäköisesti vaarallisen korkeita ammoniakkipitoisuuksia.

#### **4.11 SIMOPS**

Käsite SIMOPS (simultaneous operations) tarkoittaa tilannetta, jossa on käynnissä samanaikaisesti kaksi tai useampi operaatio, jotka vaikuttavat tai voivat vaikuttaa toisiinsa. Yleisesti SIMOPS käsite liitetään öljy- ja kemianteollisuuden prosessiturvallisuuteen ja se on mitä ilmeisimmin alkanut vakiintua merenkulun piirissä LNG-käyttöisten alusten polttoaineen täydennysten riskienarvioinnin yhteydessä.

Tutkimuskeskus MMMCZCS nostaa omassa selvityksessään ”Ammonia Phase 3 Scenario Evaluations” SIMOPS-arvioinnin tekemistä mm. lastiopeeraatioihin, polttoaineen täydennykseen, huoltotöihin, satamakäynteihin sekä alukselle ja alukselta liikkumiseen. SIMOPS-arvioinnin tarkoituksena on selvittää ja selkeyttää eri toimintoja niiden mahdollisia vaikutuksia toisiinsa, etenkin poikkeustilassa. (MMMCZCS 2025, luku 10.)

Esimerkkinä voitaisiin pitää normaalia satamakäyntiä, jossa aluksella havaittaisiin ammoniakkiavuoto, jolla olisi mahdollisesti vaikutuksia alusta lastaavaan tai purkavaan henkilöstöön. Tällöin SIMOPS-arvioinnin perusteella voitaisiin luoda toimintaohje siihen, kuinka lastiopeeraatiot keskeytetään, kuinka henkilöstö saadaan siirrettyä turvalliselle alueelle sekä kuinka siitä voidaan varmistua. Samoin edellä kuvattuun tilanteeseen voisi liittyä esimerkiksi ulkoisen palveluntoimittajan alukselle tekemä huolto tai muita satamakäynnin aikaisia toimenpiteitä, joihin voisi kohdistua vaikutuksia. Arvioinnin tarkoituksena on lisätä tilannetietoisuutta ja antaa täsmällisiä toimintaohjeita poikkeamatilanteen

ratkaisemiseksi tai lisävahinkojen välttämiseksi. Samoin selvityksessä nostetaan esiin mahdolliset muutoksen hallinnan toimenpiteet, joita voi nousta esiin yhtäaikaisten operaatioiden seurauksena. Tästä voisi esimerkkinä olla kaasunhaistajien tilapäinen poiskytkentä, joka voisi vaikuttaa poikkeustilanteen ratkaisemiseen heikentävästi. (MMMCZCS 2025, luku 10.)

## 5 YHTEENVETO

Kirjallisuuskatsaus pyrki vastaamaan seuraaviin kysymyksiin, mitä ammoniakin käytöstä aluspolttoaineena tulisi kouluttaa alusten miehistöille, miten ammoniakkia merenkulun polttoaineena säädellään ja minkälainen potentiaali ammoniakilla on merenkulun polttoaineena vihreän siirtymän näkökulmasta? Tämänhetkinen tutkittu tieto pystyy vastaamaan kysymyksiin pääosin hyvin. Ammoniakin käyttö aluspolttoaineena liittyy vahvasti vihreään siirtymään, joka valtavana trendinä poikii jatkuvasti lisää tutkimustietoa ja osa tästä huomiosta kohdistuu myös merenkulkuun. Tietoa löytyi sekä akateemisesta tutkimuksista että eri toimijoiden selvityksistä kattavasti. Mærsk Møller McKinney Center for Zero Carbon Shipping voidaan mainita erikseen tekemästään selvitystyöstä. Kyseisen tutkimuskeskuksen tekemät selvitykset ovat tarjonneet erittäin kattavan näköalan tämänhetkiseen tilanteeseen ammoniakin käytöstä merenkulun polttoaineena.

Yleisesti voidaan todeta, että vihreän ammoniakin käyttö merenkulun polttoaineena voi osaltaan mahdollistaa merenkulun vihreän siirtymän. Suurimmat kysymykset vihreän siirtymän osalta ovat ammoniakkituotannon muutos maakaasupohjaisesta tuotannosta vetyperusteiseen tuotantoon sekä ammoniakin käytöstä muodostuvien päästöjen hallinta. Ammoniakkituotannon muutokseen liittyvät investointikustannukset voivat vaikuttaa etenkin siirtymän alkuvaiheessa ammoniakin hintaan siten, että polttoaineammoniakin hinta muodostuu varustamoille liian korkeaksi. Sääntelyn osalta merkittävin kiinnostus kohdistuu päästöjen laskennan periaatteeseen. GHG-päästöjen well-to-wake-laskentaperiaate kohdistuu polttoaineen koko elinkaaren päästöihin ja täten luodelluiksi vihreän ammoniakin käyttöön merenkulun polttoaineena. Tank-to-wake-laskentaperiaate toisaalta laskisi ammoniakkia käyttävien alusten GHG-

päästöjä, mutta todennäköisesti nostaisi kokonaisuudessaan kasvihuonekaasupäästöjä. Kestävän kehityksen kannalta vihreän ammoniakkin käyttö aluspolttoaineena olisi ideaali ratkaisu, mutta se todennäköisesti edellyttää vahvaa ja pitkälle aikavälille ulottuvaa säätelyä konventionaalisille aluspolttoaineille sekä well-to-wake-laskentaperiaatteen käyttöä päästöjen laskennassa. Tarkastellessa tämänhetkistä säätelyä on Euroopan unionin Fuel-EU Maritime vahvin säätelyn väline. Tämän seurauksena Euroopan alueelle voisi olla edellytyksiä rakentaa vetytalouden ekosysteemejä, jotka linkittyisivät myös merenkulun polttoaineiden tuotantoon ja jakeluun. Kuitenkin vahvan ja pitkäjänteisen säätelyn lisäksi vihreän siirtymän ekosysteemien rakentaminen todennäköisesti edellyttää etenkin siirtymän alkuvaiheessa myös erilaisten taloudellisten kannustimien käyttöä investointien taloudellisen riskin pienentämiseksi. Kansalliselta tasolta katsottuna vetytalouteen tehtävien investointien ympärille voisi olla mahdollista rakentaa Itä- ja Pohjanmeren alueen meriliikennettä palvelevia pieniä ekosysteemejä, joiden skaalaaminen laajemmalle alueelle voisi olla tulevaisuudessa mahdollista.

Turvallisuuden osalta voidaan todeta, että ammoniakkin myrkyllisten ominaisuuksien takia sen käyttö merenkulun polttoaineena tuo aluksille riskin. Kuitenkin ammoniakkia merenkulun polttoaineena on tutkittu kattavasti ja pohjaa sen turvalliselle käsittelylle on luotu. Tärkeimmät edellytykset ovat luotettava tekniikka ja mm. prosessiteollisuudesta tuttujen turvallisten työtapojen eri menetelmien käyttöönotto ammoniakkikäyttöisissä aluksissa. Ammoniakin turvallisen käytön säätelyn osalta merkittävin viimeaikainen kehitys on ollut IMO:n julkaisema väliaikaisohjeistus ammoniakkin käytöstä aluspolttoaineena. Ammoniakkia ja useita muita vaarallisia aineita on käsitelty merikuljetuksissa useita vuosikymmeniä turvallisesti ja täten voidaan todeta, että vaikka ammoniakkikäyttöisten alusten riskiprofiili eroaa konventionaalisia polttoaineita käyttävistä aluksista, voidaan kokonaisriskin hallintaa kuitenkin pitää mahdollisena.

Ammoniakkia polttoaineena käyttäviä aluksia varten on olemassa toimivia teknisiä ratkaisuja ja aluksia tullaan ottamaan käyttöön kaupallisessa liikenteessä vuoden 2025 aikana. Käyttöönottokokemukset todennäköisesti kiinnostavat varustamoja niiden varautuessa kiristyvään päästöjen säätelyyn. Myrkyllisyydestä johtuvat negatiiviset käyttökokemukset voivat johtaa kielteiseen suhtau-

tumiseen ammoniakkia kohtaan ja ne voivat pysäyttää tai hidastaa tätä siirtymää. On myös todettava, että aluksen osittainenkin siirtymä konventionaalista polttoaineesta ammoniakkiiin teettää aluksiin merkittäviä muutoksia niin käytettävän tekniikan kuin osaamisen vaatimusten osalta. Täten voidaan myös olettaa, että varustamot, joilla on kokemusta ammoniakkin käsittelystä, olisivat siirtymän kärjessä.

Turvallisuuteen liittyvän säätelyn osalta IMO:n julkaisemat väliaikaisohjeet yhtenäistävät alusten suunnittelun perusteita ja selkeyttävät vaatimuksia teknisille ratkaisuille. Väliaikaisohjeiden merkittävimpiä linjauksia oli vaatimus säilyttää polttoaine jäähdytettynä normaali-ilmanpaineessa. Sen sijaan ohjeistuksen läpileikkaava ajatus ammoniakkikäyttöisten alusten vastaavasta turvallisuustasosta kuin konventionaalisia polttoaineita käytävillä aluksilla voi olla monimutkainen tulkita ja mahdollisesti vaatii perusteluja teknisiin ratkaisuihin. Ammoniakkia sisältävien tilojen tuuletuksen vaatimusten osalta väliaikaisohjeistus viittaa IGF-koodiin, jossa määrätään mm. TCS:n sekä FPR:n koneellisen ilmanvaihdon mitoituksesta, joka on 30 ilmanvaihtokertaa tunnissa. Tutkimuksista voidaan kuitenkin tulkita IGF-koodin vaatimuksen olevan paremminkin minimitaso ammoniakkikäyttöisillä aluksilla. Tämän osalta alusten suunnitteluvaiheen riskienarvioinneissa olisi suositeltavaa huolellisesti tarkastella riittävä varautuminen ammoniakkikaasuvuodon mahdollisiin seurauksiin.

Vaatimus turvallisen väistötilan (safe haven) järjestämisestä kaikille aluksella oleville henkilöille voi tarkoittaa sitä, että matkustaja-aluksilla ammoniakkin käyttö polttoaineena osoittautuu vaikeaksi. Normaalilla kauppa-aluksella evakuoitilanteessa ihmishengen turvaaminen ohjeistuksen määräämällä tavalla vaikuttaa hyvinkin mahdolliselta, mutta vastaavasti matkustaja-aluksilla suuren ihmismäärän turvallinen evakuointi hätätilanteessa voi osoittautua hankalaksi toteuttaa. Toisaalta tulevaisuudessa mahdollisilla autonomisilla aluksilla ammoniakkin myrkyllisyydestä johtuvat riskit ovat merkittävästi pienemmät. Yleisesti voidaan todeta, että väliaikaisohjeistus antaa selkeitä linjauksia, mutta myös mahdollistaa erilaisia toteutuskeinoja alusten ja laitteiden suunnitteluun.

Laittevalmistajat tarjoavat tällä hetkellä ammoniakkin polttoainekäytöstä johtuvien päästöjen hallintaan omia ratkaisujaan. Typenoksidien ja muihin ammoni-

akkiperäisiin päästöihin tulee mahdollisesti kohdistumaan säätelyä tulevaisuudessa. Näiden päästöjen hallinta on merkittävä osa ammoniakkikäyttöisten alusten kasvihuonekaasujen vähennystä, ja epäonnistuminen näiden hallinnassa voi vaikuttaa kielteisesti kokonaiskasvihuonekaasujen päästöjen vähentämiseen. Tämä taas voi merkittävästi kaventaa ammoniakin tuomaa päästöjen vähennystä.

Koulutuksellisesta näkökulmasta tärkeintä on ammoniakin myrkyllisten ominaisuuksien huomioiminen. Ammoniakille altistumisen estämisen menetelmät tulisi kuvailla koulutuksessa siten, että henkilöille on selvää, kuinka altistumista pyritään estämään hallinnon, teknisten ratkaisujen sekä käytettävien työmenetelmien osalta. Inhimillisestä toiminnasta johtuvat virheet, kuten puutteelliset työtavat tai puutteellinen muutoksen hallinta, olisi myös suositeltavaa käsitellä. Henkilöstön osalta turvallisten työtapojen omaksunta, kuten esimerkiksi kunnossapitotöiden riskien arviot ja mahdollisesti lisääntyvä automaatio sekä henkilökohtaisten suojavälineiden ml. kaasunhaistajien ammattimainen käyttö ovat myös merkittävässä roolissa henkilöturvallisuuden varmistamisessa. Vuotojen hallinnan osalta koulutuksessa olisi huomioitava keinot myrkyllisten pitoisuuksien torjuntaan suljetuissa tiloissa sekä aluksen sisätiloissa. Erityisen tärkeää on huomioida myös ympäröivän ilman jatkuvan ammoniakkipitoisuuden seuranta. Ammoniakkikäyttöiset alukset myös käyttävät tekniikkaa, jota muissa aluksissa ei ole käytössä, kuten ARMS-laitteistot. Uuden tekniikan toimintaperiaatteet ja tarkoitus olisi huomioitava koulutuksessa perinpohjaisesti, sillä uusien alusten käyttööntovaiheessa annettu laitevalmistajan koulutus voi menettää merkityksensä nopeasti, esimerkiksi henkilöstön vaihdosten seurauksena.

Vaikka tutkimusta ammoniakkikäyttöisistä aluksista on tehty viime vuosina runsaasti, on sitä siitä huolimatta suositeltavaa jatkaa edelleen. Mallinnuksia ammoniakkikaasun leviämisestä ja etenkin leviämisen ehkäisemisestä erilaisissa skenaarioissa on suositeltavaa tehdä lisää, jotta varotoimenpiteet henkilöturvallisuuden varmistamiseksi tällaisissa tilanteissa olisivat riittävän tehokkaita. Esimerkiksi vesisumun käyttö myrkyllisen kaasun leviämisen ehkäisemiseksi aluksen sisätiloissa voisi olla kiinnostava tutkimuskohde. Tämänkal-

taisten tutkimusten tuloksista voisi löytyä toimivia ratkaisuja myrkyllisen ammoniakkikaasun leviämisen ehkäisemiseksi esimerkiksi aluksen konehuoneessa.

## LÄHDELUETTELO

- Bureau Veritas. 2022. Alternative Fuels Outlook for Shipping. WWW-dokumentti. Saatavilla: <https://marine-offshore.bureauveritas.com/newsroom/alternative-fuels-outlook-shipping> [viitattu 2025].
- Canadian Centre for Occupational Health and Safety. 2023. Ammonia. WWW-dokumentti. Saatavilla: [https://www.ccohs.ca/oshanswers/chemicals/chem\\_profiles/ammonia.html](https://www.ccohs.ca/oshanswers/chemicals/chem_profiles/ammonia.html) [viitattu 2025].
- Committee on Acute Exposure Guideline. 2007. Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals: Volume 6. PDF-tiedosto. Saatavilla: [https://www.epa.gov/sites/default/files/2014-11/documents/ammonia\\_final\\_volume6\\_2007.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2014-11/documents/ammonia_final_volume6_2007.pdf) [viitattu 2025].
- ECHA. 2025. European Chemicals Agency. Ammonia, anhydrous. WWW-dokumentti. Saatavilla: <https://echa.europa.eu/fi/brief-profile/-/brief-profile/100.028.760> [viitattu 2025].
- EPA. 2024. U.S. Environmental Protection Agency. Ammonia results - AEGL Program. WWW-dokumentti. Saatavilla: <https://www.epa.gov/aeql/ammonia-results-aeql-program> [viitattu 2025].
- Euroopan komissio. s.a. Verotus ja tulliliitto. WWW-dokumentti. Saatavilla: [https://ec.europa.eu/taxation\\_customs/dds2/SAMANCTA/FI/Safety/HP\\_FI.htm](https://ec.europa.eu/taxation_customs/dds2/SAMANCTA/FI/Safety/HP_FI.htm) [viitattu 2025].
- European Maritime Safety Agency. 2018. EMSA Guidance on LNG Bunkering. EMSA. WWW-dokumentti. Saatavilla: <https://www.emsa.europa.eu/publications/inventories/item/3207-guidance-on-Ing-bunkering-to-port-authorities-and-administrations.html> [viitattu 2025].
- European Union. s.a. Decarbonising maritime transport - FuelEU Maritime. WWW-dokumentti. Saatavilla: [https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/maritime/decarbonising-maritime-transport-fueleu-maritime\\_en](https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/maritime/decarbonising-maritime-transport-fueleu-maritime_en) [viitattu 2025].
- Fabbricino, M, Andreatto, R. & Clarizia, L. 2023. Safety in Chemical and Process Industries: A Comprehensive Assessment. Singapore: Bentham Science Publishers Pte. Ltd. E-kirja. Saatavilla: [https://kaakkuri.finna.fi/Record/nelli29\\_mamk.28270061600041/Holdings?sid=5016949298](https://kaakkuri.finna.fi/Record/nelli29_mamk.28270061600041/Holdings?sid=5016949298) [viitattu 2025].
- Hirsjärvi, S., Remes, P. & Sajavaara, P. 2007. Tutki ja kirjoita. 13. uud. painos. Keuruu: Otavan kirjapaino Oy.
- IMO. 2016. *IGF-CODE*. 2016 Edition. Lontoo: IMO.
- IMO. 2025. Climate action and clean air in shipping. WWW-dokumentti. Saatavilla: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Decarbonization%20and%20Clean%20air%20in%20shipping.aspx> [viitattu 2025].

IMO. s.a. Initial IMO GHG Strategy. WWW-dokumentti. Saatavilla: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/pages/reducing-greenhouse-gas-emissions-from-ships.aspx> [viitattu 2025].

Jang, H., Mujeeb-Ahmed, M.P., Wang, H., Park, C., Hwang, I., Jeong, B., Zhou, P. & Mickeviciene, R. 2023. Regulatory gap analysis for risk assessment of ammonia-fuelled ships. *Ocean Engineering*, 28(2).

Jang, H., Mujeeb-Ahmed, M.P., Wang, H., Park, C., Hwang, I., Jeong, B., Zhou, P., Papadakis, A., Giannakis, A. & Sykaras, K. 2024. Safety evaluation on ammonia-fueled ship: Gas dispersion analysis through vent mast. *International Journal of Hydrogen Energy*.

Kim, D. & Jeong, B. 2024. Investigation on toxicity of ammonia releasing from storage tank onboard through CFD simulations. *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs and Shipping*.

Kojima, Y. 2023. Safety of ammonia as a hydrogen energy carrier. *International Journal of Hydrogen Energy*.

Lappalainen, H. 1987. Lastiopin kemia 1. Helsinki: VAPK / Ammattikasvatushallitus.

Latarche, M. 2020. Pounder's Marine Diesel Engines and Gas Turbines. Elsevier Science & Technology. E-kirja. Saatavissa: [https://kaakkuri.finna.fi/Record/nelli29\\_mamk.4100000011634340/Holdings?sid=5021388092](https://kaakkuri.finna.fi/Record/nelli29_mamk.4100000011634340/Holdings?sid=5021388092) [viitattu 2025].

Laursen, R., Barcarolo, D., Patel, H., Downing, M., Penfold, M., Faber, J., Kiraly, J., van der Veen, R., Pang, E & van Grinsven, A. American Bureau of Shipping, CE Delft, and Arcsilea. 2022. Potential of Ammonia as Fuel in Shipping. European Maritime Safety Agency. WWW-dokumentti. Saatavilla: <https://emsa.europa.eu/publications/reports/item/4833-potential-of-ammonia-as-fuel-in-shipping.html> [viitattu 2025].

Lehtonen, P. & Lehtonen, P. 2008. Teknisten alojen kemia. 1. painos. Helsinki: WSOY Oppimateriaalit Oy.

Lloyd's Register Maritime Decarbonisation Hub & Mærsk Mc-Kinney Center for Zero Carbon Shipping. 2023. Recommendations for Design and Operation of Ammonia-Fueled Vessels Based on Multi-disciplinary Risk Analysis. Mærsk Mc-Kinney Center for Zero Carbon Shipping. WWW-dokumentti. Saatavilla: <https://www.zerocarbonshipping.com/publications> [viitattu 2025].

MEPC.377(80), 2023. 2023. IMO Strategy on Reduction of GHG Emission from Ships. The Marine Environment Protection Committee. WWW-dokumentti. Saatavilla: [https://webaccounts.imo.org/Common/WebLogin.aspx?App=IMODOCS&ReturnUrl=https%3A%2F%2Fdocs.imo.org%2F&error\\_message=interaction\\_required](https://webaccounts.imo.org/Common/WebLogin.aspx?App=IMODOCS&ReturnUrl=https%3A%2F%2Fdocs.imo.org%2F&error_message=interaction_required) [viitattu 2025].

MMMCZCS. 2023. Managing Emissions from Ammonia-Fueled Vessels. Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping. WWW-dokumentti. Saatavilla: <https://www.zerocarbonshipping.com/publications> [viitattu 2025].

MMMCZCS. 2024a. Emerging Ship Design Principles for Ammonia Fueled Vessels. Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping. WWW-dokumentti. Saatavilla: <https://www.zerocarbonshipping.com/publications> [viitattu 2025].

MMMCZCS. 2024b. Investigating Maritime Community Perceptions of Ammonia as a Marine Fuel. Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping. WWW-dokumentti. Saatavilla: <https://www.zerocarbonshipping.com/publications> [viitattu 2025].

MMMCZCS. 2025. Ammonia Phase 3 Detailed Competency & Training Operational, Maintenance and Emergency Response Scenario Evaluations. Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping. WWW-dokumentti. Saatavilla: <https://www.zerocarbonshipping.com/publications> [viitattu 2025].

Mærsk Møller Mc-Kinney Center for Zero Carbon Shipping. 2025. About Us. WWW-dokumentti. Saatavilla: <https://www.zerocarbonshipping.com/news/> [viitattu 2025].

Ng, C. K. L., Liu, M., Lam, J. S. L. & Yang, M. 2023. Accidental release of ammonia during ammonia bunkering: Dispersion behaviour under the influence of operational and weather conditions in Singapore. *Journal of Hazardous Materials*.

Pattabathula, V., Nayak, R. & Timbres, D. 2025. AmmoniaKnowHow. Ammonia Storage Tanks. WWW-dokumentti. Saatavilla: <https://ammoniaknowhow.com/ammonia-storage-tanks/> [viitattu 2025].

Salminen, A. 2011. Mikä kirjallisuuskatsaus? – Johdatus kirjallisuuskatsauksen tyypeihin ja hallintotieteellisiin sovelluksiin. PDF-tiedosto. Saatavilla: [https://www.uwasa.fi/materiaali/pdf/isbn\\_978-952-476-349-3.pdf](https://www.uwasa.fi/materiaali/pdf/isbn_978-952-476-349-3.pdf) [viitattu 2025].

Sivill, L., Bröckl, M., Semkin, N., Ruismäki, A., Pilpola, H., Laukkanen, O., Lehtinen, H., Takamäki, S., Vasara, P. & Patronen, J. 2022. Vetytalous – mahdollisuudet ja rajoitteet. WWW-dokumentti. Saatavilla: <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/163901> [viitattu 2025].

Society for Gas as a Marine Fuel. 2023. Ammonia as a marine fuel, an introduction. SGMF. WWW-dokumentti. Saatavilla: [https://safety4sea.com/wp-content/uploads/2023/02/SGMF-Ammonia-as-a-marine-fuel-2023\\_02.pdf](https://safety4sea.com/wp-content/uploads/2023/02/SGMF-Ammonia-as-a-marine-fuel-2023_02.pdf) [viitattu 2025].

Stene, J. 2008. Design and Application of Ammonia Heat Pump Systems for Heating and Cooling of Non-residential Buildings. Trondheim, Norja: SINTEF Energy Research.

Sub-Committee on Carriage of Cargoes and Containers. 2025. Interim Guidelines for the Safety of Ships Using Ammonia as Fuel. WWW-dokumentti. Saatavilla: [https://webaccounts.imo.org/Common/WebLogin.aspx?App=IMO-DOCS&ReturnUrl=https%3A%2F%2Fdocs.imo.org%2F&error\\_message=interaction\\_required](https://webaccounts.imo.org/Common/WebLogin.aspx?App=IMO-DOCS&ReturnUrl=https%3A%2F%2Fdocs.imo.org%2F&error_message=interaction_required) [viitattu 2025].

Suvanto, K. 2005. Tekniikan fysiikka 1. 1–2. painos. Helsinki: Edita Prima Oy, 436.

Työterveyslaitos. 2025a. OVA-ohjeet: Ammoniakki. WWW-dokumentti. Saatavilla: <https://ova.ttl.fi/ammoniakki> [viitattu 2025].

Työterveyslaitos. 2025b. OVA-ohjeet: Käyttäjän opas. WWW-dokumentti. Saatavilla: <https://ova.ttl.fi/ova-ohjeet-kayttajan-opas> [viitattu 2025].

Työterveyslaitos. 2025c. Suojavaatetus. WWW-dokumentti. Saatavilla: <https://www.ttl.fi/teemat/tyoturvallisuus/henkilonsuojaimet/suojainten-valinta-ja-kaytto/suojavaatetus> [viitattu 2025].

Wärtsilä. 2025. System overview: Engineered as one holistic solution. WWW-dokumentti. Wärtsilän intranet.

Vandeputte. 2023. ABEK gas filters: what you need to know. WWW-dokumentti. Saatavilla: <https://www.vdp.com/EN/Nieuws/date/1/3077/0/abek-gas-filters-what-you-need-to-know.html> [viitattu 2025].

Yadav, A. & Jeong, B. 2022. Safety evaluation of using ammonia as marine fuel by analysing gas dispersion in a ship engine room using CFD. *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping*.

Zhao, Y., Liu, Feng., Zhang, Y., Wang, Z., Song, Z., Zan, G., Wang, Z., Guo, H., Zhang, H., Zhu, J. & Su, P. 2024. Economic assessment of maritime fuel transformation for GHG reduction in the international shipping sector. *Sustainability*.