

Vähähiiliset satamatoiminnot

Nestemäisen maakaasun päästöjen skenaariot ja mittaus
merikuljetusketjussa – loppuraportti



Pekka Räisänen, Marko Piispa & Mikko Nykänen

Vähähiiliset satamatoiminnot

Nestemäisen maakaasun päästöjen
skenaariot ja mittaus
merikuljetusketjussa – loppuraportti



Turun ammattikorkeakoulun raportteja 238

Turun ammattikorkeakoulu
Turku 2017

Kannen kuva: LNG-alus Coral Energy. Lähde: Skangas.

ISBN 978-952-216-650-0 (pdf)
ISSN 1459-7764 (elektroninen)
Jakelu: loki.turkuamk.fi

Sisältö

	Lyhenteitä.....	4
	Tiivistelmä.....	5
	Summary	6
1	Johdanto.....	7
2	Päästölähteet	8
3	Päästöskenaarioita.....	10
	3.1 Satamien kiinteät säiliöt ja laitteet	10
	3.2 Maantie- ja raidekuljetukset satamissa	10
	3.3 Merikuljetukset satamien vaikutusalueilla	11
	3.4 Roll over -ilmiö	12
	3.5 Kiehuva nesteestä muodostuvan höyryn aiheuttama räjähdys (BLEVE)	13
4	Tunnettuja onnettomuuksia	14
5	Suurten ja äkillisten maakaasupäästöjen skenaarioita merikuljetusketjun LNG-toiminnoissa Suomessa	20
	5.1 Päästöt merionnettomuuksissa	21
	5.2 Päästöt varastosäiliöistä ja lastauslaitteistoista	22
6	Suurten päästöjen vahingollisuuden arviointi ja vertailu muihin kasvihuonekaasujen lähteisiin.....	25
7	Päästöjen vaikutukset taloudellisuuteen.....	28
8	Mittaustekniikka ja tankkauksen päästöjen mittauksen tulokset.....	29
9	Johtopäätökset ja suositukset.....	31
	Viitteet.....	32
	Liite: Tankkauksen aikana tehtyjen päästömittausten raportti.....	38

LYHENTEITÄ

BLEVE	Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion: kiehuvasta nesteestä muodostuvan laajenevan höyryn räjähdys, esimerkiksi paineastian murtumisen seurauksena
CH₄	metaani
CO₂	hiilidioksidi
FID	Flame Ionisation Detector: liekki-ionisaatioon perustuva mittaustekniikka
FTIR	Fourier Transform Infrared: Fourier-muunnokseen perustuva infrapunatekniikka
IR	Infrared: infrapunatekniikka
LNG	Liquified Natural Gas: nesteytetty maakaasu
Peak-shaving plant	kulutushuippujen tasaamiseen tarkoitettu höyrystys- ja/tai nesteytyslaitos
Roll over -ilmiö	säiliössä oleva LNG alkaa höyrystyä ja paine nousee nopeasti nesteen kerrostumisen ja sen aiheuttaman virtauksen seurauksena

Tiivistelmä

Hankkeessa kartoitettiin merikuljetusketjun käytön ja mahdollisten onnettomuuksien kasvihuonekaasupäästöjä. Kasvihuonekaasupäästöjen kannalta on tärkeää huomioida nesteytetyn maakaasun vähäpäästöinen tuottaminen, kuljetus ja polttotekniikka. Hankkeessa kartoitetut ilmastopäästöjen onnettomuusskenaariot ovat hyvin samankaltaisia kuin jo käytössä olevat. Hankkeessa todettiin, että on tärkeintä kartoittaa maksimipäästöt, ja verrata niitä jatkuviin päästöihin. Vertailukohtina käytettiin mm. rekkaliikenteen, autolautan, terästehtaan ja maatalouden päästöjä. Esimerkiksi 50000 kuutiometrin varastosäiliön tyhjenemisen metaanipäästö vastaa 6000 rekan käyttöä vuoden ajan, terästehtaan käyttöä noin yhdeksän kuukauden ajan tai Suomen maatalouden metaanipäästöjä kolmen kuukauden ajalta.

Hankkeessa mitattiin myös maakaasupitoisuuksia tankkaustilanteessa, ja todettiin niiden olevan pieniä. Mittaustekniikkaa ehdotetaan kehitettäväksi lähinnä käyttötilanteissa.

Nesteytetyn maakaasun (Liquified Natural Gas, LNG) käytön taloudellisuuteen liittyen tuotannon ja kuljetusketjun maakaasupäästöt ja palamattoman metaanin päästöt moottorin läpi ovat paitsi ilmaston myös talouden kannalta merkittäviä. Suomen alueen toimintojen osuudet ovat tässä suhteellisen pieniä.

Kokonaisuutena päästöjen minimoinnissa on tärkeä keskittyä kaasun tuotannon, kuljetusten ja käytön aikaisiin päästöihin, joihin parhaat vaikutusmahdollisuudet ovat energian toimittajilla ja moottorivalmistajilla. Käyttäjien ympäristöraportoinnissa energian toimitusketjun kaikkiin osapäästöihin tulisi kiinnittää huomiota.

Yhteenvetona vertailuista muihin hiilidioksidi- ja metaanipäästölähteisiin nähden voidaan sanoa, että maakaasun tahalliset ja tahattomat päästöt Suomeen liittyvissä merikuljetusketjuissa ovat pieniä toiminnan volyyymiin nähden. Suuret päästöt ilmakehään LNG:n merikuljetusten, satamatoimintojen ja varastoinnin yhteydessä ovat epätodennäköisiä hyvän turvallisuustoiminnan takia. Tutkimus- ja kehityspäonnasta kannattaa lisätä ennemminkin maakaasun käytön ja yhteiskunnan muiden toimintojen aiheuttamien päästöjen vähentämiseen.

Summary

In the project, greenhouse gas emissions in the maritime transport chain were identified from the perspectives of consumption and accidents. Low-emission LNG production, transportation and combustion technology were found to be important. The developed accident scenarios for major LNG emissions were found to be very similar to those already in use. It was found that charting the maximum accidental emissions and comparing them with continuous emissions was essential. The benchmarks used were, for example, lorry traffic, car ferry traffic, steel mill production process and agriculture. E.g. the methane emission from emptying a 50,000 cubic capacity tank is equivalent to the emissions from the usage of 6,000 trucks for a year, running a steel mill for about nine months or the agriculture in Finland over a period of three months.

During the project, a measurement session of natural gas concentrations was carried out in a refuelling situation. The emissions were found to be small. Further development of measurement techniques is proposed mainly for operational situations.

Regarding the economy of LNG usage, it was found that the natural gas emissions from production and transport chains as well as the emissions from methane passing through the engine unburned are significant for both the climate and the economy. In this respect, the share from operations in Finland is relatively small.

As a whole, in minimizing total emissions, it is important to focus on emissions taking place during the production, transport and use of gas, with the largest responsibility lying with energy suppliers and motor manufacturers. In the environmental reporting by the users of LNG, attention should be paid to all the partial emissions from the energy supply chain.

In summary, compared with other carbon dioxide and methane emissions sources, intentional and unintentional emissions of natural gas in the maritime transport chains in Finland are small considering the volume of operation. Further, large emissions into the atmosphere in the maritime transport, harbour operations and storage of LNG are unlikely because of proper safety arrangements. It is advisable to direct the R&D investments to the processes using natural gas and other emitting activities in the society.

1 Johdanto

Tämä yhteenveto on loppuraportti Vähähiiliset satamatoiminnot-hankkeen nesteytetyn maakaasun ympäristövaikutuksia koskevasta osasta. Aiemmin hankkeessa on julkaistu raportti ”Nesteytettyä maakaasua käyttävän meriliikenteen kasvihuonekaasujen päästölähteitä” (Räisänen ym. 2016), joka perustuu alan kirjallisuuteen ja mittaustekniikan arviointiin. Aiemman raportin pääkohdat kerrataan tämän loppuraportin toisessa luvussa ja mittaustekniikkaa koskevassa luvussa. Muutoin tämä raportti liittyy LNG- päästöskenaarioihin Suomen olosuhteissa, joissa vuotoskenaarioita on tehty pääosin turvallisuussyistä. Tässä hankkeessa näitä skenaarioita tutkittiin lähinnä päästönäkökulmasta, ja uusiakin skenaarioita pyrittiin muotoilemaan maailmalla tapahtuneiden onnettomuuksien analyysien mukaan. Hankkeessa tehtiin myös tankkauksen yhteydessä syntyvien pienpäästöjen mittaus (luku 8).

2 Päästölähteet

Kirjallisuuskatsauksessa (Räisänen ym. 2016) tarkasteltiin päästöjä nesteytetyn maakaasun tuotannon ja kuljetuksen aikana, sekä tankkauksen ja onnettomuuksien yhteydessä. Lisäksi tarkasteltiin laivamoottorien päästöjä ja niiden mittausta. Alla on tiivistelmä päästölähteistä.

Kasvihuonekaasujen päästöt maakaasun tuotannossa ja siirrossa koostuvat pääosin hiilivetyjen (lähinnä metaanin) joutumisesta ilmakehään sekä kaasun polton aiheuttamasta hiilidioksidipäästöstä. Määrä riippuu kaasun määrästä ja laadusta, prosessien termisestä tehokkuudesta sekä höyrystyneen maakaasun käsittelymenetelmistä. Päästöjen arvioinnissa on oletettu, että maakaasun metaanin kasvihuoneilmiötä lisäävä vaikutus on sadan vuoden aikavälillä 20–25 kertaa suurempi kuin vastaavan metaanimäärän poltossa syntyvän hiilidioksidin. Arvioitaessa energian käytön kokonaispäästöjä on oleellista ottaa huomioon miten tarkasti loppukäyttäjän polttoprosessi pystyy polttamaan hiilivedyt.

Päästöt voidaan jakaa tahallisiin ja tahattomiin. Tahalliset päästöt syntyvät systeemien ominaisuuksista huoltojen ja käytön aikana, ja niissä hiilivedyt voidaan johtaa ilmakehään polttamattomina (esim. pneumaattiset venttiilit, laitteiden tyhjennys kaasusta huoltoa varten) tai polttaa. Tahattomia päästöjä syntyy esimerkiksi vuotoista laitteistoissa, kuten pumpuissa, kompressoreissa, putkilinjoissa sekä putki- ja letkuliitoksissa. Hetkellisiä päästöjä syntyy esimerkiksi tankkaustilanteessa laippojen ja yhteiden vuotojen, lämpötilamuutosten, ylipaineventtiilien vuotojen ja odotteluajan höyrystymisen takia.

Kasvihuonekaasujen päästöt maakaasun tuotannossa ja siirrossa koostuvat pääosin hiilivetyjen (lähinnä metaanin) joutumisesta ilmakehään sekä kaasun polton aiheuttamasta hiilidioksidipäästöstä. Suomen olosuhteissa tuotannon ja kuljetuksen metaanipäästöjen on laskettu olevan suuruusluokkaa 10–20 % kaasun koko hiiliekvivalentista. Muita päästölähteitä ovat tankkaus, onnettomuudet ja moottorit.

Maakaasun polttaminen aiheuttaa noin 170–200 g/kWh vähemmän hiilidioksidia kuin raskaan polttoöljyn käyttö. Mikäli paloprosessissa syntyy metaanipäästöjä, etu pienenee. Moottoritekniikalla on suuri merkitys palamattoman metaanin määrään. Satamien ja LNG:llä operoivien varustamoiden kannalta maakaasun käytön turvallisuudesta huolehtiminen minimoi hyvin myös kaasun tahattomat päästöt ympäristöön.

Koko kuljetusketjun kannalta päästöjen minimoinnissa on tärkeä keskittyä kaasun tuotannon, kuljetusten ja käytön aikaisiin päästöihin. Näihin parhaat vaikutusmahdollisuudet ovat energian toimittajilla ja moottorinvalmistajilla. Polttoaineiden vertailuissa tulee ottaa huomioon kasvihuonekaasujen lisäksi myös typpi-, rikki- ja partikkelipäästöt.

3 Päästöskenaarioita

Skenaariot, joissa LNG:tä vuotaa ympäristöön, päättyvät joko höyrystyneen kaasun leviämiseen ilmakehään tai kaasun syttymiseen, jolloin palamistulokset päätyvät ilmakehään. Vastatoimia ilmastovaikutuksille on vaikea keksiä, sillä suuren onnettomuuden aikana höyrystymistä ja palamista ei käytännössä pystytä estämään. Suuressa tulipalossa pelastushenkilökunnan varoetäisyydet ovat satoja metrejä (Quillen 2002, Bonilla Martinez 2013). Puhtaasti kasvihuonekaasujen päästön kannalta on syttyminen usein parempi tilanne kuin palamattoman maakaasun pääseminen ilmakehään, edellyttäen, että tuli ei leviä muihin palaviin materiaaleihin.

3.1 Satamien kiinteät säiliöt ja laitteet

LNG- prosessien ja kuljetusten onnettomuusskenaarioissa kiinteiden järjestelmien päästöt on helpompi hallita, sillä vastatoimet voidaan sovittaa paikallisiin olosuhteisiin (Frame 2010) ja esimerkiksi varastoinnissa voidaan varautua vuotojen käsittelyyn ja räjähdysten estämiseen. Kiinteän varaston tuhoutumista normaalikäytössä pidetään epätodennäköisenä; viime vuosikymmeninä tällaisia onnettomuuksia ei ole tapahtunut (Frame 2010, 34), vrt. 1. Potentiaalinen kokonaispäästö pahimmissa skenaariossa on säiliön kokonaistilavuuden suuruinen, jos mahdollisen suuren tulipalon kasvihuonepäästöjä ei oteta huomioon. Vaurioituneen säiliön tyhjenemiseen on vaikea vaikuttaa, sen sijaan putkistojen onnettomuusskenaarioissa vuodon kokoon voidaan usein vaikuttaa aktiivisilla toimilla, kuten venttiilien sulkemisella. Vuodot voidaan paikallistaa havainnoimalla höyryn ja jään muodostumista.

3.2 Maantie- ja raidekuljetukset satamissa

Kuljetusvälineissä tapahtuvat onnettomuudet sisältävät eniten ulkoisista tekijöistä johtuvia muuttujia. LNG-onnettomuudet maantiekuljetuksissa ovat harvinaisia (Yhdessä aineistossa 1 % kaikista vaarallisten aineiden maantiekuljetusten onnettomuuksista, Planas-Cuchi ym. 2004). Tyypillisissä maantie- ja raidekuljetusten skenaarioissa käsitellään onnettomuuksia, joista on vaaraa ihmisille. Näihin skenaarioihin liittyvien LNG-päästöjen ympäristövaikutuksia on käsitelty suhteellisen vähän.

Tyypillinen suuren, mutta harvinaisen onnettomuuden skenaario on LNG-säiliöauton joutuminen maantieonnettomuuteen, josta seuraa kiehuva nesteestä muodostuvan laajenevan höyryn karkaaminen ilmakehään, kaasun palaminen normaalisti tai räjähdys (BLEVE – Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion). Säiliöauton räjähdyksessä syntyy tulipallo, jonka halkaisijan suuruusluokka on 150 m (Bonilla Martinez 2013, 4, Planas-Cuchi ym. 2004, 317). Tulipalloskenaarioissa säiliöauton lastin tuhoutumisen lisäksi päästöjä syntyy ympäristössä olevien syttyvien rakenteiden palaessa. Tunnetussa onnettomuudessa syttymisestää puulle oli suuruusluokkaa 140 m. (Bonilla Martinez ym. 2012). Kuumia sirpaleita voi lentää kilometrin päähän (Bonilla Martinez ym. 2012, Frame 2010). Mikäli ympäristön syttymistä ei oteta huomioon, skenaarion maksimipäästö on autokuljetuksen LNG-määrän suuruinen maakaasupäästö ilmakehään. Mikäli syttyminen tapahtuu, kokonaispäästö riippuu LNG:n määrästä mutta myös ympäristön palokuormasta ja sammutuksen tehokkuudesta. Numeeristen simulaatioiden perusteella (Quillen 2002) suuri vuoto voi levitä kaasupilven kilometrien etäisyydelle ennen pilven hajoamista. Laajalle levinneen pilven täydellistä syttymistä tai räjähdystä pidetään epätodennäköisenä.

3.3 Merikuljetukset satamien vaikutusalueilla

LNG-vuotoja voi syntyä myös merikuljetuksissa sataman vaikutusalueella. Tyypillisiä onnettomuustilanteita ovat törmäykset satamarakenteisiin, laivojen yhteentörmäykset ja karilleajot. Törmäysskenaarioita on tutkittu turvallisuuden kannalta, ja ne sopivat hyvin myös ympäristöpäästöjen kartoitukseen. LNG-laivan joutumista yhteentörmäykseen ja karilleajoon on tarkasteltu numeerisesti (Hightower ym 2004, 99–103) mallintamalla rakenteen dynaamiset muodonmuutokset ja törmäyksen kinematiikka. Vuodon syntymiseen vaikuttavat muun muassa törmäävien kapaleiden massat, nopeudet ja törmäyskulma sekä rakenteen yksityiskohdat törmäysalueella.

Analyysin johtopäätöksistä voidaan yleistää, että karilleajossa vuodon todennäköisyys on pieni ja että yhtä suurten alusten onnettomuudessa suora törmäys kaasulaivan kylkeen voi aiheuttaa vuodon, jos törmäysnopeus ylittää 6–7 solmua (3–3,5 m/s). Mikäli törmäyskulma on viistompi, kaasutankin vuotoon tarvittava törmäysnopeus kasvaa nopeasti kulman pienetessä. Vuodon keston kannalta on merkittävää, jääkö törmännyt alus kiinni tekemäänsä aukkoon, mikä pienentää ulosvirtaavan kaasun tilavuusvirtaa huomattavasti. LNG-laivojen vuotoja koskevissa ske-

naarioissa on usein otettu huomioon myös se, että vuoto voi edetä laivan tankista toiseen, esimerkiksi tulen tai kylmäaurastumisen aiheuttamien vaurioiden takia (Quillen 2002). Vuodosta veteen voi aiheutua myös nopea faasimuutos (RPT, Rapid Phase Transition), jossa kylmä LNG kohtaa vesimassan, jonka lämpö höyrystää LNG:n räjähdysmäisesti. On kuitenkin todettu, että tyyppillinen LNG-aluksen rakenne suojaa tankkeja verrattain hyvin.

3.4 Roll over -ilmiö

Roll over -ilmiössä säiliössä oleva LNG alkaa höyrystyä ja paine nousee nopeasti neste-kerrostumisen ja sen aiheuttaman virtauksen seurauksena (Outokumpu Steel 2013a, 12). Kun säiliössä päällimmäisenä oleva nestekaasu on tiheämpää kuin sen pohjalla oleva, voi tapahtua äkillinen sekoittuminen, jossa raskaammat osat pyrkivät alaspäin ja alimpien kerrosten hydrostaattinen paine alenee kevyemmän nesteen noustessa ylöspäin. Tällöin nestekaasua höyrystyy nopeasti suuria määriä. Tiheyserot voivat syntyä esimerkiksi sen takia, että pintakerroksista on haihtunut kevyempiä osia, kaasun sisältämän typhen vaikutuksista tai erilaisten laatujen tankkauksesta (International Group of LNG Importers 2015, 12). Äärimmäisissä tapauksissa roll over -ilmiön aiheuttama höyrystyminen voi olla niin voimakasta, että ylipaineventtiilien kapasiteetti ei ole riittävä ja paineen nousu voi aiheuttaa tankin rikkoutumisen.

Tyypillisiä oireita roll over -ilmiön tapahtumiselle ovat säiliön alaosassa olevien neste-kerrosten lämpötilan nousu ja höyrystyneen kaasun määrän pieneneminen normaalitilanteeseen nähden (Society of International Gas Tanker & Terminal Operators Limited 2012). Nestekaasun tiheyden mittaus eri syvyyksillä ja pinnankorkeuden mittaus kertovat myös tilanteesta. Muita hyödyllisiä mittaushetkiä ovat tiheys syvyyden funktiona, höyrystyvän kaasun komponenttien määrät ja säiliön paine, joihin roll overia edeltävä kerrostuminen vaikuttaa (International Group of LNG Importers 2015, 20).

Roll over -ilmiötä ja sen haittoja voidaan estää mm. sekoittamalla, täyttämällä eri tiheyden omaavia nestekaasuja sopivaan kerrokseen tankissa, säilyttämällä eri tiheyden omaavia kaasuja eri tankeissa, lyhentämällä säilytysaikaa ja suunnitteleamalla varojärjestelmät kestämään roll over -ilmiön vaikutuksia (International Group of LNG Importers 2015, s. 24). LNG- aluksissa ilmiö on harvinainen. Liikkeet aallokossa eivät kuitenkaan välttämättä riitä sekoittamaan kerroksia keskenään, ja siksi

laivoissa kerrostumista monitoroidaan ja estetään kuten maalaitoksissakin (Liquifedgascarrier.com 2017).

Roll over -ilmiöstä johtuvat päästöt ympäristöön ovat suhteellisen pieniä, jos tankin vaurioitumista ei tapahdu. Baker ja Creed (1996) raportoivat roll over -tapauksesta, jossa 21000 tonnin tankista purkautui ylipaineventtiilien kautta kahden tunnin ajan yhteensä noin 150 tonnia maakaasua, kun kerrosten tiheysero säiliössä oli alle 3 %.

3.5 Kiehuva nesteestä muodostuvan höyryn aiheuttama räjähdys (BLEVE)

Paineastiassa kiehuva nesteestä muodostuvan höyryn paine voi kasvaa niin suureksi, että astia rikkoontuu räjähdysmäisesti. Höyryn ei itsessään tarvitse olla räjähtävää. Tällaisesta räjähdyksestä käytetään yleisesti lyhennettä BLEVE (Boiling liquid expanding vapour explosion, Peterson 2002). Räjähdys voi tapahtua, vaikka paineastian ylipaineventtiilit toimisivatkin normaalisti, jos paineen nousu ylittää venttiilin kapasiteetin. Lisäongelman muodostaa se, että ylipaineventtiilit voivat lakata toimimasta esimerkiksi vaurion tai tukkeutumisen takia.

Tyypillinen kiehumisen syy on tulipalo, jossa liekit pääsevät lämmittämään säiliön sisältöä aiheuttaen kiehumisen. LNG- säiliöissä onnettomuusriski kasvaa edelleen nesteen paloarkuuden takia. Ilmastopäästöjen kannalta on merkitystä, miten onnettomuus tapahtuu: suuren räjähdyksen seurauksena syntyvät tulipalot aiheuttavat päästöjä, muuten päästön maksimimääräksi voidaan olettaa säiliön sisältämän maakaasun määrä.

4 Tunnettuja onnettomuuksia

Vuosien varrella LNG- laitoksissa on tapahtunut erittäin vähän onnettomuuksia toiminnan laajuuteen nähden. Merkittävimmät ympäristöpäästöjä aiheuttaneet onnettomuudet LNG- laitoksissa on lueteltu taulukossa 1. Suunnilleen puolet tapauksista on laiterikkoja ja hieman alle puolet käyttäjän virheestä johtuvia onnettomuuksia. Taulukossa mainitun vuoden 1944 suuronnettomuuden kaltaisia säiliön murtumia on myöhemmin onnistuttu välttämään kun tietämys materiaalien kylmäaurastumisesta on lisääntynyt. Kasvihuonekaasujen kannalta on merkittävää, että noin 60 %:ssa tapauksista maakaasu ei ole syttynyt, mikä lisäisi päästövaikutuksia ilmakehän lämpenemisen kannalta.

Taulukko 1. Merkittävimpiä LNG-laitosten onnettomuuksia, joista on seurannut päästöjä ympäristöön (Baker ja Creed 1996, CH IV International 2014, Endresen ym. 2014, Rukke ja Katchmar 2016, Society of International Gas Tanker & Terminal Operators Limited 2012)

Aika ja paikka	Laitostyyppi	Kuvaus
1944 Cleveland USA	LNG:n kulutushuippujen tasauslaitos	Säiliön murtuminen aiheutti vuodon, tulipalon ja suuron- nettomuuden "The Cleveland Disaster"
1971 La Spezia Italia	LNG:n vastaanottoterminaali	Rollover- tapaus, jossa ylipai- neventtiileistä kaasua poistui useita tunteja
1972 Montreal Kanada	LNG:n kulutushuippujen tasauslaitos	Räjähdyks valvontahuoneessa, suunnittelu/käyttövirhe
1977 Arzew Algeria	LNG:n vientiterminaali	Venttiilin murtuminen, 1500- 2000 m ³ vuoto, ei syttymää
1978 Das Island Arabiemiiraatit	LNG:n vientiterminaali	Putkirikko, suuri kaasupilvi, ei syttymää

1979 Cove Point USA	LNG:n vastaanottoterminaali	Kaasuräjähdyksessä sähkökeskuksessa vuodon takia, suunnittelu/asennusvirhe
1985 Pinson USA	LNG:n kulutushuippujen tasauslaitos	Säiliön hajoaminen hitsien peittämissä takia, tulipalo
1988 Everett USA	LNG:n vastaanottoterminaali	Paineisku nesteessä rikkoi putkilaiipan tiivisteen, kaasuvuoto, ei syttymää
1989 Thurley Iso-Britannia	LNG:n kulutushuippujen tasauslaitos	Avoimeksi jäänyt tyhjennysventtiili, tulipalo
1992 Baltimore USA	LNG:n kulutushuippujen tasauslaitos	Avoimeksi jäänyt venttiili, ei tulipaloo
1993 Partington Iso-Britannia	LNG:n kulutushuippujen tasauslaitos	Rollover- tapaus, jossa ylipaineventtiileistä kaasua poistui kaksi tuntia
1993 Bontang Indonesia	LNG:n vientiterminaali	Huollon yhteydessä avoimeksi jäänyt putkilinja, ei tulipaloo
2003 Bintulu Malesia	LNG:n nesteytys- ja vientiterminaali	Murtuma putkiliitoksessa aiheutti räjähdysten laitoksen kaasuturbiinissa, iso tulipalo
2004 Skikda Algeria	LNG:n nesteytys- ja vientiterminaali	Vuoto jäähdytysjärjestelmissä, aiheutti räjähdysten ja ison tulipalon
2009 Tangguh Indonesia	LNG:n nesteytys- ja vientiterminaali	Vuoto putkistossa, asennusvirhe, ei syttymää
2011 Rotterdam Alankomaat	LNG:n vastaanottoterminaali	Vuoto huoltotöiden aikana, ei syttymää
2014 Melköya Norja	LNG:n nesteytys- ja vientiterminaali	Vuoto pumpun tiivistyksessä, ei syttymää
2014 Plymouth USA	LNG:n kulutushuippujen tasauslaitos	Laitoksen paineastian räjähdysripaleet osuivat varastosäiliöön ja aiheuttivat vuodon, käyttövirhe, ei syttymää varastosäiliön kaasussa

Samalla tavalla voidaan tarkastella LNG-laivojen onnettomuuksia (2 ja 3). Kuljettuihin määriin nähden onnettomuuksia on ollut vähän ja niiden seuraukset ovat olleet verrattain pieniä ympäristön kannalta. Noin 15 % tapauksista on karilleajoja. Näihin tapauksiin ei ole liittynyt päästöjä, vaikka vauriot ovat olleet suuria; kaksoisrunkorakenne on onnistuneesti absorboinut aluksen liike-energian. Yhteentörmäyksiä merellä on noin 18 % tapauksista. Suurimmassa osassa LNG-laiva on huomattavasti suurempi massaltaan kuin törmäyksen toinen osapuoli. Törmäyksissä on syntynyt suuria rakenteellisia vaurioita, mutta ei päästöjä ilmakehään. 10 % tapauksista on törmäyksiä satamassa, joko satamalaitteisiin tai toisiin aluksiin. Törmäysnopeudet ovat pieniä, mikä vaikuttanee siihen, että päästöjä ilmakehään ei ole näissä onnettomuuksissa raportoitu. Luonnonolosuhteet (15 %) ovat myös aiheuttaneet onnettomuuksia: salaman iskuista on raportoitu vuotoja ilmakehään, ja myrskyn aiheuttamista rakennevaurioista on syntynyt vuotoja. Laiterikot (15 % tapauksista) lähinnä putkistojen osissa ovat aiheuttaneet päästöjä, samaten inhimilliset virheet lastinkäsittelyssä (21 % tapauksista). Näissä tapausryhmissä on eniten onnettomuuksia, joista on aiheuttanut päästöjä.

Laitosten ja laivojen onnettomuuksien perusteella voidaan sanoa, että laitosten onnettomuuksissa on tapahtunut suurempia päästöjä kuin laivaonnettomuuksissa, ja että useimmin päästöihin ovat johtaneet normaalin käytön tekniset ja inhimilliset tekijät.

Taulukko 2. Merkittävimpiä LNG- laivojen onnettomuuksia 1964-79 (Baker ja Creed 1996, CH IV International 2014, Endresen ym. 2014, Rukke ja Katchmar 2016, Society of International Gas Tanker & Terminal Operators Limited 2012).

Aika	Laivan nimi	Laivan koko [1000 m ³]	LNG-päästö	Kuvaus
1964	Jules Verne	26	Pieni	Salaman isku
1965	Jules Verne	26	Pieni	Salaman isku
1965	Methane Princess	27	Pieni	Vuoto yhteiden irrotuksessa, laivan kansi säröytyi
1965	Jules Verne	26	Pieni	Tankin ylitäyttö
1966	Methane Progress	27		Ei tietoa

1968	Aristotle	5	Ei päästöä	Karilleajo, pohjaan vaurioita
1969	Polar Alaska	72	Ei päästöä?	Loiskunta tankissa vaurioitti pumpun kiinnikkeitä joka aiheutti vuodon sisätankissa
1970	Arctic Tokyo	72	Ei päästöä?	Loiskunta tankissa vaurioitti sisätankkia, mikä aiheutti vuodon
1971	Descartes	50	Ei päästöä	Pieni vaurio sisätankin yhteessä aiheutti vuodon
1974	Methane Princess	27	Ei päästöä	Laivan ollessa satamassa siihen törmäsi toinen alus. Törmäys aiheutti runkolevytyksen noin metrin pituisen repeämän.
1974	Barge Massachusetts	5	Pieni	Lastauksen yhteydessä tapahtuneen sähkökatkoksen johdosta LNG:tä vuosi kannelle, joka säröytyi
1974	Euclides	4	Ei päästöä	Kosketti toista alusta
1974	Euclides	4	Ei päästöä	Karilleajo, pohjaan ja potkuriin vaurioita
1974	Methane Progress	27	Ei päästöä	Karilleajo, peräsinvaurioita
1977	LNG Aquarius	125	Pieni	Ylivuoto, anturit ohitettu
1978	Khannur	125	Ei päästöä	Yhteentörmäys toisen aluksen kanssa merellä
1979	Mostefa Ben Boulaid	125	Pieni	Putkirikko
1979	Pollenger	88	Pieni	Venttiilivuoto

Taulukko 3. Merkittävimpiä LNG- laivojen onnettomuuksia 1979–2015 (Baker ja Creed 1996, CH IV International 2014, Endresen ym. 2014, Rukke ja Katchmar 2016, Society of International Gas Tanker & Terminal Operators Limited 2012).

Aika	Laivan nimi	Laivan koko [1000 m ³]	LNG-päästö	Kuvaus
1979	El Paso Paul Kayser	125	Ei päästöä	Karilleajo 14 solmua, suuri pohjavaurio
1980	LNG Taurus	125	Ei päästöä	Karilleajo
1980	El Paso Consolidated	125	Pieni	Vuoti putkilaipasta
1980	Larbi Ben M'Hidi	130	Pieni	Vuoto yhteiden irroituksessa
1983	Norman Lady	88	?	Laiva siirtyi laiturissa oman koneen käymisen takia ja katkoi maistaottoputket. LNG:tä vuosi, ei syttymää
1985	Isabella	36	Pieni	Ylivuoto, laivan kansi säröytyi
1985	Annabella	36	?	Vuoto, syy tuntematon
1985	Ramdane Abane	126	Ei päästöä	Yhteentörmäys lastauksen aikana
1989	Tellier	40	?	Tuuli irrotti laivan lastauslaiturista, laivan putkisto ja maistaottoputket vaurioituivat
1990	Bachir Chihani	125	Ei päästöä	Laivan runko vaurioitui merenkäynnissä suurten taipumien takia
1997	Northwest Swift	125	Ei päästöä	Yhteentörmäys kalastusaluksen kanssa, pienet vauriot LNG-laivassa
1997	LNG Capricorn	126		Törmäsi satamarakenteisiin, pienet vauriot
1999	Methane Polar	72	Ei päästöä	Törmäsi satamarakenteisiin kornikon takia, pienet vauriot
2002	Norman Lady	87	Ei päästöä	Sukellusveneen periskooppi vaurioitti laivaa

2009	Matthew	127	Ei päästöä	Karilleajo
2010	Bluesky	145	Pieni	Venttiilin ohitus aiheutti päästön
2010	LNG Edo	127	Ei päästöä	Alus kallistui äkillisesti lastauksen yhteydessä, virhe painolastin käsittelyssä
2012	Aries	125	Ei päästöä	Kaasuvuotohälytys sulki pääturbiinit, apugeneraattori ei toiminut, hinattiin satamaan, ei vaurioita
2013	Al Gharrafa	216	Ei päästöä	Yhteentörmäys 10,000 TEU:n konttilaivan kanssa, suuret vauriot alukselle
2014	Puteri Nilam Satu	137	Ei päästöä	Yhteentörmäys , pienet vauriot
2015	Al-Oraiq	210	Ei päästöä	Yhteentörmäys pienen rahtilaivan kanssa, joka upposi. Pienet vauriot LNG-laivalle

5 Suurten ja äkillisten maakaasupäästöjen skenaarioita merikuljetusketjun LNG-toiminnoissa Suomessa

LNG-onnettomuuksien mekanismeja tutkimalla voidaan muodostaa samankaltaisille onnettomuuksille mahdollisia tapahtumaketjuja, skenaarioita, joita voidaan hyödyntää yhteiskunnallisessa toiminnassa ja yritysten varautumisessa. Tässä selvityksessä on haettu merikuljetusketjun skenaarioiden kautta raja-arvoja ilmapäästöihin. Merikuljetusketju-termi on tässä määritelty ulottumaan sataman varastosäiliöön saakka.

Tutkituissa laitos- ja merionnettomuuksissa (luku 4) raportoinnin lähtökohtina ovat lähinnä aineelliset ja henkilövahingot, sillä ilmakehään häviävät maakaasuvuodot eivät saa onnettomuusraportoinnissa samanlaista painoarvoa kuin esimerkiksi raakaöljypäästöt. LNG-onnettomuuksissa on riski merkittäville tulipaloille ja räjähdyksille sekä niistä johtuville vahingoille, joten riskiltä suojautumiseen on suhtauduttu vakavasti sekä sääntelyssä että käytössä. Merikuljetusketjun päästöt voidaan jakaa kahteen kategoriaan: päästöt merionnettomuuksissa ja päästöt varastosäiliöistä ja lastauslaitteistoista.

5.1 Päästöt merionnettomuuksissa

Merionnettomuudessa ilmakehään pääsevän kaasun määrä riippuu aluksen koosta. Suomeen liikennöivien kaasutankkereiden kapasiteetit tulevat todennäköisesti lähivuosina olemaan pieniä valtamerialuksiin verrattuna, vain joitakin kymmeniä tuhansia kuutiometrejä. Esimerkiksi Skangasin Coral Energy -aluksen kapasiteetti on 15 600 m³ (Skangas 2017b).



Kuva 1. LNG-alus Coral Energy (Lähde: Skangas).

Alusten koot sopeutunevat Suomen ja lähivesien terminaalien vastaanottokapasiteettiin. Esimerkiksi Inkooseen suunnitellussa Finngulf-hankeessa (Gasum 2015a, 35) varastoiksi on suunniteltu mm. 2 kpl 165000 m₃ säiliötä, jotka toteutuessaan johtaisivat alusten koon suurenemiseen ja mahdollisen maksimivuodon kasvuun.

Alusliikenteen skenaarioihin liittyvän päästön yhteydessä ilmakehään pääsevän kaasun määrää on simuloitu numeerisin menetelmin, tosin skenaarioista on useita mielipiteitä (Baik ym. 2006). Näiden perusteella on mm. arvioitu, että suuruusluokkaa 60 % tankin tilavuudesta voi purkautua nopeasti ilmakehään. (Hightower ym.

2013, U.S. Department of Energy 2012). On epätodennäköistä, että suuronnettomuuden jälkeen LNG:tä saataisiin koottua takaisin vaurioituneesta tankista, vaan loputkin 40 % todennäköisesti joutuisivat ilmakehään myöhemmin. LNG:n kuljetuksiin kohdistuvat onnettomuudet on kirjallisuudessa jaettu kahdeksaan päätyyppiin (Holden, D. ym. 2014. International Maritime Organization, 2007, Parfomak, 2008 ja Vanem ym., 2007)

1. yhteentörmäys toisen aluksen kanssa
2. karilleajo
3. törmäys esteeseen
4. palo tai räjähdys
5. aluksen laitevika
6. huono sää
7. ongelmatilanne lastauksen tai purkamisen yhteydessä
8. lastitilan ja lastilaitteiden vauriot.

Tilastojen perusteella merionnettomuusskenaariossa vuoto on epätodennäköinen, ja seuraus on todennäköisesti vuodon syntyessä vain yhden tankin vaurio. Lastin syttyminen vauriossa on mahdollista. Merionnettomuudessa maksimiskenaario ilmaston kannalta on kuitenkin koko lastin pääsy enimmäkseen metaanina ilmakehään. Mikäli onnettomuus tapahtuu satamassa, voi maksimiskenaario olla suurempikin, esimerkiksi mikäli satamassa olevia varastoja tuhoutuu tai tulipalossa palaa laajasti ympäristöä. Tällaisten onnettomuusketjujen koon arviointi on hankalaa, mutta mahdollista. Ilmapäästöjen kannalta riittänee onnettomuusskenaarioiden suuruusluokan tunteminen, sillä suuronnettomuuksia pyritään joka tapauksessa välttämään.

5.2 Päästöt varastosäiliöistä ja lastauslaitteistoista

Merikuljetusketjun päätepisteenä on useimmiten varastosäiliö. Näiden onnettomuusskenaarioita on tehty Suomessa ympäristövaikutus- ja turvallisuusselvityksissä. Ympäristövaikutusten arviointi (YVA)-menettelystä vastaavat ympäristölupaviranomaiset. Tukes vastaa LNG-terminaalien varastointiluvista ympäristövaikutusten arvioinnin ja kaavoituksen jälkeen ja se tekee tarkastuksen ennen käyttöä (Tukes 2015). Kaikki alan toimijoiden onnettomuusskenaariot eivät ole julkisia (Vilkkö 2017, Jaskari 2017), mutta näiden päätösten julkaistuista osista saadaan tietoa Suomessa käytetyistä onnettomuusskenaarioista. Esimerkiksi Finngulf- LNG- termi-

naalin ympäristövaikutusten arvioinnissa mallinnettiin seuraavia skenaarioita (Gasum 2015a, 182):

1. täyttöletkun halkeaminen tai irtoaminen satamassa
2. LNG-varastosäiliön roll-over, kaasuvuoto varastosäiliön paineventtiilistä
3. korkeapainekaasuvuoto prosessialueelta
4. LNG-putken halkeaminen tai irtoaminen LNG-rekkalastausalueella
5. korkeapainaisen LNG:n vuoto prosessialueelta
6. paineistetun LNG:n vuoto varastosäiliön katosta.

Tukesin lupapäätöksissä (Jaskari 2017) kuvataan skenaarioita yleisesti ja määritellään niille suojausratkaisut. Laskennassa käytettyjä, hyvin epätodennäköisiksi arvioituja skenaarioita ovat:

1. LNG-lastausvarren repeäminen LNG-laivan purussa
2. LNG-täyttöletkun repeäminen
3. putken repeäminen säiliön katolla
4. LNG-säiliön varoventtiilipäästö
5. palo LNG-säiliöalueen tai prosessialueen LNG-keruualtaassa
6. LNG- tai kaasuvuoto laitesuojassa
7. autolastausletkun repeäminen
8. kaasuvuoto paineenalennusasemalla ja sisätilaräjähdyksellä.

Samankaltaisia skenaarioita löytyy ulkomailta. Esimerkiksi Rotterdamin sataman TEN-T-hankkeen Reinin kuljetusketjua koskevassa raportissa skenaarioiksi määriteltiin (Ramsden ym. 2014, 34):

1. merenkulku: yhteentörmäys toisiin aluksiin, laituriin tai siltaan; karrilleajo
2. LNG-polttoainelaitteiston vuoto, höyrystymisvuoto
3. LNG-lastitankin vuoto: tankkiyhteen vuoto, ylipainepäästö
4. tankkaus: tankkauslaitteiston pettäminen, ylitäyttö, ylipaine, vaurio irtotankin noston yhteydessä
5. tulipalon aiheuttama vuoto: lastin palo, aluksen muu tulipalo.

Nykyaikaisessa säiliössä on tyypillisesti eristetty sisäsäiliö teräksestä ja sitä suojaava ulkosäiliö, johon mahtuu myös tankin kapasiteetin verran LNG:tä. Kolmas rajoitettava rakenne on tankin ulkopuolella oleva maavalli, joka estää nesteen valumisen ympäristöön, mutta ei sen haihtumista ilmakehään. Mikäli terminaalissa on useita säiliöitä, sijoituksessa ongelmana ovat painevaikutukset (Jaskari 2015, 7), jolloin räjähdysonnettomuudessa vuotoja voi syntyä useampiinkin säiliöihin kuin yhteen.

Konkreettisenä esimerkkinä voidaan mainita Porin Tahkoluodon LNG-varastosäiliö, jonka tilavuus on 30000 m³ (Tukes 2015). Rakenteelliset suojaukset tekevät päästöstä ympäristöön epätodennäköisen. Tuhoutumisskenaarion pahimmaksi päästökseksi voidaan arvioida se, että koko kapasiteetin verran metaania pääsee ilmakehään, eli 13500 tonnia, laskettuna tiheydellä 0,45 t/m³ (International Group of LNG Importers GIIGNL. 2017, 3). Vastaavasti Tornion tehtaiden LNG-varastointikapasiteetti on 50000 m³. (Skangas 2017a) eli noin 23000 t. Tämä on myös helposti hahmotettava oleva arvo suurimmalle metaanipäästön määrälle. Laivan tullessa täyttämään yhtä säiliötä lähialueella olevan kaasun määrä ei todennäköisesti merkittävästi ylitä säiliön kokonaistilavuutta.

Edellä mainittujen skenaarioiden ja tapahtuneiden onnettomuuksien perusteella tässä hankkeessa todettiin, että varastosäiliön tyhjenemisen skenaario on keskeinen haettaessa kuljetusketjun maksimipäästöä ilmakehään Suomen nykyisissä olosuhteissa. Ilmapäästöjen kannalta varautuminen LNG- onnettomuuksiin on riittävää. Satamat pitävät säännöllisesti suuronnettomuusharjoituksia, joissa LNG-asiatkin ovat esillä (Räisänen, H. 2017). Hankkeessa todettiin, että Suomen satamien normaali riskienhallinta suojelee ihmisiä ja rakenteita satamien vaikutusalueilla, mikä ehkäisee samalla tehokkaasti myös kaasupäästöjä ilmakehään.

6 Suurten päästöjen vahingollisuuden arviointi ja vertailu muihin kasvihuonekaasujen lähteisiin

Tässä hankkeessa tarkasteltiin skenaarioita ilmastopäästöjen kannalta. Todettiin että ympäristö- ja turvallisuusselvitysten yksityiskohtaisten skenaarioiden kattavuus on hyvä ja hankkeessa testatut, vain ilmastopäästöihin liittyvät skenaariot muodostuivat samojen lähtöoletusten perusteella hyvin samanlaisiksi kuin jo käytössä olevat. Ilmastoskenaarioiden tarkoitus tässä hankkeessa on ollut päästöjen kokonaiskuvan hakeminen ympäristön kannalta, ei niinkään prosessien ja niiden yksityiskohtien turvallisuus, joka on hyvin alan toimijoiden ja viranomaisten hallinnassa. Hankkeessa todettiin, että on tärkeintä kartoittaa maksimipäästöt, joita kannattaa verrata jatkuviin päästöihin. Näin saadaan yleisiä periaatteita sille, miten päästöjen rajoittamisen toimenpiteitä kannattaa suunnata.

LNG-säiliöauton suurin tilavuus (LNG-maxitrailer) voi olla noin 80 m³. (Outokumpu Stainless 2013a, 13). Koko lastin pääsy ilmakehään vastaa noin 36 t metaanipäästöä (900 t CO₂ekv). Säiliöauto-onnettomuuden maksimipäästön suuruutta voidaan verrata rekka-auton käytön päästöihin. Täysperävaunullisen rekka-auton päästöt ovat noin 1 kg CO₂/km (VTT 2009), ja keskimääräinen vuotuinen käyttö 100.000 km (Tervonen ym. 2011, 22). Tästä saadaan yhden rekan käyttöpäästökseen noin 100 t hiilidioksidia vuodessa. Säiliöauton koko LNG-lastin vapautuminen ilmakehään vastaa siis noin yhdeksän rekka-auton normaalin vuotuisen käytön päästöjä. Tällä perusteella mahdollisen säiliöauto-onnettomuuden ilmastovaikutus on suhteellisen pieni säiliöauton käytön päästöihin nähden. Päästöjä voidaan verrata myös koko Baltic Connector-putkilinjan kompressorin ja siirtoverkoston metaani-

päästöihin, joiden arvioidaan olevan yhteensä suuruusluokkaa 50–100 tonnia vuodessa (Gasum 2015b, 218), mikä vastaa 1250–2500 tonnin hiilidioksidipäästöä kertoimella 25.

Metaanipäästöjen vaikutuksia voidaan havainnollistaa myös laskemalla keskimääräisen suomalaisen metsähehtaarin sisältämän noin 100 kiintokuutiometrin puiden runkojen (Sievänen ym. 2012, 24) kasviuonekaasujen hiiliekvivalentti ($\text{CO}_2\text{-ekv}$) kertoimella $1,6 \text{ kg CO}_2\text{ekv per kg sisäkuivaa puuta}$ (Koskela ym. 2011 s.23) ja tällaisen kiintokuution karkealla painolla $0,5 \text{ t/m}^3$. Tästä saadaan vertailuluvuksi $1,6 \times 0,5 \times 100 = 80 \text{ t CO}_2\text{ekv}$ määrä per metsähehtaari. Tarkemmin laskettuna, ja oksat sekä ankarassa metsäpalossa kannotkin huomioon ottaen saadaan 114 t CO_2 per hehtaari (Sievänen 2017). Vertailukohtana voidaan käyttää myös arviota, että yhden ihmisen ruoan tuotanto ja aineenvaihdunta tuottaa noin kaksi tonnia hiilidioksidia vuodessa (FECYT 2010).

Laivaonnettomuuden metaanipäästöjä voidaan havainnollistaa vertaamalla niitä tyypillisen autolautan vuotuisiin käyttöpäästöihin ($44000 \text{ t CO}_2\text{ekv}$, Räisänen ym. 2016, 17), jotka vastaavat noin 1800 t metaanipäästöjä. Edellä mainittujen Porin ja Tornion säiliöiden päästöskenaarioita ($30000\text{--}50000 \text{ m}^3$ eli noin $13000\text{--}24000 \text{ t}$) voidaan verrata esimerkiksi Tornion tehtaan ilmapäästöihin, jotka ympäristövaikutusten arvioinnin mukaan (Outokumpu Stainless 2013b, 80) olivat vuonna 2012 noin $760000 \text{ t CO}_2\text{-ekv}$. Kertoimella 25 metaaniksi muutettuna tämä vastaisi 30000 tonnin metaanipäästöä onnettomuudessa.

Vertailukohteena säiliö- ja laivaonnettomuuksiin voi käyttää myös Suomen teollisuuden ja liikenteen aiheuttamia metaanipäästöjä, jotka olivat 6300 t vuonna 2008 (Outokumpu Stainless 2013b, 83) tai maatalouden vuosittaisia metaanipäästöjä, jotka ovat noin 100000 tonnia ($2,5$ milj. tonnia $\text{CO}_2\text{-ekv}$, Tilastokeskus 2017). Suomen kaikkien päästöjen kannalta skenaarioiden mahdolliset, mutta hyvin epätodennäköiset metaanipäästöt ovat pieniä, sillä Tilastokeskuksen mukaan maamme kasviuonekaasujen kokonaispäästöt olivat vuonna 2016 $58,8$ miljoonaa hiilidioksiditonnia vastaava määrä (Tilastokeskus 2017).

Taulukko 4. Onnettomuusskenaarioiden metaanipäästöjen vertailua käytön ym. päästöihin.

Vertailumuuttuja	Päästölähde ja -määrä		
	Säiliöauto 36t metaania	Säiliöalus 15 000t metaania	Varastosäiliö 25 000t metaania
Ihmisen ruoan tuotanto ja aineenvaihdunta (2t CO ₂ per vuosi=80 kg CH ₄)	450 ihmistä vuoden ajan	190 000 ihmistä	310 000 ihmistä
Ankara metsäpalo Suomessa per hehtaari (114t CO ₂ =4,6t CH ₄)	8 ha metsäpalo	3300 ha metsäpalo	5400 ha metsäpalo
Rekka-auton käyttö vuoden ajan (100t CO ₂ =4t CH ₄)	Yhdekseen rekkan käyttö vuoden ajan	4000 rekkan käyttö vuoden ajan	6000 rekkan käyttö vuoden ajan
Autolautan käyttö vuoden ajan (44000t CO ₂ per vuosi=1800t CH ₄)	Autolautan käyttö viikon ajan	Autolautan käyttö kahdeksan vuoden ajan	Autolautan käyttö neljäntoista vuoden ajan
Terästehtaan käyttö vuoden ajan (760000 t CO ₂ per vuosi=30000t CH ₄)	Terästehtaan käyttö 10 h	Terästehtaan käyttö puolen vuoden ajan	Terästehtaan käyttö noin vuoden ajan
Suomen maatalouden metaanipäästöt/ vuosi 100000t CH ₄	Suomen maatalouden metaanipäästöt 3 h aikana	Suomen maatalouden metaanipäästöt noin 2 kk aikana	Suomen maatalouden metaanipäästöt 3 kk aikana

7 Päästöjen vaikutukset taloudellisuuteen

Edellisen luvun esimerkkien perusteella päästöjen määrä nesteytettyyn maakaasuun liittyvissä onnettomuuksissa ovat verrattain pieniä verrattuna kuljetukseen ja käyttöön liittyviin päästöihin. Hankkeessa laskettiin kaasupäästön suora materiaalikustannus muutamille päästöskenaarioille. Voidaan sanoa, että onnettomuudessa häviävän kaasun kustannus suhteessa muihin seurauksiin ei liene merkittävä tekijä onnettomuuksiin varautumisessa. Suorat vaarat ihmisille ja omaisuudelle ohjaavat LNG-onnettomuuksiin varautumista riittävästi, kuten hyvästä turvallisuushistoriasta voidaan todeta. Kaasun tuotannon, kuljetuksen ja käytön aikaisiin päästöihin taloudellisilla tekijöillä on vaikutusta, ja toimijat pystyvät hakemaan kustannusoptimia viranomaismääräyksiensä puitteissa. Tämä korostaa asiantuntevan paikallisen viranomaisohjauksen ja kansainvälisten sopimusten noudattamisen tärkeyttä kaikille osapuolille.

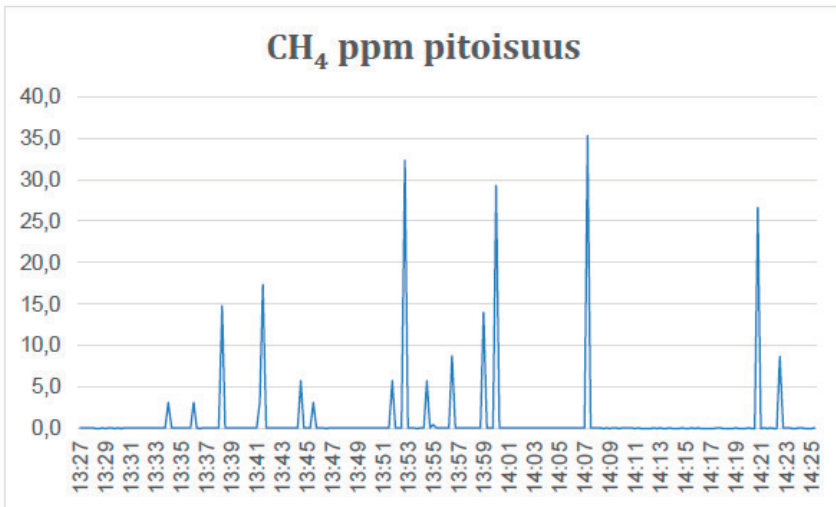
8 Mittaustekniikka ja tankkauksen päästöjen mittauksen tulokset

Hankkeessa suoritettiin pilottimittauksia metaanipäästöistä tankkauksen aikana, sillä pienten, mutta usein toistuvien päästöjen suuruusluokan tunteminen on tärkeää kun arvioidaan eri päästölähteiden tärkeyttä toisiinsa nähden. Mittausten suorittaminen on vaativaa, sillä pitoisuudet voivat olla pieniä. Sen vuoksi kirjallisuuskatsauksessa (Räisänen ym. 2016) tarkasteltiin LNG-päästöjä ja niiden mittausta.

LNG-tankkauksen ja moottorien pakokaasujen päästöjä voidaan mitata pääosin neljällä eri menetelmällä: IR-, FTIR-, ja FID-menetelmiin perustuvilla mittalaitteilla sekä adsorpoimalla näyte aktiivihieleen ja tutkimalla se laboratoriossa. Infrapuna-mittauksessa (infrared, IR-tekniikka) säteilylähteestä lähtevä valo kulkee sekä vertailukennon että näytekennon läpi ilmaisimelle. Ilmaisimien tunnistaa kennojen välisen eron, josta kaasun pitoisuus voidaan määrittää. Fourier-muunnokseen perustuvassa infrapunatekniikassa (Fourier Transform Infrared) voidaan määrittää yhdellä analyysaattorilla jatkuvatoimisesti useita eri yhdisteitä samanaikaisesti. Mittauksen tuloksena on spektri, josta voidaan määrittää, miten paljon eri komponentteja näytekäasussa esiintyy. FTIR-tekniikan etuna on se, että analysointi tapahtuu kosteista kaasuista, jolloin näytteen kuivauksen mahdolliset riskit poistuvat. Liekki-ionisaatioon perustuvassa mittaustekniikassa (FID-tekniikka, Flame Ionisation Detector) näytekäasun hiiliatomit palavat yhdessä polttokaasun kanssa ja ionisoituessaan hiiliatomit aiheuttavat mitattavan sähkövirran. Adsorptiossa kaasumainen aine muodostaa ohuen kalvon kiinteän aineen pintaan. Metaanipäästöjä mitattaessa käytetään aktiivihielesuodatinta näytteen adsorpoimiseen, jolla päästään hyvinkin tarkkaan, alle 1 ppm tarkkuuteen. Mittauskohde sijaitsee räjähdysvaarallisella alueella (tilan määre ATEX tai EX), jonne räjähdysuojamattomia mittalaitteita tai välineitä ei voi asentaa. Mittaukset pitääkin tehdä niin, että räjähdysuojamattomat laitteet sijaitsevat

alueen ulkopuolella ja mittauskohteessa on vain näytelinja, jonka läpi mahdollinen päästökaasu imetään mittalaitteille.

Yllä kuvattujen mittausvaihtoehtojen välillä tehtiin vertailu, jonka perusteella valittiin kenttämittauksen menetelmäksi liekki-ionisaatiomenetelmä (FID). Mittausraportti on tämän raportin liitteenä. Mittauksen tuloksista voidaan todeta, että metaanipitoisuuden (CH_4) keskiarvo oli säiliöautotankkauksen aikana alle 1 ppm, joka on erittäin pieni arvo. Käytännössä tankkaus ei aiheuta metaanipäästöä, joka voitaisiin luotettavasti mitata. Mittauksessa havaitut metaanimäärän nousut olivat hyvin pieniä ja lyhytkestoisia, kuten alla olevasta kuvasta voi todeta.



Kuvio 1. Tankkauksen aikana mitattu metaanipitoisuus (Piispa 2017).

9 Johtopäätökset ja suositukset

Johtopäätöksenä vertailuista muihin hiilidioksidi- ja metaanipäästölähteisiin nähden voidaan sanoa, että maakaasun (suuruusluokkaa 98 % metaania CH₄) tahalliset ja tahattomat päästöt Suomeen liittyvissä merikuljetusketjuissa ovat pieniä toiminnan volyyymiin nähden. Suuret päästöt ilmakehään LNG:n merikuljetusten, satamatoimintojen ja varastoinnin yhteydessä ovat epätodennäköisiä hyvän turvallisuustoiminnan takia. Tehdyt tarkastelut tukivat kirjallisuudessa vallitsevia käsityksiä onnettomuuspäästöistä.

Hankkeessa verrattiin merikuljetusketjun onnettomuuspäästöjä muihin yhteiskunnassa syntyviin päästöihin, mikä havaittiin hyväksi keinoksi tutkia riskien suuruusluokkaa. Hankkeen perusteella tutkimus- ja kehityspanosta kannattaa suunnata ennemminkin maakaasun käytön ja yhteiskunnan muiden toimintojen aiheuttamien päästöjen vähentämiseen. Polttoaineiden vertailuissa tulisi ottaa huomioon kasvihuonekaasujen lisäksi myös typpi-, rikki- ja partikkelipäästöt. Ympäristöraportoinnissa energian toimitusketjun kaikkiin osapäästöihin tulisi kiinnittää huomiota.

Mittaustekniikkaa ehdotetaan kehitettäväksi lähinnä käyttötilanteissa, joissa suurimmat päästöt syntyvät. Kiinnostavinta tämä lienee kaasua käyttävässä rekka-auto- ja laivaliikenteessä, joissa voitaisiin mitata pakokaasujen metaanipitoisuutta jatkuvasti. Tällöin saataisiin hyvä käsitys käytön reaalista metaanipäästöistä eri kuormitusolosuhteissa, mikä antaisi mahdollisuuden säätää polttoprosessia. Myös päästöjä kaasunpurkumaston kautta voisi olla hyödyllistä kartoittaa.

Maakaasuonnettomuudet ovat olleet harvinaisia, ja on oletettavaa, että kaasun vaarallisuuden takia sen riskienhallinta merikuljetusketjussa tulee maassamme pysymään hyvällä tasolla tulevaisuudessakin. Tämä suojaa myös ympäristöä tehokkaasti onnettomuuspäästöiltä.

Viitteet

Baik, J., Raghunathan, V., Witlox, H. 2006. Consequence Modelling of LNG Marine Incidents. ASSE-MEC-0306-15. American Society of Safety Engineers, Middle East Chapter. 7th Professional Development Conference. Bahrain. https://www.dnvgl.com/Images/Consequence%20Modelling%20of%20LNG%20Marine%20Incidents%202006_tcm8-13556.pdf

Baker, N., Creed, M. 1996. Stratification and rollover in liquefied natural gas storage tanks. IChemE Symposium series No. 139. <http://docplayer.net/23223268-Stratification-and-rollover-in-liquefied-natural-gas-storage-tanks-background.html>

Bonilla Martinez, J.M. 2013. Liquefied Natural Gas Road Tanker Explosion. LNG 17 International Conference & Exhibition on Liquefied Natural Gas. Houston. http://www.gastechnology.org/Training/Documents/LNG17-proceedings/Safety-4-Juan_M_Bonilla.pdf

Bonilla Martinez, J.M. Belmonte Pérez, J., Marín Ayala, J.A. 2012. Analysis of the explosion of a liquefied-natural-gas road-tanker. Seguridad y Medio Ambiente. Year 32 N 132. <http://www.mapfre.com/fundacion/html/revistas/seguridad/n127/en/article2.html>

CH IV International. 2014. Safety History of International LNG Operations. TD-02109 Revision 13, March 2014. <http://www.ch-iv.com/assets/documents/safety-history.pdf>

De Backer, P. 2015. Report on the joint investigation of the collision between the LNG Carrier mts AL ORAIQ and the mv FLINTERSTAR off the coast of Belgium on 6 October 2015 with the total loss of the mv FLINTERSTAR. <http://www.philippedebacker.be/sites/default/files/Report%20Collision%20Flinterstar%20Al%20Oraiq%20final.pdf>

Endresen, P, Landro, E., Kalberg, B. 2014. Hydrocarbon leak in the process plant at Hammerfest LNG. Petroleumstilsyne. Norway. http://www.psa.no/getfile.php/1328102/Tilsyn%20p%C3%A5%20nettset/Granskinger/2014_18_Granskingsrapport%20Hammerfest%20LNG-eng.pdf

FECYT - Spanish Foundation for Science and Technology. 2010. "Every person emits two tons of carbon dioxide a year through eating, Spanish study finds." ScienceDaily. ScienceDaily, 2 November 2010. <www.sciencedaily.com/releases/2010/11/101102131108.htm>

Frame, J. 2010. Handling the cryo factor. Industrial Fire Journal. Third Quarter 2010. www.hemmingfire.com

Gasum, 2015a. Finngulf LNG – LNG-terminaali Inkooseen. Ympäristövaikutusten arviointiselostus. Espoo. http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Asiointi_luvat_ja_ymparisto_vaikutusten_arviointi/Ymparistovaikutusten_arviointi/YVAhankkeet/Gasum_Oyn_LNGterminaalin_rakentaminen_Inkooseen/Gasum_Oyn_LNGterminaalin_rakentaminen

Gasum. 2015b. BALTICCONNECTOR 2015. Ympäristövaikutusten arviointiselostus. Maakaasuputki Suomen ja Viron välillä. Espoo. <http://www.ymparisto.fi/balticconnectorYVA>

Hightower, M., Gritzo, L., Luketa-Hanlin, A., Covan, J., Tieszen, S., Wellman, G.; Irwin, M., Kaneshige, M., Melof, B.; Morrow, C., Ragland, D. 2004. Guidance on Risk Analysis and Safety Implications of a Large Liquefied Natural Gas (LNG) Spill Over Water. SANDIA REPORT SAND2004-6258. Sandia National Laboratories.

Hightower, M., Petti, J., Lopez, C. 2013. Risk mitigation of LNG ship damage from large spills. Sandia National Laboratories. 17th International Conference & Exhibition On Liquefied Natural Gas (LNG 17). April 17, 2013. Houston. http://www.gastechnology.org/Training/Documents/LNG17-proceedings/5-6-Mike_Hightower.pdf

Holden, D. ym. 2014. Liquefied Natural Gas (LNG) Bunkering Study. DNV GL – Report No. PP087423-4, Rev. 3. Maritime Administration. <http://www.marad.dot.gov/wp-content/uploads/pdf/DNVLNGBunkeringStudy3Sep14.pdf>

International Group of LNG Importers GIIGNL. 2017. Basic Properties of LNG. http://www.kosancriplant.com/media/5648/1-lng_basics_82809_final_hq.pdf

International Group of LNG Importers GIIGNL. 2015. Rollover in LNG Storage Tanks. http://www.giignl.org/sites/default/files/PUBLIC_AREA/Publications/rollover_in_lng_storage_tanks_public_document_low-res.pdf

International Maritime Organization (IMO). 2007. Formal Safety Assessment – Liquefied Natural Gas (LNG) Carriers. Maritime Safety Committee. MSC 83/INF.3. http://www.rina.org.uk/hres/msc%2083_inf_3.pdf

Japan Transport Safety Board 2014. Marine Accident Investigation Report MA2014-12. http://www.mlit.go.jp/jtsb/eng-mar_report/2014/2013tk0001e.pdf

Japan Transport Safety Board 2013. Marine Accident Investigation Report MA2013-11. http://www.mlit.go.jp/jtsb/eng-mar_report/2013/2013tk0012e.pdf

Jaskari A. 2015. Ajankohtaisia kaasualan turvallisuuskysymyksiä. Kaasualan neuvottelupäivät, 20.5.2015. Tukes. Helsinki. http://www.kaasuyhdistys.fi/sites/default/files/pdf/esitykset/20150521_neuvottelupaivat/Jaskari.pdf

Jaskari, A. 2017. Tukes. Kommunikointi 2017

Koskela, S.; Korhonen, M., Seppälä, J., Häkkinen, T ja Vares, S. 2011. Materiaalinäkökulma rakennusten ympäristöarvioinnissa. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 16. Helsinki. http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/tiedotteet/rakentamisen-ymparistovaikutuksilla-suuri-yhteiskunnallinen-merkitys/SYKE-ra_16_2011_materiaalinakokulma_rakennusten_ymparistoarvioinnissa.pdf

Liquefiedgascarrier.com. 2017. Rollover effects onboard a liquefied gas carrier. <http://www.liquefiedgascarrier.com/rollover.html>

Lindblad, J. & Verkasalo, E. 2001. Teollisuus- ja kuitupuuhakkeen kuiva-tuoretiheys ja painomittauksen muuntokertoimet. Metsätieteen aikakauskirja 3/2001: 411–431.

Luketa, A., Hightower, M., Attaway, S. 2008. Breach and Safety Analysis of Spills Over Water from Large Liquefied Natural Gas Carriers. Report no. SAND2008-3153. U.S. Department of Transportation. Washington D.C.

Outokumpu Stainless 2013a. LNG_YVA_selostus_sivut_1_31 www.ymparisto.fi/download/noname/%7B0C5BD4CA-1651-4380-B22C.../44029

Outokumpu Stainless 2013b. LNG_YVA_selostus_sivut_32_107.pdf www.ymparisto.fi/download/noname/%7B0C5BD4CA-1651-4380-B22C.../44029

Parfomak, P.W., 2008. Liquefied Natural Gas (LNG) Infrastructure Security: Issues for Congress. CRS Report for Congress. Washington D.C. <https://www.hsdl.org/?view&did=486464>

Peterson, D.F. 2002. BLEVE_ Facts, Risk Factors, and Fallacies - Fire Engineering 4.1.2002. <http://www.fireengineering.com/articles/print/volume-155/issue-4/features/bleve-facts-risk-factors-and-fallacies.html>

Piispa, M. Päästömittaukset- Vähähiiliset satamat –hanke, Gasum 6.3.2017. Kaakois-Suomen ammattikorkeakoulu Oy, Kymilabs. Kotka.

Planas-Cuchi, E., Gasulla, N.; Ventosa, A., Casal, J. 2004. Explosion of a road tanker containing liquified natural gas. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 17, 4, 315-321. Elsevier

Prairie, Y., Duarte C., 2007. Direct and indirect metabolic CO₂ release by humanity. Biogeosciences, 4, 215–217, 2007 <http://www.biogeosciences.net/4/215/2007/bg-4-215-2007.pdf>

Quillen, D. 2012. LNG Safety Myths and Legends. Natural Gas Technology -Investment in a Healthy U.S. Energy Future. Houston. <http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/02/ngt/quillen.pdf>

Ramsden, N., Roue, R., Mo-Ajok, B., Langerak, G., Watkins, S., Peeters, R. 2014. LNG Masterplan for Rhine-Main-Danube. Emergency and incident response study. LNG Masterplan Consortium. Sub-activity 2.4 Technical Evidence & Safety & Risk Assessment. Deliverable 2.4.4. Havenbedrijf Rotterdam N.V. http://www.lng-masterplan.eu/images/gallery/Deliverables/D_244_Emergency_and_incident_response_study_v1.0_FINAL_2015-4-15.pdf

Rukke, S., Katchmar, P. 2016. Failure Investigation Report – Liquefied Natural Gas (LNG) Peak Shaving Plant, Plymouth, Washington. US Department of Transportation. Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration.

Räisänen, H. Porin satama. Keskustelu kevät 2017.

Räisänen, P., Piispa, M., Nykänen, M. 2016. Nesteytettyä maakaasua käyttävän meriliikenteen kasvihuonekaasujen päästölähteitä. Turun ammattikorkeakoulun raportteja 234. ISBN 978-952-216-642-5. Turun ammattikorkeakoulu. Turk

Sievänen, R. Luonnonvarakeskus. Kommunikointi 2017.

Sievänen, R., Asikainen, A., Vapaavuori, E. ja Ilvesniemi, H. 2012. Suomen metsäenergia- ja hiilivarat ja niiden käyttö ilmastonmuutokseen sopeutumisessa. Julkaisussa Bioenergia, ilmastonmuutos ja Suomen metsät. Metlan työraportteja 240 <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2012/mwp240.htm>. ISBN 978-951-40-2378-1 (PDF)

Skangas 2017a. Tornion LNG-terminaali - Skangas.pdf. <http://www.skangas.com/fi/lng-portfoliomme/hankkeet/tornion-lng-terminaali/>

Skangas 2017b, Coral Energy. <http://www.skangas.com/fi/lng-portfoliomme/laivat/coral-energy/>

Society of International Gas Tanker & Terminal Operators Limited (SIGGTO). 2012. Guidance for the Prevention of Rollover in LNG Ships. Bermuda. http://www.sgmf.info/media/5648/prevention_of__rollover_on_lng_ships.pdf

Tilastokeskus 2017 Suomen virallinen tilasto (SVT): Kasvihuonekaasut [verkkójulkaisu].ISSN=1797-6049. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 9.6.2017]. Saantitapa: <http://www.stat.fi/til/khki/>.

Tervonen, J., Ristikartano, J., Sorvoja, S. 2011. Tieliikenteen ajokustannusten yksikköarvojen määrittäminen. Taustaraportti 2010. Liikennevirasto, liikennejärjestelmäosasto. Helsinki. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 33/2010. ISBN 978-952-255-039-2.

Tukes 2015. LNG-terminaalit – uutta Suomessa ja Tukesin valvonnassa <http://verkko-lehti.tukes.fi/lng-terminaalit-uutta-suomessa-ja-tukesin-valvonnassa/>. Helsinki

U.S. Department of Energy. 2012. Liquefied Natural Gas Safety Research. Report to Congress, May 2012.

Vanem, E. et al. 2008. Analysing the risk of LNG carrier operations. Reliability Engineering and System Safety 93. pp. 1328–1344

Vilkko L. 2017. Skangas. Keskustelu kesä 2017.

VTT 2009. LIPASTO. Liikenteen päästöt. Varsinaisella perävaunulla varustetut yhdistelmät. Kokonaismassa 60 t, kantavuus 40 t. Maantieajo. <http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/tavaraliikenne/tieliikenne/kavptie.htm>

Liite: Tankkauksen aikana tehtyjen päästömittausten raportti

PÄÄSTÖMITTAUKSET

VÄHÄHIILISET SATAMAT -HANKE

GASUM

6.3.2017

Kotkassa 22.3.2017

Raportin laatija tekn. Marko Piispa

Raportin tarkastaja Ins. Mikko Nykänen

1. MITTAUSKOHDE.....	3
2. MITTAUSTEN TARKOITUS	3
3. MITTAUSTULOKSET.....	3
4. MITTAUSAIKA JA –OHJELMA	3
5. MITTAUKSIEN SUORITTAJAT	4
6. TIEDONKERÄYS.....	4
7. MITTAUSTULOKSET JA NIIDEN KÄSITTELY	4
8. TULOSTEN TARKASTELU.....	4
8.1 MITTAUSEPÄVARMUUS	4
9. MITTAUSMENETELMÄT	4
10. MITTAUKSISSA KÄYTETYT LAITTEET	5
11. MITTAUSPAIKKA JA MITTAUSTEN OLOSUHTEET	5
12. YHTEYSHENKILÖ.....	5

1. MITTAUSKOHDE

Mittausten kohteena oli Gasum Oy:n omistama LNG-tankkausaseman Porvoon jalostamon alueella. Mittausten aikana tankkausasemalla täytettiin LNG:tä rekka-auton perävaunuun. Samalla rekalla ja tankkausletkuilla tankataan myös mm. laivoja.

2. MITTAUSTEN TARKOITUS

Mittausten tarkoituksena oli selvittää LNG tankkauksesta aiheutuvat metaanipäästöt.

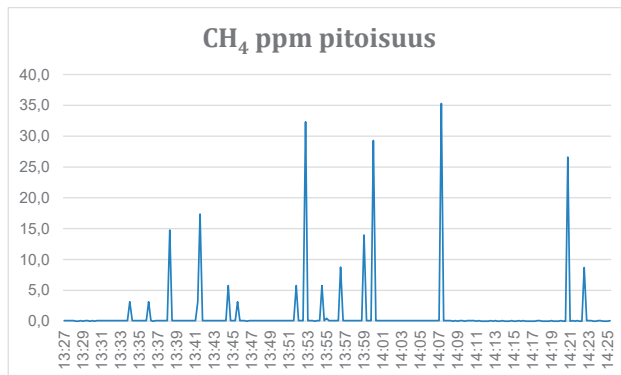
3. MITTAUSTULOKSET

Alla olevissa taulukoissa on esitetty mittaustulokset graafisesti

Taulukko 1. CH₄ mittaustulokset.

	CH ₄ ppm	
		Epävarmuus
Maksimiarvo	35,3	± 20 %
Minimiarvo	0	± 20 %
Keskiarvo	0,98	± 20 %

Mittaustulosten keskiarvo on niin pieni, että se menee mittausepävarmuuteen. Syntyneet mittauspikit ovat taas niin lyhyitä, että ne eivät juurikaan nosta keskiarvoa.



Kuvassa mittaustulokset graafisessa muodossa.

4. MITTAUSAIKA JA -OHJELMA

Mittaukset suoritettiin seuraavan aikataulun mukaisesti

6.3.2017	klo 11:00 – 13:00	Mittauslaitteiden asennus ja kalibrointi
	klo 13:00 – 14:25	Mittaukset
	klo 15:00 – 16:00	Mittauslaitteiden kalibroinnin tarkastus ja poisvientä

5. MITTAUKSIEN SUORITTAJAT

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulusta mittauksiin osallistui ins. Mikko Nykänen ja tekn. Marko Piispa. Mittauspaikalla yhdyshenkilönä oli käytönvalvoja Petri Voutilainen

6. TIEDONKERÄYS

Mittausdata kerättiin dataloggerille ja pöytäkirjoihin.

7. MITTAUSTULOKSET JA NIIDEN KÄSITTELY

Kaikki mittauksien pohjalta tehdyt laskut on suoritettu excel-ohjelmalla.

Mittauksien tulokset pätevät ainoastaan mitatuille näytteille.

Selosteen saa kopioida vain kokonaan. Muussa tapauksessa kopiointista on saatava kirjallinen lupa testauslaboratoriolta.

8. TULOSTEN TARKASTELU

Mittauksien tuloksia voidaan pitää onnistuneina. CH₄-pitoisuuden keskiarvo oli tankkauksen aikana alle 1 ppm, joka on todella pieni arvo. Yhteenvedon voidaan todeta, että käytännössä tankkaus ei aiheuta CH₄ päästöä, joka voitaisiin luotettavasti mitata. Mittauksissa käytettiin myös hankkeelle hankittua GX-2009 mittari, joka ei pystynyt mittaamaan näin pieniä pitoisuuksia.

Yhteenvedon voidaan todeta että LNG-tankkaus ei aiheuta ympäristöön CH₄-päästöjä normaali tankkaustilanteessa. Mittauksissa havaitut CH₄ piikit olivat hyvin pieniä ja lyhyt kestoisia että ne eivät aiheuta käytännössä ympäristöpäästöjä.

8.1 MITTAUSEPÄVARMUUS

Mittauksen kokonaisepävarmuus lasketaan tarkoitukseen laadituilla ja validoituilla Excel-työkirjoilla. Virhetarkastelu suoritetaan todennäköisyyslaskentaan perustuen. Päästöjen laskennassa käytettävät kaavat on linearisoitu, jotta virheet, jotka oletetaan riippumattomiksi satunnaismuuttujiksi, voidaan yhdistää. Kaikki käytettävät virheet edustavat 95 %:n luottamusväliä.

Mittausepävarmuuden laskennassa on huomioitu

- näytteenoton virhe (näytteen edustavuus)
- analysaattorien epätarkkuus
- kaasun kosteuden ja kaasun tiheyden määrittämisen epävarmuus

Näiden tekijöiden virheet määritetään laskentaa varten jokaiselle mittaukselle ja syötetään laskenta-arkille. Epävarmuudet perustuvat yli kymmenen vuoden aikana mittauksissa kertyneeseen kokemukseen (sisältäen laboratorioiden väliset vertailumittaukset). Epävarmuutta ei määritetä yhdessä mittauksessa olevien arvojen vaihtelun perusteella.

9. MITTAUSMENETELMÄT

Jatkuvatoimisissa mittauksissa käytettiin seuraavia menetelmiä ja standardeja:

Komponentti	Menetelmä	Standardi
CH ₄	FID	SFS 5624

10. MITTAUKSISSA KÄYTETYT LAITTEET

Mittauksissa käytettiin seuraavia mittalaitteita ja kalibroitinkaasuja.

Komponentti	Mittalaite	Mittausalue	Kalibroitinkaasu
CH ₄	THC MODEL 51	0 – 500 ppm	0 – 30 ppm

Mittalaitteet ovat kalibroitu ja lineaarisuustestattu

11. MITTAUSPAIKKA JA MITTAUSTEN OLOSUHTEET

Olosuhteen mittausten aikana.

Mittaus		Yksikkö
Lämpötila	-4,2	°C
Paine	101,8	kPa
Kosteus	34,0	%
Tuuli	2,0	m/s

Mittauspaikka sijaitsi terminaali alueella kahden ison LNG-säiliön välittömässä läheisyydessä, tankkaus letku oli n 3 metriä pitkä. Mittaussondin pää oli tankkausletkujen liitosten lähellä, josta se oli havainnut kaikki CH₄-päästöt jos sellaisia olisi syntynyt.

12. YHTEYSHENKILÖ

Lisätietoja mittauksista tai tuloksista antaa Marko Piispa, puhelin 044 702 8253 tai sähköpostitse marko.piispa@xamk.fi