



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

Inseneriteaduskond

Soojusenergeetika õppetool

The report on implementation of LNG bunkering safety measures on the basis of a practical example in Tallinn Old City Harbour

Ohutusmeetmete rakendamise analüüs LNG punkerdamisel praktilise näite põhjal Tallinna Vanasadamas

MAGISTRITÖÖ

EI70LT

Autor taotleb
tehnikateaduse magistri
akadeemilist kraadi

Üliõpilane: Sergei Danilov

Üliõpilas kood: 121918

Juhendaja: Igor Krupenski

Tallinn, 2018

AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.

Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Töös kasutatud kõik teiste autorite materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis assistent Igor Krupenski juhendamisel

“.....”2018 a.

Töö autor

..... allkiri

Töö vastab magistritööle esitatavatele nõuetele.

“.....”2018 a.

Juhendaja

..... allkiri

Lubatud kaitsmisele.

..... eriala/õppekava kaitsmiskomisjoni esimees

“.....”2018 a.

..... allkiri

MAGISTRITÖÖ ÜLESANNE

2018. aasta kevadsemester

Üliõpilane: Sergei Danilov, 121918MASM

Õppekava: Soojusenergeetika MASM02/09

Eriala: Soojusenergeetika

Juhendaja: Igor Krupenski

Konsultandid: Virgo Vinkel, Tallink Grupp AS, Technical Superintendent;
Torbjörn Samuelsson, Safedays Cryogenic, technical director

MAGISTRITÖÖ TEEMA:

Ohutusmeetmete rakendamise analüüs LNG punkerdamisel praktilise näite põhjal Tallinna Vanasadamas

Lõputöös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1.	Sisendmaterjalide hankimine ja sissejuhatava osa koostamine	15.03.2018
2.	LNG ladustamise ja punkerdamise tehnoloogia	30.03.2018
3.	Veeldatud maagaasiga töötamisel esinevate ohtude kirjeldus, meetmed nende riskide minimeerimiseks	21.04.2018
4.	M/L Megastari kirjeldus, selle LNG vastuvõtu osa ja punkerdamise korralduse ohutusnõuete analüüs	05.05.2018
5.	Järelduste koostamine, analüüsi tulemuste kirjeldamine	01.06.2018

Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid:

Ohutusmeetmete rakendamine LNG punkerdamisel praktilise näite põhjal. Väljakutsed M/L Megastar LNG punkerdamisel ja nende lahendamine. Punkerdamise protsessi optimeerimine ja arendus.

Täiendavad märkused ja nõuded: puuduvad

Töö keel: eesti

Kaitsmistaotlus esitada hiljemalt 14.05.2018

Töö esitamise tähtaeg 28.05.2018

Üliõpilane Sergei Danilov

/allkiri/ kuupäev.....

Juhendaja Igor Krupenski

/allkiri/ kuupäev.....

Konfidentsiaalsusnõuded ja muud ettevõttepoolsed tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

Autorideklaratsioon	1
Magistritöö ülesanne	2
Sisukord.....	3
Eessõna.....	5
Lühendite ja tähistete loetelu	6
Sissejuhatus	7
1. LNG KUI PERSPEKTIIVNE KÜTUS MERETRANSPORDIS	9
1.1. Regulatiivne baas	9
1.2. LNG kui kütuse eripära	11
1.2.1. Gaasilahvatus.....	12
1.2.2. Lombituli	12
1.2.3. Leekjuga	12
1.2.4. Plahvatus.....	13
1.2.5. Lämpumine	13
1.2.6. Haprus ja külmakahjustused	13
1.2.7. LNG kinnine ummistus	14
1.2.8. Keeva vedeliku paisuvate aurude plahvatus (BLEVE)	14
1.3. Laevadel kasutatavate LNG hoiustus mahutite tüübid.....	15
1.3.1. IMO Type A independent tanks	15
1.3.2. IMO Type B independent tanks.....	16
1.3.3. IMO Type C independent tanks.....	17
2. LNG PUNKERDAMINE	19
2.1. Punkerdamise meetodid	19
2.1.1. Truck-to-Ship.....	19
2.1.2. Terminal-To-Ship	22
2.1.3. Ship-To-Ship	24
2.3. LNG punkerdamise ohutusalane ettevalmistus	28
2.3.1. Potentsiaalsete ohtude ennetamine	28
2.3.2. Tehnilised meetmed ohuolukorras.....	28

2.3.3. Tagajärgede minimeerimine ja likvideerimine	29
3. LNG PUNKERDAMISE PROTSESS JA OHUTUSMEETMED M/L MEGASTAR	
NÄITEL	30
3.1. Üldine kirjeldus	30
3.2. M/L Megastar ja LNG vastuvõtu, hoiustamise ja realiseerimise süsteem	30
3.3. LNG punkerdamise ehk vastuvõtu jaamad.....	34
3.4. Punkerdamise ettevalmistusprotsess.....	37
3.4.1. HAZID (Hazard Identification)	37
3.4.2. HAZOP (Hazard and Operability Study).....	38
3.4.3. Riskianalüüs	39
3.4.3.1. BLEVE ohualade arvutus.....	42
3.5. Punkerdamise protsessi kirjeldus.....	43
3.5.1. Üldine iseloomustus	43
3.5.2. Personal ja punkerdamise nõuded.....	44
3.5.3. Megastari ja Eesti Gaasi treileri vaheline tehniline liides.....	46
3.6. AS Eesti Gaasi LNG treilerid	47
3.6.1. ESD (Emergency Shut Down) süsteem	48
3.7. LNG tarned	50
3.7.1. Maagaasi veeldamise tehas Pihkvas - "КСИГ Псков"	50
3.7.2. LNG kvaliteet ja sellega seotud probleemid punkerdamisel	51
3.8. LNG punkerdamise operimeerimine ja ohutustaseme tõstmine.....	56
3.9. AS Eesti Gaasi planeeritav LNG punkerdamise laev	56
Kokkuvõte	62
Summary	64
Kasutatud kirjanduse loetelu	66

EESSÕNA

Käesolev magistritöö teemavalik põhineb autori tööalasest tegevusest ettevõttes AS Eesti Gaas. Autori osalusel toimus Balti riikides esmakordse LNG punkerdamise ettevalmistamine ja läbiviimine, mille käigus ilmnis mitmeid mõtteid valdkonna arenguks. Tööd juhendas Tallinna Tehnikaülikooli lektor Igor Krupenski. Suur osa töös kasutatavast materjalist on hangitud projektdokumentatsioonidest, kuid samuti abistasid konsultatsioonidega kolleegid Tallink Grupist Virgo Vinkel ning Norra konsultatsiooniettevõttest Safedays Torbjörn Samuelsson. Autor tänab nii eelnimetatud kui ka kõiki kaudselt aidanud inimesi abi ja panustatud aja eest.

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

LNG – Veeldatud maagaas („Liquefied Natural Gas“)

LFL – Alumine süttivuspiir („Lower flammability level“)

UFL – Ülemine süttimispiir („Upper flammability level“)

TRV – Soojuspõhine kaitseventiil („Thermo relief valve“)

BAC – Murdub krüogeenliides („Break away coupling“)

DCC – Kuiv krüoogenne ühendus („Dry cryogenic coupling“)

PBU – Rõhutõstmise soojusvaheti („Pressure build-up unit“)

ESD – Avariiväljalülituse süsteem („Emergency shut down“)

ADR – Maanteedel ohtliku kaubaveo konventsioon („European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road“)

BLEVE – Keeva vedeliku paisuvate aurude plahvatus („Boiling liquid evaporated vapours explosion“)

PIC – Vastutav isik („Person in charge“)

SIMOPS – üheaegsed operatsioonid („Simultaneous Operations“)

SISSEJUHATUS

LNG-d (Liquefied Natural Gas) ehk veeldatud maagaasi kui alternatiivset kütust meretranspordis on aina rohkem hakatud käsitlema kui keskkonnanõuetele vastavuse strateegiana nii avamerel kui ka sadamates. Märkimisväärne ning vahetu mõju vääveloksiidide (SO_x), lämmastikoksiidide (NO_x) ja tahkete osakeste heitmete vähendamisele LNG kasutamisel meretranspordis on mänginud motiveerivat rolli ka asjakohase regulatiivse raamistiku loomisel.

Rangemad nõuded meretranspordi kütuste puhtusele sunnivad laevaomanikke ja –operaatoreid aina enam otsustama LNG-d kasutavate laevade kasuks – kas uusehitistena või ümberehitatuna.

Õlipõhiste kütustega võrreldes omab LNG keemilis-füüsikalisi omadusi, mis muudavad selle käsitlemise ja hoiustamise tehniliselt keerukaks. Madal krüogeenne temperatuur koos tuleohtliku gaasi omadustega mõjutab tehnoloogilisi protsesse ja varustuse valikut terves kütuse tarneahelas alates tootmisest ja transpordist ning kuni kütuse punkerdamiseni ja põlemiskambrisse suunamiseni.

Käesolev töö keskendub LNG kui keskkonnasõbraliku meretranspordi kütuse punkerdamisega seotud ohtude ja väljakutsete uurimisele. Töö esimene osa kirjeldab, milliste riskidega tuleb arvestada veeldatud maagaasiga töötamisel ning milliseid meetmeid kasutatakse nende ohtude vältimiseks. On välja toodud kolm praktikas kasutatavat LNG punkerdamise meetodi kirjeldust koos näidete ja võrdlustega. Selle uurimiseks on eelkõige kasutatud asjakohaseid standardeid ja klassiühingute poolt väljastatud soovituslikke materjale laevaomanikele, sadamavõimudele ja kütusetarnijatele.

Töö teises osas analüüsib autor, kuidas on LNG punkerdamine korraldatud Tallinna Vanasadamas Tallinki mootorlaevale Megastar, milliste probleemide ja väljakutsetega on silmitsi seistud algusperioodil ning millised muudatused on tehtud nende lahendamiseks.

Vaatamata sellele, et M/L Megastar saabus Eestisse uusehitisena 2017 aastal, on seda laeva käsitletud juba kahes Tallinna Tehnikaülikooli üliõpilase lõputöös.

Alexey Shkryabini magistritöö „LNG kui kütus meretranspordis“ räägib seadusandlikest ja majanduslikest võimalustest veeldatud maagaasi kasutamiseks transpordikütusena meretranspordis maailmas koos prognooside stsenaariumitega.

Anna Podgurskaja bakalaureusetöö „LNG kasutamine meretranspordis „Megastar“ laeva näitel“ kirjeldab üldiselt, millised laevad ja kuidas kasutavad Läänemere regioonis kütusena veeldatud maagaasi ning peatub pikemalt Megastari iseloomustusel. Samuti analüüsib ja võrdleb autor oma töös veeldatud maagaasi omadusi teiste meretranspordi kütustega.

Kui eelnimetatud tööd keskenduvad pigem LNG kui alternatiivkütuse uudsusele ja selle eelistele, siis käesolev magistritöö analüüsib vahetuid väljakutseid ja objektiivselt ohte selle kütusega töötamisel praktikas.

Kuna tegemist on endiste Nõukogude riikide seas esmakordse kogemusega, siis oli punkerdamise käivitamiseks tehtud väga põhjalik ohutusala ettevalmistus, mis autori arvates vajab erilist tähelepanu. Selle osa informatsioon on hangitud nii projektdokumentatsioonist kui ka autori isiklikust kogemusest Megastari punkerdamise projekti käivitamise tööst ettevõttes AS Eesti Gaas.

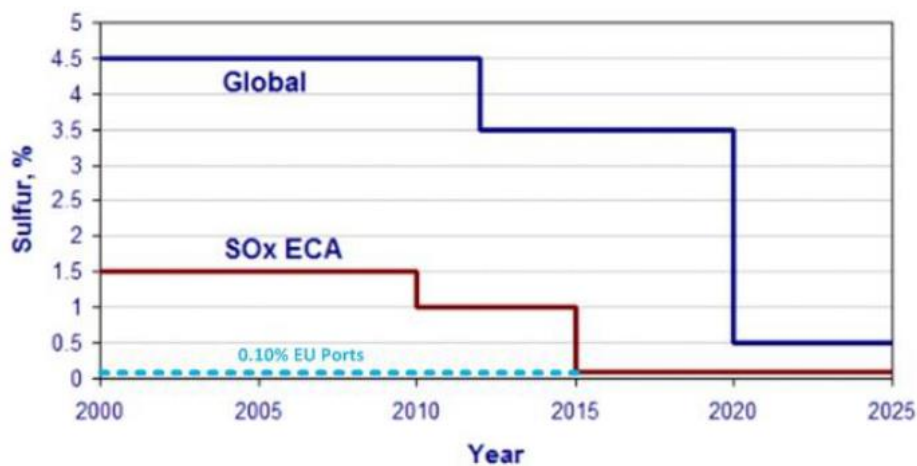
M/L Megastari punkerdamine on korraldatud Truck-to-Ship meetodiga, mis on suhteliselt paindlik moodus projekti algfaasi jaoks. Käesoleva töö käigus aga selgub, et üleminek Ship-to-Ship meetodile tõstab oluliselt protsessi efektiivsust ja ohutuse taset.

Antudtöö juhendaja kuulub Eesti Standardikeskuse liikmete hulka, siis on planeeritud töö materjale kasutada LNG punkerdamise standardi välja töötamiseks, mis tänasel päeval puudub.

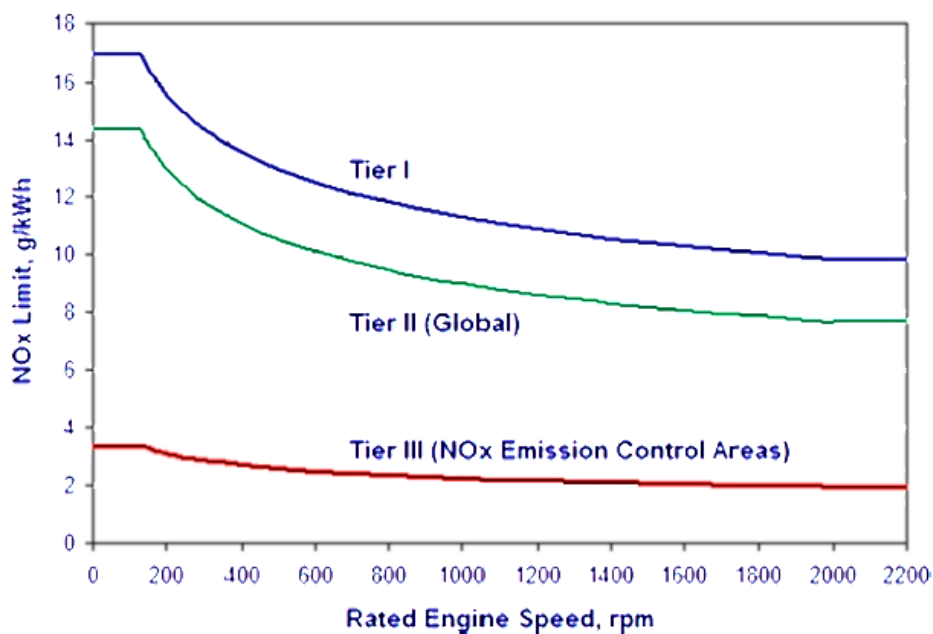
1. LNG KUI PERSPEKTIIVNE KÜTUS MERETRANSPORDIS

1.1. Regulaatiivne baas

Rahvusvahelise konventsiooni MARPOL 73/78 lisa VI määrab järk-järgulised ja astmelised käsitlused alandamaks SO_x ja NO_x heitmeid reguleerimisalades ning ülemaailmselt (Joonised 1. ja 2.). Konventsiooni alusel on kehtestatud Euroopas heitkoguste kontrolli piirkonnad, millesse kuuluvad Põhja-Ameerika rannik, Läänemeri, Inglise kanal ja Põhjameri.

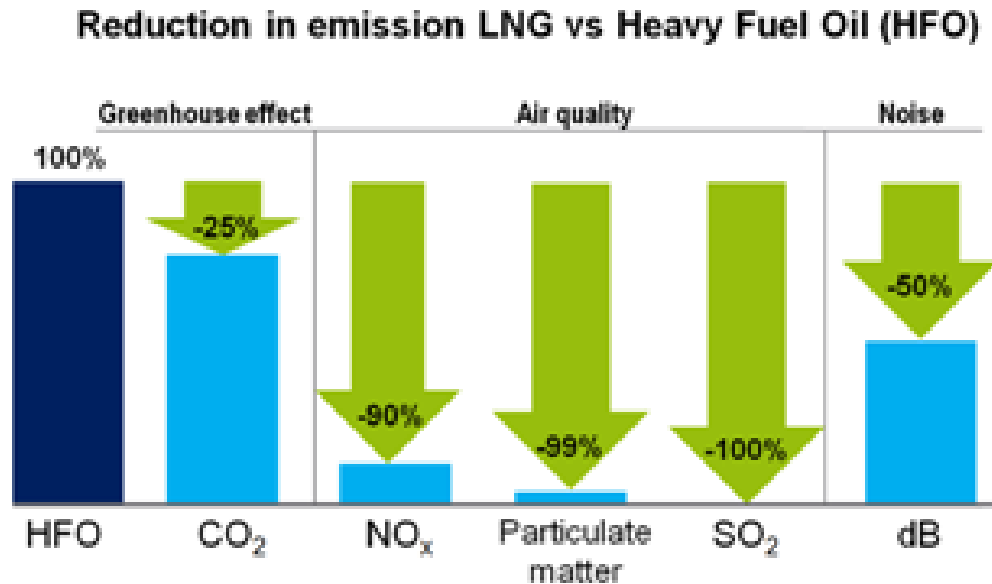


Joonis 1. Lubatud väävlisisalduse kogus meretranspordi kütustes maailmas ja heitmete kontrollialas SECA (MARPOL lisa VI) [3]



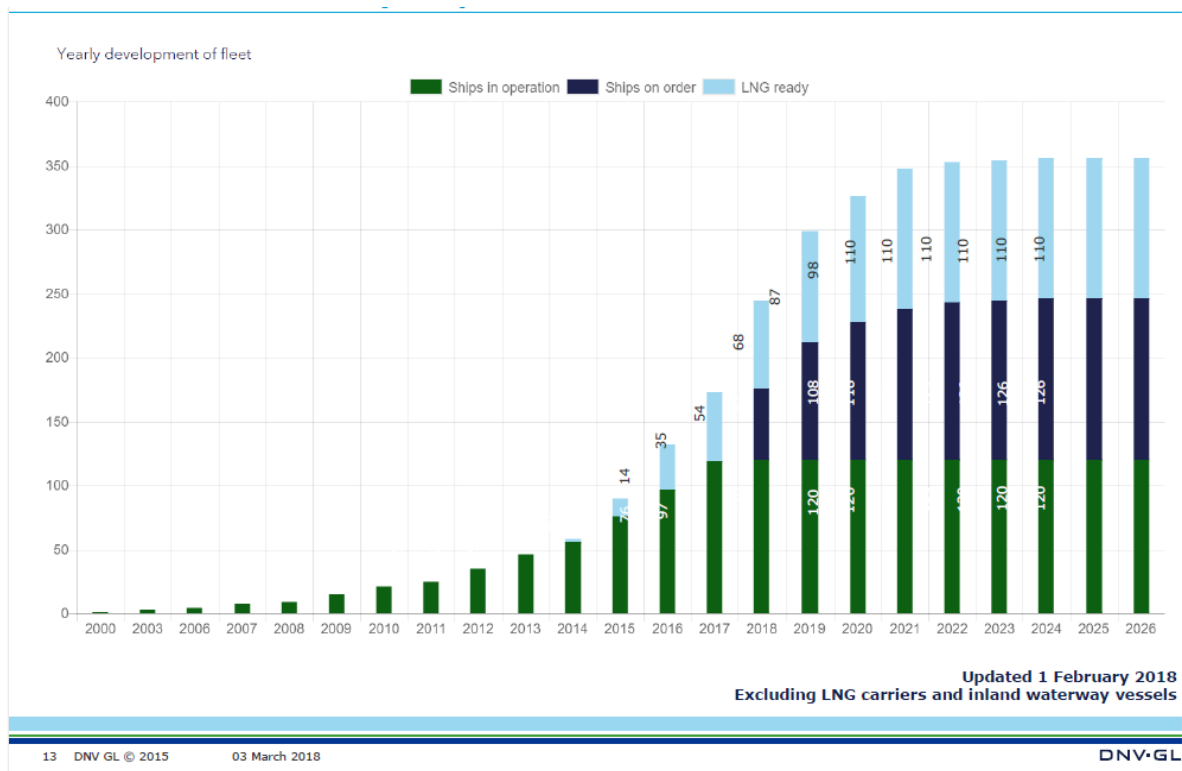
Joonis 2. Laevamootorite vastavus NO_x heitmete kogusele sõltuvalt pöörete arvust (MARPOL lisa VI) [3]

Laevaomanikel tuleb otsustada, kas hakata kasutama madala väävlisisaldusega puhtaid, aga kallimaid õlikütuseid, paigaldada puhastusseadmed või võtta kasutusele LNG-l töötavad laevad. Joonis 3 ilmestab selgelt, milline heitmete vähenemine saavutatakse LNG kasutamisel võrreldes raskeküttega HFO.



Joonis 3. Heitmete ja mürataseme võrdlus LNG ja raske küttega kasutamisel [10]

LNG kui meretranspordi kütuse perspektiivikust näitab ka klassiühingu DNV/GL läbiviidud uurimustöö, milles kogutud andmete põhjal ilmneb, et laevaomanike huvi LNG-l töötavate laevade vastu kasvab ning selliste laevade tellimuste arv kasvab iga aastaga (Joonis 4.) Tegemist on analüütilise prognoosiga, kuid paljud eksperdid on arvamusel, et väävliheitmete ülemaailmne piirang aastal 2020 võib selle prognoosi stsenaariumit veelgi kiirendada.



Joonis 4. DNV GL klassiühingu poolt väljastatud ülevaade töös olevate ning tellitud LNG laevade arvu kohta [2]

1.2. LNG kui kütuse eripära

Selleks, et analüüsida LNG punkerdamise protsessi ja sellega seonduvaid ohte, on vaja eelnevalt peatuda LNG keemilis-füüsikalistel omadustel, mis teevad selle kütuseainulaadseks. LNG omaduste tõttu seonduvad sellega mahavoolamisel ja/või inimeste või masinatega kokkupuutumisel teistsugused ohud kui „tavaliste“ õlipõhiste punkerkütustega. Tegemist on krüogeense vedelikuga, mille keemistemperatuur on atmosfäärirõhul sõltuvalt selle koostisest -166°C ja -155°C vahel (Graafik 1). Aurustumisel vabanev maagaas (Boil-Off Gas) koosneb põhiliselt metaanist, sõltuvalt leiukohast 70-95%. Ülejäänud osa moodustavad etaani, propaani butaani ja lämmastiku segu ning väiksemas koguses pikemate ahelatega süsivesinikke. LNG käitlemisel esinevad põhilised ohud on seotud gaasi tuleohtlikkusega, võimalike külmakahjustustega ning kontrollimatust aurustumisest tulenev rõhutõus. Alljärgnevas kirjeldatakse peamisi ohtusid, mis on iseloomulikud just LNG-le.

1.2.1. Gaasilahvatus

Aurustunud LNG ehk maagaasi süttimiseks on vajalik selle segunemine õhuga vahemikus 4,5 (LFL) - 16,5% (UFL). Kui segu on liiga lahju või liiga rikas, siis maagaas ei sütti. Samuti on süttimiseks vajalik süüteallikas, mille rolli võib täita tavapärasest elektriseadmest pärinev säde. Isesüttimistemperatuur on maagaasil 560°C. Aurustunud gaas põleb suhteliselt aeglaselt ereda leegiga ja kõrge soojus kiirgusega (tavaliselt 200 – 300 kW/m²). Gaasilahvatus tekib siis, kui gaasipilv põleb ilma olulise ülerõhu tekketa. Gaasipilv saab süttida ainult servast, jõudes õhus levides süüteallikani (nt lahtine leek, sise põlemismootor, säde). Gaasipilve serva süttimisel lahvatab leek tagasi üle kogu gaasipilve süttiva massi (st selle osa, mis jääb süttimisvahemikku – UFL-i ja LFL-i vahele). Seejärel põleb gaasipilv UFL-i piiril, kuni kogu süsivesinike mass on ära põlenud. Gaasilahvatuse kestus on suhteliselt lühike, aga see võib stabiliseeruda lekke asukohas püsivaks leekjoaks või lombituleks. [19]

1.2.2. Lombituli

Suuremahulise maha voolamise korral ei suuda õhk piisavalt kiiresti soojust edasi kanda, et kuigi palju LNG-d aurustuks, seetõttu jääb osa mahavoolanud vedelgaasist tõenäoliselt lombina vedelasse olekusse. Lombituli võib tekkida ka pärast gaasilahvatust. LNG lombituli eraldab tugevat soojuskiirgust – pindadele avalduv kiirgusvõimsus on ligikaudu 200 kW/m² (kaitseriietuses inimene suudab tavaliselt taluda lühiajalist kiirgusvõimsust 12 kW/m²). Põlemise lisandumisel aurustumisele kahaneb lomp tunduvalt väiksemaks, kuni saavutab lombitule püsimise jaoks vajaliku läbimõõdu. [19]

1.2.3. Leekjuga

Leekjoad on põlevad gaasi või atomiseeritud vedeliku joad, mille kuju sõltub aine inertsist selle vabanemisel. Leekjuga tekib tavaliselt gaasi või kondensaadi vabanemisel kõrgsurve-seadmetest, nt survepumbast, survetorustikust vms. Samuti võib leekjuga tekkida kõrge rõhu all oleva ja lahustunud gaasi sisaldava vedeliku vabanemisel, kuna gaas lahvatab põlema ja paiskab vedeliku peente piiskadena laiali. Tavaliselt juhtub see rõhul üle 2 bar. [19]

1.2.4. Plahvatus

Aurupilve plahvatus võib tekkida siis, kui suur tuleohtlik kogus süsivesinikuaurusid süttib piiratud ruumis (nt suletud ruumis). Avatud tingimustes ehk vabas õhus piiranguid ei ole ja katsed on näidanud, et gaasiline metaan põleb suhteliselt aeglaselt ja kogu selle paisumine on suunatud ülespoole. Metaanipilves levib leek aeglaselt. Plahvatuse jaoks küllaldast leegi kiirenemist ei toimu, kui selleks ei ole piisavat paisumise piirangut ehk kitsenevat või suletud ruumi. [19]

1.2.5. Lämpumine

Maagaas ei ole mürgine. Kui aga maagaas lekib suletud või poolsuletud alasse, siis võib tulemuseks olla sealviibijate lämbumine hapnikupuuduse tõttu, mis tekib, kuna metaani ja õhu segunemisel tekkivas segus on hapniku osakaal väiksem kui segunemata õhus. Kontsentratsioonil 50 mahuprotsenti (metaani õhus) tekivad lämbumisinähtud nagu hingamisraskused, ning hingeldamine koos reaktsioonikiiruse vähenemise ja lihaste koordinatsiooni nõrgenemisega. [19]

1.2.6. Haprus ja külmakahjustused

Maagaasi veeldamisel suureneb selle tihedus kuni 600 korda ning langeb temperatuur vahemikku -130 kuni -160°C , sõltuvalt rõhust, mistõttu kujutab LNG termilist ohtu kõigile, kes sellega vedelal kujul kokku puutuvad. Sattudes atmosfääritingimustesse hakkab LNG kõrge temperatuurierinevuse tõttu intensiivselt aurustuma samuti tekitades inimesele ohtlikult madala temperatuuriga aurupilve. Kokkupuude ilma vajalike enesekaitsevahenditeta tekitab põletuskahjustusi. Samas ei ole inimesed ainsad, kellele äärmiselt madalad temperatuurid ohtlikud on. Kui roostevaba teras ja alumiinium jäävad painduvaks, siis süsinikteras ja madalamad terasesulamid muutuvad hapraks ja võivad suure tõenäosusega praguneda või murduda. Seetõttu peab standardset laevaterast võimaliku LNG-ga kokkupuute eest kaitsma ja soojustama. [19]

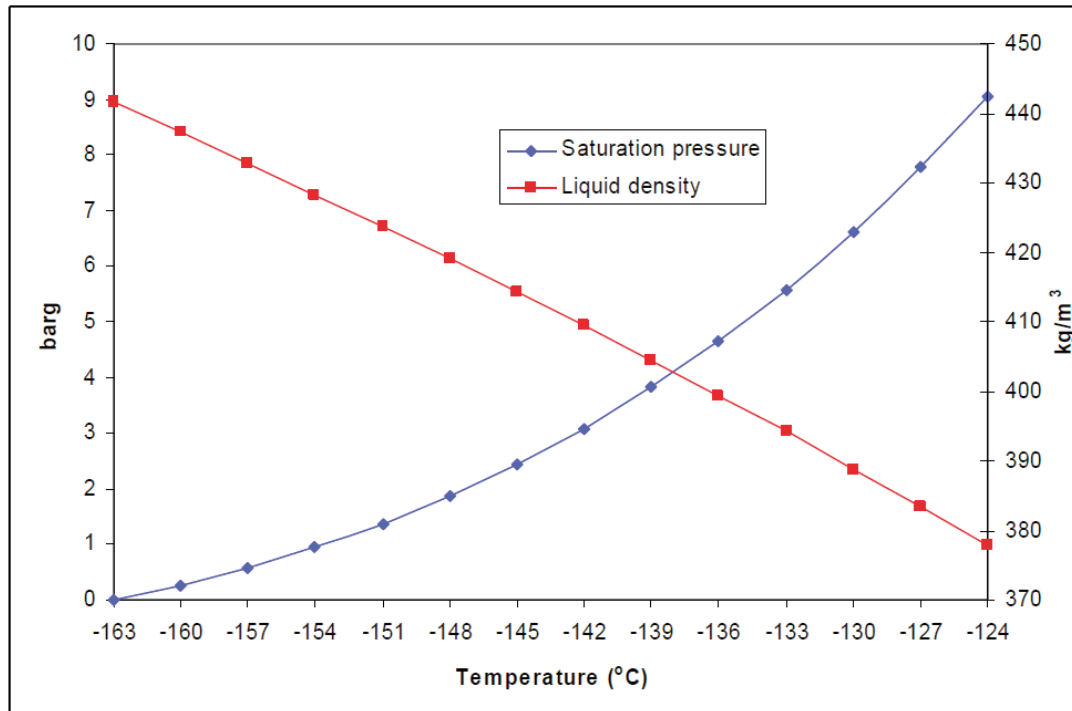
Selliste krüogeensete temperatuuride käsitlemiseks kasutatakse LNG varustuses spetsiaalseid roostevabasid nikkelteraseid ning järgitakse aeglase ning järk-järgulise jahutamise põhimõtteid.

1.2.7. LNG kinnine ummistus

Kui torusse või kusagile pumpamissüsteemi jääb LNG-d, siis tekitab see gaasilisse olekusse üle minnes lokaalse ülerõhu, mis võib potentsiaalselt põhjustada toru lõhkemise ja sellest tulenevalt suure koguse maagaasi või vedela LNG väljavoolamise, olenevalt purunemiskohast ja töötingimustest. Seetõttu peab kõik torud ja mahutid varustama soojuspõhiste kaitseventiilidega TRV-ga. Süsteemide muutmisel või hooldamisel tuleb alati ettevaatusabinõusid rakendada, sest kahe klapi vahele jäänud vedel LNG võib toru lõhki lüüa. [19]

1.2.8. Keeva vedeliku paisuvate aurude plahvatus (BLEVE)

Keeva vedeliku paisuvate aurude plahvatus (BLEVE) on nähtus, mis seondub survemahuti äkilise katastroofilise lõhkemisega. Kõigil sellistel juhtudel on survemahutile langenud leegi soojuskiirgus. BLEVE tekib siis, kui leegi soojus tõstab mahuti siserõhku, eriti kohas, kus mahuti sisu mahutit ei jahuta, kuni mahuti äkitselt lõhkeb. Sellisel lõhkemisel tekib lööklaine ja rõhk mahutis langeb kohe. Selleks ajaks on vedeliku temperatuur oluliselt üle keemistemperatuuri ja see aurustub kiiresti, tekitades suurel hulgal aurasid, mis süttivad niipea, kui nende kontsentratsioon õhus jõuab süttimisvahemikku. See tekitab omakorda tulekera, mis põhjustab kiiresti eemale paiskuvate aurude kaudu täiendava lööklaine ja ka tugeva soojuskiirguse. [19]



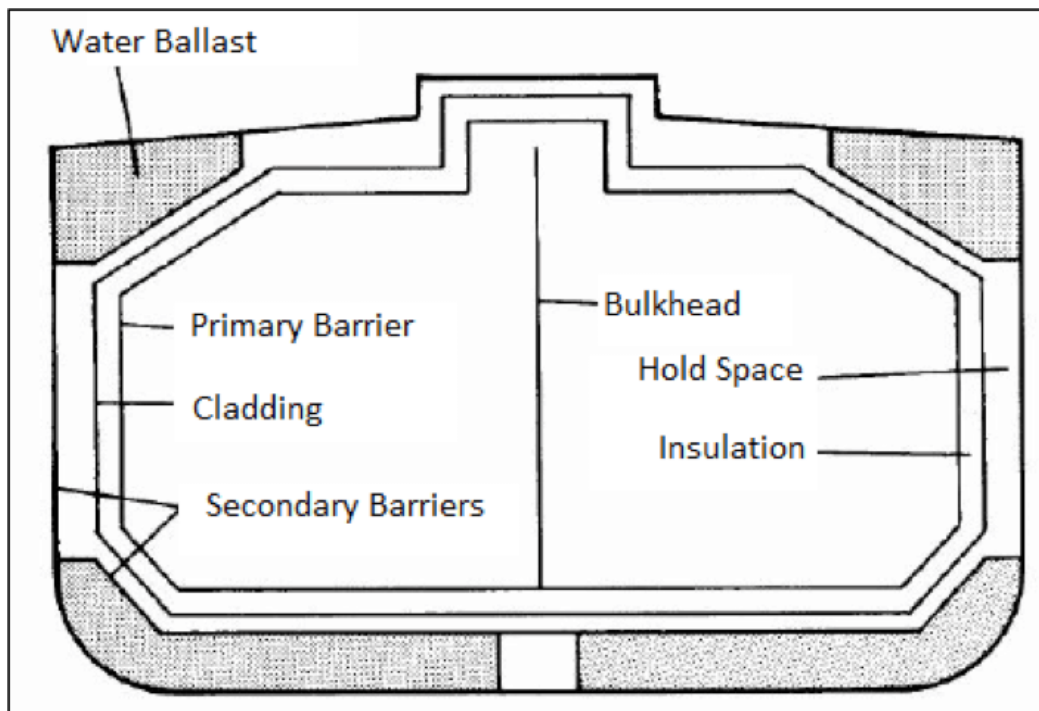
Graafik 1. LNG füüsikalised omadused: rõhu ja tiheduse suhe temperatuurile [3]

1.3. Laevadel kasutatavate LNG hoiustus mahutite tüübid

Üks suuremaid väljakutseid LNG tehnoloogias on LNG kuluefektiivne ja ohutu hoiustamine ning transport. Rahvusvaheline koodeks „Gaasi või muu madala leekpunktiga kütust kasutavate laevade ohutuse kohta“ (IGF Code) jagab gaasiliste kütuste mahutid kolmeks tüübiks:

1.3.1. IMO Type A independent tanks

Need mahutid on disainitud kõige levinumate konstruktsiooniliste laevaehtus meetodite alusel ning maksimaalne lubatav gaasiaurude rõhk nendes ei tohi ületada 0,07 MPa. Kujult on need prismaatilised ning neid on kerge sobitada laevakere sisse, seetõttu saavutatakse kõrge ruumieffektiivsus. Suhteliselt madala rõhupiirangu tõttu on A-tüüpi mahutiga laevad varustatud keerukamate ja kallimate rõhu kontrollimise süsteemidega nagu gaaside taaskondenseerimine või aurustunud gaasi komprimeerimine. Tähelepanuväärseim nõue A-tüüpi mahutitel on IGF Code järgi sekundaarbarjääri olemasolu, mille eesmärk on ohjata ükskõik, millist leket kuni 15 päeva. Sageli kasutatakse selle barjääri loomiseks laevakere konstruktsioonides olevat ruumi (Joonis 1.3.1) [1]



Joonis. 1.3.1 A-tüüpi mahuti ristlõige ja sekundaarbarjääri näide. [1]

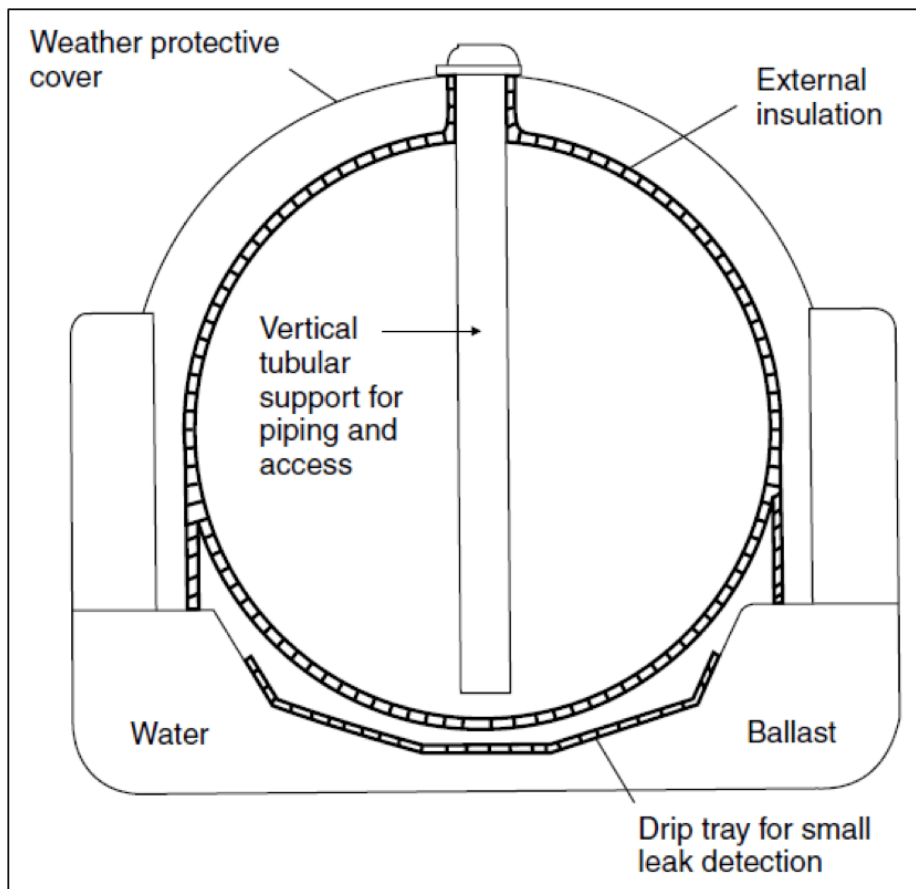
Antud tüüpi mahuteid kasutatakse suuremahulistes tankerites LNG transportimiseks leiukohtadest või tehastest lokaalsetesse terminalidesse.

1.3.2. IMO Type B independent tanks

B-tüüpi mahutite disaini sisu seisneb selles, et see võimaldab avastada mõra mahuti seinas oluliselt varem enne tegelikku purunemist. Selliste mahutite projekteerimiseks kasutatavad meetodid hõlmavad erinevatel temperatuuridel ja rõhkudel esinevate stressi tasemete määramist, paagi struktuuri väsimuse eluea kindlakstegemist ja pragude levikuparameetrite uurimist (Joonis 1.3.2) [17]

B-tüüpi mahuti ristlõige on sfäärilise kujuga ja see asetseb laeva keres nii, et ainult pool või suurem osa sfäärist asetseb peadeki tasandi all. Mahuti välispinnad on kaetud isolatsiooniga ja peadeki kohal asetsev mahuti osa on kaitstud ilmastikukindlate kihtidega. Mahuti ülaosast kuni põhjani paigaldatakse vertikaalne torukujuline tugi, milles asuvad torustik ning ligipääsuredelid. Mahuti all asetseb spetsiaalne tilkumisalus, millele koguneb igasugune mahuti leke ning millel asuvad temperatuuriandurid tuvastavad lekkinud LNG olemasolu. B-tüüpi

mahutitel peetakse seda tehnoloogiat osaliseks sekundaarbarjääriks. Need mahutid on kõige levinumad suurte LNG koguste transportimisel. [1]



Joonis 1.3.2 B-tüüpi mahuti ristlõige ja sekundaarbarjääri näide. [1]

1.3.3. IMO Type C independent tanks

Need mahutid on olemuselt krüogeensed surveanumad, mille projekteerimise põhikriteeriumiks on aururõhk. C-tüüpi mahuteid disainitakse rõhule üle 2 bari ning kujult on need kas silindrilised või silindrilised kahepoolsed (nn Bi-Lobe) (Joonis 1.3.3). Madalaim aururõhk C-tüüpi mahutile arvutatakse valemiga:

$$P_o = 0,2 + AC(p_r)^{1,5} \text{ (MPa) [16], milles}$$

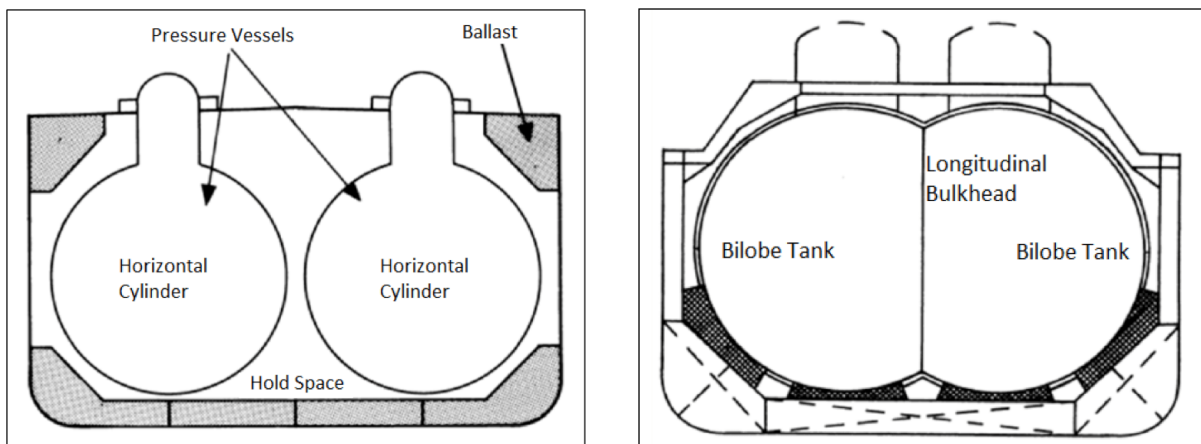
$$A = 0,00185\left(\frac{\sigma_m}{\Delta\sigma_A}\right)^2, \text{ kus}$$

σ_m – esmane disainitud stress

$\Delta\sigma_A$ – lubatav dünaamiline stress

C – mahuti mõõtude karakteristik

p_r – mahutis kasutatava LNG tihedus



Joonis 1.3.3 C-tüüpi mahutid laeva ristlõikes: silindriline ja Bi-Lobe kujuline [1]

Seda tüüpi mahutitele ei ole nõutav sekundaarbarjäär, pigem kasutatakse ära mahutit ümbritsevat ruumi täites seda inertgaasiga või kuiva õhuga. Selles paigutatud õhu koostise andurid tajuvad ka väiksemat LNG leket, mis võimaldab ennetada suuremat purunemist.

C-tüüpi mahutid on kõige levinumad LNG punkerdamise tehnoloogias, samuti LNG-d kütusena kasutatavad laevad on enamusest varustatud just nendega. Nende eeliseks on suhteliselt madal hind, madalad käitlemiskulud ning tugev isolatsioon, mis võimaldab LNG-d hoida mahutis pikka aega ilma lisakuludeta tekkivate aurude käsitlemiseks. C-tüüpi mahuteid isoleeritakse väliskeskkonnast tiheda polüuretaan kattedkihiga või vaakumisolatsiooniga. Viimast moodust kasutatakse silindriliste mahutite korral ning selle efektiivsus on esimesest oluliselt suurem. [1]

2. LNG PUNKERDAMINE

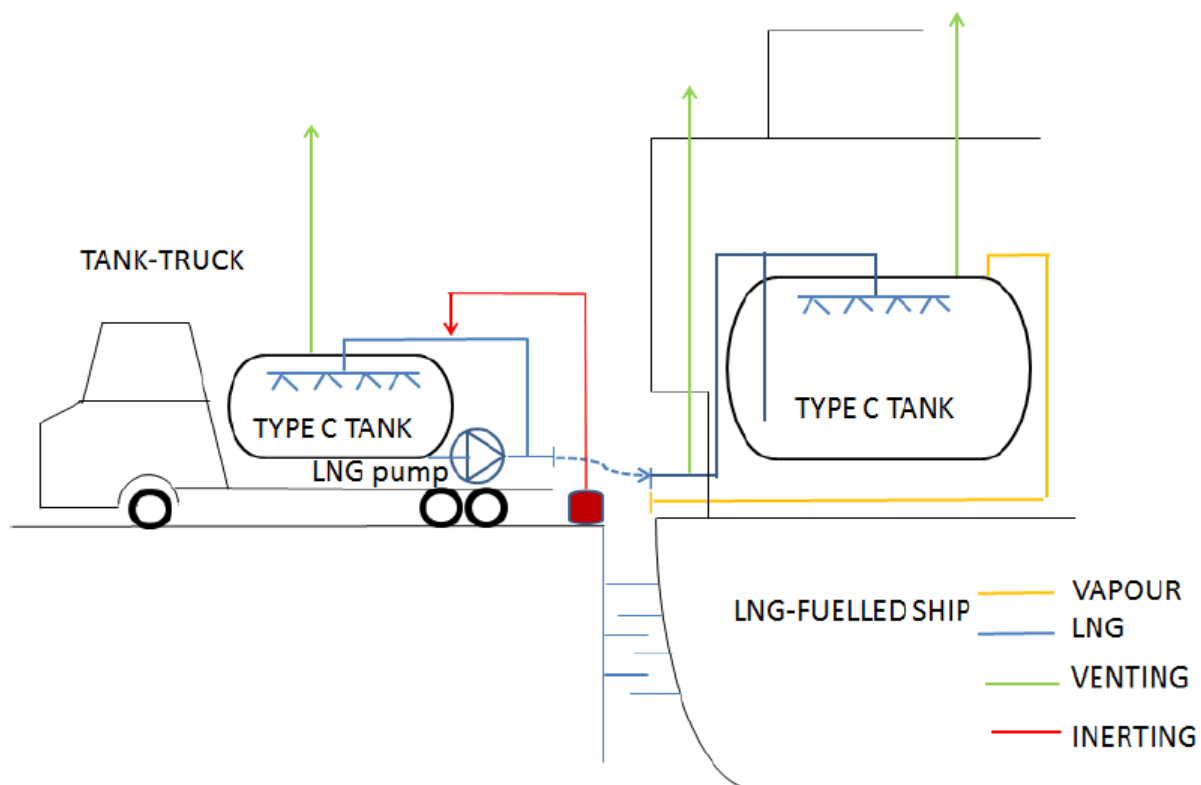
LNG punkerdamiseks nimetatakse kindlat tüüpi operatsiooni, mille käigus toimub LNG kütuse ülekandmine tarneallikast LNG-l töötava laeva mahutisse. Sõltuvalt vajalikust voolukiirusest ja punkerdatavast kogusest toimub see kas pumba abil või rõhkude vahe arvelt. Protsessi on kaasatud ka seotud sidusrühmade esindajad - laeva personal, kütusetarnija, sadama esindajad, ohutuspersonal ja võimuesindajad. Üks olulisemaid väljakutseid selles protsessis on sobivate ja ohutute liideste loomine kütuse ülekande ajal.

2.1.Punkerdamise meetodid

LNG tarnimine laevale võib toimuda erinevate meetoditega, sõltuvalt logistilisest korraldusest ja erinevatest tehnilistest faktoritest. Kõige levinum meetod koos erinevate variatsioonidega on LNG punkerdamine tsisternautost ehk Truck-to-Ship. Selline meetod on kõige paindlikum ning sobib kõige paremini punkerdamise pilootprojektidele. Laevast laevale (Ship-to-Ship) ja terminalist laevale (Shore-To-Ship) meetodid kasutatakse väljakujunenud tarnelogistika korral ning suuremate mahtude ja vooluhulkade puhul. [8]

2.1.1. Truck-to-Ship

Selle meetodi puhul kasutatakse spetsiaalseid LNG poolhaagiseid, mis toovad paindlikult tellitud koguse LNG-d sadamasse, kohe sildunud laeva juurde. LNG vool poolhaagisest laevamahutisse toimub kas krüogeense pumba või rõhkude vahe arvelt läbi painduva vooliku.



Joonis 2.1.1 Truck-to-Ship punkerdamise põhimõtteline skeem [20]

Joonise 2.1.1 näitab, et kõige praktilisem moodus on kasutada poolhaagiseid krüogeensete pumpadega, mis võivad tekitada voolukiirust üle 1000 l/minutis rõhuga kuni 20 bari. Poolhaagised tarnivad sõltuvalt leiukohast LNG-d tavaliselt rõhu all 2-4 baari, umbes samasuguse rõhu all hoiustatakse seda ka laevamahutites. Rõhku laevamahutis on võimalik reguleerida sõltuvalt täitmise moodusest - kas mahuti alt või ülevalt. Nagu ilmneb ka Joonisel 2.1.1, täitmine mahuti ülemisest osast toimub läbi LNG pihustamise, mis toob kaasa mahutis oleva aurufaasi osalise kondenseerumise ja rõhulangu. Peale igat punkerdamise operatsiooni peavad kõik torustikud jääma gaasist puhtaks, seetõttu kasutatakse inertgaasina rõhu all olevat lämmastikuballooni, millega puhutakse süsteem läbi. [3]

Tüüpilised punkerdamise kogused ja voolukiirused	Eelised	Puudused
$V \sim 50-100 \text{ m}^3$ $Q \sim 40-60 \text{ m}^3/\text{h}$	Paindlikkus opereerimisel	Piiratud punkerdamise maht: 40-50m ³ ühe poolhaagise maht
	Suhteliselt madalad nõuded infrastruktuurile	Limiteeritud voolukiirus: kuni 1200 l/h
	Võimalus kohandada punkerdatavaid koguseid vastavalt kliendi vajadustele (poolhaagiste arvuga)	Oluline mõju teistele samaaegselt toimuvatele operatsioonidele, milles on kaasatud reisijad või kaubatransport
	Kerge kohaneda erinevatele ohutusnõuetele	Piiratud liiklus kai peal (seoses LNG poolhaagiste viibimisega)
	Sobilik erinevate LNG pilootprojektide teostamiseks	Maanteetranspordiga seotud piirangud, nagu massipiirang, teeload, liikluspiirangud jms).

Tabel 2.1. Truck-to-Ship punkerdamise meetodi iseloomulikud näitajad ning eelised ja puudused [3]

See meetod on kõige laiemalt levinud, seetõttu omab see ka mitmeid variatsioone, näiteks:

- Poolhaagiste ühendamise paralleelselt läbi ühenduskollektori (koos pumbamooduliga või ilma) (Pilt 2.1)
- Mitme poolhaagisega jadaühenduses
- Ühe treileri pumba kasutamine teise treileri mahuti tühjendamiseks
- Pumba asemel rõhkude erinevusega tekitatud vooluga



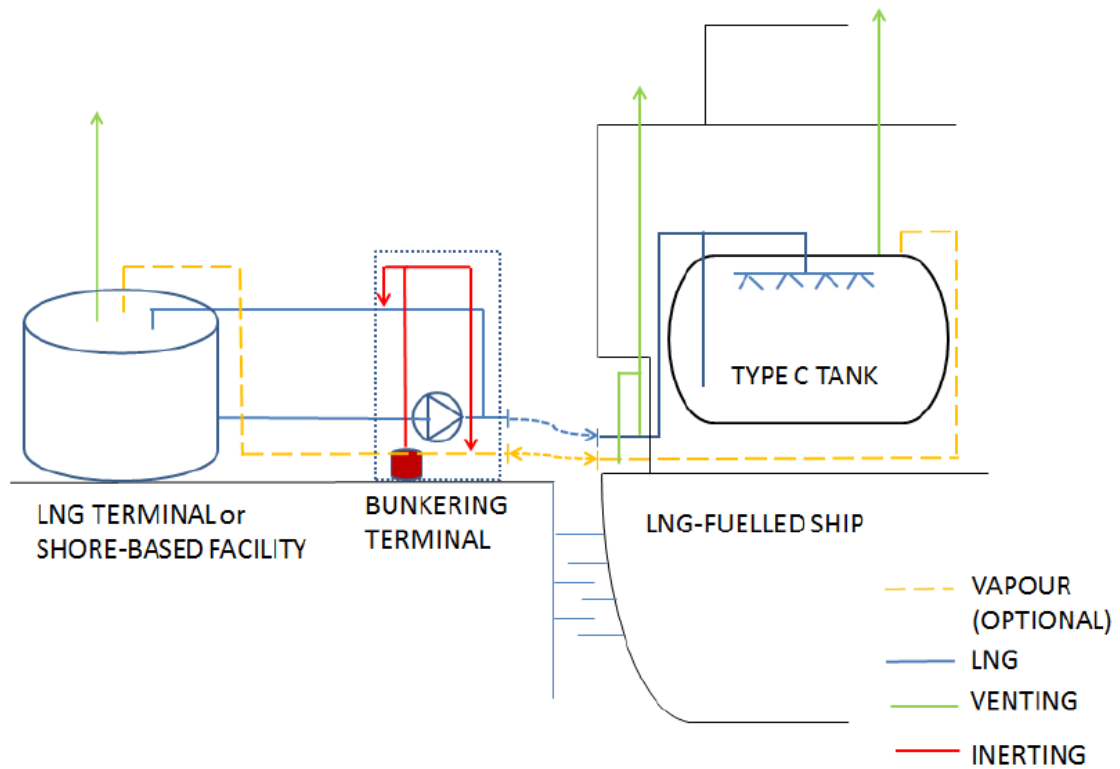
Pilt 2.1. Truck-To-Ship punkerdamise variatsioon, kasutades spetsiaalset moodulit/kollektorit, mis võimaldab üheaegselt tühendada mitut poolhaagist [Marinelog]

2.1.2. Terminal-To-Ship

Selle meetodi eelduseks on punkerdamise terminali olemasolu sadama kai vahetus läheduses (joonis 2.1.2 ja Pilt 2.2). Kuna LNG-d ei ole selle omaduste tõttu võimalik klassikalise toruühendusega kaugemale transportida, kasutatakse isoleeritud torusid, mis teevad selle oluliselt kulukamaks ja keerulisemaks.

Tüüpilised punkerdamise kogused ja voolukiirused	Eelised	Puudused
$V \sim 500-20000 \text{ m}^3$	Võimalus tarnida laevadele suures koguses LNG-d suhteliselt kõrge voolukiirusega	LNG-d tankiv laev peab punkerdamise protseduuriks minema spetsiaalselt terminali sadamasse
$Q \sim 1000-2000 \text{ m}^3/\text{h}$	Kasulik lahendus sadamatele luua pikaajaline ja kindel LNG tarnevõimekus	Terminali täitmise logistika LNG-ga võib olla keerukas
		Üldjuhul pikemaajalised lepingud terminalidega on nõutavad, et LNG saadavust terminalis garanteerida

Tabel 2.2 Terminal-to-Ship punkerdamise meetodi iseloomulikud näitajad ning eelised ja puudused [3]



Joonis 2.1.2. Shore-to-Ship punkerdamise põhimõtteskeem [20]



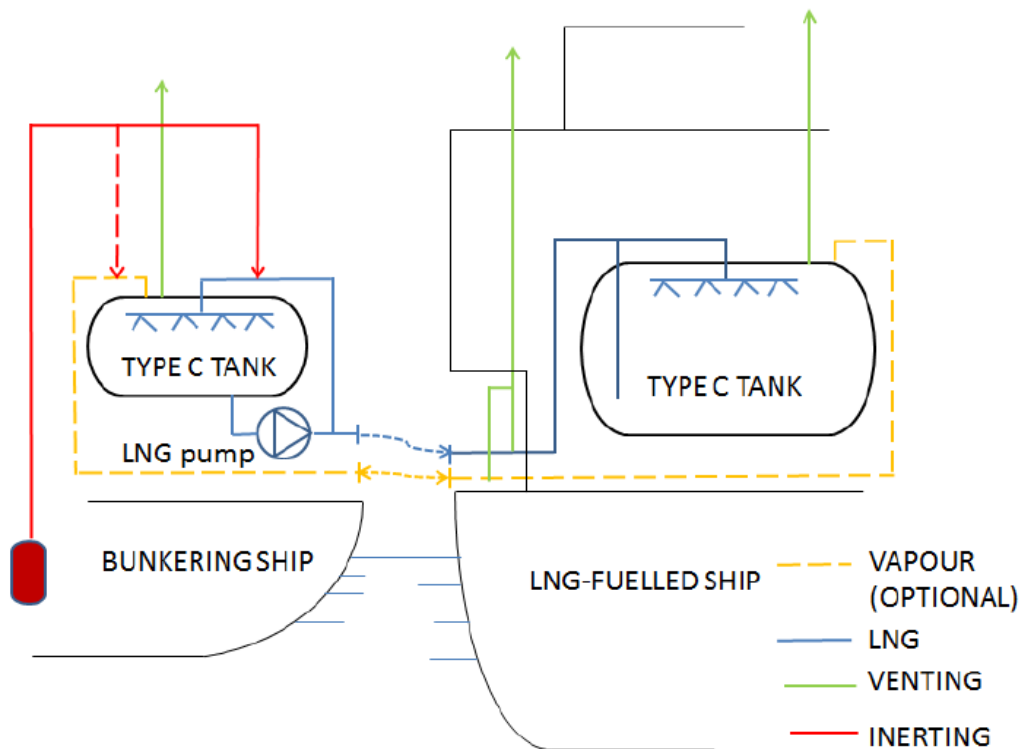
Pilt 2.2. LNG punkerdamise terminal Taanis Hirtshalsis. Fjörddline laevade teenindamiseks. [Fjörddline]

2.1.3. Ship-To-Ship

Seda meetodit loetakse oma paindlikkuse tõttu kõige perspektiivsemaks LNG punkerdamise turul (Joonis 2.1.3 ja Pilt 2.3).

Tüüpilised punkerdamise kogused ja voolukiirused	Eelised	Puudused
V≈100-6500 m ³	Üldjuhul ei häiri samaaegseid operatsioone (SIMOPS) reisijate peale- ja mahaminemisega ja kaubavahetusega	Suhteliselt kõrge esialgne investeeering, võttes arvesse punkerdamislaeva disaini ja ehitust ning kõrged opereerimiskulud.
Q≈500-1000 m ³ /h	Laevaomanike poolt eelistatuid meetodeid, eriti väikese seisuaajaga liinidel sadamates	Sadamate poolt võivad olla seatud piirid siseneva punkerlaeva suurusele.
	Suuremad tarnitavad mahud ja voolukiirused võrreldes TTS meetodiga	
	Paindlikkus: operatsioonid võivad aset leida nii sadamas kui ka ankurdatult merel	

Tabel 2.3. Terminal-to-Ship punkerdamise meetodi iseloomulikud näitajad ning eelised ja puudused [3]



Joonis 2.1.3. Ship-to-Ship punkerdamise põhimõtteline skeem [20]

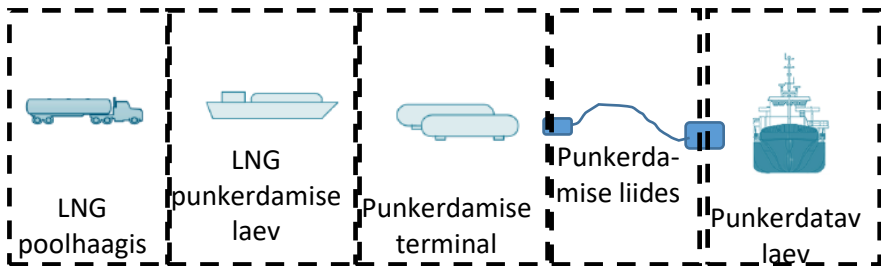


Pilt 2.3. Maailma esimene LNG punkerdamise operatsioon septembris 2016. Punkerdatav laev vasakul M/T Ternsund; punkerdamise laev Coral Energy [Marinelog]

Laeva tüüp	Punkerdatav kogus (m3)	Kiirus (m3/h)	Kestus	Eelistatud punkerdamise meetod
Teeninduslaevad, puksiirlaevad, kalastuslaevad ja piirivalvelaevad	50	60	45 min	Truck-to-Ship
Väikesed Ro-Ro ja Ro-Pax laevad	400	400	1 tund	Truck-to-Ship
Suuremad Ro-Ro ja Ro-Pax laevad	800	400	2 tundi	Ship-to-Ship
Väiksemad konteiner- ja kaubalaevad	2000-3000	1000	2-3 tundi	Ship-to-Ship
Suuremad kaubalaevad	4000	1000	4 tundi	Ship-to-Ship
Suured tankerid, puistlastilaevad, konteinerlaevad	10000	2500	4 tundi	Terminal-to-Ship
Väga suured konteinerlaevad ja õlitankerid	20000	3000	7 tundi	Terminal-to-Ship

Tabel 2.4. Tüüpilised LNG punkerdamise põhiandmed laevatüüpide järgi ja eelistatud meetod [3]

2.2. LNG punkerdamisega seonduvad standardid ja regulatsioonid ja nende rakendusvaldkond [3]

Rakendatav standard, seadus, määrus, konventsioon või soovitus					
	LNG poolhaagis	LNG punkerdamise laev	Punkerdamise terminal	Punkerdamise liides	Punkerdatav laev
IGF Code					
IGC Code					
STCW Code					
Directive 2014/94/EC					
EU Ports Regulation 2017/352					
Seveso III					
ADN					
ADR					
EN 1473:2014					
EN 1474-2					
EN 1474-3					
EN12065					
EN12066					
EN 12308					
EN13645					
EN 13766:2010					
EN 14620:2006					
ISO/DTS 16901					
EN ISO 16903					
EN ISO 16904					
ISO/TS 18683					
EN ISO 20088-1					
EN ISO 20519					
ISO/TS 17177					
ISO 17776:2016					
ISO 18132-1:2011					
ISO 23251:2006					
IEC 60079-10-1:2015					
IACS Rec.142					
SGMF Bunkering Guidelines					
IAPH Check-lists					
DNV-RP-G105					

2.3. LNG punkerdamise ohutusalane ettevalmistus

Tulenevalt klassiühingute Bureau Veritas ja DNV GL juhistest LNG punkerdamise ohutuse korraldamiseks jagatakse kaitsemehhanismid kolmeks omavahel seotud üksuseks:

2.3.1. Potentsiaalsete ohtude ennetamine

1) Eeltöö

- HAZID (Hazard Identification) – potentsiaalsete LNG punkerdamisega seotud ohtude identifitseerimise uurimustöö ajurünnaku vormis
- HAZOP (Hazards and Operability) – tuvastatud riskide maandamise meetmete määramine ja dokumenteerimine
- Sõltumatu osapoole riskianalüüs ja ohutsoonide arvutus; kvalitatiivne ja kvantitatiivne riskihindamine; halvima stsenaariumi analüüs
- Compatibility study ehk sobivusuuring punkerdamisüksuse ja punkerdatava laeva vahel (ühenduste sobivus, voolukiirus, rõhud, suhtluskanal)
- Personali väljaõpe; teoreetiline ja praktiline õppus; detailne protseduuride kirjeldus

2) Tehniline

- Dry Cryogenic Couplings - lekkevabad kiirühendused
- Kaitseriietus – antistaatiline, külmakindel, lekketuvastus analüsaatorid

2.3.2. Tehnilised meetmed ohuolukorras

- ESD süsteem pumpamise seiskamiseks (reageerimine rõhule, lekkele, mahupiiridele)
- Break-away Coupling ehk murduv krüogeenliides (laeva ootamatul triivimisel)
- LNG- ja gaasitorustiku kaitseklapid (paisuvate aurude rõhu vabastamiseks)
- Veekardin laevakere metalli kaitseks [3]

2.3.3. Tagajärgede minimiseerimine ja likvideerimine

- Personali väljaõpe ja koostöö kohaliku päästeteenistusega ohuolukorras
- Avariilikvideerimise varustus ja valmidus

Tulenevalt eelpool nimetatust ilmneb, et mida suuremat rõhku pannakse ettevalmistus- ja planeerimistöole, seda vähem on vajalik kahe järgneva kaitsebarjääri rakendamine.

3. LNG PUNKERDAMISE PROTSESS JA OHUTUSMEETMED M/L MEGASTAR NÄITEL

3.1. Üldine kirjeldus

Veebruaris 2017 alustas ettevõtte AS Eesti Gaas osutama Tallinki uuele LNG-l töötavale reisilaevale Megastar LNG punkerdamise teenust. Tegemist on Baltimaade sadamates esmakordse kogemusega, seetõttu kõikide osapoolte ja kohalike võimude tähelepanu oli ennekõike suunatud protsessi ohutusele ja turvalisusele. Punkerdamise tehnikaks oli valitud veokist laevale (TTS) meetod, mis tähendab, et LNG tuuakse kaile sadulveokitega poolhaagistega ning pumbatakse otse laeva mahutisse. Suhteliselt range ajapiirangu tõttu (öösi ajavahemikul kell 2.00-6.00) pumbatakse korraga 2 haagist, kasutades spetsiaalset kollektorit laeva punkerdamissõlmes. Punkerdamine toimub neljal kuni viiel päeval nädalas, iga kord 2 x 2 paari ehk kokku 4 poolhaagist, summaarne kogus 4 x 18=72 tonni LNG-d. Kütuse ladustamist sadamas ei toimu. Punkerdamisel rakendatavad LNG-seadmed on standardiseeritud tooted, mis vastavad nende puhul rakenduvatele kõrgetele tehnilistele ja ohutusnõuetele, et vältida LNG käitlemisega seotud riskide realiseerumist.

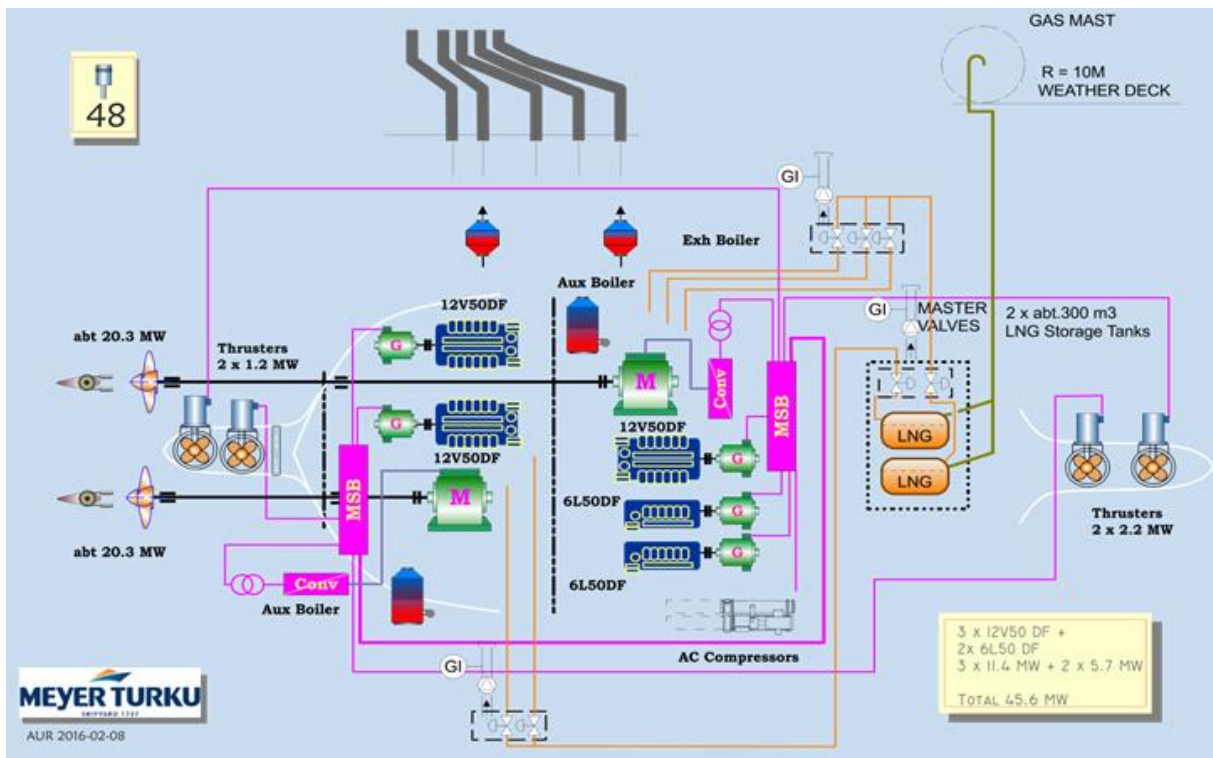
3.2. M/L Megastar ja LNG vastuvõtu, hoiustamise ja realiseerimise süsteem

M/L Megastar on Tallink Grupile kuuluv Ro-Pax kiirlaev, mis on ehitatud Soomes Mayer Turku laevatehases spetsiaalselt Tallinn-Helsinki-Tallinn liinile. Ehitus kestis vähem kui kaks aastat ning esmakordselt saabus ta Tallinna Vanasadamasse 27. jaanuaril ning sellega asendas umbes veerandi võrra väiksema liinilaeva Superstari. Võrreldes eelkäiaga on Megastar suurem ja mahukam, kuid tänu uuenduslikule keredisainile ning säästlikele Dual-fuel (kahekütuselised) mootoritele jäid opereerimiskulud samale tasemele. Megastar on 212 meetrit pikk, 36m lai ning mahutab pardale 2800 reisijat (Pilt 3.1).



Pilt 3.1. M/L Megastar Mayer Turku laevatehases 30.11.2016

Laev on varustatud kolme 12-silindrilise Wärtsila 12V50DF peamasinaga ning kahe 6-silindrilise Wärtsila 6L50DF neljataktilise abimasinaga summaarse koguvõimsusega üle 45 MW. Peamiselt LNG-d kütusena kasutavad masinad on võimelised vajadusel töötama ka diiselmootoriga (MDO). Megastaril on kaks sõuvõlli, mille liikumapaneev jõud tuleb nn diiselmootoriga elektrilisest süsteemist. See tähendab seda, et peamasinad ei ole sõuvõllidega mehaanilises otseühenduses, vaid genereerivad elektrienergiat, mida jaotatakse kõikidele laeva elektritarbijatele alates sõuvõllide elektriaktsioonidest kuni olmetarbijateni. (Joonis 3.1). [9]

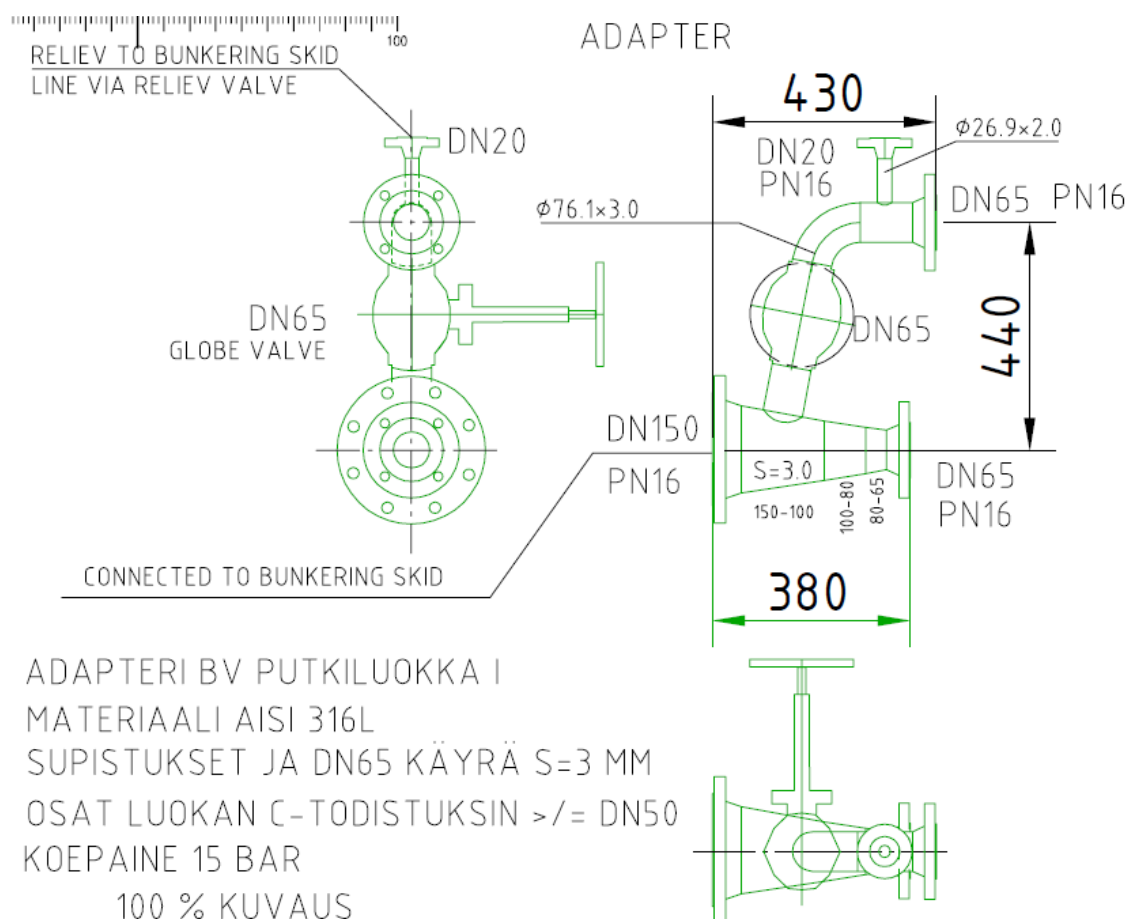


Joonis 3.1. Megastari skemaatiline jõusüsteem: 3 peamasinat ja 2 abimasinat ning elektri jaotamine tarbijate vahel. [21]

Megastari põhikütuseks on veeldatud maagaas ehk LNG, mille hoiustamiseks on laeva peadeki all kaks 300 m³ mahuga IMO C-tüüpi vaakumisoleeritud mahutit (Joonis 3.2) maksimaalse töö rõhuga 10 baari. [21]

3.3. LNG punkerdamise ehk vastuvõtu jaamad

LNG kui kütuse laevale laadimiseks on mõlemad parda pooled varustatud punkerdamisejaamaga, mille eesmärk on ohutu ühenduse loomine LNG tarnija varustusega ning tarnitava LNG voolu mõõtmine ja jälgimine. Punkerdamise voolikute ühendamiseks on jaamas DN150 ühendusflants vedeliku faasi ja DN65 ühendusflants gaasilise faasi tagastuse jaoks. Turustiku ja ühenduse mõõdud olid valitud Ship-to-Ship punkerdamise meetodile, mil projekteeritud maksimaalne vooluhulk on 300 m³/h. Kuna Tallinna ja Helsinki sadamates veel Ship-to-Ship punkerdamise teenust ei pakuta, oli otsustatud täiendada see sõlm Truck-to-Ship punkerdamise võimekusele. [18] Kuna ühe poolhaagise poolt väljastatav vooluhulk on suhteliselt madal, siis otsustati punkrijaama paigaldada spetsiaalne adapter, mis võimaldab korraga kahe treileri ühendamist kumbagi DN65 ühendusega (Joonis 3.3).

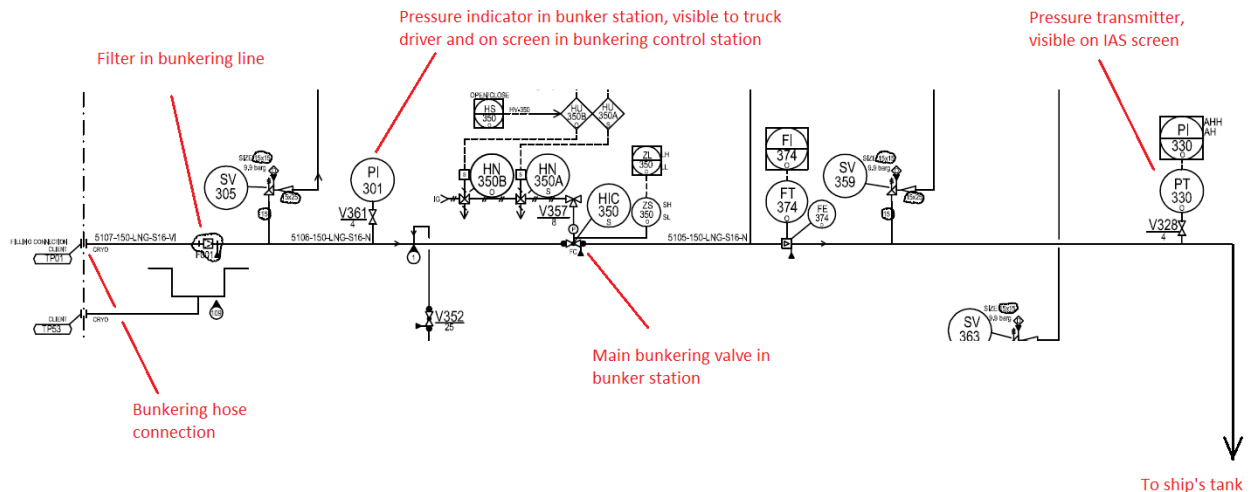


Joonis 3.3. Spetsiaalne adapter Megastari punkerdamise jaamas Truck-to-Ship punkerdamise võimaldamiseks [21]

süsteem automaatselt rõhku 3-5 bari vahel ning vastavalt vajadusele ise valib täitmise viisi. (Joonis 3.5) [21] [18]

Kõik laeval asuvad LNG torustikud on topelt seinaga vaakumisoleeritud. Gaasilise faasi torustikud on topelt seinaga ja ventilatsiooniga, mis tähendab, et on välistatud, et igasugune potentsiaalne gaasileke satub laevaruumidesse, vaid aurustub läbi ventilatsioonišahti atmosfääri. See ventilatsioonimast on üks väline LNG laevade tunnusjooni.

Oluline on aga ära märkida, et gaasileke on kasvuhoonegaaside seisukohalt neli korda kahjulikum kui CO₂ paiskamine atmosfääri, seetõttu igasugune gaasi või LNG leke on kriitiline ning ventilatsioonišahitis asuvad gaasilekkeandurid lülitavad laeva gaasisüsteemi automaatselt välja.



Joonis 3.5. Põhimõtteline LNG torustiku joonis Megastaril LNG punkerdamise jaamast mahutiteni [21]

3.4. Punkerdamise ettevalmistusprotsess

Megastar seilab Tallinnast Helsingisse ja tagasi kolm korda päevas igal nädalapäeval ning öösiti seisab Tallinna Sadamas kai ääres. Seisakud reisijate ja sõidukite maha- ja pealeminekuks on nii Helsingis kui Tallinnas kõigest ühe tunni pikkused ning selle aja jooksul piisavas koguses LNG-d punkerdada ei ole võimalik. Seetõttu on punkerdamise ajaks valitud öine aeg Tallinnas, kui laev seisab ajavahemikus 00:30 – 07:30.

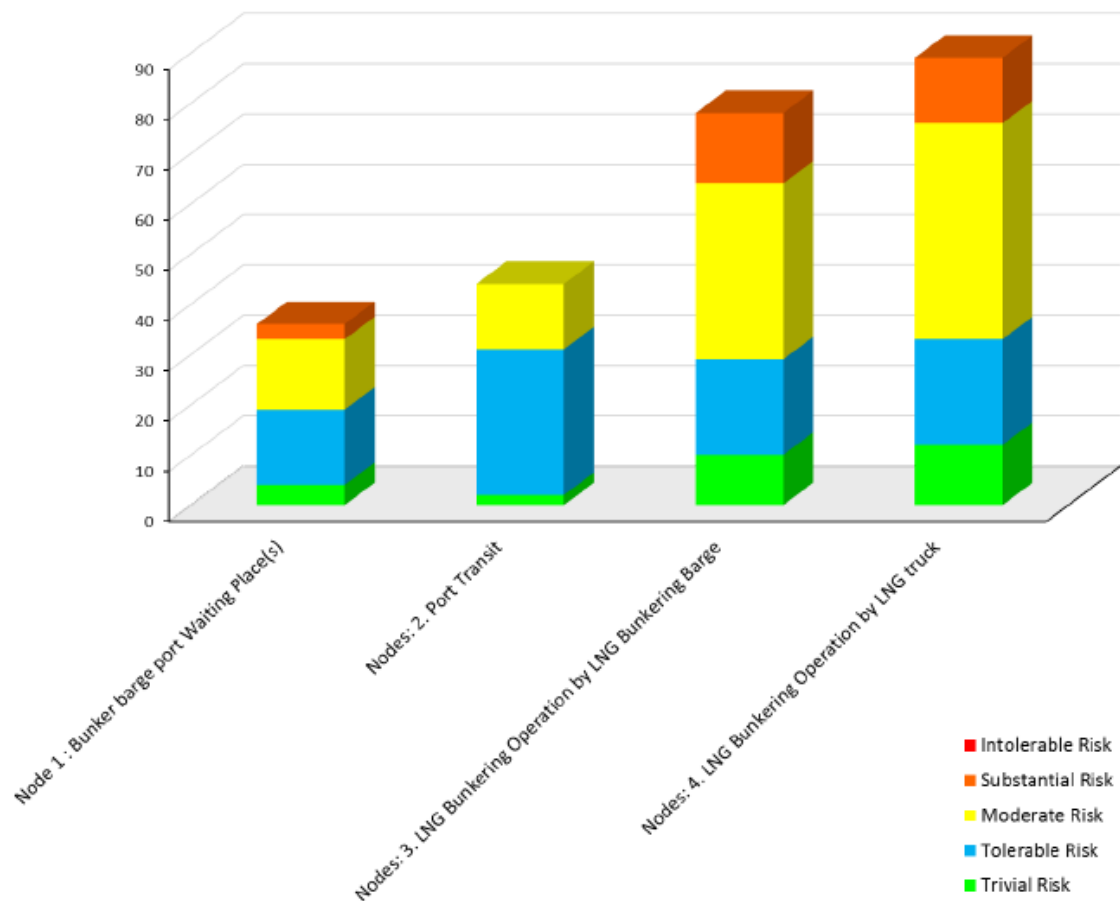
Loomaks usaldusväärset, läbimõeldut ja ohutut LNG punkerdamise keskkonda oli kõikide osapoolte osalusega läbi viidud põhjalik ettevalmistusprotsess, mille tulemusel valmis kolm analüüsi.

3.4.1. HAZID (Hazard Identification)

Sadamas LNG punkerdamisega seotud riskide tuvastamiseks töötas Bureau Veritase tütarettevõtte Teknitas riskihindamise analüüsi, milles osalesid Tallinna Sadama, Tallinki, klassiühingu ja Veeteede Ameti esindajad. Analüüsi eesmärk oli kindlustada, et ohutusalsed ja operatsioonidega seotud riskid on elimineeritud või alandatud miinimumini. Muu hulgas tõi see töö välja erinevate punkerdamise operatsioonide mõju ümbritsevale keskkonnale, teistele laevadele ja sadama infrastruktuurile. Töö käigus analüüsiti erinevaid punkerdamise meetodeid, samuti sai määratud nende moodustele iseloomulike riskide maandamise meetmed ning selle eest vastutavad osapooled. [7]

HAZID meetodika kujutab endast kombinatsiooni struktuurilisest potentsiaalsete ohtude identifitseerimisest, analüüsimisest ja ajurünnakust tulenevalt töögrupi liikmete kogemusest. Kõik võimalikud juhtumid ja stsenaariumid jagati viide erinevasse riskitasemesse ning koostati riskimaatriksid.

Töö tulemusest selgus, et kõige suurema arvu erinevate riskidega on seotud just Truck-to-Ship punkerdamise meetod, samas ühtegi talumatut riski ei tuvastatud (Joonis 3.6). Samuti koostas HAZIDI teostanud ettevõtte soovitude nimekirja teatavate riskide maandamiseks.



Joonis 3.6. HAZID analüüsi tulemused LNG punkerdamiseks Tallinna Vanasadamas. [5]

3.4.2. HAZOP (Hazard and Operability Study)

HAZIDI käigus tuvastatud riskid Truck-to-Ship punkerdamisel Tallinna Vanasadamas said põhjalikult ja detailselt käsitletud HAZOP analüüsi käigus, mil oli selgunud gaasitarnija koos tehnilise lahendusega. Töö eesmärk on kinnitada punkerdamise lahendus ja liidese disain, võttes arvesse kõik potentsiaalsed ohud ja organisatoorsed toimingud. Analüüs tõi välja kokku 84 toimingut või kitsaskohta, mida on vaja enne punkerdamise alustamist veel ühel või teisel osapoolel lahendada või muuta.

3.4.3. Riskianalüüs

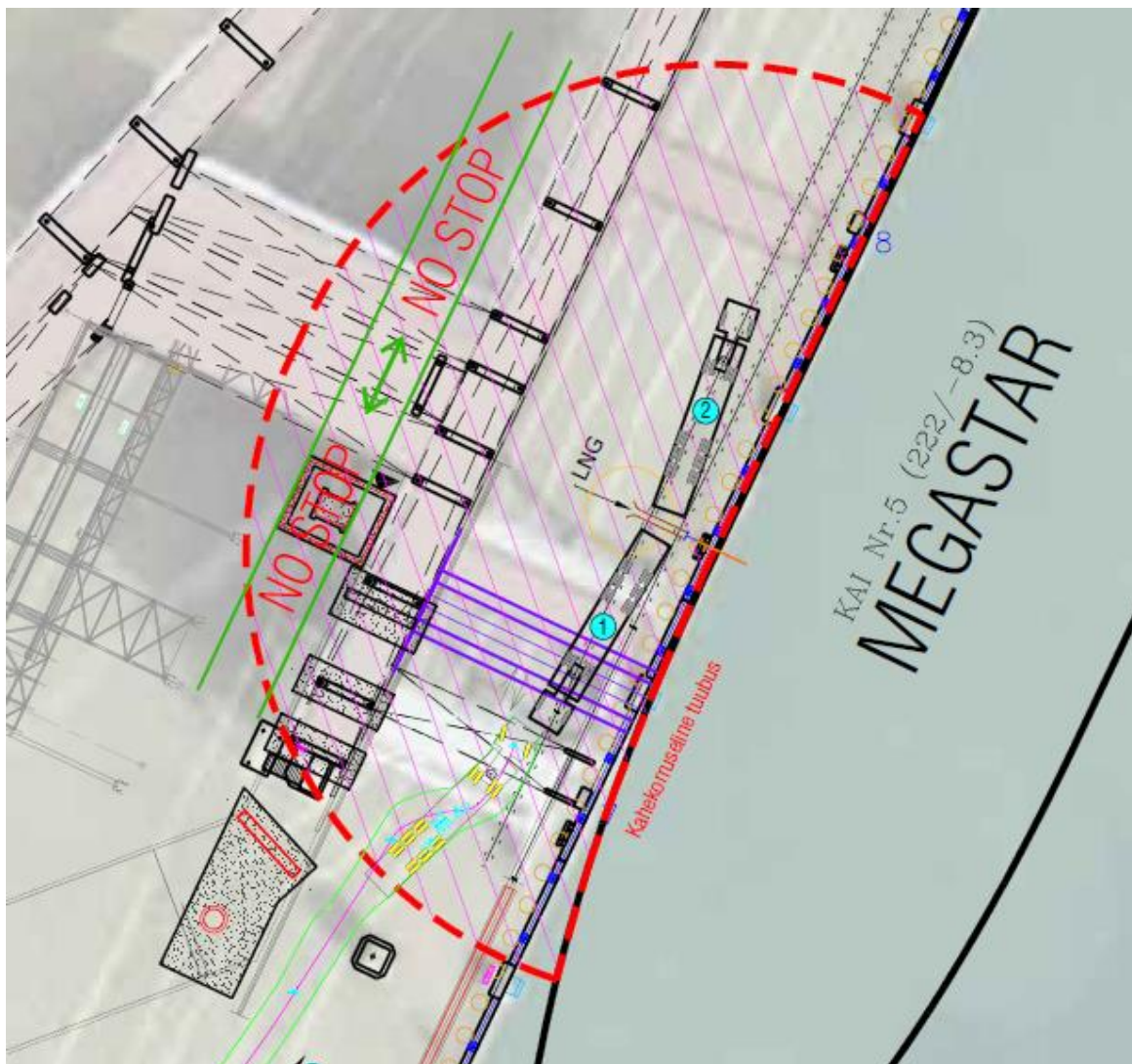
Kui oli selgunud täpne punkerdamise lahendus, voolukiirused, asukoht ja aeg, telliti ettevõttelt Hendrikson & Ko riskianalüüs koos ohutsoonide määramisega. Vastavalt tuleohutuse seaduse § 29¹ lg 1 peab isik, kelle tegevus toob kaasa plahvatusohtliku keskkonna tekke, määrama plahvatusohutsoonid ning kasutama vaid vastavas plahvatusohutsoonis kasutamiseks ettenähtud plahvatusohutsooni seadmeid, kaitsesüsteeme, komponente ja tarvikuid. Nõuded plahvatusohutsoonide määramiseks on kehtestatud Majandus- ja taristuministri 03.08.2015 määruse nr 103. Määrust kohaldatakse tavapärasel režiimis toimuvale tegevusele (määruse § 1 lg 3 p 6 sätestab, et määrust ei kohaldata õnnetuse ja avarii tagajärjel tekkinud olukorras) ja määruse § 1 lg 4 kohaselt tuleb plahvatusohtliku gaasikeskkonna puhul järgida standardi EVS-EN 60079-10-1 nõudeid. Õnnetuse või avarii tagajärjel tekkida võivad ohutsoone hinnatakse lähtuvalt Kemikaaliseadusest riskianalüüsiga. Riskianalüüsis on rakendatavatest ennetusmeetmetest lähtudes lühidalt hinnatud, kui suur kogus ohtlikku ainet võib korraga õnnetusse sattuda. Välja on toodud ka tehnoloogilised ohutusmeetmed. Punkerdamisprotsessi ohtude hindamisel on arvestatud LNG suurima võimaliku lekkekogusega laadimisalal, mis on määratud 2 LNG poolhaagise kogumahuga (2 x 18 t ehk ca 2 x 43 m³). [4]

Leke on võimalik peamiselt inimliku eksimuse (laadimisprotsessi nõuete mittetäitmine) või mehhaanilise mõju (laadimisseadmete mehhaaniline purunemine) tagajärjel. Lekkinud LNG lombipõlengu tekkeks on vajalik süüteallika olemasolu, süttimise võimalik põhjus on näiteks veoki süsteemide rike, mis põhjustab veoki süttimise (st tehniline põhjus).

Punkerdamisprotsessi käigus esinevate vigade (lekked, seadmete/ühenduste purunemine) esinemise tõenäosused on leitud vastavalt RIVM (National Institute of Public Health and the Environment) juhendi andmetele ja planeeritud punkerdamise tundide arvule (520 tundi aastas).

1. Laadimisühenduse vooliku/toru purunemine: 4×10^{-6} tunnis (aastas 0,00208; väike)
2. Leke laadimisühenduse torust/voolikust: 4×10^{-5} tunnis (aastas 0,0208; keskmine)

Ohualade arvutuste tulemused on toodud tabelis 3.1 ning Joonisel 3.7 on kujutatud 34m ohutsooni rakendamine punkerdamise kohas Vanasadama kail. [4]



Joonis 3.7 LNG treilerite asetus punkerdamise ajal ja maksimaalse lekinud ja süttinud LNG ohuala ulatus Vanasadama kail nr 5 [4]

Sündmus	Mõju	Kriteeriumid		
		Ohtlik ala	Väga ohtlik ala	Eriti ohtlik ala
Leke	Süttimisohu	60% LEL (tulepahvakud)	100% LEL	
		34 m	20 m	
Lombipõleng	Inimelule	8 kW/m ²	10 kW/m ²	25 kW/m ²
		22 m	20 m	13 m
	Ehitistele	37 kW/m ²	-	-
		10 m	-	-

Tabel 3.1. Punkerdamisalal lekinud ja süttinud LNG ohualade ulatus [4]

34 meetri ohuala piirangud on sätestatud koostöös AS Eesti Gaasi ja Tallinna Sadamaga järgnevalt.

Enne punkerdamise algust:

- Peale LNG treilerite parkimist punkerdamise alas märgitakse OHUALA teemärgistega (teekoonused ning vajadusel eralduslint)
- Läbisõidukoridor ohualas on märgistatud tähisega “NON STOP”, mis tähendab seismajäämise keeldu ohualas punkerdamise ajal
- Kõik elektriseadmed (k.a galerii ja tuubuse elektrivarustus) ohualas on välja lülitatud või EX teostusega
- Ohuala läheduses on 50 kg pulbertulekustuti [6]

Punkerdamise ajal:

- Sädettekitavad tööd on keelatud (keevitamne, lihvimine jne) ohualas
- Elektriseadmete kasutamine on keelatud (mobiiltelefonid, kaamerad, mitte EX-raadiod, mitte-EX-taskulambid jms) ohualas
- Suitsetamine on keelatud ohualas
- Tõstetööd on keelatud ohualas
- Sõidukid võivad läbida “Läbisõidu koridori” läbi “NON-STOP” ala ilma seismajäämata
- Volitamata isikutel ei ole lubatud viibida ohualas punkerdamise ajal
- Punkerdamise operatsioonidesse kaasatud isikud peavad kandma isikukaitsevahendeid antistaatiliste omadustega ning gaasidetektorit
- Punkerdamise protsessis mitteosalevad isikud peavad punkerdamise ajal asuma väljaspool ohuala [6]

3.4.3.1. BLEVE ohualade arvutus

Tehnilise Järevalve Ameti soovitusel teostati riskianalüüsi raames ka LNG poolhaagise kogu mahu BLEVE ohuala arvutus. Selle esinemise tõenäosused on leitud samuti vastavalt RIVM juhendi andmetele ja planeeritud punkerdamise tundide arvule, mis andis tulemuseks:

- LNG poolhaagise kogu mahu BLEVE: $5,8 \cdot 10^{-10}$ tunnis (aastas: 0,0000003; väga väike)

Sellisel juhul tekkivate ohualade ulatus arvutati välja ALOHA tarkvaraga ning tulemused on toodud tabelis 3.2. [4]

Sündmus	Mõju	Kriteeriumid		
		Ohtlik ala	Väga ohtlik ala	Eriti ohtlik ala
LNG poolhaagise BLEVE	Inimelule	8 kW/m ²	10 kW/m ²	25 kW/m ²
		405 m	362 m	224 m
	Ehitistele	37 kW/m ²		
		179 m		

Tabel 3.2. LNG poolhaagise BLEVE ohualad [4]

LNG poolhaagise BLEVE korral on ohustatud 405 meetri raadiuses viibivad kaitsmata inimesed ja 179 meetri raadiuses paiknevad ehitised. Inimesed on ohustatud praktiliselt kogu Vanasadama avatud territooriumil ja sellega piirneval alal. Punkerdamise toimumise ajal (01:30 – 06:00) ei viibi ohualas arvukalt inimesi – ei saa välistada üksikute inimeste viibimist väljaspool territooriumi. Teoreetilised on BLEVE toimumusel võimalikud üksikud hukkunud, kuid sündmus ei toimu momentaalselt, st peaks olema tagatud piisava evakuatsiooni aeg.

Eesti Gaasi poolhaagised on konstrueeritud ja ehitatud selliselt, et BLEVE tekkimine on neis välistatud. Seetõttu ei ole BLEVE-ks ettevalmistavad meetmed proportsionaalsed selle tekkimise tõenäosusega. Tootestandardi kohaselt peab mahuti vaakum taluma 650°C otsest kuumust 2 tundi (alles siis kaob kahe kesta vahel vaakum). Peale vaakumi kadumist kaitseklapid suudavad välja lasta koguaurustuva gaasi (kaitseklappide ristlõiked arvutatud varuga) [4]

3.5. Punkerdamise protsessi kirjeldus

3.5.1. Üldine iseloomustus

LNG transporditakse Vanasadama territooriumile sadulveokitega poolhaagistega mahutavusega 18-18,5 tonni (ca 43 m³). LNG on haagistes temperatuuril -155 °C ja rõhul kuni 3 bari. Laeva punkerdamine toimub Vanasadama kail nr 5 laeva ja kaid ühendava tuubuse lähisel. Veokid sisenevad sadama territooriumile kahekaupa, punkerdamist ootavad veokid pargivad sadama territooriumil ettenähtud ootealal vastavalt LNG tarnija ja sadama vahelisele kokkuleppele. Punkerdamise operatsioonid viiakse läbi kinnitatud punkerdamise protseduuride kohaselt, mis kaasavad endas kahte osapoolt ("Shore – Ship"). Vastutusala lepatakse kokku laeva ja punkerdaja esindajate kohtumisel enne igat punkerdamisoperatsiooni. Punkerdamisoperatsiooni eest tervikuna vastutab laevakapteni poolt volitatud vanemmehaanik. "Ship-Shore" infovahetus toimub punkerdamise operatsiooni ajal raadiosaatjate kaudu. [6]

Punkerdamisprotsess jaguneb kolmeks etapiks:

1) Eelnevad tegevused, sh:

- LNG veokite parkimine, rataste blokeerimine;
- LNG veokite maandamine;
- LNG süsteemi mahajahutamine nõutud temperatuurini;
- LNG pumpamisala ohutsooni tähistamine ja kontroll, kaevuluukide katmine;
- sadama kai nr. 5 galerii ja tuubuse elektrivarustuse väljalülitamine;
- gaasilekkeandurite ja portatiivsete gaasidetektorite kontroll;
- LNG pumpamisvoolikute kaile tõstmine, ühendamine veokiga ja lekkekindluse kontroll lämmastikuga;
- laeva ja veoki ühendusvoolikute krüo-isemurduvate liitmike visuaalne kontroll
- pumpamise ESD süsteemi ühendamine ja testimine [6] [8]

2) Punkerdamine:

- punkerdamistoimingute teostamine, kokkulepitud parameetrite (rõhk, temperatuur, pumpamiskiirus, mahutite täituvusmäär) jälgimine [6] [8]

3) Järeltegevused, sh:

- LNG pumpade ja sulgeseadmete kontroll;
- pumpamisvoolikute vabastamine LNGst ja läbipuhumine lämmastikuga treilerite paakidesse ning lahtiühendamine;
- pumpamisvoolikute paigutamine kaile või laeva punkerdamisjaama;
- ohutsooni desaktiveerimine ja ohutähiste eemaldamine
- LNG veokite lahkumine punkerdamisalalt. [6] [8]

Eeltoodud tegevused on detailselt kirjeldatud protseduuride dokumendis, mida punkerdamise personal on kohustatud rangelt järgima.

3.5.2. Personal ja punkerdamise nõuded

Järgneva personali kohalolek on kohustuslik punkerdamise operatsiooni läbiviimiseks:

- Operaator/laadimisülem või gaasiseadmete mehaanik laeva masinaruumis, kes jälgib punkerdamise protsessi laeva esindajana;
- Klassiühingute soovitusel punkerdamise operatsioonideks peab olema määratud LNG tarnija poolel operatsiooni eest vastutav isik ehk PIC, kelleks AS Eesti Gaasi poolt on LNG punkerdamise operaator, kes vastutab kaldal toimuva eest
- Operaator/autojuht asub treileri juures ja tegutseb pumba ja vajalike kraanidega;
- Punkerdamissõlm laevas on punkerdamise ajal tühi. Inimene on punkerdamissõlmes voolikute ühendamisel, lämmastiku kraanide avamisel ja punkerdamise vooliku hermeetilisuse kontrollimiseks. [6] [8]

Järgmised ennetavad meetmed peavad olema täidetud enne kui punkerdamise operatsioon on alustatud:

- LNG treilerid on tehniliselt korras;
- punkerdamisel osalevate töötajate pädevuse ja väljaõppe tagamine;
- LNG operaatorid on hea tervise juures ja puhanud. Nad on varustatud nõuetekohaste isikukaitsevahenditega. Gaasilekke detektorid on laetud.

- Jooniselt 3.8 on näha LNG operaatori töö ala kaugus kai servast (umbes 3 meetrit) ning kai serva ja Megastari vahelise ala suurust (umbes 1m). Kuna kai võib olla märg või libe, siis operaatorid on kohustatud kandma töö ajal lisaks ka päästevesti.
- Majandus- ja taristuministri 03.08.2015 määruse nr 103 nõuetele vastava plahvatusohu tsooni jääda võivate elektriseadmete vastavus Ex nõuetele;
- suurima ulatusega avariilise ohualasse (ulatus 34 m, vastab ISO/TS 18683 / IACS juhiste järgsele kaitsetsoonile) jäävate elektriseadmete väljalülitamine, lülitusseadmetele ligipääsu takistamine, nendel seadmetel, mida ei ole võimalik välja lülitada või on vaja kasutada punkerdamise ajal (nt punkerdamisplatsi ja kaitsetsooni valgustus) – teisaldamine kaitsetsoonist välja või tagada vastavus Ex nõuetele;
- Punkerdamise alal ei ole füüsilisi takistusi, jääd ja lund. Avariiväljapääsu teed on vabad.
- Kail on tagatud piisava valguse olemasolu
- Punkerdamise tsoon on piiratud ohutuskoonustega ja kõiki maa-aluste kommunikatsioonide teenidusluigid on kaetud silikoonmattidega. [8] [6]

Punkerdamise käigus rakendatavad meetmed

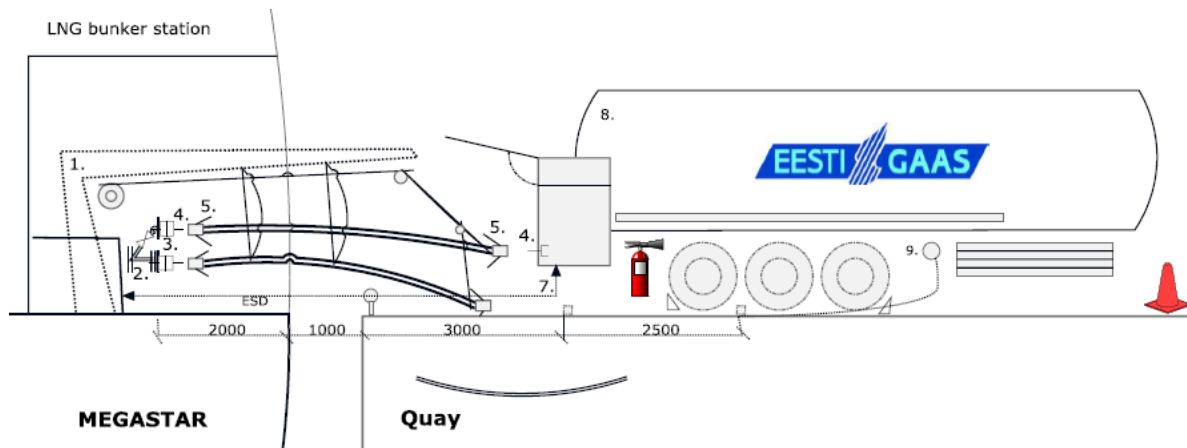
- punkerdamise kontrollnimekirjas toodud nõuete täitmine ja tegevuste korrektne rakendamine;
- ohutsooni kehtestamine, tähistamine ja seal kehtivate ohutusnõuete täitmise kontroll;
- veokite, haagiste ja laadimisseadmete korrasoleku jälgimine;
- hoiatussüsteemide ja –seadmete näitude jälgimine;
- punkerdamise kokkulepitud parameetrite rõhk, temperatuur, pumpamiskiirus, mahutite täituvusmäär) jälgimine;
- pumpamise ESD süsteemi korrasoleku jälgimine. [8] [6]

Kuna statsionaarseid LFL detektoreid ei paigaldata, kontrollitakse punkerdamise järgselt 34 m kaitsetsoonis gaasidetektoritega keskkonna ohutust.

Laadimisülem ei tohi lubada punkerdamise operatsiooni alustamist, kui on põhjust uskuda, et punkerdamist ei ole võimalik teha ohutult või on punkerdamise süsteemil esindatud mõni puudus. Enne ja peale igat punkerdamist täidavad punkerdaja ja laeva esindajad kontroll-lehe (Check-listi), milles kinnitavad allkirjaga vastavust kõikidele ohutusnõuetelenõuete ja valmisolekut punkerdamise operatsioonideks. [12]

3.5.3. Megastari ja Eesti Gaasi treileri vaheline tehniline liides

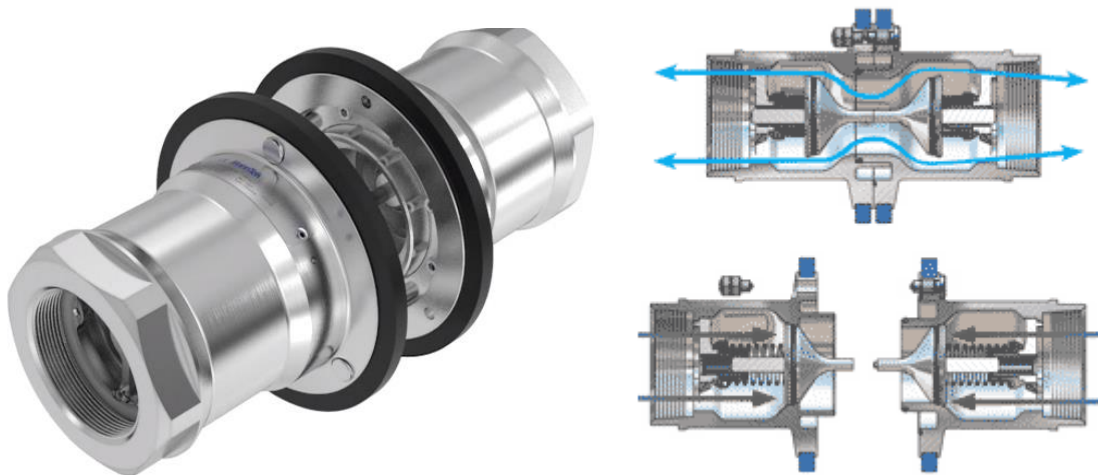
Laeva ja treileri ühendamiseks kasutatakse 8 meetriseid krüogeensete omadustega voolikuid, mis on laeva ja treileri poolt ühendatud krüogeensete kuivade kiirühendustega tootjalt Manntek. Järgnev joonis näitab ühenduse põhimõtteid. [6] [21]



Joonis 3.8. Megastari ja Eesti Gaasi treileri vaheline ühendusskeem [6]

1. Laeva kraana
2. Adapter (kahe treileri ühendamiseks) koos isoleerflantsiga
3. Murduv krüogeenliides - BAC (Joonis 3.9)
4. Mannteki kiirühendus (isane)
5. Mannteki kiirühendus (emane pool)
6. LNG voolikud, kumbki 8m
7. Õhuvoolikud ESD süsteemi tarvis
8. LNG treiler
9. Maanduskaabel

Laeva adapteril on voolikute ühenduskohtadele paigaldatud nn murduvad krüogeenliitmikud, mille eesmärk on eriolukorras ennetavalt voolik ohutult murda kaheks pooleks. Kui voolikutele peaks tekkima pinge (nt laeva triivimisel), siis need liidesed katkevad ja mõlemad otsad sulguvad automaatselt klappidega ning laadimispumbad seiskuvad (Joonis 3.9).



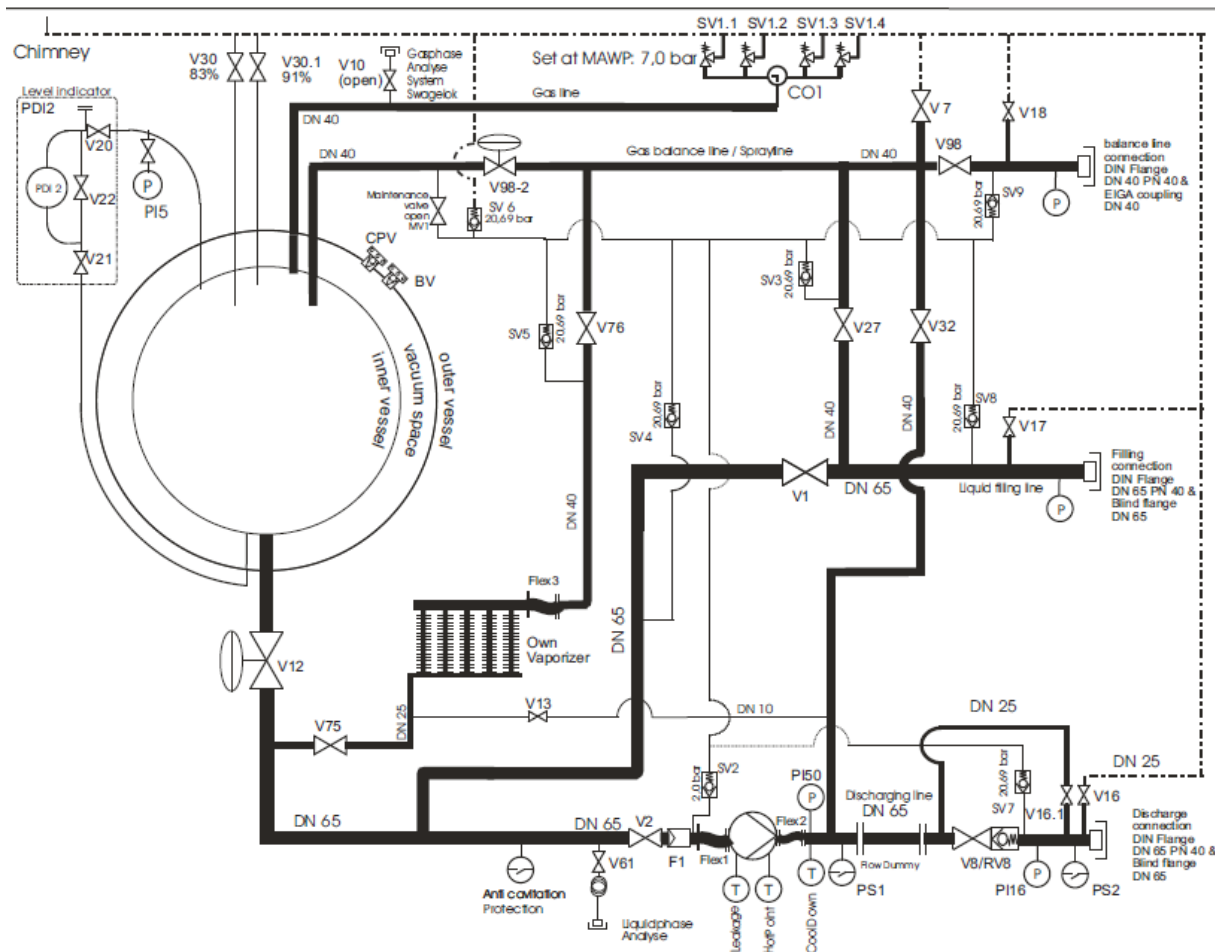
Joonis 3.9. Break-away coupling ja selle tööpõhimõte. [13]

Sarnase põhimõttega töötavad ka kuivad krüogeensed kiirühendused, mis võimaldavad teha voolikute kokku- ja lahtiühendamist kiiresti ja ilma väikseimata lekketa.

3.6. AS Eesti Gaasi LNG treilerid

Kokku ostis AS Eesti Gaas 8 LNG poolhaagist, mida projekteeriti ja ehitati spetsiaalselt Megastari LNG punkerdamise jaoks ühe juhtiva tootja Gofa poolt. Kõige olulisemad näitajad LNG treileri iseloomustamiseks on selle kaal, maksimaalne töö rõhk ning isolatsiooni tüüp. Mida kõrgemale maksimaalsele rõhule on see ehitatud, seda paksem on mahuti metall, mis omakorda tõstab selle massi ja lähtuvalt maanteeveo massipiirangutest on selle arvelt väiksem LNG kogus, mida transportida. Eesti Gaasi LNG treilerite mõned olulisemad tehnilised näitajad:

- Valmistatud roostevabast nikkelterasest 304/ 1.4301
- Topelt seinaga vaakumisoleeritud
- Geomeetriline maht 52 000l; maksimaalne lubatav rõhk 7 bari
- Hüdraulilise ajamiga krüogeenne tsentrifugaalpump jõudlusega 1000 l/min
- Peaklapid avatavad/suletavad pneumaatiliselt (Joonis 3.10) [6]

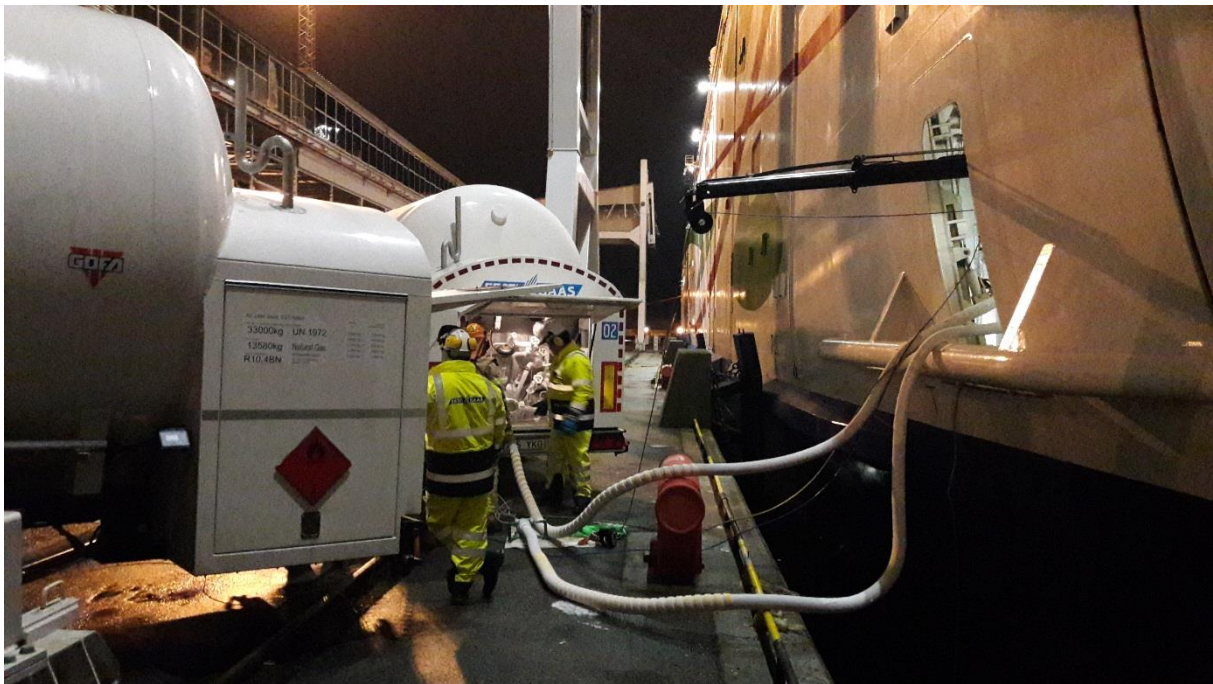


Joonis 3.10. Eesti Gaasi LNG treilerite tehnoloogiline skeem. [6]

Joonisel 3.10 on näha, et treileril on kolm ühendust: täitmise liin, väljuv liin koos pumbaga ning auru tagastusliin. Vajaliku rõhu saavutamiseks pumpamise ajaks on treiler varustatud ka rõhutõste aurustiga PBU. Jooniselt on ka näha, et kõik torustikulõigud, milles võib teoreetiliselt kahe kraani sulgemisega sisse jääda LNG vedelikku, on varustatud ülerõhuklappidega aurustumisega kaasneva rõhu välja laskmiseks.

3.6.1. ESD (Emergency Shut Down) süsteem

Jooniselt 3.10 on ka näha, et mahutist väljuvatel liinidel on esimesed sulgeseadmed ehk V12 ja V98-2 pneumaatiliselt juhitud. Vajalik suruõhk nende klappide avatud hoidmiseks varustatakse punkerdamise ajal Megastari pealt. Selline ESD lahendus võimaldab laeva operaatoril avariiolekorras õhurõhk ESD kaablist välja lasta ja sellega sulgeda treileris LNG peale voolu pumbale. Treilerid on erikohtades varustatud ka kolme ESD nupuga, mille vajutamisel samuti õhurõhk vabastatakse ja peaklapp sulgub.



Pilt 3.2 LNG treilerite ja Megastari punkrijaama ühendusliides



Pilt 3.3. Üks Truck-to-Ship punkerdamise variatsioonidest: ühe treileri tühjendamine teise treileri pumbaga (Megastari punkerdamise näitel)

3.7. LNG tarned

Et LNG punkerdamise tegevus majanduslikult tasuv oleks, on ülioluline tarnete logistiline korraldus. Selleks on Eesti Gaas välja kujundanud usaldusväärsed tarnepunktid võimalikult lähedal Tallinnale: LNG importterminalid Poris ja Klaipedas ning LNG veeldamise tehas Pihkvas (Joonis 3.11).



Joonis 3.11. Eesti Gaasi väljatöötatud LNG tarneallikad [6]

3.7.1. Maagaasi veeldamise tehas Pihkvas - "КСПГ Псков"

Peamiseks tarneallikaks on välja kujunenud Tallinnast ca 350 km kaugusel asuv maagaasi veeldamise kompleks Pihkvas, mis valmis 2017 aasta alguses. Tehase tootmisprotsess algab toru kaudu sisse tuleva maagaasi puhastamisega süsihappegaasist ja kuivatamisest. Seejärel liigub puhastatud gaas kompressoritsehhi, milles toimub gaasi kolmeastmeline

komprimeerimine. Peale kokkusurumist ca 200 barini lastakse gaasil paisuda spetsiaalses keermestatud torus, mille käigus gaasi temperatuur langeb ja hakka tekkima selle kondensaat. Separaaoris eraldatakse gaasi aurud ja vedelik, kusjuures veeldatud gaas suunatakse mahutitesse ning protsessist ülejäänud gaas saadetakse tagasi maagaasivõrku. Tehase territooriumil on kokku neli vertikaalset LNG hoiustamise mahutit igaüks mahuga 60m³, milles ladustatakse LNG temperatuuril umbes -135°C ning rõhul 5 bari. Selliste parameetritega LNG sobib hästi soojuse tootmiseks katlamajades, kuid sise põlemismootorite süsteemid nõuavad madalamat rõhku ja temperatuuri. Selleks on tehase territooriumile lisaks paigaldatud „boil-off gas“ kompressor, mille eesmärk on juba valmis toodetud LNG-l imeda madalamaks gaasilise osa rõhku. Sellisel moel langeb LNG rõhk umbes 2 barini ning vastavalt ka selle temperatuur ca -155 °C -ni. Lõpptoodang pumbatakse krüogeense pumbaga treileritesse. [11]



Pilt 3.4. Maagaasi veeldamise kompleks Pihkvas

3.7.2. LNG kvaliteet ja sellega seotud probleemid punkerdamisel

Megastari mootorite tootja ja LNG hoiustamise ja kasutamise varustuse tarnija on seadnud LNG kvaliteedile ranged nõuded, mida tarnijal tuleb arvestada. Kõige kriitilisem komponent LNG-l töötavate seadmete jaoks on süsihappegaas (CO₂), mis atmosfäärirõhul kristalliseerub temperatuuril -80°C. Seetõttu hakkavad ligi -155°C kraadises vedelikus tekkima ummistavad elemendid, mis sadestuvad filtritel, takistavad kuulgraanide ja klappide tööd ning rikuvad

tihendeid. Sellest tulenevalt on ka Megastari kvaliteeditingimustes rangeks nõudeks maksimaalne süsihappegaasi sisaldus kütuses 0,006% Mol.

Teine oluline kütuse kvaliteeti iseloomustav näitaja on selle metaaniarv (Methane Number). Gaasikütusel on omadus põlemiskambris moodustada veel põlemata kütuse ja õhu segu, mis isesüttimise tagajärjel tekitab sisepõlemismootori jaoks ohtliku nn „knocking“ efekti. Nagu ka kõik maagaasil töötavad Otto tsükliga sisepõlemismootorid, nii ka Megastaril olevad Wärtsilä masinad vajavad stabiilset kõrge kvaliteediga gaasi, mille metaaniarv on vähemalt 80. [9] See on ühikuta suurus, mis iseloomustab kütuses olevate metaani, etaani, propaani ja butaani suhet, kusjuures viimased kolm mõjutavad alandavalt ning esimene suurendavalt. Metaani arvu arvutamiseks kasutatakse standardis „ISO 15403-1:2006 - Natural gas for use as a compressed fuel for vehicles -- Part 1: Designation of the quality“ välja toodud metoodikat.

Pihkva maagaasi veeldamise tehases väljastatava LNG sertifikaadi (Pilt 3.5) kohaselt on need kaks põhinõuet täidetud ning kütus Megastari pardale edukalt tarnitud.

QUALITY CERTIFICATE № 288P

dated 30.04.2018.

Liquefied natural fuel gas according to TU 51-03-03-85
 Natural gas analysis according to GOST 31371.7-2008
 Organization-supplier: LLC «CRYOGAS-PSKOV»
 Legal address: 180022, RF, Pskov, Pozhigovskaya st.,21

Consignment № *ИТ24-06/76-04.18/19*
 LNG sample is picked out by the handheld sampler.
 Temperature: 0 °C

Component composition of liquefied natural gas (LNG) consignment:

Name of the component	Vol. %	Mol. %
Carbon dioxide	0,0000	0,0000
Oxygen	0,0000	0,0000
Ethane	4,28	4,31
Nitrogen	0,044	0,044
Propane	0,86	0,87
I-butane	0,144	0,149
N-butane	0,137	0,143
I-pentane	0,0251	0,0267
N-pentane	0,0178	0,0193
Neopentane	0,0038	0,0040
N-hexane	0,0281	0,0314
Helium	0,0000	0,0000
Hydrogen	0,0000	0,0000
Sum:	5,5398	5,5974

Calculation according to GOST 31369-2008 (ISO 6976:2005):

Rate: 100

Air density: 1,2047

Tabular information of methane: density – 0,6669 kg/m³, Condensability factor – 0,9981Estimated value of methane: **94,4602 O6 %**, **94,4026 Мол. %**

Relative gas density with regard to the air: 0,7113

Wobbe number: the highest 13086 kc/m³Calorific value: the lowest – 9059 kc/m³, the highest – 10058 kc/m³The gas density under normal conditions - 0,7638 kg/Nm³

Condensability factor with regard to the standard conditions: 0,9972

Calculation according to ISO 15403-1:2006:

Methane Number : 85

Calculation according to ISO 6976-2005:

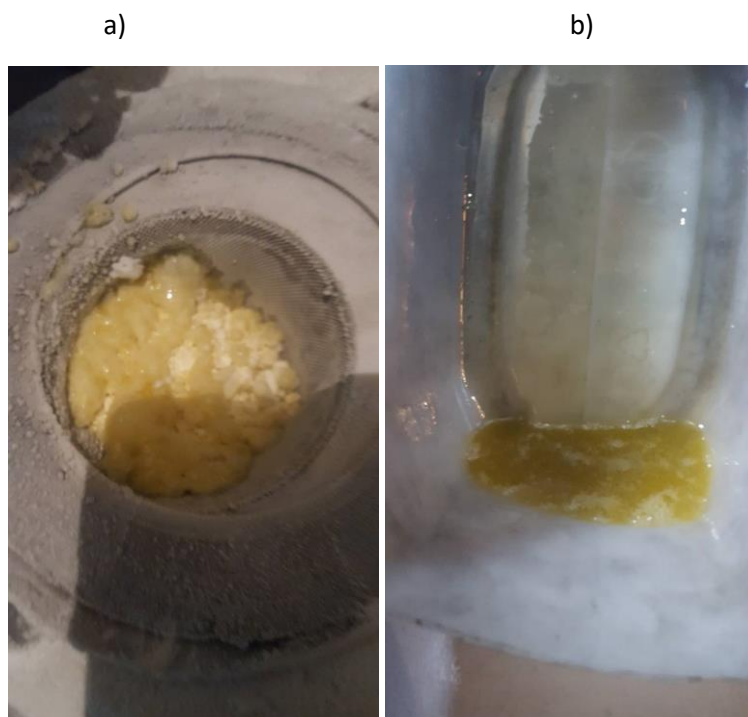
(Temperature: 0 °C)

Calorific value the lowest – 37,93 MJ/m³ (10,5361 kWh/Nm³), the highest – 42,11 MJ/m³ (11,6972 kWh/Nm³)Density of LNG – 415,0 kg/m³ (P = 2,3 bar(g.))

Pilt 3.5. Pihkva maagaasi veeldamise tehases 30.04.2018 väljastatud LNG sertifikaat

Sertifikaadilt (Pilt 3.5) ilmneb samuti, et LNG sisaldab endas ka pikemate ahelatega nn raskemaid süsivesikuid nagu butaan, pentaanid ja heksaanid. Kuigi nende osakaal koostises on suhteliselt madal, näitas punkerdamise alguseaja praktika, et nende olemasolu määrab olulist rolli punkerdamise protsessi takistamisele ja ohutusele. Nimelt on nende komponentide sulamistemperatuur väga lähedane LNG temperatuuriga, mis toob endaga kaasa nende komponentide faasimuutuse ja õlimassi moodustumise. See toob aga endaga kaasa nii treileri pumbaeelse filtri (filtri asukoht F1 Joonisel 3.10) kui ka laeva punkrijaama filtri ummistumise, mille tagajärjel kasvab punkerdamise süsteemis rõhk, avanevad kaitseklapid ning metaankütus satub väliskeskkonda, mis tähendab viivitamatut punkerdamise katkestamist

Kuna filtri avamine on võimalik alles peale torustiku vabastamist gaasirõhu alt ja läbipuhumist lämmastikuga, millega kaasneb keskkonna temperatuuri tõus, siis avamise hetkeks on ummistavad komponendid juba aurustunud või muutunud õhukeseks vedelaks õlikihiks. Seetõttu oli alguseperioodil operaatoritel keeruline probleemi põhjusteni jõuda, millest on tingitud ootamatud tõhutõusud punkerdamise ajal. Eksperimenteerimise eesmärgiga oli erandkorras vastu võetud otsus teha filtri avamine selle soojenemist ootamata ehk kohe peale kiiret läbipuhumist lämmastikuga, et visuaalsel vaatlusel tuvastada filtri seisundit punkerdamise tingimustele võimalikult lähedal. Katsete tulemusena selguski, et LNG-le iseloomulikul temperatuuril tekib rasketest süsivesikutest tahke ummistav mass (Pilt 3.6 a), mis soojenedes osaliselt aurustub ja muutub õliks (Pilt 3.6 b).



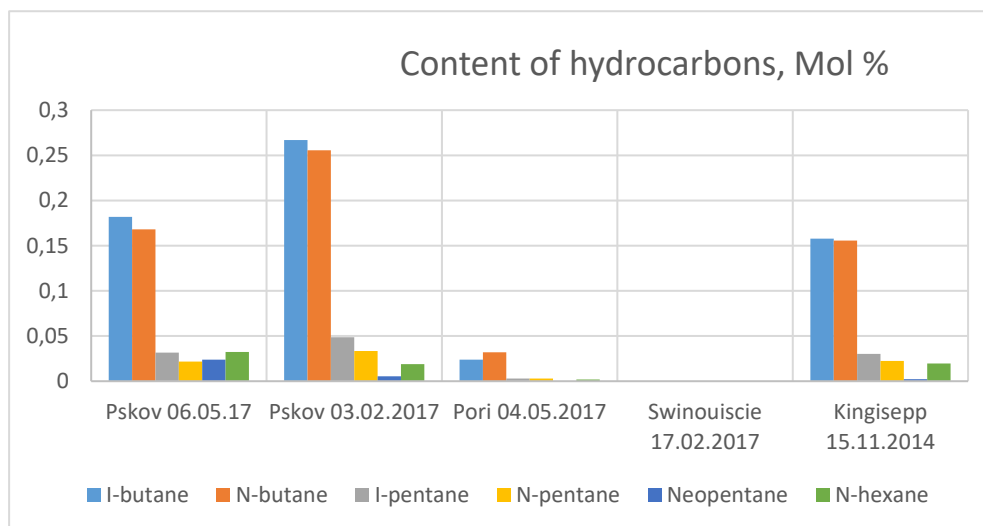
Pilt 3.6.

a) LNG treileril asuv koonusfilter ning selles tahkunud rasked süsivesikud

b) sama mass peale 2-3 minutulist soojenemist atmosfääritingimustes

Komponent	Mol %					Melting point, C	Boiling point, C
	Pskov 06.05.17	Pskov 03.02.2017	Pori 04.05.2017	Swinouiscie 17.02.2017	Kingisepp 15.11.2014		
Methane	93,3036	93,1784	91,478	93,1551	94,6873	-182,5	-161,49
Ethane	5,15	4,472	7,97	6,6805	2,9899	-182,8	-88,5
Propane	1,1	1,5	0,399	0,0407	0,9052	-187,7	-42,2
Nitrogen	0,058	0,2132	0,088	0,1237	0,8138	-210,0	-195,7
I-butane	0,182	0,2671	0,024	0	0,1579	-159,2	-11,7
N-butane	0,168	0,2557	0,032	0	0,1555	-140	-1
I-pentane	0,0317	0,0487	0,003	0	0,0302	-159,9	27,8
N-pentane	0,0216	0,0335	0,003	0	0,0225	-129,8	35,9
Neopentane	0,024	0,0054	0	0	0,0021	-16,6	10,01
N-hexane	0,0324	0,0189	0,002	0	0,0196	-96,0	68,05

Tabel 3.3. LNG-s sisalduvate komponentide koguse võrdlus erinevatest tarneallikatest ning nende sulamis- ja keemistemperatuurid [6]



Graafik 3.1. Süsivesikute kogused LNG-s sõltuvalt tarneallikast [6]

Erinevatest allikatest tarnitud LNG koostise ja opereeritavuse analüüs (Tabel 3.3 ja Graafik 3.1) näitas, et Soome Pori ning Poola Swinouiscie terminalidest tarnitud kütusel on raskete süsivesikute osakaal oluliselt madalam võrreldes Venemaa tootmistehastest tarnitud ning üldnimetatud opereerimisprobleeme ei esinenud. Olukord paranes ning nende komponentide osakaal langes peale lisapuhastusseadmete ja filtrite paigaldamist tehases sissetuleva torugaasi liinile.

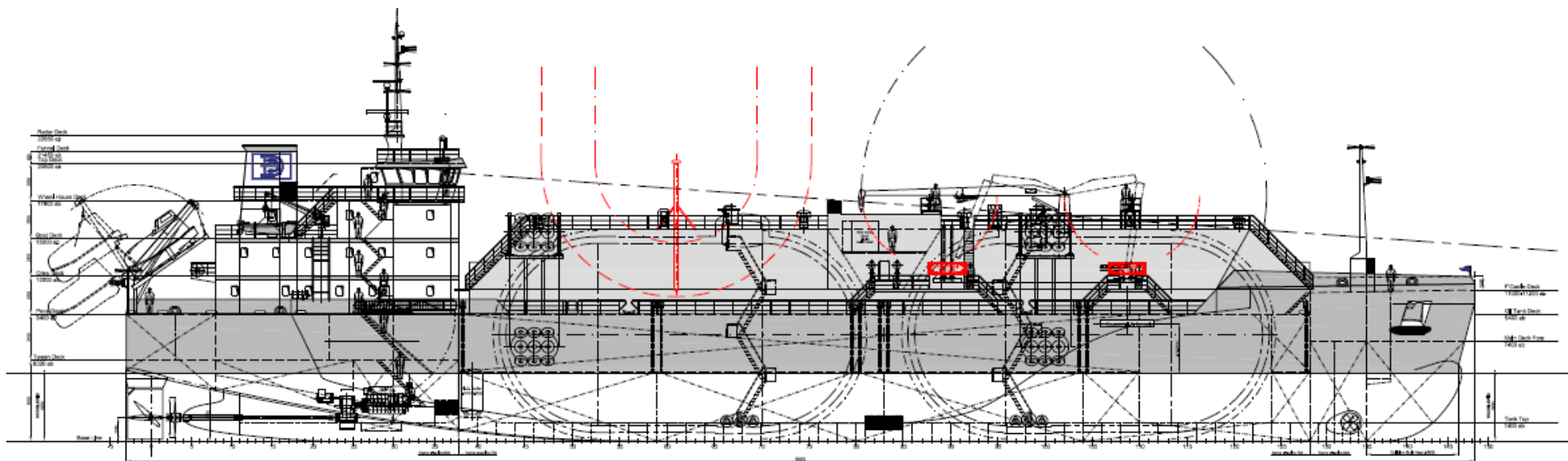
3.8. LNG punkerdamise operimeerimine ja ohutustaseme tõstmine

Nii HAZID analüüsi tulemused kui ka praktilise töö käigus kinnitust saanud probleemid ja ohuallikad ning üldine turutendents viitavad sellele, et Truck-to-Ship punkerdamise meetod LNG äris on ajutine lahendus ja kõikide osapoolte arusaam edaspidisest arengus on üleminek Ship-to-Ship meetodile. Nii Tallinna Sadam, Helsinki sadam, Tallink kui ka teised potentsiaalsed LNG laevade operaatorid on avaldanud selget eelistust just sellele meetodile ning näevad seda teenust praktikas toimumas juba lähitulevikus.

3.9. AS Eesti Gaasi planeeritav LNG punkerdamise laev

Kuna AS Eesti Gaas on peale esimest aastat pikendanud koostöölepingut Tallinkiga veel 5-ks aastaks, siis tõenäoliselt saab sellest ettevõttest regiooni esimene LNG punkerlaeva operaator. Vastavasisuliste ettevalmistustöödega ettevõtte tegeleb ning on valminud juba esmane punkerlaeva disain (Pilt 3.12. Planeeritava punkerlaeva eesmärk oleks hankida LNG-d Läänemere ümbruses asuvatest terminalidest ning pakkuda paindlikku ning ohutut punkerdamise teenust nii sadamates kui ka avamerel. Planeeritava punkerdamise laeva põhilised näitajad on järgmised:

- Laeva mõõdud umbes 100m pikkus ja 20m laius, mis võimaldab sisenemist ka suhteliselt väikestesse sadamatesse
 - Kõrge manööverdamisevõime tagatakse kahe ökonoomse ja keskkonnasõbraliku dual-fuel mootoriga
 - Pardal on kaks C-tüüpi mahutit summaarse mahutavusega umbes 6000 m³
 - Mahutitesse monteeritud pumpade süsteem võimaldab LNG voolukiirust kuni 700 m³/h
- [6]

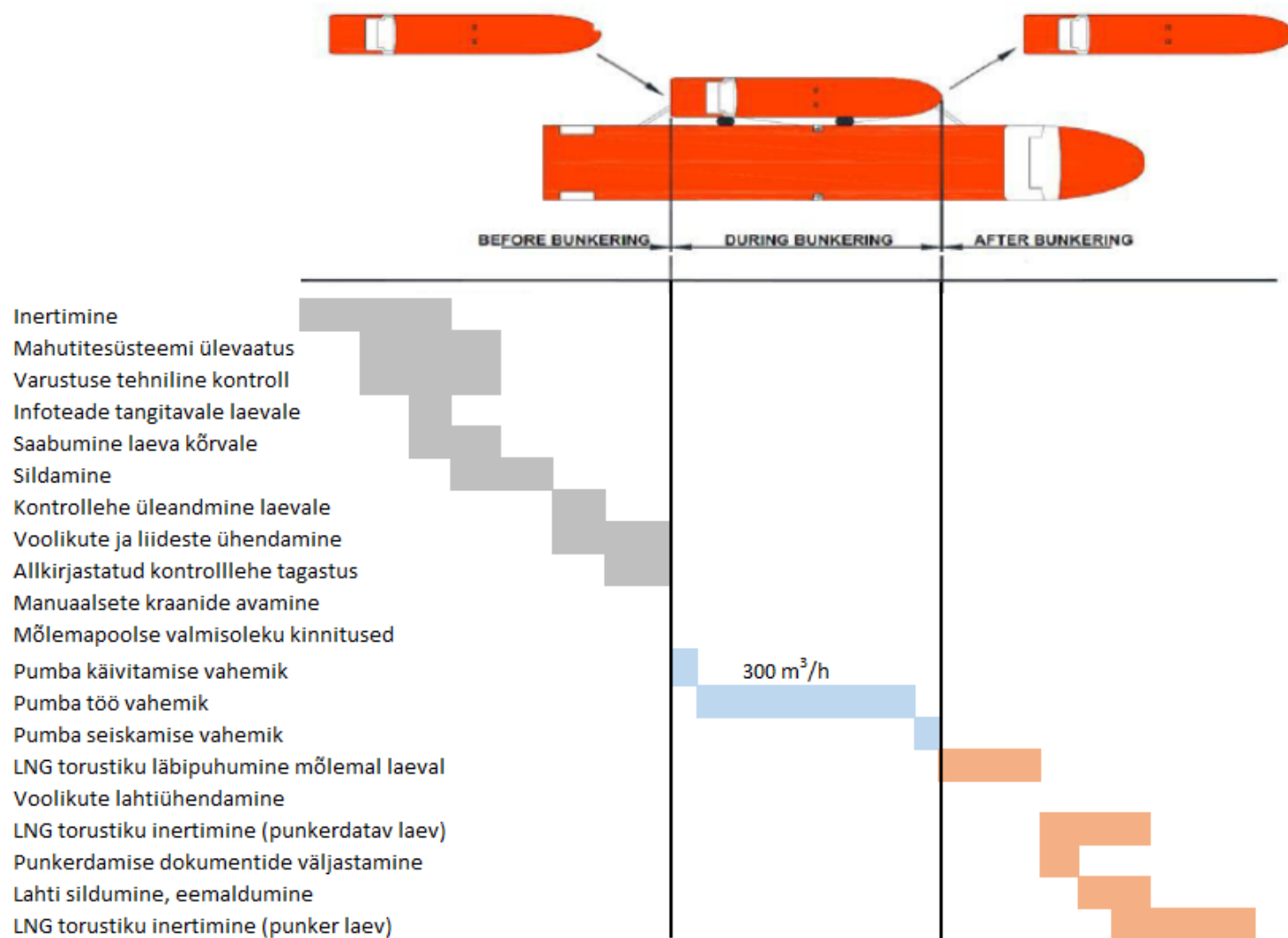


Pilt 3.12. AS Eesti Gaasi planeeritava LNG punkerdamise laeva eskiisdisain [6]

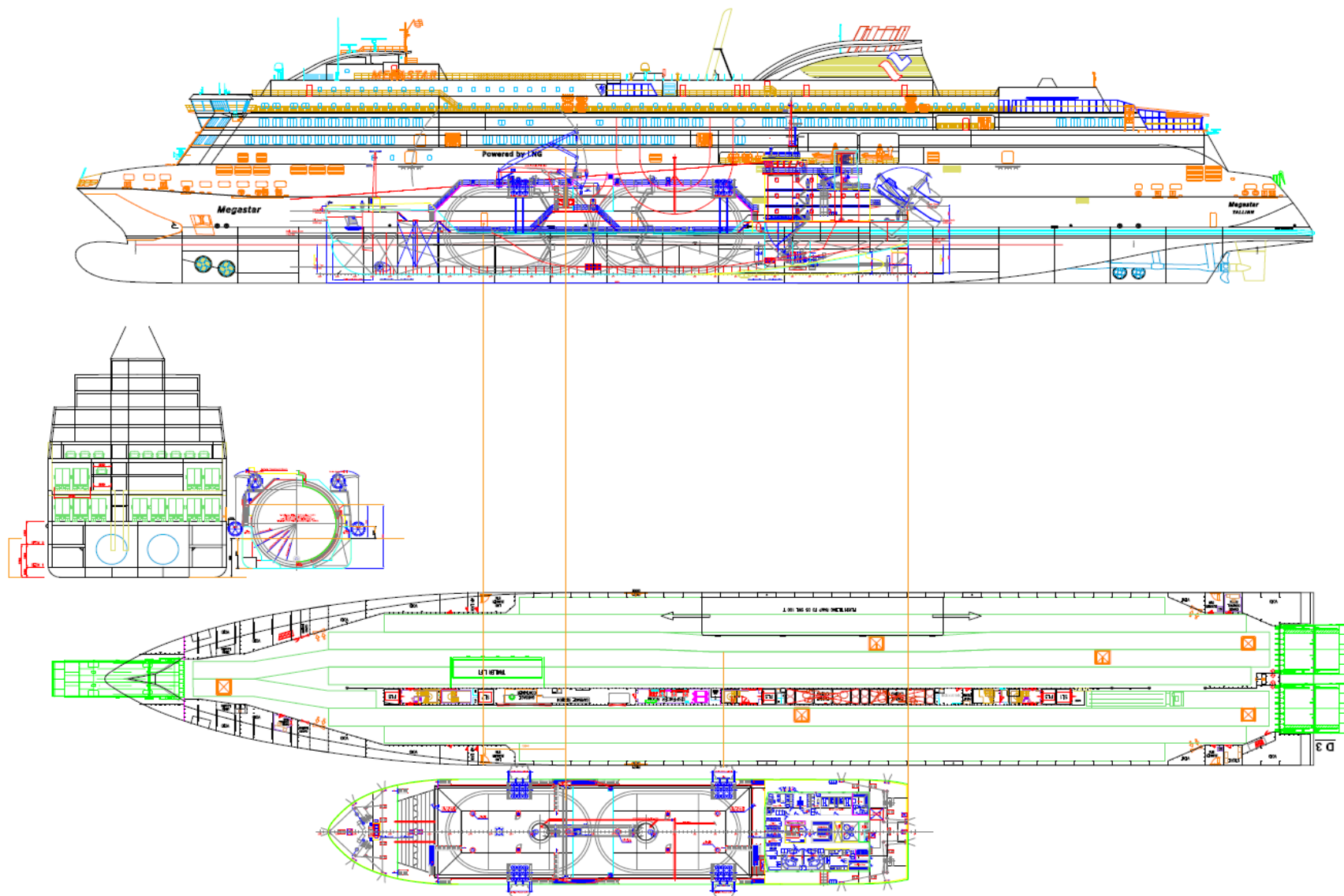
Kõige olulisemad põhjused, miks Ship-to-Ship (STS) punkerdamise meetod on eelistatud kõikide seotud osapoolte poolt, on järgnevad:

- Punkerdamisopratsioonide kordade arv väheneb 11 korda ehk ühe Ship-to-ship punkerdamisel üle antav LNG kogus 440m^3 on võrdne 11 LNG pollhaagise tarnega. Sellega seoses on vaja teostada 11 korda harvem voolikute, liitmike, seadmete kontrolli ja seega on töötajate tähelepanu paremini oma ülesannetele fokusseeritud. Punkerdamisopratsiooni rutiinsusest tekkivad riskid vähenevad märgatavalt.
- Punkerdamisoperatsioonidel osalevate inimeste arv väheneb oluliselt. Praegu täidab iga treilerveoki juht teatud kohustust punkerdamisel. Veokijuhte, eks osaleb punkerdamistel on praeguse lahenduse puhul kokku ca. 8-10. Mida rohkem on punkerdamisel osalevaid inimesi, seda suurem on inimliku eksimuse riskifaktor.
- Üldine punkerdamiseks vajalik aeg väheneb. Kui Megastar vajab ühel punkerdamiskorral ca 450 m^3 LNG-d, siis selle ümberpumpamine STS meetodil võtab aega ca. 1,5 h. Punkerlaeva lähenemine ja eemaldumine koos ettevalmistuste ja toimingute lõpetamisega peab mahtuma umbes 1 tunni sisse (Joonis 3.13). Seega kogu protseduuri kestvus punkerdamiseks 450 m^3 võtab 2,5-3 tundi, tänase 4-5 tunni asemel, mille jooksul jõuab punkerdada maksimaalselt 240 m^3 . Selline ajareserv on oluline andmaks töötajatel võimaluse teostada topeltkontrolli kõikide vajalike protseduuride käigus.
- SIMOPS riskid on maandatud. Kai peal on alati võimalus, et vaja on teha mingeid muid operatsioone: lume koristus, kaldaseadmete remont, kai pealt laevakere värvimine, reisijate tuubuste, - galeriide remont. Need kõik jäävad praegusesse punkerdamise ohualasse. STS punkerdamisel moodustab Megastar ise füüsilise barjääri võimalikule gaasi levikule. Pealegi on Megastari ventilatsioon suures osas organiseeritud nii, et sissetõmbavad avad asuvad laeva paremas pardas, väljapuhuvad aga vasakus pardas. Kuna punkerlaev hakkab seisma vasakus pardas, siis on vähendatud ka oht, et võimaliku gaasilekke korral põlevad gaasid satuvad laeva siseruumidesse (Joonis 3.14)

- Laevade saabumine sadamasse, liikumine sadamates ja lahkumine on väga hästi reguleeritud, mis tagab LNG tarnekindluse. Igal treilerveokil on LNG kohale toomiseks vaja läbida hulk erinevaid etappe: laadimine tehases või terminalis, sõit, piiriületus jne. Nendel etappidel on hulgaliselt juhtidest mitteolenevaid ohutegureid: teeolud, liiklusummikud, ilmastikuolud. võimalikud liiklusõnnetused jne. Kõike eelnevat arvestades võib väita, et LNG tarnekindlus punkerlaevaga on oluliselt suurem, kui treilerveokitega. Ühekordse laadungi kohale jõudmine punkerdatava laeva lähedale on seotud vähemate riskidega.
- Ohutus sadama alas. Võimaliku LNG lekke korral kai peal võib tekkida olukord, kus treilerveokit ei ole võimalik kuhugi teisaldada ning seetõttu tulekahju korral võib hävineda hulgaliselt kaldarajatisi. LNG punkerlaev ja Megastari LNG punkerjaam on varustatud statsionaarse tulekustutussüsteemiga. Tulekahju korral LNG vooliku liitekohas on võimalik käivitada mõlema laeva tulekustutussüsteemid ning LNG punkerlaev võib eemalduda punkerdatavast laevast avamerele, kus laeva meeskonna ja Päästeameti abiga tuli kontrolli alla saadakse ilma kaldarajatisi ning laeva ohustamata. Eelis on selles, et punkerlaeva juhtimissild ja masinaruum asuvad võõris olevast LNG punkerdamismanifoldist piisavalt kaugel. Treilerveoki puhul aga võivad leegid ka väikese lekke korral ulatuda juhikabiinini.
- LNG punkerlaeva seadmeid kontrollitakse plaanipäraselt ning kontrollimiste kvaliteet on tagatud opereeriva firma juhtimisstandarditega ning laeva klassiühingu järelevalve protseduuridega. Treilerveokite puhul on küll garanteeritud ADR vedude kvaliteet, kuid LNG ümber pumpamistehnika kontrollimise protseduurid ei ole standardiseeritud ning sellel puudub riiklik järelevalve. [18]



Joonis 3.13 LNG punkerdamise korraldus Ship-to-Ship meetodil, kestusega kokku kuni 3 tundi [3]



Joonis 3.14. Megastari ja plaanitava LNG punkerdamise laeva ühilduvusanaliüs[21] [6]

KOKKUVÕTE

Tingituna rahvusvahelise konventsiooni MARPOL 73/78 heitmete piirangutest meretranspordis, on viimasel ajal aina rohkem kõne all veeldatud maagaasi ehk LNG kasutamine. Võrreldes klassikaliste õlipõhiste kütustega eraldab maagaas põledes märgatavalt väiksemat kogust heitmeid, mis paneb laevaomanikke aina enam otsustama just selle kütuse kasutamise kasuks. Küll aga kaasnevad keerulisema LNG tehnoloogia kasutamisega mitmed ohud, millele, autori arvates, ei pöörata piisavalt tähelepanu. Nimelt omab LNG oma keemilis-füüsikaliste omaduste tõttu lisaks maagaasi tuleohtlikkusele veel täiendavaid ohte nagu külmakahjustuste risk, aurude kiire paisumine ja BLEVE. See lisab aga kogu LNG tarnimise ahelale täiendavaid nõudeid ja tehnoloogilisi keerukusi alates kütuse tootmisest ja ladustamisest kuni punkerdamiseni välja. Klassiühingud on jaganud kaitsemehhanismid kolmeks grupiks: ennetavad meetmed, ohuolukorras rakendatavad meetmed ning reageerimine avariiolekorras. Mida rohkem panustatakse planeerimise, ettevalmistuse ja detailse riskihindamise faasi, seda väiksema tõenäosusega tekib vajadus kahe järgneva kaitsebarjääri järele.

LNG kasutamise kohta on tehtud palju erinevaid teoreetilisi uuringuid, kuid käesolevas töös on tuginetud just reaalses praktikas hangitud kogemusele. M/L Megastar ehitati Soomes Mayer Turku tehases ning Helsinki-Tallinna liinil hakkas see töötama 2017 aasta algusest. See on Balti regioonis esimene LNG-l töötav laev, seetõttu kütusetarne ohutuse ettevalmistus oli kõrgendatud tähelepanu all kõikide osalejate poolt – sadamavõimud, järelevalveorganid, päästeamet ja Tallink. Punkerdamine on korraldatud AS-i Eesti Gaas poolt truck-to-ship meetodiga kaasaegsete LNG poolhaagistega. Esimese LNG tarne teostamisele eelnes põhjalik ettevalmistustöö, mille käigus valmisid mitmed riskide hindamise analüüsid koos meetmete tuvastamisega nende minimeerimiseks. Riskianalüüsi käigus oli välja arvatud ka ohutsoon punkerdamisekoha ümber raadiusega 34m, milles viibides oli seatud nimekiri keelavatest ja kohustavatest tegevustest. Punkerdamise liidese projekteerimisel oli ette nähtud kõik kaasaegsed krüogeenseadmed, nende hulgas kuivad kiirühendused (DCC) ja murduvad krüogeenliidesed (BAC).

Punkerdamiseoperatsioonid toimuvad neljal kuni viiel korral nädalas, mis tähendab, et sama palju kordi toimub voolikute kokku- ja lahtiühendamine, sisse- ja väljatõstmine, läbipuhumine, pumpade käivitamine ja seiskamine ning kõikide muude protseduuride teostamine, millega võib kaasna kas tehnoloogiline või inimeksimuse risk. Harvem, kuid suurema koguse punkerdamine korraga on eelistatud lahendus nii sadamavõimude kui ka laevade opereerijate

poolt. Kõige sobivam meetod selleks on Ship-to-Ship, mida lähitulevikus plaanib Eesti sadamates juurutama hakata ka AS Eesti Gaas. Megastari punkerdamise aeg ja operatsioonide arv väheneb, järelvalve LNG tehnoloogia üle muutub tõhusamaks, inimfaktori osakaal väheneb ning ohtliku kauba vedu veokitega sadama territooriumil kaob.

Käesoleva töö käigus selgus, et vaatamata kõrgetele ohutusmeetmetele on LNG punkerdamise puhul tegemist kõrgendatud ohutasemega operatsiooniga, mida on võimalik optimeerida efektiivsemaks kasutades spetsiaalseid LNG punkerdamise laevu.

Nagu oli eesmärgina seatud, võib töö tulemusi kasutada LNG punkerdamise standardiseerimis dokumentide koostamisel.

SUMMARY

Due to International convention MARPOL 73/78 about the reduction of emissions in marinetime transport segment, it becomes more actual to start using LNG as fuel. Compared to classical oil-based fuels LNG emits significantly less pollution and this makes the main reason to shipowners to choose LNG. However, the more sophisticated LNG technology creates several additional hazards, that, in opinion of the author, have too little attention. Because of its chemical-physical properties liquefied natural gas has in addition to flammability several other hazards such as risk of frost damage, rapid expansion of cold vapours and BLEVE. This adds additional requirements and technological complicity to whole supply chain starting from production and storing LNG and ending with bunkering operations. Classification societies have divided safety mechanisms into three main groups: preventive actions, measures applicable in hazardous situation and emergency respond. The more effort is made during the planning and preparing phase, the less probability of the need to take into use the other two groups will be.

There are many different theoretical studies regarding the use of LNG, but this work is founded on experience obtained during real practice. M/S Megastar was built in Finnish shipyard Mayer Turku and started to operate between Tallinn and Helsinki since the beginning of 2017. This is a first LNG-driven ship in Baltic region, therefore the whole supply chain of the fuel was under high priority attention by all parties of the project – port authorities, supervisory bodies, rescue brigade and also Tallink team. The bunkering is conducted by AS Eesti Gaas with truck-to-ship method, using a fleet of modern semi-trailers. Before the first delivery of LNG, a high level preparation work was done which issued different risk assessment studies together with identification of measures to reduce hazards. During risk assessment a safety zone of 34 meters was calculated around the bunkering place and a list of prohibiting and obliging actions in this zone was created. The design of bunkering interface was composed out of most modern cryogenic equipment, among them Dry Cryogenic Couplings (DCC) and Break Away Couplings (BAC).

Bunkering operations are held four or five days a week, which means the same number of ADR truck manouverings, connections and disconnections of hoses, hose handelings, purgings, starts and stops of pumps and all other procedures, that may cause any technological or human failure. Seldom amount of operations, but with higher volume, is preferable solution both for port and ship operators. The most suitable method in this case is ship-to-ship solution, which is

also planned to be implemented in Estonian ports in near future by AS Eesti Gaas. The amount of operations and bunkering time of Megastar will be decreased, supervision over LNG technology becomes more efficient, the possibility of human error will be smaller and LNG truck traffic in the port will disappear.

During this research work came out that despite of high safety measures for LNG bunkering, it is still the operation with a high danger level, that can be optimized and reduced by taking into use special LNG bunkering vessels.

As a set target, the results of this report can be used for preparation of LNG bunkering standardization documents.

Kasutatud kirjanduse loetelu

1. Marineinsight kodulehekülg [WWW] <https://www.marineinsight.com/naval-architecture/understanding-design-liquefied-gas-carriers/> (20.04.2018)
2. Andrius Uldukis, DNV-GL, presentatsioon „LNG Powered Vessel: Trends and Technical Aspects, Märts 2018
3. European Maritime Safety Agency, Guidance on LNG Bunkering to Port Authorities and Administrations, 2018
4. Hendrikson & KO, Tallinna Vanasadamas LNG punkerdamine – Riskide ja ohualade hinnang, 2017
5. Tecnicas, LNG Bunkering Operation in Tallinn Old City Harbour: Hazard Identification Workshop Report, 2015
6. AS Eesti Gaas, välja töötatud LNG punkerdamise projektdokumentatsioon, 2016
7. ABS Group, LNG Bunkering: Technical and Operational Advisory, 2014
8. Bureau Veritas, Guidelines on LNG Bunkering, July 2014
9. Wärtsilä kodulehekülg [WWW] <https://www.wartsila.com/products/marine-oil-gas/engines-generating-sets/dual-fuel-engines>
10. Fluxys Belgium kodulehekülg [WWW] <http://www.fluxys.com/belgium/en/About%20natural%20gas/fuelfortransport/LNGships/LNGships>
11. Veebiartikkel „Химические технологии и продукты“ ajakirjas Российскиемалотоннажные производства по сжижению природного газа [WWW] <https://cyberleninka.ru/article/v/rossiyskie-malotonnazhnye-proizvodstva-po-szhizheniyu-prirodnogo-gaza>
12. International Association of Ports and Harbours, LNG Bunkering Checklist for Truck to Ship guidelines, June 26th 2014
13. Mann Teknik AB kodulehekülg [WWW] <https://www.manntek.se/products/cryogenic-break-away-couplings>
14. DNV GL, Development and operation of liquefied natural gas bunkering facilities – Recommended Practice, October 2015
15. LNG in Baltic Sea Ports, LNG Handbook (www.lnginbalticseaports.com)
16. International Code of Safety for Ship Using Gases or Other Low-flashpoint Fuels (IGF Code), 2017

17. The International Code of the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk (IGC Code), May 2016
18. Vinkel, V. vestlusest (03.04.2018) Megastari opereerimise optimeerimine
19. LNG bunkering in the Port of Antwerpen, guidelines, Port of Antwerpen, 2014
20. International Association of Classification Societies, „LNG bunkering Guidelines“, No. 142, June 2016
21. M/L Megastar tehniline projektdokumentatsioon, väjavõtted