

Tuomas Raivio, Venla Kontiokari, Elina Heikinheimo,
Jatta Aho
Javad Taghinia, Bingzhi Li, Juha Tanntari

Selvitys metaanilla toimivien kaasuaajoneuvojen käyttörajoituksista maanalaisissa tiloissa

Tammikuu 2018

Valtioneuvoston selvitys-
ja tutkimustoiminnan
julkaisusarja 10/2018

KUVAILULEHTI

Julkaisija ja julkaisuaika	Valtioneuvoston kanslia, 08.03.2018		
Tekijät	Tuomas Raivio, Jatta Aho, Venla Kontiokari, Elina Heikinheimo Gaia Consulting Javad Taghinia, Bingzhi Li, Juha Tanntari Process Flow Solution LTD Oy		
Julkaisun nimi	Selvitys metaanilla toimivien kaasujoneuvojen käyttörajoituksista maanalaisissa tiloissa		
Julkaisusarjan nimi ja numero	Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 10/2018		
Asiasanat	Kaasukäyttöiset ajoneuvot, maakaasu, biokaasu, metaani, maanalaiset tilat, riskit		
Julkaisun osat/ muut tuotetut versiot	-		
Julkaisuaika	8.3.2018	Sivuja 83	Kieli Suomi

Tiivistelmä

Tässä työssä on verrattu kaasupolttoaineiden riskejä nestemäisiin polttoaineisiin maanalaisissa tai muuten suljetuissa tiloissa. Selvityksen tavoitteena on ollut yhtäältä luoda käsitys kaasukäyttöisten ajoneuvojen käyttökieltilanteesta Suomessa sekä kahdessa vertailumaassa, ja toisaalta vertailla kaasukäyttöisten ajoneuvojen riskejä nestepolttoainetta käyttävien ajoneuvojen riskeihin kyseisissä tiloissa.

Työssä referoidut tilastot osoittavat, että polttoaineen merkitys onnettomuustiheydessä ei ole merkittävä. Suoritettu vertaileva riskinarviointi osoittaa, että kaasukäyttöisten henkilöajoneuvojen riskilisa maanalaisissa tai suljetuissa tiloissa on bensiinikäyttöisiin ajoneuvoihin verrattuna korkeintaan pieni. Dieselkäyttöisiin ajoneuvoihin verrattuna kaasukäyttöiset ajoneuvot edustavat jonkinasteista riskilisää, mikä on syytä ottaa huomioon esimerkiksi maanalaisten bussiterminaalien ja vastaavien tilojen suunnittelussa. Riskilisää ei ole perusteltua hallita laajamittaisilla lainsäädännön tai esimerkiksi rakentamismääräysten muutoksilla, vaan tapauskohtaisella harkinnalla.

Liite 1 Haastatellut tahot ja henkilöt sekä työpajan osallistujat

Liite 2 Muut polttoainetekniikat

Liite 3 Relevantit rakentamismääräykset ja Liikenneviraston tunneliohje

Liite 4 Seurausanalyysi ja mallinnus metaanivuodosta pienessä pysäköintihallissa

Tämä julkaisu on toteutettu osana valtioneuvoston vuoden 2017 selvitys- ja tutkimussuunnitelman toimeenpanoa (tietokayttoon.fi).

Julkaisun sisällöstä vastaavat tiedon tuottajat, eikä tekstisisältö välttämättä edusta valtioneuvoston näkemystä.

PRESENTATIONSBLAD

Utgivare & utgivningsdatum	Statsrådets kansli, 08.03.2018		
Författare	Tuomas Raivio, Jatta Aho, Venla Kontiokari, Elina Heikinheimo Gaia Consulting Javad Taghinia, Bingzhi Li, Juha Tanntari Process Flow Solution LTD Oy		
Publikationens namn	Utredning över metangasdrivna fordons begränsningar i användningen i underjordiska utrymmen		
Publikationsseriens namn och nummer	Publikationsserie för statsrådets utrednings- och forskningsverksamhet 10/2018		
Nyckelord	Gasdrivna fordon, naturgas, biogas, metan, underjordiska utrymmen, risker		
Publikationens delar /andra producerade versioner	-		
Utgivningsdatum	8.3.2018	Sidantal 83	Språk Finska

Sammandrag

I denna utredning jämfördes riskerna av fordonsgas och flytande bränsle i underjordiska eller tillslutna utrymmen. Utredningens ändamål har varit dels att forma en uppfattning om gasdrivna fordons begränsningar i användningen i Finland och i två jämförelseländer, dels att jämföra riskerna mellan gasdrivna fordon och fordon med flytande bränsle i dylika utrymmen.

Enligt den refererade statistiken har drivmedlen ringa betydelse till olyckstätheten. En jämförande riskbedömning visar, att i underjordiska eller tillslutna utrymmen utgör gasdrivna personbilar en mycket liten riskökning jämfört med bensindrivna fordon. Jämfört med dieseldrivna fordon bidrar gasdrivna fordon med en ökad risk, vilket bör tas i beaktande t.ex. vid planeringen av underjordiska bussterminaler eller motsvarande utrymmen. Riskökningen är dock så liten att den går att behandlas enskilt fall för sig, utan att kräva nämnvärd ingripande i lagstiftningen eller byggförordningar.

Bilaga 1 Intervjuobjekt och intervjupersoner samt deltagaren i workshopen

Bilaga 2 Övriga bränslesystem

Bilaga 3 Relevanta byggförordningar samt Trafikverkets instruktion för tunnlar

Bilaga 4 Konsekvensbedömning och modellering av metanläckage i en liten parkeringshall

Den här publikation är en del i genomförandet av statsrådets utrednings- och forskningsplan för 2017 (tietokayttoon.fi/sv).

De som producerar informationen ansvarar för innehållet i publikationen. Textinnehållet återspeglar inte nödvändigtvis statsrådets ståndpunkt

DESCRIPTION

Publisher and release date	Prime Minister's Office, 08.03.2018		
Authors	Tuomas Raivio, Jatta Aho, Venla Kontiokari, Elina Heikinheimo Gaia Consulting Javad Taghinia, Bingzhi Li, Juha Tanttari Process Flow Solution LTD Oy		
Title of publication	Restrictions concerning methane-driven vehicles in underground areas		
Name of series and number of publication	Publications of the Government's analysis, assessment and research activities 10/2018		
Keywords	Natural gas vehicles, natural gas, bio gas, methane, underground areas, risks		
Other parts of publication/ other produced versions	-		
Release date	8.3.2018	Pages 83	Language Finnish

Abstract

This survey compared risks arising in underground or other closed parking areas from vehicles fuelled by compressed natural or bio gas to vehicles fuelled by gasoline/petrol and diesel oil. Restrictions regarding natural gas vehicles (CNG vehicles) in Finland and two benchmark countries were investigated, and risks arising from CNG and liquid fuel were compared in two relevant accident scenarios.

Statistics referred to in this survey show that the fuel system does not significantly affect the rate of accidents. A comparative risk assessment indicates that risks associated with methane-driven passenger cars are not significantly higher than the risks related to gasoline-driven cars in underground or otherwise closed areas. Compared to diesel-fuelled vehicles the risks of methane-fuelled vehicles are slightly higher, which should be taken into account for example when planning underground bus terminals or similar buildings. It is estimated that this additional risk does not require risk management via wide scale changes in legislation or building regulations, but should be dealt with case by case.

Appendix 1 Interviewed organisations and persons, and participants of the workshop

Appendix 2 Other fuel system techniques

Appendix 3 Relevant building regulations and tunnel guidance by the Finnish Transport Agency

Appendix 4 Modelling of consequences caused by a methane release in a small parking house


This publication is part of the implementation of the Government Plan for Analysis, Assessment and Research for 2017 (tietokayttoon.fi/en).

The content is the responsibility of the producers of the information and does not necessarily represent the view of the Government.



SISÄLLYS

Esipuhe	6
TIIVISTELMÄ	7
Käytetyt lyhenteet	8
1 Johdanto	9
1.1 Hankkeen tausta ja tavoitteet	9
1.2 Tarkasteltavat polttoaineet	9
1.3 Raportin rakenne	10
2 Kaasuajoneuvot ja maanalaiset tilat	11
2.1 Kaasuajoneuvojen määrä Suomessa ja arvio yleistymisestä	11
2.2 Tyypillinen maanalainen käyttö	15
2.3 Tapahtuuko kaasuajoneuvoille enemmän onnettomuuksia?	16
2.4 Millaisia ovat metaanikäyttöisten ajoneuvojen onnettomuudet?	18
2.5 Riskin kokemiseen vaikuttavia tekijöitä	21
3 Kaasuautojen käyttörajoitukset Suomessa	23
3.1 Kieltojen laajuus tällä hetkellä	23
3.2 Case Kamppi	23
3.3 Kaasuajoneuvot rakentamismääräyksissä	25
4 Kaasuautojen käyttörajoitukset vertailumaissa	26
4.1 Saksa	26
4.2 Ruotsi	27
5 Vertaileva riskinarviointi - kirjallisuuskatsaus	30
5.1 CNG-tekniikka ja sitä ohjaavat standardit ja keskeiset erot nestepolttoainetekniikkaan	30
5.2 Katsaus onnettomuusmallinnuksiin	34
6 Vuotoskenaarioiden vertaileva analyysi	40
6.1 Tarkasteltavat vuotoskenaariot	40
6.2 Skenaario 1	42
6.3 Skenaario 2	48



6.4	Yhteenveto.....	49
7	Yhteenveto ja kehittämissuhteet.....	50
7.1	Yhteenveto.....	50
7.2	Kehittämissuhteet- ja toimintatapaehdotuksia.....	51
	LÄHTEITÄ JA TAUSTA-AINEISTOJA	53
	Liite 1: Haastatellut tahot ja henkilöt sekä työpajan osallistajat.....	57
	Liite 2: Muut polttoainetekniikat	60
	Liite 3: Relevantit rakentamismääräykset ja Liikenneviraston tunneliohje	62
	Liite 4 Seurausanalyysi ja mallinnus metaanivuodosta pienessä pysäköintihallissa ..	65

ESIPUHE

Tämä julkaisu on valtioneuvoston tutkimus- ja selvitystoimintaan kuuluvan hankkeen ”Selvitys metaanilla toimivien kaasuaajoneuvojen käyttörajoituksista maanalaisissa tiloissa” loppuraportti. Hankkeessa selvitettiin, aiheuttavatko kaasukäyttöiset autot bensiini- tai dieselkäyttöisiin autoihin verrattuna korkeampia riskejä maanalaisissa tai muuten suljetuissa tiloissa. Taustalla oli tarve selvittää mahdollisia esteitä tai haasteita turvallisuuskulmasta kaasukäyttöisten autojen yleistymiselle Suomessa.

Selvityksen laativat Tuomas Raivio, Venla Kontiokari, Elina Heikinheimo ja Jatta Aho Gaia Consulting Oy:stä. Hankkeessa toteutetut kaasuvuodon seurausanalyysit ja mallinnukset toteuttivat Javad Taghinia, Bingzhi Li ja Juha Tanntari Process Flow Solution Ltd:stä. Hankkeen ohjausryhmään kuuluivat Saara Jääskeläinen liikenne- ja viestintäministeriöstä, Harri Hillamo työ- ja elinkeinoministeriöstä sekä Veli-Pekka Reskola maa- ja metsätalousministeriöstä. Ohjausryhmän asiantuntijajäsenenä toimi lisäksi Aki Tilli liikenteen turvallisuusvirasto Trafista.

Hankkeessa perehdyttiin kaasuaajoneuvotekniikkaan kirjallisuus- ja lainsäädäntökatsauksella sekä ajoneuvo- ja kaasualan edustajien haastatteluilla. Kaasuaajoneuvojen nykyisiä ja tulevia käyttömääriä selvitettiin tilastoista sekä kohdennetuilla haastatteluilla. Kaasuaajoneuvoja koskevia käyttörajoituksia Suomessa ja vertailumaissa kartoitettiin asiantuntijahaastatteluilla sekä kirjallisuus- ja lainsäädäntötarkastelulla. Myös rakennusmääräyksiin ja relevantteihin rakennetekniisiin ohjeisiin perehdyttiin. Kaasuaajoneuvoihin liittyviä onnettomuustapauksia ja niiden yleisyyttä selvitettiin kirjallisuudesta, joka käsitti muun muassa riskinarvioita ja tilastotietokoosteita. Tietojen perusteella valittiin tässä hankkeessa kuvatut onnettomuusskenaariot, joissa kaasukäyttöisen ajoneuvon käyttäytymistä verrattiin bensiinikäyttöisen ajoneuvon käyttäytymiseen. Alustavia tuloksia esiteltiin ja verifioitiin joulukuussa 2017 työpajassa, jonne oli kutsuttu laajalti asiantuntijoita.

Hankkeen tulosten toivotaan tukevan ensisijaisesti pelastuslaitoksia sekä säädösten ja ohjeistusten valmistelua eri tasoilla. Julkaisun toivotaan hyödyttävän myös pysäköintihallien ja liikenneterminaalien suunnittelua.

TIIVISTELMÄ

Suomessa tavoitteena on, että vaihtoehtoisten käyttövoimien osuus tieliikenteen energiasta olisi vähintään 40 prosenttia vuonna 2030. Biopolttoaineita pidetään usein hyvänä vaihtoehtona päästövähennysten aikaansaamiseksi. Biokaasu on tässä suhteessa tärkeä liikenteen biopolttoaine. Vaikka maakaasu ei ole biopolttoaine, on sillä paljon myönteisiä ominaisuuksia liikennepolttoaineena. Tavoitteena on, että Suomessa olisi 50 000 kaasukäyttöistä ajoneuvoa vuonna 2030.

Eräs bio- ja maakaasun liikennepolttoainekäytön yleistymisen mahdollinen este on kysymys kaasumaisten polttoaineiden turvallisuudesta, kun ajoneuvolla ajetaan suljettuun tai maanalaiseen tilaan.

Tässä työssä on verrattu kaasupolttoaineiden riskejä nestemäisiin polttoaineisiin sisätiloissa. Työn laati Gaia Consulting Oy. Selvityksen leviämis- ja palomallinnukset laati Process Flow Solution Ltd.

Selvityksen tavoitteena on ollut yhtäältä luoda käsitys kaasukäyttöisten ajoneuvojen käyttökieltotilanteesta Suomessa sekä kahdessa vertailumaassa, ja toisaalta tuottaa vertailupohjaa sille, miten kaasukäyttöisten ajoneuvojen riskit poikkeavat nestepolttoainetta käyttävien ajoneuvojen riskeistä maanalaisissa tiloissa.

Normaalitilanteissa ja -käytössä kaikki polttoaineet ovat turvallisia. Erot vaaroissa liittyvät vuototilanteisiin tai polttoaineiden käyttäytymiseen onnettomuustilanteessa. Kaasukäyttöisten ajoneuvojen yleistä onnettomuusalttiutta on verrattu kirjallisuusselvityksen pohjalta nestepolttoainekäyttöisten ajoneuvojen onnettomuusalttiuteen. Työssä referoidut tilastot osoittavat, että polttoaineen merkitys onnettomuustiheydessä ei ole merkittävä. Kaasukäyttöisille ajoneuvoille sattuu onnettomuuksia yhtä paljon kuin nestepolttoainekäyttöisille, eivätkä ne poikkea seurauksiltaan merkittävästi toisistaan.

Suoritettu vertaileva riskinarviointi osoittaa, että polttoaineen vuototilanteessa kaasujoneuvojen vaarat eivät oleellisesti poikkea bensiinikäyttöisten ajoneuvojen vaaroista. Riskiprofiilit ovat joiltakin osin erilaiset, mutta oleellisia eroja ei tämän tason analyysissä ole tunnistettu. Dieselkäyttöisiin ajoneuvoihin verrattuna erot ovat samansuuntaiset kuin verrattaessa bensiini- ja dieselkäyttöisiä ajoneuvoja keskenään. Säiliöiden osallistumisessa jo käynnissä olevaan tulipaloon ei ole erityisiä eroja nestepolttoainekäyttöiseen autoon edellyttäen, että kaasusäiliön lämpösulake toimii. Lämpösulakkeen toimimattomuus on mm. sitovan normituksen vuoksi varsin epätodennäköistä.

Kaasukäyttöisten henkilöajoneuvojen riskilisiä maanalaisissa/suljetuissa tiloissa on bensiinikäyttöisiin ajoneuvoihin verrattuna korkeintaan pieni. Dieselkäyttöisiin ajoneuvoihin verrattuna kaasukäyttöiset ajoneuvot edustavat jonkinasteista riskilisää, mikä on syytä ottaa huomioon esimerkiksi maanalaisten bussiterminalien ja vastaavien tilojen suunnittelussa. Riskilisää ei ole perusteltua hallita laajamittaisilla lainsäädännön tai esimerkiksi rakentamismääräysten muutoksilla, vaan tapauskohtaisella harkinnalla.

KÄYTETYT LYHENTEET

CBG – Paineistettu biokaasu, Compressed Bio Gas
CFD-laskenta – Numeerinen virtauslaskenta, Computational Fluid Dynamics
CNG – Paineistettu maakaasu, Compressed Natural Gas
ECE R110 – CNG-säiliöitä koskeva YK:n Euroopan talouskomission sääntö (luonteeltaan pakottava)
HKL – Helsingin kaupungin liikenneliikelaitos
HSL – Helsingin seudun liikenne
LBG – Nesteytetty biokaasu, Liquefied Bio Gas
LNG – Nesteytetty maakaasu, Liquefied Natural Gas
LPG – Nestekaasu (paineenalaisena nesteytetty propaani), Liquefied Petroleum Gas
MRL – Maankäyttö- ja rakennuslaki
MSB – Ruotsin turvallisuudesta ja valmiustasosta vastaava viranomainen (Myndigheten för Samhällsskydd och beredskap)
NTP – Kemiassa ja fysiikassa käytetty normaalilämpötila ja -paine (0 °C ja 1 bar), Normal Temperature and Pressure
OVA – Onnettomuuden vaaraa aiheuttavat aineet
PRONTO – Pelastustoimen resurssi- ja onnettomuustilasto
Trafi – Liikenteen turvallisuusvirasto
UNECE – Yhdistyneiden kansakuntien Euroopan talouskomissio, The United Nations Economic Commission for Europe
VTT – Teknologian tutkimuskeskus

1 JOHDANTO

1.1 Hankkeen tausta ja tavoitteet

Bio- ja maakaasun liikennekäyttö on monin tavoin kannatettavaa. Suomessa tavoitteena on, että vaihtoehtoisten käyttövoimien osuus tieliikenteen energiasta olisi vähintään 40 prosenttia vuonna 2030. Biopolttoaineita – jollainen mm. biokaasu on – pidetään usein hyvänä vaihtoehtona päästövähennysten aikaansaamiseksi.

Eri yhteyksissä on nostettu esiin kysymys, voidaanko kaasukäyttöisiä ajoneuvoja käyttää turvallisesti maanalaisissa tiloissa. Keskeisenä lähtökohtana on alun perin ollut kysymys suljettujen ja maanalaisten bussiterminaalien turvallisuudesta, mutta myös henkilöautojen pysäköintitilojen osalta kysymystä on pidetty relevanttina. Suomessa keskustelu on kulminoitunut noin kymmenen vuotta sitten Helsingin Kampin terminaalin suunnittelun ja rakentamisen yhteydessä. Keskustelun lopputulemana Kampin terminaalissa kiellettiin kaasukäyttöisten ajoneuvojen käyttö.

Tämän selvityksen tavoitteena on ollut yhtäältä luoda käsitys kaasukäyttöisten ajoneuvojen käyttökieltilanteesta Suomessa sekä kahdessa vertailumaassa, ja toisaalta tuottaa vertailupohjaa sille, miten kaasukäyttöisten ajoneuvojen riskit poikkeavat nestepolttoainetta käyttävien ajoneuvojen riskeistä maanalaisissa tiloissa. Aihetta ei ole käsitelty avoimessa kirjallisuudessa tyhjentävästi. Selvityksen tulosten avulla voidaan osaltaan perustella niitä hallinnollisia ja muita toimia, joita turvallisuuden kannalta katsotaan tärkeiksi. Selvitys keskittyy maanalaisiin tiloihin, mutta tulokset ovat luonnollisesti sovellettavissa myös muihin suljettuihin tiloihin.

Normaalitilanteissa ja -käytössä kaikki polttoaineet ovat turvallisia. Erot vaaroissa liittyvät vuototilanteisiin tai polttoaineiden käyttäytymiseen onnettomuustilanteessa. Pysäköintihallien, terminaalien ja muiden vastaavien suljettujen tilojen turvallisuuden kannalta oleellista on ymmärtää, miten normaaliolosuhteissa kaasumaisten polttoaineiden käyttäytyminen vuototilanteessa eroaa nestemäisistä polttoaineista ja mikä merkitys eroilla on.

1.2 Tarkasteltavat polttoaineet

Suomessa tällä hetkellä ajoneuvojen tärkeimpiä hiilivetyvoimanlähteitä ovat normaaliolosuhteissa nestemäiset bensiini ja dieselöljy. Normaaliolosuhteissa kaasumaisia ajoneuvojen hiilivetypolttoaineita ovat maakaasu, biokaasu ja nestekaasu sekä vety.

Maakaasu on koostumukseltaan lähes pelkkää metaania (CH₄). Etaanin ja muiden raskaampien hiilivetyjen sekä muiden kaasujen osuus on hyvin pieni. Maakaasu on fossiilinen tuontipolttoaine. Maakaasu voidaan varastoida ajoneuvoissa kahdella tavalla:

- CNG (Compressed Natural Gas): kaasu on ajoneuvon säiliössä puristettuna suurimmillaan noin 200 bar paineeseen
- LNG tai CLNG (Liquefied Natural Gas): kaasu on ajoneuvon säiliössä nesteytettynä noin -162 °C lämpötilassa
- Käytännössä kaikki ajoneuvot Suomessa käyttävät toistaiseksi CNG:tä, mutta LNG saattaa tulevaisuudessa yleistyä raskaalle kalustolle

Biokaasu on kaasuseos, jota syntyy kun biomassaa hajotetaan anaerobisesti mädättämällä. Biokaasureaktoreista saatava raakabiokaasu sisältää 60–65 % metaania ja 30–35 % hiilidioksidia. Lisäksi raakabiokaasussa on muun muassa vettä, typpeä, happea, vetyä, ammoniakkia ja rikkivetyä. Jotta biokaasua voidaan hyödyntää liikennepolttoaineena, tulee sen metaanipitoisuus nostaa yli 95 prosenttiin poistamalla kaasusta hiilidioksidia. Samalla poistetaan myös mm. korroosiota aiheuttavaa rikkivetyä sekä vettä. Jalostuksen jälkeen kaasu vastaa koostumukseltaan maakaasua. Liikennekäytössä biokaasu voi olla paineistettuna CNG:n tapaan, jolloin siitä käytetään lyhennettä CBG (Compressed Bio Gas) tai nesteytettynä (LBG eli Liquefied Bio Gas). Biokaasu on uusiutuva energianlähde, jota voidaan valmistaa kotimaassa.

Nestekaasu (LPG eli Liquefied Petroleum Gas) on pääasiassa paineistamalla nesteytettyä propaania, joka sisältää pieniä määriä butaania, tai nesteytettyä butaania. Nestekaasujärjestelmien käyttöpainetta on 16 bar ja nestekaasu varastoidaan ajoneuvoissa paineistamalla nesteytettyä muodossa. Nestekaasu on öljynjalostusteollisuuden sivutuote ja fossiilinen tuontipolttoaine. Butaanipohjaisella nestekaasulla toimivia autoja on eräissä Keski-Euroopan maissa paljon, koska butaanista syntyy maiden öljynjalostusteollisuudessa ylijääntä. Suomessa nestekaasumarkkinoille ei ole vastaavia perusteita eikä nestekaasua juuri-kaan käytetä liikennepolttoaineena.

Vety on herkästi palava kaasu, jota voidaan myös käyttää autoissa joko suoraan moottoripolttoaineena tai epäsuorasti polttokennoon perustuvassa sähköntuotannossa. Vety ei tällä hetkellä ole käytännössä liikennekäytössä Suomessa, mutta se saattaa yleistyä lähivuosikymmeninä.

Tämän työn kannalta keskeiset kaasupolttoaineet ovat paineistettu maa- ja biokaasu (CNG ja CBG). LNG:n tai LBG:n yleistymistä sellaisessa käytössä, jossa autot ajettaisiin maanalaisiin tai vastaaviin suljettuihin tiloihin, ei pidetä todennäköisenä. Nestekaasumarkkina on Suomessa käytännössä estetty veroteknisesti, ja vety ei ole tällä hetkellä tekniikkana laajamittaisesti käytössä.

Keskitymme tässä työssä tarkastelemaan paineistettua maakaasua (CNG) ja paineistettua (sekä liikennekäyttöön puhdistettua) biokaasua (CBG), joita kumpaakin voidaan käyttää ns. maakaasu- eli CNG-ajoneuvoissa. Viittaamme jatkossa sekä maakaasuun että puhdistettuun biokaasuun termeillä metaani ja paineistettu kaasu. Muita polttoaineita sivutaan tarvittaessa.

1.3 Raportin rakenne

Raportin luvussa 2 kuvataan kaasukäyttöisten ajoneuvojen osuus ajoneuvoista Suomessa vuonna 2016 sekä arvio kaasujoneuvomäärän kehityksestä, kuvataan niitä käyttötapa-alueita, joita maanalaiseen käyttöön liittyy, todetaan keskeisinä pidetyt huolet sekä kuvataan riskin kokemiseen tutkimusten mukaan liittyviä tekijöitä.

Luvuissa 3 ja 4 esitetään kaasujoneuvoja koskevat käyttörajoitukset Suomessa ja kahdessa vertailumaassa (Ruotsi ja Saksa) tällä hetkellä. Suomen osalta esitetään myös tiivistelmä relevanteista rakentamismääräyksistä.

Luvussa 5 kuvataan kaasuautojen tekniikkaa ohjaavat normit ja keskeisen tekniset erot perinteiseen nestepolttoainetekniikkaan. Lisäksi esitetään suppea kirjallisuuskatsaus kaasukäyttöisten ajoneuvojen osuudesta erilaisissa onnettomuuksista, jonka pohjalta arvioidaan karkeasti sitä, ovatko kaasumaiset polttoaineet yllämainituissa onnettomuuksissa ja liittyykö kaasujärjestelmiin erityisiä ongelmia. Lisäksi tarkastellaan kaasujärjestelmien riskianalyysistä ja tyypillisiä onnettomuusskenaarioita. Varsinaista kaasujoneuvojen onnettomuusikäytymistä maanalaisissa tiloissa ja erityisesti vertailua nestepolttoainekäyttöisten ajoneuvojen onnettomuusikäytymiseen on avoimessa kirjallisuudessa tutkittu yllättävän vähän. Luvussa referoidaan erityisesti Suomessa Kampin terminaalin yhteydessä tehtyä tutkimusta sekä laajaa kanadalaista selvitystä aihepiiristä.

Luvussa 6 esitetään vertaileva puolikvantitatiivinen seurausanalyysi kahdesta skenaariosta – polttoainesäiliön vuodosta ja polttoainesäiliön osallistumisesta muusta syystä syttyneeseen tulipaloon. Analyysissä vertaillaan täyden metaanisäiliön ja täyden bensiinisäiliön käyttäytymistä vuototilanteessa ja tapahtumien etenemistä syttymätilanteessa.

Luvussa 7 vedetään yhteen tulokset sekä esitetään toimintatapojen ja säädösten kehittämisehdotukset.

Liitteessä 1 listataan hankkeessa haastatellut henkilöt ja heidän edustamansa tahot sekä hankkeen työpajan osallistajat.

Liitteessä 2 kuvataan lyhyesti LPG:n, LNG:n ja vedyn eroja metaaniin turvallisuusmielessä.

Liitteessä 3 kuvataan relevantit rakentamismääräykset sekä Liikenneviraston julkaisema tietunnelien rakenneohje.

Liitteessä 4 esitetään virtauslaskennalla toteutettu tapaustutkimus metaanin leviämisestä noin 5 000 kuutiometrin kokoiseen pysäköintihalliin henkilöauton kaasusäiliön vuodosta sekä arvioiduista deflagraatoräjähdyksen painevaikutuksista.

2 KAASUAJONEUVOT JA MAANALAISET TILAT

2.1 Kaasuajoneuvojen määrä Suomessa ja arvio yleistymisestä

2.1.1 Kaasuajoneuvojen määrä Suomessa 2016 ja kehitys 2011–2016

Suomessa oli vuonna 2016 yhteensä 2524 liikennekäytössä olevaa kaasuajoneuvoa, kun mukaan lasketaan nestekaasu- ja metaanikäyttöiset sekä kahta polttoainetta käyttävät nestekaasu-bensiini- ja metaani-bensiinikäyttöiset ajoneuvot (Taulukko 1). Tämä vastaa 0,05 % kaikista liikennekäytössä olleista ajoneuvoista vuonna 2016. Tästä 1820 oli henkilöautoja (0,07 % kaikista liikennekäytössä olleista henkilöautoista), 41 oli linja-autoja (0,33 % kaikista liikennekäytössä olleista linja-autoista) ja loput 663 ajoneuvoa oli muita ajoneuvotyyppisiä (kuorma-autot, pakettiautot ja muut ajoneuvot, kuten moottorityökoneet¹; 0,03 % kaikista liikennekäytössä olleista muista ajoneuvotyypeistä).

Vuosina 2011–2016 kaasuajoneuvojen määrä kasvoi 117 %, mikä selittyy pääasiassa metaani- ja metaani-bensiinikäyttöisten henkilöautojen määrän kasvulla (+192 %) (Kuva 1). Samanaikaisesti kaasua käyttävien linja-autojen määrä puolittui vuosien 2011 ja 2016 välillä (-49 %). Koko liikennekäytössä olevan ajoneuvokannan määrä kasvoi noin 2 % vuosina 2011–2016, mikä tarkoittaa, että kaasuajoneuvojen osuus koko ajoneuvokannasta kasvoi selvästi (0,02-0,05 %).

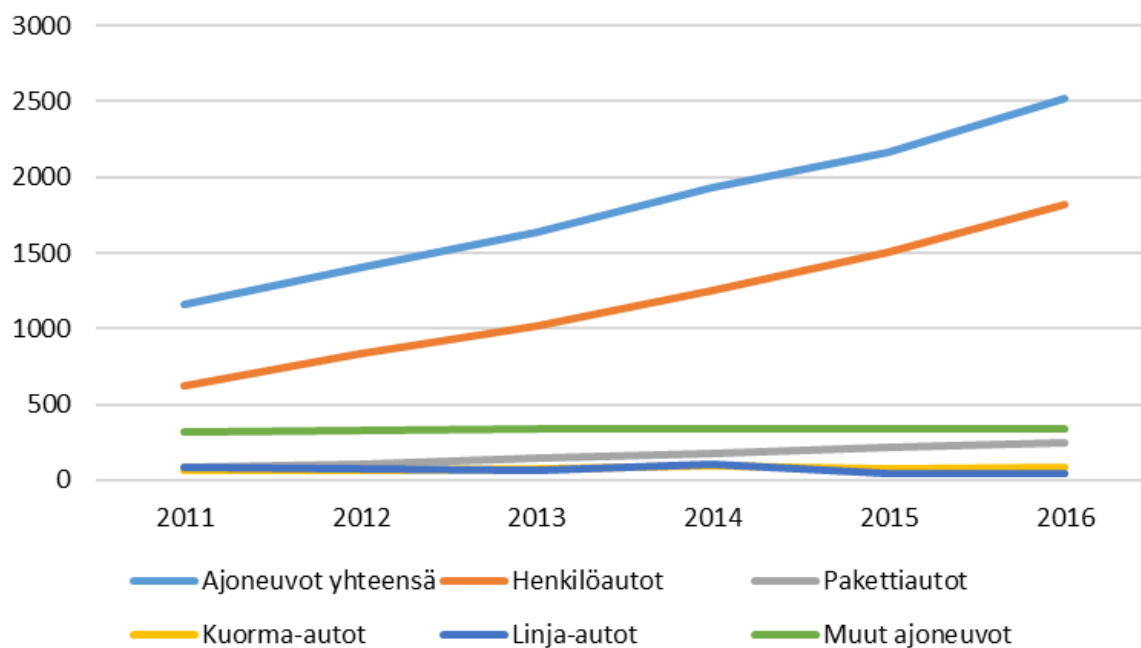
Taulukko 1. Kaasuajoneuvojen määrän kehitys Suomessa ajoneuvotyyppittäin 2011-2016².

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Muutos 2011–2016
Ajoneuvot yhteensä	1163	1408	1641	1929	2162	2524	117,0 %
Henkilöautot	623	834	1020	1253	1503	1820	192,1 %
Pakettiautot	79	101	145	171	216	242	206,3 %
Kuorma-autot	61	68	74	90	76	80	31,1 %
Linja-autot	81	76	68	107	45	41	- 49,4 %
Muut ajoneuvot	319	329	334	335	338	341	6,9 %

1 Pääosa näistä lienee nestekaasukäyttöisiä trukkeja

2 Liikenteen turvallisuusvirasto Trafi (2017). Ajoneuvokannan käyttövoimatilastot 2012–2016. Päivitetty 26.1.2017.

Kaasuajoneuvojen määrä Suomessa 2011-2016



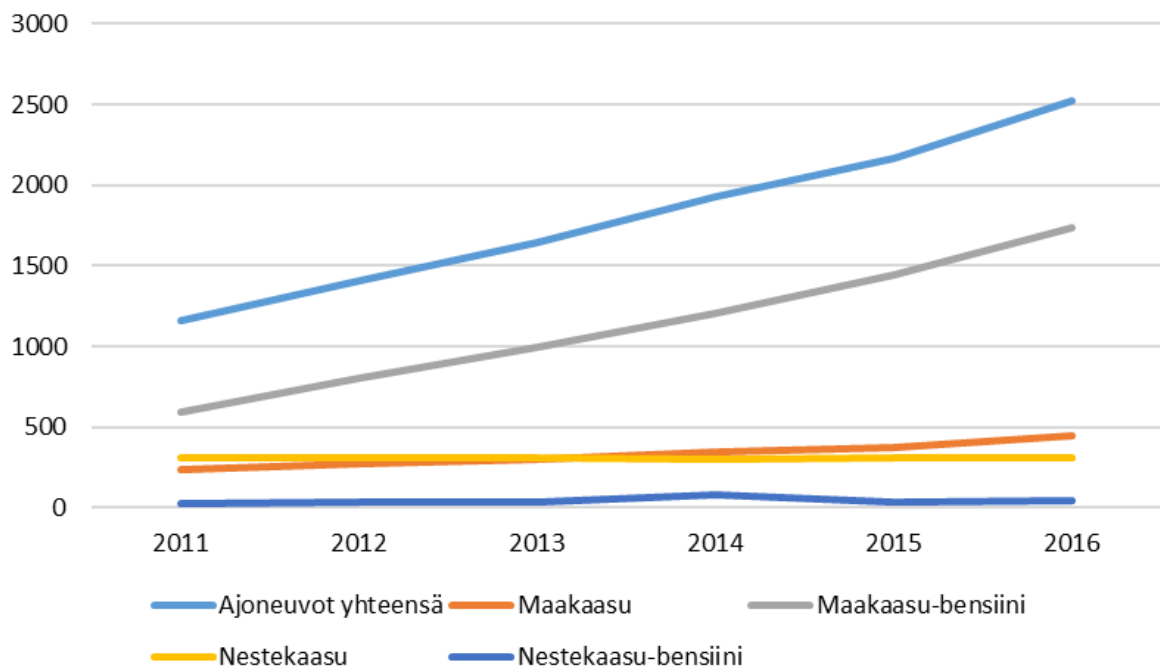
Kuva 1. Kaasuajoneuvojen määrän kehitys Suomessa ajoneuvotyypeittäin 2011-2016².

Kuten taulukosta 2 ja kuvasta 2 käy ilmi, kaasuajoneuvojen yleisin käyttövoima vuonna 2016 oli metaanin ja bensiinin yhdistelmä (1733 ajoneuvoa) ja toiseksi yleisin metaani (442 ajoneuvoa). Vuonna 2016 nestekaasukäyttöisiä ajoneuvoja oli 309 kpl ja nestekaasu-bensiinikäyttöisiä ajoneuvoja 40 kpl.

Taulukko 2. Kaasuajoneuvojen määrän kehitys Suomessa käyttövoimittain 2011-2016².

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Muutos 2011–2016
Ajoneuvot yhteensä	1163	1408	1641	1929	2162	2524	117,0 %
Metaani	239	270	303	343	372	442	84,9 %
Metaani-bensiini	596	799	996	1204	1446	1733	190,8 %
Nestekaasu	307	306	305	304	305	309	0,7 %
Nestekaasu-bensiini	21	33	37	78	39	40	90,5 %

Kaasuajoneuvojen määrä Suomessa 2011-2016 käyttövoimittain



Kuva 2. Kaasuajoneuvojen määrän kehitys Suomessa käyttövoimittain 2011-2016²

2.1.2 Arvio kaasuajoneuvojen määrän kehityksestä tulevaisuudessa

Kaasukäyttöisten autojen osuuden lisääminen Suomen liikenteessä on asetettu tavoitteeksi kansallisessa energia- ja ilmastostrategiassa³. Strategiassa linjataan toimia, joilla Suomi saavuttaa hallitusohjelmassa sekä EU:ssa sovitut tavoitteet vuoteen 2030 sekä etenee kohti kasvihuonekaasupäästöjen vähentämistä 80–95 prosentilla vuoteen 2050 mennessä. Yhtenä tavoitteena strategiassa on, että Suomessa olisi vuonna 2030 vähintään 50 000 kaasukäyttöistä autoa.

Ennusteita tulevaisuuden autokannasta, suoritteista ja kulutuksista on esitetty VTT:n kehittämässä ALIISA-autokantamallissa⁴. Mallin ennusteet pohjautuvat Liikenneviraston ja VTT:n ennusteisiin liikennesuoritteiden, autokannan ja energiatehokkuuden kehittymisestä. Baseline-kehityksen yleisenä periaatteena on, että toimenpiteistä otetaan huomioon vain jo päätetyt toimenpiteet. Ennustejakso ulottuu vuoteen 2050⁵. ALIISA autokantamallin tuloksia on koottu taulukkoon 3⁶. Mallin mukaan kaasuautojen määrän kehitys olisi merkittävästi pienempää kuin esimerkiksi sähköautojen ja vuonna 2030 kaasuautoja on ennustettu olevan henkilöautoliikenteessä vain n. 13 000. ALIISA-ennusteen mukaan kaasukäyttöisten linja-autojen määrä lisääntyisi jonkin verran lähivuosina ja vuoteen 2050 mennessä käytössä olisi jo yli 700 kaasukäyttöistä linja-autoa.

3 Huttunen, R (2017). Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030, Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisu, Energia 4/2017.

4 ALIISA-autokantamalli, <http://www.lipasto.vtt.fi/aliisa/index.htm>

5 ALIISA-autokantamallin menetelmäkuvaus, http://www.lipasto.vtt.fi/aliisa/aliisa_menetelma.pdf

6 ALIISA-autokantamallin tuloksia, http://www.lipasto.vtt.fi/aliisa/aliisa_tulokset.htm

Taulukko 3 ALIISA autokantamallin tuloksia henkilö- ja linja-autoille⁶.

	2012	2017	2020	2030	2040	2050	Ennustettu lisäys 2017-2050	%
Henkilöautot, bensiini	1 962 209	1 905 992	1 903 697	1 815 086	1 812 542	1 839 326	-66 666	-3
Henkilöautot, FFV (E85 korkeaseosetanoli)	5 770	8 357	8 247	6 730	6 012	6 561	-1 796	-21
Henkilöautot, diesel	590 310	742 289	848 548	1 002 004	949 349	854 436	112 147	15
Henkilöautot, kaasu	1 197	2 350	3 628	13 110	23 994	29 928	27 578	1 174
Henkilöautot, bensiini, pistoke (PHEV(BE))	10	3 486	10 441	65 610	175 725	334 260	330 774	9 489
Henkilöautot, diesel, pistoke (PHEV(DI))	1	291	564	2 705	9 109	20 904	20 613	7 084
Henkilöautot, sähkö	0	1 859	7 447	51 733	132 497	237 764	235 905	12 690
Henkilöautot, vety	0	10	65	553	4 787	15 004	14 994	149 940
Henkilöautot, yhteensä	2 559 497	2 664 633	2 782 636	2 957 532	3 114 016	3 338 184		
Linja-autot, diesel	11 940	12 583	12 940	13 081	12 433	11 526	-1 057	-8
Linja-autot, kaasu	70	70	87	272	561	717	647	924
Linja-autot, sähkö	0	5	55	756	1 833	2 584	2 579	51 580
Linja-autot, vety	0	0	0	0	0	0		
Linja-autot, yhteensä	12 010	12 658	13 082	14 109	14 827	14 827		

Pääkaupunkiseudulla kaasubussien käytön lisääntyminen ei kuitenkaan näytä todennäköiseltä. Helsingin seudun liikenteen (HSL) kalustoskenaariossa on esitetty, että vuonna 2025 kalusto koostuisi 30-prosenttisesti sähköbussista ja lopun 70 % osalta HSL pyrkii olemaan mahdollisimman teknologianeutraali (taulukko 4). Tällä hetkellä n. 30–40 % busseista on EURO6-busseja.⁷

HSL on kuntayhtymä, joka vastaa joukkoliikenteen järjestämisestä Helsingissä, Espoossa, Kauniaisissa, Vantaalla, Keravalla, Kirkkonummella ja Sipoossa. Vuoden 2018 alussa myös Tuusula ja Siuntio liittyivät kuntayhtymään. HSL:n yhtenä tehtävänä on bussi-, raitiovaunu-, metro-, lautta- ja lähijunaliikennepalveluiden hankkiminen. Bussien hankinta toteutetaan kilpailuttamalla operaattoreita pisteytysmenetelmän mukaisesti, jossa huomioidaan hinnan lisäksi myös ympäristöhyödyt (sekä paikallis- että CO₂-päästöt⁸). Helsingin seudulla oli parhaimmillaan yli 100 kaasubussia käytössä 2000-luvun vaihteessa, mutta sittemmin niistä luovuttiin useammasta syystä. Käytössä olleissa bussimalleissa oli paljon teknisiä ongelmia ja huolto oli kallista. Toisaalta keskustelu alkoi kääntyä enemmän sähköbussien puolelle, ja EURO6-päästönormien tultua voimaan vuonna 2014 menettivät kaasukäyttöiset bussit myös päästöedun dieselbussien nähden. EURO6-standardi asetti entistä tiukempia rajoituksia dieselkäyttöisten ajoneuvojen hiukkas- ja typenoksidipäästöille, minkä seurauksena standardin mukaisilla dieselbussilla päästäänkin polttoaineesta riippuen jopa pienempiin typenoksi- ja hiukaspäästöihin kuin kaasubusseilla.

⁷ Tiedonanto Petri Saari, HSL, 11.12.2017.

⁸ CO₂-päästöjen vertailussa on huomioitava diesel vs. kaasu -vertailun lisäksi myös kummankin polttoaineen tuotantotapa. HSL:n mukaan biopolttoaineissa (biokaasu, biodiesel tai bioetanoli) käytetään ainoastaan voimassa olevien kansallisten määräysten mukaisia kestävästi tuotettuja biokomponentteja.

Taulukko 4. HSL:n kalustoskenaario vuoteen 2025. Päästötavoitteet on esitetty vertailuna vuoden 2010 tasoon. ⁷

Bus Emissions category	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2016	2017	8 years	2025	operation
								situation	plan	to go	target	
Euro I	1 %											
Euro II	31 %	18 %	14 %	7 %	3 %	1 %	0,3 %		0,3 %			
Euro III	29 %	26 %	26 %	23 %	17 %	12 %	5 %		2,1 %			
Euro IV	7 %	7 %	7 %	7 %	6 %	4 %	2,7 %		2,0 %			
Euro V	4 %	4 %	4 %	4 %	4 %	4 %	1,4 %		1,0 %			
EEV	28 %	45 %	47 %	54 %	55 %	55 %	52 %		47,0 %			
EEV / energy-efficient			1 %	5 %	6 %	6 %	6 %		6,0 %			
Retrofit EEV -> euro VI						1 %	3,4 %		3,6 %			
Hybrid EEV + euro VI			0,2 %	0,2 %	0,5 %	0,5 %	0,5 %		0,5 %			
Plug in hybrid ?												
Euro VI					6 %	13 %	24,1 %		32,0 %			
Euro VI energy-efficient					2 %	4 %	4,0 %		5,0 %			
Euro VII ?												
Electricbuses					0,2 %	0,3 %	0,4 %		0,5 %		30 %	"400 bus"
Requirement on biofuels		6 %	6 %	6 %	6 %	8 %	10 %		12,0 %			
100% biofuels.		1 %	4 %	7 %	15 %	26 %	28 %		50,0 %		100 %	"960 bus"
2nd gen. biofuels constitute 100% from 2020 onwards												100 %
Emissions	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016				2025	
Nox, tons	879,42	749,05	686,60	623,51	610,03	531,92	455,58	-48 %			-92 %	Reduction of NOx
PM, tons	14,60	11,79	10,12	8,26	7,94	6,64	6,11	-58 %			-95 %	Reduction of PM
CO ₂ , tons	112 795	107 832	106 059	96 225	96 600	85 215	82 025	-27 %			-90 %	Reduction of CO ₂

Vaasassa otettiin vuoden 2017 alussa käyttöön 12 uutta biokaasubussia. Biokaasu bussien tarpeisiin tuotetaan Stormossenin biokaasulaitoksella Vaasan seudun kotitalouksien biojätteestä sekä Vaasan Veden jäteveden lietteestä. Tällöin päästään nettohiilidioksidipäästöihin, jotka ovat samaa luokkaa kuin sähköautojen, joiden käyttövoimasähkö on tuotettu tuuli-voimalla. Vältetyn hiilidioksiditonin hinta EURO6-normiin verrattuna on noin 370 euroa. ⁹

Näiden tulosten valossa oletamme, että kysymys bussien kaasukäyttöisyydestä ja terminaalihin liittyvät turvallisuuskysymykset eivät ole enää täysin siinä roolissa, missä ne vielä 10 vuotta sitten olivat, vaan tarkastelun painopistettä tulee siirtää henkilöautoihin ja tavallisiin pysäköintitiloihin.

Yhteenveto kaasujoneuvojen määrän kehitymisestä Suomessa	
•	Toistaiseksi kaasukäyttöisten ajoneuvojen määrä Suomessa on pieni
•	Tavoitetilassakin kaasukäyttöisiä ajoneuvoja olisi Suomessa prosentuaalisesti melko vähän. Tavoitetta on tosin kritisoitu myös liian vaatimattomaksi.
•	Kaasukäyttöisten bussien tulevaisuus Suomessa on tällä hetkellä epävarma

2.2 Tyypillinen maanalainen käyttö

Joukkoliikennekäytössä tyypillinen käyttötapa on kaasukäyttöisten bussien terminaalien sijoittaminen maanalaiseen tai vastaavalla tavalla suljettuun tilaan esimerkiksi matkakeskuksen osaksi. Joukkoliikenteen ilmasto- ja paikallispäästöjen vähennystavoitteissa sekä polttoaineomavaraisuuden kannalta biokaasutoimimisen bussiliikenteen roolia on pidetty tärkeänä.

Henkilöautojen osalta kysymykseksi nousee niiden turvallisuus maanalaisissa pysäköintitiloissa. Maanalaisia pysäköintitiloja on paljon, ja niitä todennäköisesti rakennetaan lisää. Tällä hetkellä kaasukäyttöisiä henkilöautoja on kuitenkin vähän.

Bussiterminaalien kannalta erityisen huolen aiheuttaa se, että terminaalien ajoneuvotiloissa ja niiden läheisyydessä on tyypillisesti paljon ihmisiä. Esimerkiksi Kampin terminaalissa on noin 6 miljoonaa henkilöä vuodessa. Maanalaisissa pysäköintitiloissa on vähemmän ihmisiä yhtä aikaa. Keskeinen kysymys on, altistuvatko nämä ihmismäärät kaasukäyttöisten

⁹ Vaasan kaupungin tiedote (2017). Vaasa tekee historiaa: 12 tulliä biokaasubussia liikenteeseen sekä haastattelu Pertti Hällilä, Vaasan kaupunki, 5.11.2017

ajoneuvojen takia jollain tavalla korkeammalle riskille, joka ei olisi yhteiskunnallisesti hyväksyttävä.

Yhteenveto kaasujoneuvojen käyttötapauksista ja huolenaiheista
<ul style="list-style-type: none"> • Kaasubussit maanalaisessa tai muuten suljetussa joukkoliikenneterminaalissa sekä näihin liittyen suuret ihmismäärät • Kaasukäyttöiset henkilöautot pysäköintitiloissa ja maanalaisten pysäköintitilojen yleistymisen

2.3 Tapahtuuko kaasujoneuvoille enemmän onnettomuuksia?

2.3.1 Pelastuslaitosten tilastoimat liikennevälineonnettomuudet Suomessa 2015–2016

Suomessa tapahtuneita onnettomuuksia, joissa on ollut osallisena kaasujoneuvo, on esitetty taulukossa 5. Onnettomuudet kattavat sanahaulilla löydetyt tapaukset Pelastustoimen resurssi- ja onnettomuustilasto PRONTO:sta¹⁰. Koska ajoneuvon käyttövoimaa ei merkitä rekisteriin erikseen, vaan ainoastaan onnettomuusselostukseen tapauskohtaisesti, ei ole täyttä varmuutta siitä, onko kaasuautoja ollut onnettomuuksien osallisena enemmänkin. Lisäksi PRONTO-rekisteriin kirjataan vain kaikki ne tehtävät, joihin pelastuslaitos on hälytetty. Siten lievimpiä tapauksia, joihin on hälytetty pelkkä ambulanssi, ei löydy lainkaan PRONTO-rekisteristä.

Taulukossa esitetyissä liikenneonnettomuuksissa ei aiheutunut lisävahinkoa ajoneuvon kaasukäyttöisyydestä johtuen. Onnettomuusselosteissa ei myöskään käy ilmi mitään erityistä poikkeavaa normaaleihin bensiinikäyttöisten autojen onnettomuuksiin verrattuna. Liikennevälinepaloista yhdessä tapauksessa ajoneuvo paloi kokonaan.

On huomioitava, että samana ajanjaksona suunnilleen vastaavilla ehdoilla PRONTO-tilastosta löytyi 5 865 liikennevälinepaloa ja liikenneonnettomuuksia yhteensä 48 751.

Taulukko 5: Onnettomuuksia Suomessa, joissa osallisena kaasuauto¹⁰

Tapahtumakunta	Tapahtumavuosi	Onnettomuustyyppi	Liikenneonnettomuuden tyyppi	Onnettomuudessa osallisena olleet liikennevälineet	Liikennevälinepalon liikennevälinetyyppi
Helsinki	2016	Liikenneonnettomuus	Tieliikenne	Henkilöauto ja kuorma-auto	
Luumäki	2015	Liikenneonnettomuus	Tieliikenne	Henkilöauto ja kuorma-auto	
Helsinki	2015	Liikenneonnettomuus	Tieliikenne	Henkilöauto	
Lohja	2017	Liikennevälinepalo			Henkilöauto
Kuopio	2016	Liikennevälinepalo			Henkilöauto
Ruokolahti	2016	Liikennevälinepalo			Henkilöauto
Salo	2016	Liikennevälinepalo			Henkilöauto

¹⁰ Haastattelu, Johannes Ketola, Pelastusopisto, 9.11.2017

2.3.2 Onnettomuustutkintakeskuksen bussipalospelvitykset

Syksyllä 2000 Onnettomuustutkintakeskus käynnisti projektin, jossa tutkittiin vuosien 2000 ja 2001 bussipalot Suomessa. Työtä jatkettiin vuonna 2012 tutkimalla vuosien 2010 ja 2011 palot.

Vuoden 2000 aikana tutkijoiden tietoon tuli 33 paloa, jotka vaihtelivat pienestä palosta auton täydelliseen tuhoutumiseen. Oletettavasti pienehköjä paloja on seurantajakson aikana ollut enemmänkin, mutta vasta syksyllä aktiivisesti alkaneen tutkinnan vuoksi kaikki alkuvuoden tapaukset eivät ole tulleet tutkijoiden tietoon. Palon syyt jakautuivat karkeasti ottaen viiteen osaan: jarruista aiheutuneet palot, oikosulku akun tai latausgeneraattorin kaapelissa, muut sähkölaiteviat, polttoainevuodot ja muut syyt. Tilastossa oli yksi metaanikäyttöinen bussi, jossa palo johtui turbon akselin katkeamisesta ja vapautuneen voiteluöljyn syttymisestä pakosarjan päällä.

Vuoden 2001 aikana tutkijoiden tietoon tuli 38 paloa, jotka vaihtelivat pienestä palosta auton täydelliseen tuhoutumiseen. Palon kriteerinä oli se, että kohteessa on ollut avoliekki ja sen sammuminen on vaatinut aktiivista sammuttamista.

Vuosina 2010–2011 tapahtui yhteensä 114 paloa, joista metaanikäyttöisiä busseja oli neljä. Kaikki palontutkinnan kannalta tarpeelliset tiedot eivät jälkikäitelvityksessä olleet tiedossa, mutta voidaan arvioida, että metaani käyttövoimana ei ollut syynä yhteenkään paloon tai mukana pahentamassa paloa (selvitys perustuu PRONTO-järjestelmään, johon olisi varmasti raportoitu, mikäli näin olisi ollut).

Onnettomuustutkintakeskuksella ei ole vastaavaa tietoa henkilöauto-onnettomuuksista. Myöskään Onnettomuustietoinstituutti ei kerää systemaattisesti sellaista onnettomuustietoa, jota olisi voitu hyödyntää tässä selvityksessä.

2.3.3 Muita onnettomuustilastoja

Yhdysvalloissa voittoa tuottamaton Clean Vehicle Education Foundation teki tutkimuksen, jossa seurattiin 8 331 metaanikäyttöistä hyötyajoneuvoa, joilla oli ajettu yhteensä 178,3 miljoonaa mailia. Ko. ajoneuvojen onnettomuuksissa loukkaantui 37 % vähemmän ihmisiä kuin keskimäärin bensiinikäyttöisten hyötyajoneuvojen onnettomuuksissa. Näillä metaanikäyttöisillä ajoneuvoilla ei sattunut kuolemantapauksia, kun taas bensiinikäyttöisillä hyötyajoneuvoilla (joita Yhdysvalloissa on paljon) tapahtuu keskimäärin 1,28 kuolemantapausta 100 miljoonaa ajoneuvokilometriä kohti. Tutkituille 8 331 ajoneuvolle sattui 7 tulipaloa, joista yksi johtui kaasujärjestelmästä.¹¹

Yhdysvalloissa National Renewable Energy Laboratory laati kyselytutkimuksen kymmenelle bussiyhtiölle, joilla oli käytössä 15–2 509 metaanikäyttöistä busssia; yhteensä tutkimus kattoi 4 071 busssia. Keskeiset metaanikäyttöisten bussien palosyyt olivat hydraulioöljyletkun pettäminen, turbon hajoaminen, pakoputkiston aiheuttama ylikuumeneminen, isku alustaan asennettuihin kaasusäiliöihin ei-hyväksytyllä ajoreitillä ja jarrupalo. Alustaan asennettuja kaasusäiliöitä lukuun ottamatta onnettomuudet eivät liittyneet kaasujärjestelmään.¹²

Yhteenveto kaasujoneuvojen onnettomuusalttiudesta

- Käsitellyn aineiston perusteella voidaan vahvistaa sitä vallalla olevaa käsitystä, että kaasujoneuvot eivät ole ylliedustettuina onnettomuustilastoissa, eikä kaasukäyttöisyys sinänsä näyttäisi olevan yhteydessä onnettomuustaajuuteen tai onnettomuuden seurauksiin.

¹¹ Technology Committee Bulletin (1999, revised 2010). How safe are natural gas vehicles.

¹² Adams, R., Home, D.B. (2010). Compressed Natural Gas (CNG) Transit Bus Experience Survey April 2009 – April 2010. Subcontract Report NREL/SR-7A2-48814, 9/2010

2.4 Millaisia ovat metaanikäyttöisten ajoneuvojen onnettomuudet?

2.4.1 Tilastoja metaanikäyttöisten ajoneuvojen onnettomuuksista

Seisler¹³ esittelee Yhdysvaltojen Department of Transportation:in tilastoja metaanikäyttöisten ajoneuvojen onnettomuuksista 1976–2010, joissa on käyty läpi 138 hyötyajoneuvojen onnettomuutta Yhdysvalloissa, Euroopassa, Aasiassa ja Etelä-Amerikassa. Tarkastelun kohteena olleista ajoneuvoista 51 % oli kuorma-autoja, 38 % busseja ja 11 % muita hyötyajoneuvoja. Onnettomuudet jakautuivat seuraavasti:

- Säiliön repeäminen: 50 kpl, joista 18 kpl säiliön pinnan vahingoittumisesta ja 8 kpl valmistusvirheitä
- Varoventtiilin tai lämpösulakkeen¹⁴ laukeaminen, ei tulipaloo: 14 kpl
- Ajoneuvopalo, ei säiliön repeämistä: 17 kpl; yksi palo sai alkunsa kaasujärjestelmästä
- Onnettomuus toisen auton kanssa: 12 kpl. Tapauksista kahdeksassa ei syntynyt kaasuvuotoa, kolmessa lämpösulake toimi ja esti kaasun syttymisen sekä yhdessä lämpösulake toimi mutta kaasua syttyi.
- Onnettomuus ilman toista autoa: 6 kpl
- Säiliövuoto: 14 kpl
- Muu: 7 kpl, joista 5 kpl liittyi huoltoon

Hornen¹⁵ mukaan Yhdysvaltojen Clean Vehicle Education Foundation oli vuoteen 2012 mennessä dokumentoinut 68 metaanikäyttöisen ajoneuvon onnettomuustapausta. Näistä

- 15:ssä oli kyse kaasuvuodosta
- 22:ssa oli kyse varoventtiilin tai lämpösulakkeen laukeamisesta
- 19:ssä oli kyse säiliön pettämisestä (näistä suurin osa on tapahtunut säiliön väärän asennuksen seurauksena; myös säiliöiden kuntoa ja ikää tulisi Hornen mukaan seurata tarkkaan)
- 12:ssa vuotolähde oli epäselvä.

Hankkeen työpajassa todettiin, että 2000-luvulla on tapahtunut Suomessa muutamia tapauksia, joissa kaasusäiliön lämpösulake on auennut virheellisesti. Syynä on ollut mm. ulospuhallusputkiin irronneen tulppamaisen sääsuojan takia päässyt vesi ja sulaketyyppi, joka on ollut jäätymisvaurioille altis. Kaikissa tapauksissa tämä on tapahtunut ulkona, joko ajossa tai parkissa. Tapausten jälkeen valmistajat ovat muuttaneet lämpösulakkeen rakennetta ja tyyppiä niin, etteivät edellisen tyyppiset suunnittelun ja huollon virheet johda lämpösulakkeen laukeamiseen.

Perrette ja Wiedemann¹⁶ esittävät kolme tapauskuvausta Ranskassa ja Saksassa tapahtuneista metaanikäyttöisten bussien onnettomuuksista, joissa kaasusäiliö oli pettänyt bussipalojen yhteydessä. Syynä säiliöiden pettämisiin oli ollut kahdessa tapauksessa lämpösulakkeen toimimattomuus - ainakin toisessa näistä kahdesta tapauksesta lämpösulake oli ECE R110 -säännön vaatimusten vastainen. Kolmas bussipalo johtui vandalismista.

Wong¹⁷ esittää tutkimuksen kaasukäyttöisten ajoneuvojen säiliöiden pettämisistä. Aineisto on maailmanlaajuinen. Vuosina 2000–2008 aineistossa oli 26 säiliön repeytymistä. Yhteensä säiliön pettämisistä on aineistossa 54 kpl. Tutkituista 54 tapauksesta

13 Seisler, J.M. (2014). CNG: A safe fuel for ADR trucks, presented to WP15 -Transport of Dangerous Goods 4.11.2014 United Nations, Geneva

14 Lämpösulake vapauttaa säiliössä olevan kaasun hallitusti yli 110 °C lämpötilassa, jotta säiliö ei repeäisi lämmön nousun aiheuttaman paineen nousun seurauksena. Lisätietoja lämpösulakkeiden toiminnasta ks. luku 5.

15 Horne, D. (2012) CNG Cylinder safety Issues & Opportunities, NGVTF Meeting, October 12, 2012.

16 Perrette, L. & Wiedemann, H.K. (2007). CNG buses fire safety: learnings from recent accidents in France and Germany. Society of automotive engineer world Congress 2007, April 2007, Detroit, United States. SAE International.

17 Wong, J. (2009). CNG & Hydrogen Tank Safety, R&D, and Testing. Powertech Labs Inc.

- 5 johtui säiliön mekaanisesta kulumisesta tai vaurioitumisesta
- 12 johtui korroosiosta tai muusta ympäristötekijästä
- 3 johtui ylipaineesta (viallinen tankkausasema ja/tai varoventtiili)
- 16 johtui tulipalossa toimimattomasta lämpösulakkeesta
- 14 johtui komposiittisäiliöiden valmistusvirheistä
- 1 johtui käyttäjän virheestä
- 3:n syy oli tuntematon.

Tapauksista 32 sattui konversioautoille, 7 kaasukäyttöiseksi valmistetuille henkilöautoille ja 15 kaasukäyttöiseksi valmistetuille busseille.

2.4.2 Sisätiloissa oleelliset onnettomuustyytit

Tässä työssä voidaan turvallisesti olettaa, että varsinaiset liikenneonnettomuudet (törmäykset) eivät maanalaisissa tiloissa ole energioiltaan sellaisia, että ne johtaisivat merkittäviin polttoainejärjestelmän vaurioihin.

Mahdollisia onnettomuustyyppisiä sisätiloissa ovat siis polttoainevuodot ja säiliön joutuminen (muualla alkaneeseen) tulipaloon.

Tarkastelemme seuraavassa alaluvussa lyhyesti vuoto- ja tulipalotilanteiden eroja nestepolttoainevuotoihin ja tämän jälkeen säiliön repeämistä. Tarkempi puolikvantitatiivinen seurausanalyysi on esitetty luvussa 6 ja tapaustutkimuksen leviämisen- ja palolaskennat on koottu liitteeseen 4.

2.4.2.1 Kaasun ja nesteen vuotokäyttäytymisen erot – onko niitä?

Kaasumainen polttoaine (tässä metaani) purkautuu vuototilanteessa kaasusuihkuna ulos järjestelmästä. Vuotonopeus riippuu vuotokohdan (reiän) suuruudesta ja paineesta säiliössä.

Lämpötilastaan riippuen kaasu joko nousee kattoon tai täyttää tilaa muuten. Mahdollisessa syttymätilanteessa kaasu palaa. Palo aiheuttaa suljetussa tilassa hetkellisen paineennousun, jonka suuruus riippuu karkeasti palavan kaasun määrästä ja ominaisuuksista, määrän suhteesta tilan koko tilavuuteen sekä tilan ilmanvaihtoaukkojen koosta. Kaasupilven palota-
pahtuma kestää tyypillisesti hyvin lyhyen ajan. Mikäli kaasuvuoto jatkuu syttymähetkellä, palo sytyttää ulosvirtaavan kaasun, joka palaa ns. suihkupalona, kunnes kaasu loppuu. Suihkupalo sytyttää todennäköisesti ympäröivän palokuorman.

Syttymän keskeiset vaikutukset ovat kaasupilven palosta syntyvä paineaalto, lämpösäteily kaasupilven sisällä sekä mahdollisen suihkupalon aiheuttama palon leviäminen. Metaani tuottaa palaessaan vettä ja hiilidioksidia. Muita savukaasuja voi syntyä levinneestä palosta.

Nestepolttoaine (tässä bensiini tai dieselöljy) valuu vuototilanteessa lattialle muodostaen lammikon, joka saattaa osittain valua hulevesiverkostoon. Lammikon halkaisija on arviolta useita metrejä. Bensiini on helposti haihtuvaa, mutta dieselöljy ei. Haihtunut bensiinihöyry leviää tilassa autojen välissä. Mahdollisessa syttymätilanteessa höyry palaa humahtaen. Höyryn palaminen aiheuttaa suljetussa tilassa hetkellisen paineennousun, jonka suuruus riippuu karkeasti palavan ilmaseoksen määrästä, määrän suhteesta tilan koko tilavuuteen sekä tilan ilmanvaihtoaukkojen koosta. Palo jatkuu lammikkopalona, joka sytyttää todennäköisesti lähellä olevan palokuorman. Lammikkopalon savunmuodostus on voimakasta ja savukaasut myrkyllisiä.

Syttymän keskeiset vaikutukset ovat pilven palosta mahdollisesti syntyvä paineaalto, lämpösäteily kaasupilven sisällä sekä mahdollisen lammikkopalon aiheuttama palon leviäminen. Bensiini tuottaa palaessaan nokea ja myrkyllisiä palotuotteita (mm. MTBE-lisäaineesta¹⁸). Muita savukaasuja voi syntyä levinneestä palosta.

Yhteenvetona voidaan todeta, että kaasu vapautuu todennäköisesti vuototilanteessa nopeammin kuin bensiini. Toisaalta jos bensiini saa höyrystyä pitkään, myös se tuottaa sytytvää

¹⁸ metyyli-tert-butyylietteri

ilmaseosta melko paljon. Sekä suihkupalo että lammikkopalo levittävät paloa. Ilmeisiä eroja vuotovaaroissa ei suoralta kädeltä ole havaittavissa.

2.4.2.2 Polttoainesäiliö tulipalossa

Kun metaanisäiliö joutuu ulkoiseen paloon, sen lämpötila ja paine alkavat nousta. 110 °C lämpötilassa lämpösulake aukeaa ja kaasu virtaa ulos palaen tyypillisesti suihkupalona. Mikäli lämpösulake ei jostain syystä toimisi, säiliö repeäisi lopulta ja säiliön sisältö palaisi tulipallona. Nestepolttoainesäiliössä polttoaine lämpenee kiehumispisteeseensä, jolloin säiliö hajoaa, ja sisältö palaa tulipallona.

2.4.2.3 Kaasusäiliön repeäminen

Vaaremekanismi, joka liittyy kaasuun käyttövoimana ja jota nestepolttoaineilla ei ole, on kaasusäiliön repeäminen spontaanisti tai tulipalossa.

Euroopassa ainakin Volkswagen-merkkisillä metaanikäyttöisillä autoilla on esiintynyt polttoainesäiliöiden korroosiota niin, että takaisinvedosta ja valmistajakorjauksista huolimatta ehti tapahtua onnettomuuksia, mukaan lukien säiliöiden spontaaneja repeämisiä ainakin Saksassa, Ruotsissa ja Tshekissä¹⁹. Laajimmillaan kaikki metaanikäyttöiset autot olivat Saksassa tankkauskiekkollossa, joskin kieltoja sittemmin rajoitettiin vain takaisinvedon koskettamiin automalleihin. Syyskuussa 2016 Volkswagen-konserni tiedotti Saksassa asiasta laajasti²⁰. Tapahtunut oli todennäköisesti yhteydessä siihen, että säiliöitä ei ollut tarkastettu riittävästi elinkaaren aikana.

Säiliön repeäminen suljetussa tilassa saisi aikaan todennäköisesti varsin korkean hetkellisen ylipaineen. Lisäksi vapautuva sisältö aiheuttaisi syttyessään kaasun voimakkaan palon. On kuitenkin huomattava, että lähes kaikki edellä kuvatut spontaanit säiliöiden repeämiset ovat ilmeisesti sattuneet tankkauksen yhteydessä tai pian tankkauksen jälkeen, sillä heikentynyt säiliö pettää todennäköisimmin paineen ja säiliön kehäjännityksen kasvaessa tankkauksessa nopeasti. On luonnollisesti mahdollista, että auto ajetaan pysäköintihalliin heti tankkauksen jälkeen, mutta tankkaustoimintaa ei ole tarkoitus järjestää sisätiloissa. Pidämme tässä selvityksessä tällaisesta syystä johtuvaa säiliön repeämisen todennäköisyyttä pysäköintihallissa merkityksettömän pienenä.

Säiliön repeäminen lämpötilannoususta ja sitä seuraavasta kaasun paineen noususta johtuen on estetty niin, että tulipalossa säiliön lämpösulake aukeaa säiliön lämmitessä, ja kaasu virtaa ulos palaen usein ns. suihkupalona. Mikäli lämpösulake ei toimisi tai sitä ei olisi, säiliö repeäisi paineen noustessa hallitsemattomasti. Kuten luvuissa 2.4.1, 5.1.1. ja 6.3.4 kuvataan, tämän tapahtuman todennäköisyys on varsin pieni.

2.4.2.4 Case: Jäteajoneuvon kaasusäiliön repeäminen ajon aikana, Ruotsi

Ruotsissa tapahtui syyskuussa 2016 kaasukäyttöisen jätteenkuljetusajoneuvon kaasusäiliön repeäminen, josta Ruotsin turvallisuudesta ja valmiustasosta vastaava viranomaisen, Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB), on tehnyt onnettomuustutinnan²¹. Ajoneuvon yhteensä kahdeksasta kaasusäiliöstä yksi repesi ajon aikana ja vahingoitti reitessään kolmea muuta polttoainesäiliötä. Onnettomuus tapahtui ajoneuvon ollessa ajossa risteyksen kohdalla (nopeuden ollessa oletettavasti alhainen). Ajoneuvon säiliöt oli tankattu vain vähän aikaa ennen repeämistä. Vahingoittuneet polttoainesäiliöt päätettiin tyhjentää kaasusta ennen ajoneuvon siirtoa ampumalla säiliöihin reikiä. Ampumisen yhteydessä tapahtui vielä yhden kaasusäiliön repeäminen. Repeämiset eivät aiheuttaneet tulipaloa tai henkilövahinkoja (matkustamossa oli ensimmäisen repeämisen hetkellä kaksi ihmistä), mutta tilanne määriteltiin kuitenkin vakavaksi onnettomuudeksi, joka sisälsi riskin vakavista seurauksista.

¹⁹ Saksankielisiä uutisia ja keskusteluja, mm. <https://www.welt.de/motor/article158271124/Sind-Erdgasautos-rollende-Zeitbomben.html>, <http://www.erdgasfahrer-forum.de/viewtopic.php?t=13658> ja <http://www.erdgasfahrer-forum.de/viewtopic.php?t=14568>

²⁰ ADAC. Aktuelle Informationen der ADAC Fahrzeugtechnik. Folgen der geborstenen Erdgastanks bei VW-Modellen, https://www.adac.de/infotestrat/tanken-kraftstoffe-und-antrieb/alternative-kraftstoffe/erdgas/erdgas_unfall.aspx

²¹ Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (2017). Tryckkärlsexplosion i biogasdriven sopbil. Olycksutredning.

Kaikki kahdeksan polttoainesäiliötä sijaitsivat ajoneuvon pohjassa. Onnettomuustutkinnassa selvisi, että kaasusäiliön repeäminen aiheutui todennäköisesti hiekan ja soran aiheuttamasta kaasusäiliön kulumisesta ja/tai aiemmasta tai aiemmista säiliöön kohdistuneista iskuista. Säiliö on todennäköisesti altistunut iskuille alapuolelta. Hiekkaa ja soraa on kerääntynyt säiliöiden ja niitä suojaavien levyjen väliin aiheuttaen hankausta. Myös ajoneuvon pohjan mataluus on voinut altistaa soran ja hiekan vaikutuksille. Myös säiliöiden materiaalilla (hiilikuitulaminaatti) arvioidaan olleen vaikutusta vaurion syntymiseen.

Onnettomuustutkintaraportissa todetaan, että vastaavien onnettomuuksien ehkäisemiseksi tulevaisuudessa suositellaan, että ajoneuvojen suunnittelulla varmistetaan kaasusäiliöiden riittävä suojaaminen alhaalta kohdistuvilta iskuilta ja esimerkiksi hiekan, soran ja kivien aiheuttamilta vaikutuksilta. Lisäksi todetaan, että jos kaasusäiliöiden suojaavissa havaitaan vaurioita, kaasusäiliöt pitäisi tarkastaa. Onnettomuus selvityksessä todetaan myös, että lain-säädännöllä tulisi varmistaa, että ajoneuvojen kaasusäiliöt sekä niiden vaurioille altistavat tekijät tarkastettaisiin ulkopuolelta säännöllisesti.

2.4.2.5 Säiliöiden määräaikaistarkastukset Suomessa

Edellä on todettu, että säiliöiden repeytymisriskiin vaikuttaa osaltaan niiden säännöllinen tarkastaminen. ECE R110:n uusin versio ottaa kantaa säiliöiden määräaikaistarkastuksiin ja määrittelee säiliövaatimuksissa säiliölle käyttöiän, josta mm. erilaiset säiliötestit riippuvat. Enimmäiskäyttöikä on 20 vuotta. Sallitun käyttöajan on oltava merkitty selkeästi ja pysyvästi säiliöön. Kun suurin sallittu käyttöikä saavutetaan, säiliö on poistettava käytöstä.

Kaasulaitteistojen ja -säiliöiden tarkastuksiin liittyen kukin autonvalmistaja asettaa omat vaatimukset huolto-ohjelmissa. Huolto-ohjelman toteuttaminen on kuitenkin jokaisen auton-omistajan oma valinta ja huolto-ohjelman toteuttaminen erityisesti vanhoissa autoissa on usein enää osittaista. Säännön vaatimia säiliöiden määräaikaistarkastusvaatimuksia ei ole voitu liittää katsastustoimintaan, sillä katsastusdirektiivin 2014/45/EU mukaan katsastus on voitava suorittaa ilman työkaluja edellyttävää rakenteiden purkamista, ja kaasusäiliöiden tarkastaminen edellyttää tyypillisesti erilaisten suojakansien ja verhoilujen poistamista.

Tällä hetkellä Trafi valmistelee hanketta, jossa selvitetään katsastusdirektiivin ja E-säännön ristiriitaisuuden ratkaisemista ²².

Yhteenveto kaasujoneuvojen onnettomuustyypeistä
<ul style="list-style-type: none">• Kaasujärjestelmään liittyviä onnettomuustyyppisiä ovat vuodot matalapainepuolelta ja korkeapainepuolelta sekä säiliön repeäminen• Oleellisia onnettomuustyyppisiä sisätiloissa ovat polttoainevuodot ja säiliön joutuminen muualla alkaneeseen tulipaloon, mistä voi mahdollisesti seurata säiliön repeäminen• Sisätiloissa merkitykselliset erot kaasukäyttöisten ja nestepolttoainekäyttöisten ajoneuvojen välillä ovat erot polttoaineen vuotokäyttäytymisessä sekä kaasusäiliöiden pettäminen spontaanisti tai käynnistyneessä tulipalossa• Vuotojen seuraukset kaasu- ja nestepolttoaineilla ovat erilaiset, ja nestepolttoaineilla säiliöiden spontaania polttoainesäiliön pettämistä ei tapahdu• Voidaan kuitenkin suhteellisen turvallisesti olettaa, että niin kauan kuin kaasujoneuvoja ei tankata sisätiloissa, kaasusäiliön spontaanin pettämisen todennäköisyys sisätiloissa on mitättömän pieni

2.5 Riskin kokemiseen vaikuttavia tekijöitä

Yleisesti kaasujoneuvoihin liittyviä riskejä pidetään todennäköisesti epäselvinä ja tuntemattomina. Näiden sekä monien muiden tekijöiden (ks. taulukko 6) tiedetään vaikuttavan riskin

²² Tiedonanto Aki Tili, Trafi, 18.1.2018

kokemiseen ja koettuun riskin suuruuteen²³. Kaasukäyttöisten ajoneuvojen osalta riskin kokemista voimistavat ainakin:

- Riskin vapaaehtoisuus (joku toinen on ajanut kaasuauton pysäköintihal-
liin/bussiterminaaliin)
- Kauhistuttavuus (sana "kaasu" koetaan todennäköisesti kauhistuttavammaksi kuin
"neste")
- Katastrofaalisuus (mielikuva siitä, että "kaasun" täytyy johtaa "katastrofiin")
- Tieto riskistä (tietämys kaasuautojen riskeistä on puutteellista)
- Riskin jakautuminen (kaasun vaikutukset mielletään laajemmiksi)
- Riskiin liittyvän hyödyn jakautuminen (en hyödy siitä, että toinen ajaa kaasuautolla)
- Kaasu ei ole välttämättömyys - muitakin polttoaineita on
- Realisoitumisen nopeus (kaasuriskit mielletään todennäköisesti äkillisiksi)
- Kaasuautojen harvinaisuuden vuoksi riskin tunnettuus on huono
- Luottamuksen puute (kaasuautot koetaan vieraina ja siten epäluotettavina)

Taulukko 6. Riskin kokemiseen vaikuttavia tekijöitä²³.

Tekijä	Selitys
Riskin ottamisen va- paaehtoisuus	Pakotettu riski koetaan suuremmaksi kuin itse otettu
Vaihtoehtojen ole- massaolo	Jos vaihtoehtoja ei ole, riski koetaan suuremmaksi
Kauhistuttavuus	Ihmisen omiin pelkoihin liittyvät riskit koetaan todellista suuremmiksi (esim. käärmeenpureman pelko)
Katastrofaalisuus	Seurauksiltaan katastrofaaliset riskit koetaan suuremmiksi (esim. lento- onnettomuudet)
Tieto riskistä	Tuntematon pelottaa ja riski koetaan suuremmaksi, jos siitä saadaan puut- teellista tietoa
Riskin jakautuminen	Laajalle leviävät vaikutukset ja puolustuskyvyttömiin ihmisiin (kuten lapset tai vanhukset) kohdistuvat riskit koetaan suurempina
Väärinkäytön mahdol- lisuus	Mikäli riskinaiheuttaja on väärin käytettynä erityisen riskialtis, myös nor- maalikäytön riskit koetaan suurempina
Riskistä hyötyjä	Riskit, joista saatavat hyödyt menevät jollekulle muulle, koetaan suurem- pina kuin itseä hyödyttävät riskit
Välttämättömyys	Sellaiset toiminnot, joita ei voida välttää, koetaan riskeiltään pienemmiksi kuin vastaavat ei-välttämättömät toiminnot
Realisoitumisen no- peus	Hitaasti toteutuva riski koetaan pienemmäksi kuin yhtäkkinen riski ("kaik- keen tottuu")
Riskin tunnettuus	Mitä yleisempi riski on, sen pienempänä se koetaan - esimerkiksi auto- onnettomuudet koetaan riskinä pienemmiksi kuin vaikkapa kemikaaliriskit, vaikka usein tilanne on päinvastainen
Luottamus	Luottamus riskin aiheuttajaan saa riskit tuntumaan pienemmällä - tuttua laitosta naapurissa ei koeta riskinä, sen sijaan uusi vastaava toiminta voi- daan kokea hyvinkin vaaralliseksi

Mikäli riskejä halutaan tarkastella objektiivisesti, riskin kokemiseen vaikuttavat tekijät tulisi huomioida. Koettua riskiä voidaan myös pienentää vaikuttamalla tässä lueteltuihin tekijöihin.

23 Slovic, P. (1987). Perception of Risk. Science, New Series, Vol. 236, No. 4799 (Apr. 17, 1987), pp.208-285.

Yhteenveto riskin kokemisesta

- Tärkeä rooli vaikutusten vertailussa on myös riskin kokemisella
- Kaasuun käyttövoimana liittyy paljon tekijöitä, jotka ovat omiaan suurentamaan koettua riskiä
- Riskin kokemiseen liittyvät tekijät on objektiivisessa vertailussa huomioitava.

3 KAASUAUTOJEN KÄYTTÖRAJOITUKSET SUOMESSA

3.1 Kieltojen laajuus tällä hetkellä

Hankkeessa kartoitettiin Suomessa tällä hetkellä asetettuja kieltoja sekä rajoituksia kaasuaajoneuvojen käytölle maanalaisissa tiloissa haastatteleamalla pelastuslaitosten edustajia. Haastatellut pelastuslaitosten edustajat on esitetty liitteessä 1. Haastattelujen perusteella rajoituksia kaasuaajoneuvojen käyttöön liittyen ei vaikuttaisi olevan tällä hetkellä muualla kuin Helsingissä Kampin terminaalissa. Joillakin paikkakunnilla saattaa olla joitakin kiinteistönomistajan asettamia omia kieltoja, mutta tästä ei saatu täyttä varmuutta. Riskien selvittämistä ja vaikutustietoa pidetään pelastuslaitoksissa kuitenkin tärkeänä tulevaisuutta silmälläpitäen.

Yhteenveto kieltojen laajuudesta

- Kampin bussiterminaalialueeseen lukuun ottamatta selvityksessä ei tunnistettu muita maanalaisia tai suljettuja tiloja, joissa kaasukäyttöisten ajoneuvojen käyttöä olisi rajoitettu tai kielletty. Kampin keskuksen käyttörajoitus on Suomessa poikkeuksellinen ja tapaus käsitellään yksityiskohtaisemmin seuraavassa kappaleessa.

3.2 Case Kamppi

Kampin keskus sijaitsee Helsingin ydinkeskustassa Kampin alueella. Kampin keskuksen alueella oli aikaisemmin linja-autoaseman bussikenttä ja Kampin keskuksen rakennusprojektin tavoitteena olikin tämän suuren maanpäällisen bussikentän tehokkaampi hyödyntäminen. Tavoitteena oli sijoittaa Espoon suunnasta tulevien seutubussien sekä kaukoliikenteen linja-autoterminaalit ja tavara-asema maanalaisiin tiloihin.

Kampin keskuksen alueen rakentaminen käynnistyi elokuussa 2002, ja ensimmäiset vaiheet olivat valmiit kesällä 2005. Kokonaan alue oli valmis kesällä 2006. Kampin keskus käsittää kauppakeskuksen, maanalaiset bussiterminaalit kauko- ja lähiliikenteelle, kolme asuinrakennusta, kolme toimistorakennusta sekä torin ja aukioita.

Paikallisliikenteen terminaalit oli alun perin tarkoitettu rakentaa kaasubusseille soveltuvaksi, mutta tämä jäi kuitenkin lopulta huomioimatta. Suunnittelun alkuvaiheessa yhtenä vaihtoehtona tutkittiin ratkaisua, jossa tilan katto muotoiltaisii siten, että syttymiskelpoisen kaasupilven muodostumisriski vähenisi ja lisäksi ilmanvaihtoa vuototilanteessa tehostettaisiin. Ilmanvaihdon tarpeet todettiin kuitenkin epärealistisen suuriksi ja katon muotoilu tasaiseksi ja kaltevaksi olisi vaatinut liikaa tilaa sekä ollut kustannuksiltaan huomattavasti suurempi.²⁴ Tällöin ajatus jäi taka-alalle.

Kysymys kaasubussien käytöstä nousi esille myös pelastuslaitoksen taholta Kampin suunnitteluvaiheessa. Pelastuslaitoksen kanta oli, että jos terminaalialue on tarkoitettu käyttämään kaasubusseille, tulee tämä huomioida jo asemakaavavaiheessa. Tuolloin Helsingin kaupungin liikenneliikelaikituksen (HKL) taholta vahvistettiin, että Kampin keskuksen ei ole suunnitteilla kaasubussilinjoja, eikä näitä tarvitse huomioida suunnittelussa. Kaasubussikysymys nousi

²⁴ Laaksonen, J.-P. (2013) Vaihtoehtotarkasteluja kaasubussien käyttömahdollisuuden palauttamiseksi Kampin keskuksessa 2013. L2 Paloturvallisuus Oy, 12.3.2013 sekä haastattelu Juha-Pekka Laaksonen, L2 Paloturvallisuus Oy, 17.10.2017

tämän jälkeen esiin myös myöhemmässä vaiheessa suunnittelua rakennuttajan taholta, jolloin saatiin sama vahvistus, että kaasubusseja ei Kampin terminaalissa tulnaisi käyttämään. Tuolloin kuitenkin jätettiin suunnittelijan toimesta varaus kaasuilmaisimien asentamiselle jälkikäteen.

Kysymys kaasubussien käytöstä nostettiin uudelleen esiin Kampin rakennustöiden ollessa jo pitkällä, tällä kertaa Helsingin kaupungin toimesta. Tuolloin teetettiin VTT:llä tarkempia selvityksiä kaasubussien aiheuttamista mahdollisista vaaratilanteista sekä niiden seurauksista²⁵. Selvityksen mukaan kriittisimmäksi turvallisuusriskiksi todettiin bussien ja odotustilan välissä sijaitsevan suuren lasiseinän rikkoutuminen. Koska kaasuvuoto ja siitä seuraava kaasupilven syttyminen voivat kehittyä nopeasti, ei edes tämän riskin nopea havaitseminen kaasuilmaisimin auta, koska odotustilaa ei ehdittäisi evakuoida riittävän nopeasti. Tästä syystä suunnittelijan jättämiä varauksia kaasuilmaisimille ei toteutettu. Edellä mainitun selvityksen sisältöä on esitelty yksityiskohtaisemmin kappaleessa 5.2.4.

Erilaisia ratkaisuvaihtoehtoja kaasubussien käyttömahdollisuuden palauttamiseksi Kampin keskukseen selvitettiin Kampin valmistumisen jälkeen useaan otteeseen. Vuonna 2008 kaasubussien käytön mahdollistavia muutoksia Kampin terminaalissa lähdettiin uudelleen selvittämään Helsingin kaupungin asettaman työryhmän toimesta. VTT:llä teetettiin selvitys korkeapaineisen vesisumujärjestelmän toimivuudesta kaasupilven syttymisen ehkäisemisessä²⁶. Vesisumujärjestelmä osoittautui ainoaksi jälkiasenteiseksi ratkaisuksi, jossa ei olisi tarvinnut tehdä mittavia rakenteellisia muutoksia ja joka olisi mahdollistanut Kampin keskuksen muuttamisen kaasubussien käytön sallivaksi. Järjestelmää ei kuitenkaan toteutettu sen kalliin hinnan sekä tulevaisuudessa häämöttäneen länsimetron rakentamisen takia.

Vuonna 2012 kaasubussiasia nousi uudelleen esille. Tällä kertaa aloitteen tekijänä oli Helsingin ympäristökeskus, joka halusi lisätä kaasubussien osuutta bussiliikenteessä typenoksidipäästöjen vähentämiseksi. HKL lähti viemään asiaa eteenpäin ja Kampin rakentamisen aikaisilta rakenne- ja paloturvallisuussuunnittelijoilta pyydettiin lausunnot²⁴ sekä teetettiin lisäselvityksiä. VTT:n selvityksessä ”Kampin terminaalien muuttaminen kaasubusseille” tutkittiin miten mahdollisen kaasupalon paineenousua voitaisiin rajoittaa²⁷ ja Aaro Kohonen Oy selvitti tarkemmin terminaalien rakenteita sekä niiden paineensietokykyä²⁸. Selvitysten mukaan paineen hallittua purkautumista voidaan edistää rakentamalla terminaalien kattoon paineenalennuskuiluja sekä muuttamalla seinärakenteita siten, että lasiseinästä tehdään lujarakenteinen ja terminaalien pohjoisseinä taas muutetaan kevytrakenteiseksi. Lisäksi matkustajien käyntiovien tulisi olla paineen kestäviä, mikä vaikuttaisi olennaisesti matkustajien liikkumisen sujuvuuteen. Näitäkään ratkaisuja ei lähdetty toteuttamaan, koska paineenalennuskuilujen rakentaminen olisi edellyttänyt kaavamuutosta²⁹, rakennustyön aikaiset haitat bussiliikenteelle olisivat kestäneet useita kuukausia ja maksaneet huomattavia summia sekä lisäksi terminaalien avoimuutta ei haluttu muuttaa lasiseinää poistamalla. Samoihin aikoihin Helsingin bussiliikenne luopui kokonaan kaasubusseista, syistä joita on käsitelty kappaleessa 2.1.2.

Yhteenveto Kampin tapauksesta

- Kampissa kaasubussien huomiointi suunnittelussa oli koordinoimatonta
- Merkittävä vaikutus lopulliseen käyttökieltoon oli varsin epärealistisena pidetyn skenaarion mallinnuksella
- Mallinnuksen mukaan suurin vaaratekijä liittyi terminaalien lasiseinään, joka olisi hajotessaan altistanut bussiterminaalien ihmiset vaaroille
- Kaasubussit olisi voitu sallia Kampissa muutostöillä, mutta ehdotetut muutokset kaa-
tuivat ilmeisesti kustannustehokkuuteen tai kustannus- ja vastuujakoon liittyviin epäselvyyksiin. Lisäksi olemassa olleita muutamia kaasubusseja voitiin ajaa muilla jouk-

²⁵ Lautkaski, R. (2005). Maakaasubussien käyttö Kampin terminaalissa 1. Vaaratilanteiden tunnistaminen ja kuvaus. VTT. Tutkimusselostus PRO1/1029/05. Luottamuksellinen.

²⁶ VTT (2008). Korkeapaineisen vesisumujärjestelmän toimivuus maakaasun syttymisen ehkäisemisessä, VTT

²⁷ Lautkaski, R. (2013). Kampin terminaalien muuttaminen kaasubusseille. VTT. Raportin numero VTT-CR-02061-13. Luottamuksellinen.

²⁸ Meriläinen, T. (2013). Kampin keskus, Espoon terminaalit, Maakaasubussien käyttömahdollisuus ja siihen liittyviä rakenteellisia riskitekijöitä. Lausunto, Aaro Kohonen Oy 8.4.2013.

²⁹ Rontu, K. (2013). Lausunto Tennispalatsin aukion asemakaavatilanteesta. Helsingin kaupunki, rakennusvalvontavirasto.

koliikennelinjoilla, ja kaasubusseista oltiin luopumassa muista syistä.

- Kampin käyttökieltoa ei voida tämän vuoksi yleistää muihin vastaaviin tiloihin
- Maanalaisia tai suljettuja pysäköinti- tai terminaalitiloja suunniteltaessa tulee kaasu mahdollisena polttoaineena ottaa huomioon jo aikaisessa vaiheessa, erityisesti joukkoliikenneterminaaleissa.

3.3 Kaasuajoneuvot rakentamismääräyksissä

3.3.1 Rakentamismääräysten keskeiset sisällöt

Suomen rakentamismääräyskokoelma kokoaa yhteen asetuksena annettuja rakentamista koskevia velvoittavia säännöksiä. Ne täydentävät Maankäyttö- ja rakennuslaissa (132/1999, MRL) annettuja yleisiä edellytyksiä. Rakentamismääräyskokoelman määräykset koskevat pääasiassa uudisrakennuksia - ellei toisin ole määrätty. Korjausrakentamisessa määräyksiä on sovellettu korjaus- ja muutostöiden laajuus huomioon ottaen. Nykyiset määräykset on uudistettu osa kerrallaan vuoden 2018 alkuun mennessä.

Myös yhtenäisen soveltamisen tueksi annetut ministeriön ohjeet sekä suositusluonteiset ohjeet kootaan rakentamismääräyskokoelmaan, vaikka nämä eivät ole velvoittavia.

Hankkeen ohjausryhmä on tunnistanut sekä ympäristöministeriön rakennetun ympäristön osaston asiantuntijat maininneet haastatteluissa³⁰ seuraavat rakennusmääräyskokoelman osat oleellisiksi umpinaisissa tai maanalaisissa tiloissa tapahtuvan kaasukäyttöisten autojen pysäköinnin kannalta:

- Paloturvallisuuden osalta oleellisia voimassa olevia määräyksiä ovat ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta (848/2017; voimaan 1.1.2018). Aiemmin voimassa olleet rakennusmääräyskokoelman relevantit osiot (E1 ja E4) on vastikään kumottu.³¹
- Lujuuden ja vakauden osalta oleelliset voimassa olevat määräykset on annettu ympäristöministeriön asetuksella kantavista rakenteista (477/2014; kumonnut aiemmat rakennusmääräyskokoelman osiot B1-2, B4-8 ja B10).³²
- Ilmanvaihtomääräyksiä koskien voimassa olevat määräykset on annettu ympäristöministeriön asetuksella uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta (1009/2017; voimaan 1.1.2018). Aiemmin voimassa olleet rakennusmääräyskokoelman relevantit osiot (D2 ja erityisesti sen liite 2) on vastikään kumottu.³³

Lisäksi oleelliseksi ohjeistukseksi on tunnistettu Liikenneviraston Tietunnelin rakennetekniset ohjeet (Liikenneviraston ohjeita 34/2017).

Yllä mainittujen määräysten ja ohjeiden keskeiset sisällöt tämän työn kannalta on koottu liitteeseen 3.

Mainitut määräykset ja ohjeet eivät säädä erikseen kaasukäyttöisten ajoneuvojen aiheuttamien riskien huomioimisesta. Esimerkiksi kaasuantureista, kestävydestä liittyen kaasun aiheuttamiin humahduspaloihin tai degflagraatioihin tai muusta vastaavasta Suomessa ei ole rakentamista koskevia määräyksiä.

30 Haastattelu, Kirsi Martinkauppi, Jorma Jantunen ja Jukka Bergman; 6.10.2017

31 Ympäristöministeriö http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ia_rakentaminen/Lainsaadanto_ia_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Paloturvallisuus

32 Ympäristöministeriö http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ia_rakentaminen/Lainsaadanto_ia_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Rakenteiden_lujuus_ia_vakaus

33 Ympäristöministeriö http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ia_rakentaminen/Lainsaadanto_ia_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Terveellisyyt

Yhteenveto rakentamismääräyksistä

- Rakentamismääräykset ja Liikenneviraston tietunneliohje eivät tunnista erityisesti kaasukäyttöisiä ajoneuvoja tai aseta niille erillisiä vaatimuksia
- Määräykset ja ohjeet ota kantaa ajoneuvojen käyttövoimaan, vaan keskittyvät ylipäättään rakenne- ja henkilöturvallisuuden takaamiseen
- Määräysten mukaan toteutettu ilmanvaihto tuulettaa kaasumaisen ja höyrystyneen polttoaineen tilasta ulos. Määräysten lähtökohta on kuitenkin hengitysilman laatu pysäköintitilassa eikä niinkään turvallisuus vuototilanteissa.

4 KAASUAUTOJEN KÄYTTÖRAJOITUKSET VERTAILUMAISSA

Työssä tarkasteltaviksi vertailumaiksi valittiin Ruotsi ja Saksa. Ruotsin valinnan perusteena oli olosuhteiden samankaltaisuus Suomen kanssa ja Saksa valittiin tarkasteluun kaasuautojen käyttömäärien takia. EU-maista Italiassa on ylivoimaisesti eniten kaasuautoja käytössä, mutta alustavan selvityksen perusteella Saksasta uskottiin saatavan paremmin tietoa turvallisuusnäkökulmiin ja niiden huomioimiseen liittyen.

Molemmista maista tunnistettiin käyttörajoituksista vastaava hallinnon osa ja asiantuntija-henkilöt. Nämä henkilöt tai heidän osoittamansa muut mahdolliset tahot haastateltiin puhe- ja sähköpostitse. Lisäksi tehtiin asiakirja- ja internet-hakuja.

Vertailumaiden osalta pyrittiin selvittämään kaasuautojen käyttö- ja pysäköintikieltolinjaukset, keskeiset riskit ja syyt, joille kiellot tai sallimiset perustuvat, relevantti säädöspohja ja hallinnolliset mekanismit, joille linjaukset perustuvat.

4.1 Saksa

Saksassa on noin 550 000 kaasukäyttöistä henkilöautoa. Näistä 80 % eli noin 450 000 ajoneuvoa on nestekaasukäyttöisiä (LPG). Metaanikäyttöisiä ajoneuvoja on siis varsin pieni osuus Saksan kaasuaajoneuvoista.³⁴

Saksassa ei ole maanlaajuista lakia tai säädöstä, joka sääntelisi tai rajoittaisi kaasukäyttöisten ajoneuvojen pysäköintiä suljetuissa tai maanalaisissa tiloissa. Pysäköintitalojen rakenteita säännellään osavaltiokohtaisissa laeissa.

Suurimmassa osassa osavaltioita pysäköintitalolait eivät nykyisin sisällä mainintaa kaasukäyttöisistä autoista. Syynä on valtakunnallinen ns. mallilaki, josta kaikki kaasuaajoneuvoja koskevat vaatimukset on poistettu. Perusteluna tähän on, että vaatimukset kaasukäyttöisille ajoneuvoille ovat nykyisin niin korkeat, että turvallisuustaso vastaa bensiini- ja dieselautoja. Siten kaasuaajoneuvoja ei ole erikseen tarpeen huomioida pysäköintilaitoksissa. Ajoneuvojen säännöllisten tarkastusten³⁵ arvioidaan varmistavan riittävän turvallisuuden. Tausta vanhoille käyttökielloille on 1970-luvulta, jolloin määrättiin, että propaani- ja butaanikäyttöisiä ajoneuvoja ei saanut viedä maanalaisiin tiloihin, sillä nämä kaasut ovat ilmaa raskaampia eivätkä siten välttämättä poistu tilasta ilmanvaihdon kautta³⁶.

Yhdessä osavaltiossa (Saarland) on vielä voimassa määräys, että näitä ”ilmaa raskaampia kaasuja” polttoaineenaan käyttäviä ajoneuvoja saa pysäköidä ainoastaan sellaisiin pysäköintitaloihin, joissa mahdollisesti vuotava kaasu pääsee vaarattomasti ulkoilmaan. Tämäkin maininta tulee poistumaan, kun Saarland päivittää kyseisen lakinsa vastaamaan valtakunnallista mallilakia.³⁷

34 Deutscher Verband Flüssiggas (Saksan nestekaasuyhdistys) <https://www.dvfg.de/> ja Zukunft Erdgas (Saksalainen yhdistys Maakaasun tulevaisuus). Vertailu CNG vs. LPG. <https://www.erdgas.info/erdgas-mobil/vergleich-cng-und-lpg>

35 Saksassa kaasukäyttöiset autot tulee tarkistuttaa säännöllisesti myös kaasulaitteiston osalta. Ks. esim. <https://www.tuv.com/germany/de/pr%C3%BCfung-von-gasanlagen-zum-antrieb-von-fahrzeugen.html>

36 Tiedonanto, Knut Czepuck, rakennusvalvonta, Nordrhein-Westfalenin osavaltiohallinto, 15.12.2017

37 Tiedonanto, Isabell Schmid, rakennusvalvonta, Saarlandin osavaltiohallinto, 24.10.2017

Toisaalta yksittäiset pysäköintitalojen omistajat saavat asettaa kieltoja³⁸. Nämäkin rajoitukset koskevat yleensä lähinnä nestekaasukäyttöisiä autoja.

Mitään varsinaisia riskinarvioita tai riskitarkasteluihin pohjautuvia perusteluja kiellottomuudelle ei toistaiseksi ole löytynyt. Mitä ilmeisimmin valtakunnallisen mallilain taustalla ei ole kaasukäyttöisten ajoneuvojen vaarapotentiaaliin kantaa ottavaa tutkimusta tai selvitystä³⁹. Toisen tiedonannon mukaan riskinarvioiteja kaasukäyttöisten autojen riskeistä pysäköintihalleissa tuskin on Saksassa tehty, kuten Hollannissa ja Sveitsissä on⁴⁰.

Niin metaani- kuin nestekaasuajoneuvojen käyttöä ja yleistymistä tukevat tukiyhdistykset mainitsevat internetsivuillaan autojen olevan hyvin turvallisia. Metaanin osalta todetaan, että todellinen räjähdys on turvallisten kaasutankkien vuoksi käytännössä poissuljettu⁴¹. Turva-venttiilit huolehtivat siitä, että kaasu pääsee tarvittaessa hallitusti pois tankista⁴².

Yhteenveto Saksan tilanteesta
<ul style="list-style-type: none">• Kaasukäyttöiset autot pääosin nestekaasu- eli LPG-käyttöisiä• Vanhastaan on ollut LPG-ajoneuvoja koskevia rajoituksia, joita niitäkin on vähitellen poistettu• Metaanikäyttöisille autoille ei yleisesti ole rajoituksia• Kaasukäyttöisiä autoja pidetään yhtä turvallisinakin kuin bensiinikäyttöisiä autoja

4.2 Ruotsi

Ruotsissa otettiin käyttöön kaasujoneuvot ensimmäistä kertaa 1980-luvun puolivälissä. Ruotsin teillä ajoi vuoden 2016 lopussa 54 439 kaasujoneuvoa, joista 2 331 oli busseja, 821 oli raskaita ajoneuvoja ja loput olivat henkilöajoneuvoja tai pakettiautoja. Vuonna 2016 kaasujoneuvojen kaasumyynnistä 70 % muodostui biokaasusta⁴³. Kaasujoneuvoihin liittyviä vakavia onnettomuuksia on ollut vähän, ja kaikki tunnetut kaasujoneuvojen polttoainejärjestelmään liittyvät vakavammat onnettomuudet ovat tapahtuneet 2010-luvulla.⁴⁶

Ruotsissa kaasukäyttöisten ajoneuvojen käyttöä ei rajoiteta millään tavalla suljetuissa tai maanalaisissa tiloissa⁴⁴. Kaasukäyttöisiä ajoneuvoja koskevat samat kiellot ja rajoitukset kuin muilla polttoaineilla käyviä autoja. Kaasukäyttöisten autojen korjausta sisätiloissa on kuitenkin rajoitettu. Kaasujärjestelmään kohdistuvat korjaustoimenpiteet on tehtävä joitakin poikkeuksia lukuun ottamatta ulkotiloissa. Rajoitus nojaa syttyviä ja räjähtäviä aineita koskevan lain 2010:1011 pykälään 6 §. MSB (Myndigheten för samhällsskydd och beredskap) perustaa rajoituksen siihen, että ajoneuvossa voi olla korkeapaineista metaanikaasua, josta voi syntyä sisätilaan syttyvä ilma-kaasuseos siinä tapauksessa, että kaasujärjestelmän painetta säätelevät komponentit eivät olisi niin tiiviit kuin tiiviystarkastuksissa on mitattu (kuten helposti korjaustilanteessa voi olla).⁴⁵

Kaasujoneuvojen valmistamiseen ja varusteisiin liittyy useita vaatimuksia. Ruotsiin rekisteröidyt ajoneuvot tulee suunnitella ja valmistaa YK:n säännön ECE R110:n mukaisesti. Kaasujoneuvojen polttoainejärjestelmä on Ruotsin Liikenneviraston (Transportstyrelsen) ohjeen TSFS 2017:54 mukaisesti erikseen tarkastettava säännöllisten ajoneuvojen tarkastusten yhteydessä: ensimmäisen kerran 36 kk ensirekisteröinnin jälkeen, sitten 24 kk päästä ja sen jälkeen 14 kk välein.⁴⁶

38 ADAC. Autogas <https://www.adac.de/infoteirat/tanken-kraftstoffe-und-antrieb/alternative-kraftstoffe/autoogas/autoogas-technik-angebot-umwelt-wirtschaftlichkeit.aspx>

39 Tiedonanto, Michael Schiller, rakennusvalvonta, Brandenburgin osavaltiohallinto, 9.10.2017

40 Tiedonanto, Georg W. Mair, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), 5.10.2017

41 Zukunft Erdgas (Saksalainen yhdistys Maakaasun tulevaisuus). Näin turvallisia maakaasuautoja ovat. <https://www.erdgas.info/erdgas-mobil/vergleich-cng-und-lpg/so-sicher-sind-erdgas-fahrzeuge/>

42 Bremer Offensive, Erdgas als Kraftstoff - Maakaasu polttoaineena. <http://www.bremer-erdgasfahrzeuge.info/index.php?obj=page&id=194&unid=59eaa957f8e01e1fcc904f7c62969765>

43 Energigas Sverige (2017). Statistik om fordonsgas.

44 Haastattelut Lars Synnerholm, MSB, 5.10.2017 ja Per Öhlund, Transportstyrelsen, 10.10.2017

45 Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (2016). Begränsningar för arbete med gasdrivna fordon, eller fordon med tankar för brandfarlig gas enligt ADR, inomhus. 26.2.2016.

46 Energigas Sverige (2017). Säkerhetsarbete med fordonsgasdrivna bilar. Lehdistöiedote 24.8.2017.

Tukholman alueella on useita bussivarikkoja, jotka ovat myös biokaasubussien käytössä: ainakin Gubbängenin bussivarikko Etelä-Tukholmassa, Frihamnenin bussivarikko Tallink Siljan terminaalin yhteydessä sekä vuonna 2017 valmistunut, erityisesti kaasubusseille suunniteltu Fredriksdalin osittain maanalainen bussivarikko Hammarby Sjöstadin kaupunginosassa. Kaikilla varikoilla kaasubussien tankkaus tapahtuu ulkotiloissa. Vain Fredriksdalin varikolla kaasubusseja pysäköidään sisätiloihin.⁴⁷

Tukholman alueella on myös yksi joukkoliikenneterminaali, joissa kaasubusseja liikennöi sisätiloissa: Liljeholmin terminaali. Kyseisessä terminaalissa ei ole kaasubussien vuoksi asennettuja erikoislaitteistoja tai -järjestelmiä.⁴⁸

4.2.1 Case: Fredriksdalin kaasubussivarikko, Ruotsi

Tukholman Hammarby Sjöstadiin valmistui vuonna 2017 kaasukäyttöisille linja-autoille tarkoitettu varikko, Fredriksdalsdepån. Hanke liittyy Tukholman tavoitteeseen siirtyä keskustan alueella biokaasukäyttöisiin linja-autoihin muutamien kuukausien kuluessa. Varikko on rakennettu pääosin teräksestä ja betonista. Varikossa on seitsemän kerrosta, joista kaksi alinta kerrosta sijaitsee täysin tai osittain maan alla⁴⁹ (Kuva 3). Alin kerros toimii yli sadan biokaasukäyttöisen bussin pysäköintihallina. Toiseksi alin kerros toimii pysäköintihallina henkilöajoneuvoille. Toiseksi alin kerros käsittää lisäksi sosiaali- ja varastotiloja. Maantasossa oleva (kolmanneksi alin) kerros käsittää tankkausasemia, autokorjaamoja ja pesuhalleja sekä varikon toimistotilat. Autokorjaamot ja pesuhallit ovat erillisissä rakennuksissa, jotka ovat kiinteänä osana varikkorakennuskokonaisuutta (Kuva 4). Tankkausasemat sijaitsevat rakennuksen ulkopuolella, kevyen katoksen alla⁵⁰. Ylemmät kerrokset on suunniteltu toimistokäyttöön. Varikkokokonaisuus käsittää lisäksi kaksi erillistä toimistorakennusta. Koko hankkeen rakennettu kerrosala on noin 90 000 m².⁵¹

Bussien tankkaukseen käytettävä nesteytetty biokaasu tulee varikolle maanalaisesta putkesta pitkin Henriksdalin jätevedenpuhdistamolta.⁵¹



Kuva 3. Havainnekuva bussien pysäköinnistä maan alla Fredriksdalin bussivarikolla⁶⁸

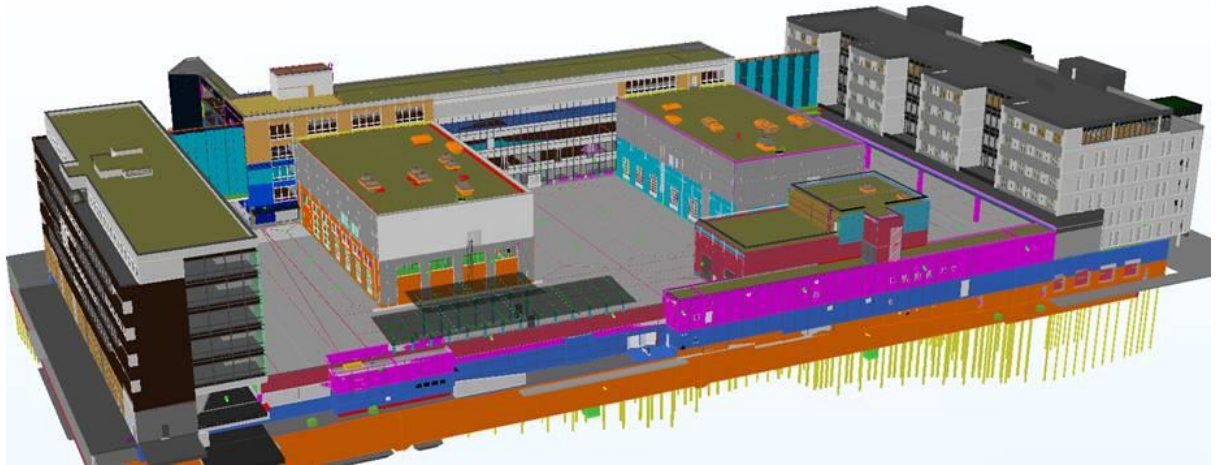
⁴⁷ Tiedonanto Per Erik Österlund, Miljöförvaltningen, Miljöbilar i Stockholm, 21.11.2017.

⁴⁸ Tiedonanto Johan Böhlén, Stockholms läns landsting, 19.2.2018.

⁴⁹ Skanska, Fredriksdals bussdepå, Stockholm. <https://www.skanska.se/vart-erbjudande/vara-projekt/57873/Fredriksdals-bussdepå-Stockholm>.

⁵⁰ Tiedonanto Richard Lundmark, Ramboll Sverige AB, 21.11.2017.

⁵¹ Ramboll, Fredriksdalsdepån. <http://www.ramboll.se/Projekt/rse/fredriksdalsdepån>.



Kuva 4. Kolmiulotteinen havainnekuva Fredriksdalin bussivarikosta⁵⁰. Korjaamo- ja pesuhallit näkyvät kuvassa maan tasossa etualalla.

4.2.2 Toimenpiteet riskien vähentämiseksi bussivarikolla

Riskiarvioiden (ks. luku 5.2.3) perusteella tehtiin useita rakenteellisia ratkaisuja, joilla kaasubusseista aiheutuvia riskejä on voitu vähentää⁵². Varikon alimpaan, maanalaiseen kerrokseen, joka toimii bussien pysäköintihallina, rakennettiin ikkunoita ja ovia, jotka rikkoutuvat yli 0,1 bar ylipaineessa. Kaikki muut alimman kerroksen rakenteet mitoitettiin kestäämään 0,2 bar ylipaine. Alimman kerroksen rakenteet suunniteltiin lisäksi kestäämään 120 minuuttia kestävä tulipalo. Alimpaan kerrokseen asennettiin lisäksi Ex-luokiteltu (räjähdysvaaralliseen tilaan soveltuva) ilmanvaihtojärjestelmä, jonka mitoitus perustuu siihen, että tilaan ei pääse syntymään syttyvää kaasupilveä.⁵⁰

Toiseksi alin, osittain maanalainen kerros (jossa on pääasiassa henkilöajoneuvojen pysäköintiä), rakennettiin kaasutiiviiksi niin, että kaasuvuoto pohjakerroksesta/ylemmästä kerroksesta ei voi levitä sinne niin nopeasti, että kaasun syttyminen olisi mahdollista. Tämän kerroksen lattia rakennettiin siten, että sinne ei jäänyt mitään sellaisia ilmataskuja, joihin ilmanvaihto ei tehokkaasti ulotu. Lisäksi kaikki pylväät ja seinät, joiden läheisyydessä ajetaan ajoneuvoilla, rakennettiin kestäämään bussin törmäys noin 30 km/h nopeudella. Sisääntulokerros (kolmanneksi alin) rakennettiin siten, että se ei välittäisi ajoneuvoista aiheutuvaa tärinää ylempiin kerroksiin. Osa toimistotiloista rakennettiin lisäksi erillisiin rakennuksiin melun ja tärinän aiheuttaman haitan välttämiseksi.⁵² Sisääntulokerroksessa sijaitsevia korjaamoita ja pesuhalleja ei suunniteltu kestäämään kaasuvuotoja ja niiden syttyviä, sillä suoraan niiden yläpuolella ei ole toimistotiloja. Näiden tilojen ilmanvaihto kuitenkin suunniteltiin tehokkaaksi, jotta tiloissa työskentelevä henkilöstö altistuisi mahdollisimman vähän öljyistä ja kemikaaleista haihtuville yhdisteille.⁵⁰

Riskejä vähentäviin toimenpiteisiin Fredriksdalin bussivarikolla kuuluu lisäksi mm. tankkaus-pisteen sijoittaminen kokonaan ulkotiloihin (kevyen katosrakenteen alle). Bussien pysäköinti-halli on varustettu palokaasujen ilmanvaihtojärjestelmällä sekä kaasunilmaisimilla, palova-roittimilla ja sammutussprinklerijärjestelmällä. Sprinklerijärjestelmä kattaa koko rakennuk-sen.⁵⁰

⁵² Tiedonanto, Richard Lundmark, Ramboll Sverige AB, 15.11.2017.

Yhteenveto Ruotsin tilanteesta

- Biokaasulla Ruotsissa merkittävä asema suhteessa muihin kaasupolttoaineisiin
- Kaasujärjestelmien käyttöä suljetuissa tai maanalaisissa tiloissa ei rajoiteta
- Kaasupolttoainejärjestelmä on tarkastettava erikseen säännöllisten ajoneuvotarkastusten yhteydessä
- Tukholman seudulla useita bussivarikkoja käyttävät myös kaasukäyttöiset bussit
- Vuonna 2017 valmistui osittain maanalainen ja erityisesti kaasubusseille suunniteltu Fredriksdalin bussivarikko, jossa tehtiin useita rakenteellisia ratkaisuja kaasubusseista aiheutuvien riskien pienentämiseksi. Tätä bussivarikkoa voidaan pitää hyvänä suunnitteluesimerkinä.

5 VERTAILEVA RISKINARVIOINTI - KIRJALLISUUSKATSAUS

5.1 CNG-tekniikka ja sitä ohjaavat standardit ja keskeiset erot nestepolttoainetekniikkaan

5.1.1 E-sääntö ECE R110

Paineistetulla metaanilla toimivien ajoneuvojen tekniikkaa ohjaa YK:n UNECE:n E-sääntö ECE R110. Sääntö on laadittu alun perin ohjaamaan jälkikäteen suoritettavaa kaasukäytölle muuttamisen turvallisuutta, mutta se ohjaa myös tehdasvalmisteista tuotantoa. E-sääntöihin viitataan suomalaisessa ajoneuvolainsäädännössä, joten säännöt ovat luonteeltaan pakottavia.

Säännössä kaasujärjestelmän komponentit jaetaan viiteen eri luokkaan paineen ja toiminta-periaatteen mukaan:

- Luokka 0: Korkeassa paineessa toimivat komponentit, mukaan luettuna putkistot ja sovitekappaleet, joissa maa- tai biokaasun paine on yli 30 bar mutta enintään 260 bar.
- Luokka 1: Keskipaineessa toimivat komponentit, mukaan luettuna putkistot ja sovitekappaleet, joissa maa- tai biokaasun paine on yli 4,5 bar mutta enintään 30 bar.
- Luokka 2: Matalassa paineessa toimivat komponentit, mukaan luettuna putkistot ja sovitekappaleet, joissa maa- tai biokaasun paine on yli 0,2 bar mutta enintään 4,5 bar.
- Luokka 3: Keskipaineessa toimivat komponentit, joita käytetään turvaventtiileinä tai jotka ovat suojatut turvaventtiileillä, mukaan luettuna putkistot ja sovitekappaleet, joissa maa- tai biokaasun paine on yli/vähintään 4,5 bar mutta enintään 30 bar.
- Luokka 4: Komponentit, jotka ovat kosketuksissa kaasuun, jonka paine on alle 0,2 bar.

Polttoainejärjestelmälle asetettavia yleisiä vaatimuksia ovat (säännön kohta 17.1) mm.

- järjestelmän kaikkien komponenttien tulee olla tyyppihyväksytyjä ko. säännön mukaisesti
- komponenttien on sovellettava käytettäväksi puristetulla maa- tai biokaasulla
- polttoainejärjestelmä ei saa vuotaa, toisin sanoen saippualliuoksella tehtävässä tiiveystestissä ei saa muodostua kuplia 3 minuutin aikana
- polttoainejärjestelmä on asennettava siten, että se on mahdollisimman hyvin suojattu niin, että esimerkiksi ajoneuvon liikkuvat osat, törmäykset, hiekka tai ajoneuvon kuorman lastaus, purkamisen tai liikkuminen eivät vahingoita sitä

Polttoainejärjestelmässä tulee olla ainakin seuraavat komponentit (säännön kohta 17.3.1):

- kaasusäiliö(itä) tai kaasupullo(ja)
- painemittari tai polttoainemittari
- lämpösulake
- automaattinen säiliöventtiili
- käsisulkuventtiili
- paineensäädin
- kaasuvirtauksen säädin
- virtauksenrajoitin
- kaasun ja ilman sekoitin (kaasutin tai injektori)
- täyttöyksikkö
- taipuisa polttoaineputki
- kiinteä polttoaineputki
- elektroninen ohjausyksikkö
- liittimiä
- kaasutiivis kotelo niille komponenteille, jotka on asennettu matkustaja- tai tavaratiilaan

Polttoainejärjestelmässä saa olla seuraavia komponentteja (säännön kohta 17.3.2):

- vastaventtiili
- varoventtiili (lämpösulakkeesta riippumaton)
- kaasusuodatin
- polttoainekisko (fuel rail)
- paine- ja/tai lämpötila-anturi
- polttoaineen valintajärjestelmä ja sähköjärjestelmä (monipolttoaineratkaisut)

Jokaisessa säiliössä on oltava automaattinen säiliöventtiili. Automaattisen säiliöventtiilin on toimittava siten, että se sulkeutuu, kun moottori pysäytetään ja pysyy kiinni, kun moottori ei käy (säännön kohta 17.5.1). Automaattisen säiliöventtiilin yhteydessä on oltava liikavirtausventtiili (kohta 15.3). Toinen automaattiventtiili saadaan asentaa kaasuputkeen mahdollisimman lähelle paineensäädintä (kohta 17.8.1). Liikavirtausventtiilin on sulkeuduttava, kun paine-ero venttiilin yli on 6,5 bar.

Kaasusäiliöiden suurinta täyttöpainetta koskevat seuraavat rajoitukset (liite 3, kohta 4.2):

- Paineen on asetettava lukemaan 200 bar, kun ympäristön lämpötila on 15 °C.
- Välittömästi täytön jälkeen paine saa olla enintään 260 bar.
- Paine ei saa milloinkaan ylittää 260 bar.

Kaikki kaasusäiliöt on suojattava tulipalon varalta lämpösulakkeilla. Lämpösulake on mitoitettava paineelle, joka on 1,5 kertaa säiliön käyttöpainetta. Lämpösulakkeen on avauduttava lämpötilassa 110 ± 10 °C (liite 4A, kohta 4). Lämpösulakkeen toiminnan ideana on, että lämpötilan noustessa sulake laukeaa sellaisessa lämpötilassa, joka vastaa 260 bar säiliöpainetta. Sulakkeen avautuessa kaasu purkautuu säiliöstä ulos. Kaasu voi tuki osallistua purkauksessaan tulipaloon ns. suihkupalona, mutta säiliön repeäminen estetään. Lämpösulakkeen pitävyyden ja toiminnan varmistetaan erilaisin monipuolisilla testeillä, joita on kuvattu yksityiskohtaisesti säännössä.

Kaasusäiliöt voidaan säännön mukaan valmistaa seuraavilla tavoilla:

- CNG1: Metallinen säiliö
- CNG2: Metallinen säiliörunko, jonka lieriöosa on vahvistettu kuitulujitemuovilla.
- CNG3: Metallinen säiliörunko, joka on kokonaan vahvistettu kuitulujitemuovilla.
- CNG4: Säiliö, jonka materiaalina on käytetty muuta kuin metallia, ja joka on vahvistettu kuitulujitemuovilla (täyskomposiittisäiliö)

Taulukossa 7 alla on summattu erilaiset kokeet, joita eri säiliötyypeiltä säännön mukaan vaaditaan.

Taulukko 7. Erilaiset kokeet, joita eri säiliötyypeiltä säännön ECE R110 mukaan vaaditaan.

Liitteen osio ja vastaava koe		Sylinterityyppi			
		CNG-1	CNG-2	CNG-3	CNG-4
A.12	Repeämispainekoe	X*	X	X	X
A.13	Tykytyskoe huoneenlämpötilassa	X*	X	X	X
A.14	Happaman ympäristön koe		X	X	X
A.15	Polttotesti	X	X	X	X
A.16	Lävistyskoe	X	X	X	X
A.17	Huokosten sietokoe		X	X	X
A.18	Virumiskoe korotetussa lämpötilassa		X	X	X
A.19	Jännitysmurtumakoe		X	X	X
A.20	Pudotuskoe			X	X
A.21	Kaasunläpäisykoe				X
A.24	PRD-koe	X	X	X	X
A.25	Vääntömomenttikoe				X
A.27	Tykytyskoe maakaasulla				X
A.6	LBB-koe	X	X	X	
A.7	Tykytyskoe ääriarvolämpötiloissa		X	X	X
X= vaaditaan					
* = ei vaadita sylintereiltä, jotka täyttävät ISO 9809 -säännön					

Säännön mukaan säiliö voidaan sijoittaa ajoneuvoon vapaasti muualle kuin moottoritilaan. Asennuksessa on huomioitava, että säiliön ja ajoneuvon rungon osalta ei esiinny metallien välistä kosketusta muualla kuin säiliön kiinnityspisteissä. Säiliön on lisäksi oltava vähintään 200 mm korkeudella tien pinnasta.

5.1.2 Standardi ISO 11439

UNECE:n lisäksi myös ISO on standardoinut ajoneuvojen kaasusäiliöiden vaatimuksia standardiin ISO 11439:2013⁵³. ECE R110:n liite 3A on alun perin (v. 2000) perustunut ko. standardin luonnokseen, mutta dokumentit ovat tämän jälkeen kehittyneet eri suuntiin. Käytännössä UNECE:n jäsenmaissa sääntö R110 on määräävä pakottavan luonteensa takia, ja eroilla on merkitystä lähinnä kansainvälisesti toimiville säiliövalmistajille. Käynnissä oleva harmonisointi saattaa muuttaa R110-sääntöä lähitulevaisuudessa, mutta tuskin tavalla, jolla olisi tämän hankkeen kannalta merkitystä.

5.1.3 Kaasujärjestelmän osat

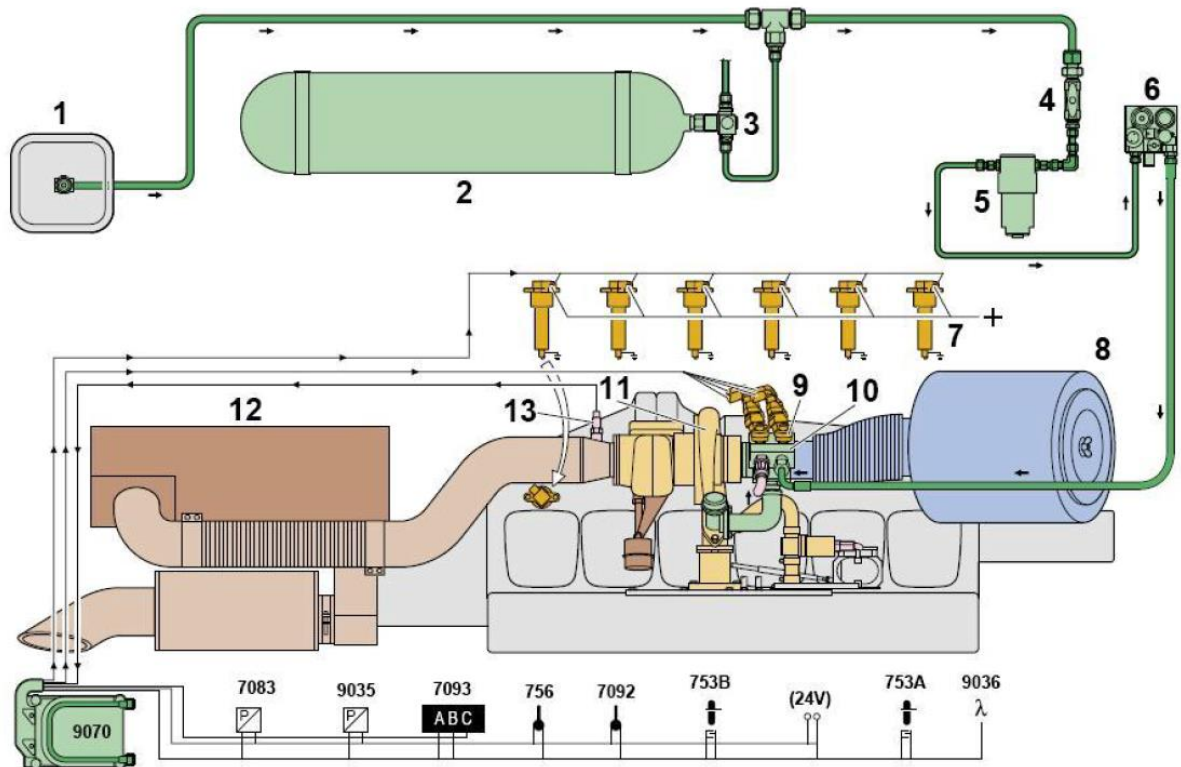
Kun kaasujärjestelmä toteutetaan em. sääntöjen ja standardien mukaisesti, se koostuu seuraavista osista kaasuvirtauksen mukaisessa järjestyksessä:

- Tankkausyhde: maa- tai biokaasu täytetään säiliöön standardoidun täyttöyhteen kautta
- Takaiskuventtiili (tarkoitus estää säiliön tyhjeneminen tankkausyhteen kautta)
- Putkitus kaasusäiliöille
- Säiliö: henkilöautoissa tyypillisesti useita muutaman kymmenen litran kokoisia säiliöitä ja busseissa tyypillisesti useita noin 200 litran kokoisia säiliöitä

⁵³ International Organization for Standardization (2013). ISO 11439:2013 High pressure cylinders for the on-board storage of natural gas as a fuel for automotive vehicles.

- Manuaaliventtiili: käsin suljettava venttiili, jolla säiliö eristetään esimerkiksi huoltotoissa tai onnettomuustilanteessa; oltava jokaisessa säiliössä (tarkoituksena turvata huoltotoiminta ja onnettomuustilanteet)
- Magneettiventtiili (automatic valve): sähköisesti ohjattu kaasuventtiili, joka aukeaa sytytysvirran ollessa kytketty; oltava jokaisessa säiliössä (tarkoituksena vähentää vuodon todennäköisyyttä auton ollessa käyttämättä)
- Liikavirtausventtiili: korkeapaineputkessa oleva venttiili, joka sulkeutuu, mikäli painero sen yli on yli 6,5 bar (tarkoituksena estää suuret vuodot korkeapainelinjasta)
- Omassa linjassaan säiliöstä johtaa ulos myös lämpötilaohjattu varoventtiili (lämpösulake⁵⁴; tarkoituksena päästää kaasu ulos tilanteessa, jossa säiliön lämpötila ja paine nousevat suunnitteluarvojen yli)
- Korkeapaineputkitus: ohut korkeapaineputki, joka on asennettu suojaputkeen ja jolla kaasu siirtyy paineenalennimelle
- Paineenalennin: regulaattori, joka laskee kaasun paineen noin 10 bar
- Moottorin kaasunsyöttölaitteisto: kaasua sylintereihin ruiskutuspumppun tai kaasuttimen tavoin siirtävä laitteisto

Kaavio eräästä Volvon laitteistosta on esitetty Kuvassa 5.



Kuva 5. Volvon GH10C-moottori. Kaasujärjestelmän oleelliset osat: 1 = täyttöpöytä, 2 = kaasusäiliö, 3 = säiliöventtiili, 4 = manuaaliventtiili, 5 = hienosuodatin, 6 = painesäädin (9,5 bar).⁵⁵

⁵⁴ Lämpösulakkeen ulospuhallussuuntaa ei ole määritetty.

⁵⁵ Eronen, P. (2007). Maakaasukäyttöisten ajoneuvojen käyttö suljetuissa tai maanalaisissa tiloissa. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu.

5.1.4 Erot nestepolttoainetekniikkaan

Nestepolttoaineratkaisuja ohjaavat niin ikään erilaiset standardit, joita ei kuitenkaan ole tässä tarkoituksenmukaista käydä läpi tekniikan ja ratkaisujen ollessa suhteellisen koeteltuja ja vakiintuneita. Nestepolttoaineratkaisujen yleinen rakenne on seuraava:

- Tankkausyhde, josta polttoaine täytetään säiliöön
- Putkitus säiliölle
- Säiliö: henkilöautoissa noin 40–70 litran kokoinen säiliö ja busseissa yhteensä joidenkin satojen litrojen kokoinen säiliö
- Säiliön huohotin ja aktiivihilisuodatin, tarkoituksena päästää korvausilmaa säiliöön ja tasata painevaihteluja
- Siirtoputki, jolla polttoaine siirtyy moottorille pumpattuna
- Kaasutin tai ruiskutuslaitteisto, joka syöttää polttoaineen moottorille

Polttoainelaitteisto tarkistetaan silmämääräisesti katsastuksen yhteydessä.

Yhteenveto polttoainetekniikkaa koskevista vaatimuksista
<ul style="list-style-type: none">• E-sääntö ECE R110 ohjaa tehdasvalmisteista kaasuaajoneuvojen tuotantoa ja ajoneuvojen konvertointia kaasukäyttöisiksi• E-säännöt ovat luonteeltaan pakottavia• Kaikilta säiliötyypeiltä vaaditaan useita kestävyyttä ja turvallisuutta mittaavia kokeita• Kaikki kaasusäiliöt on suojattava tulipalon varalta lämpösulakkeilla• Kaasusäiliö voidaan sijoittaa ajoneuvoon vapaasti muualle kuin moottoritalaan• Nestepolttoaineratkaisujakin ohjaavat erilaiset standardit, ja polttoainelaitteisto tarkistetaan silmämääräisesti katsastuksen yhteydessä

5.2 Katsaus onnettomuusmallinnuksiin

5.2.1 Arvioita relevanteista onnettomuusmekanismeista

Kuten luvussa 2 todettiin, keskeiset kaasuaajoneuvojen laitteistoihin liittyvät onnettomuusmekanismit ovat korkeapaineisen kaasun vuoto ja painesäiliön pettäminen eri syistä. Vuoto matalapainepuolelta ei ole merkityksellinen: voidaan laskea, että 10 bar paineesta vuotava 10 mm putki tuottaa massavirran, joka on suuruusluokaltaan noin 3 kg/min eli 68 l/s (NTP-olosuhteissa); voidaan siis arvioida, että täydellisen sekoituksen vallitessa syntyy syttymiskelpoista seosta (5-15 %) noin 1 m³/s. Rakentamismääräysten mukainen ilmanvaihto esimerkiksi pinta-alaltaan 1 000 m² ja korkeudeltaan 4 m hallissa on noin 4 m³/s. Ilmanvaihto ei siis merkittävästi vaikuta syttyvän kaasuseoksen määrään vuototilanteen aikana. Mainitussa 1 000 m² kokoisessa hallissa syttymiskelpoista seosta syntyy kattoon noin 1 mm/s. Minuutin vuoto aiheuttaa kattoon noin 60 mm paksun syttyvän kaasun kerroksen. Todellisuudessa seoksessa on tiheysgradientti ja vain sen alaosa on syttymiskelpoista. Syttymistilanteessa liekkirintama etenee syttymiskelpoisessa seoksessa, ja yli 15 % pitoisuudessa olevat alueet osallistuvat paloon vain, mikäli palokaasujen pyörteily aiheuttaa riittävää sekoitusta ja happea on saatavilla. Kaasumäärän palaminen kestää todennäköisesti useita sekunteja eikä palorintama välttämättä etene edes koko pilven läpi. Tällaisella palolla ei arvioida olevan merkittäviä lämpösäteily- tai painevaikutuksia. Myös pistoliekki matalapainepuolelta on todennäköisesti pituudeltaan kymmenien senttimetrin luokkaa ja suuntautuu hyvin todennäköisesti auton sisälle eikä suoraan levitä paloa.

Kirjallisuudessa on päädytty samansuuntaisiin arvioihin:

- Chamberlain ja Modarres⁵⁶ arvioivat PSA-pohjaisesti yhden metaanikäyttöisen koulubussin paloturvallisuutta. Malli perustuu geneeriselle vikaantumisdatalle ja asian-

56 Chamberlain, S. & Modarres, M. (2005). Compressed Natural Gas Bus Safety: A Quantitative Risk Assessment. Risk Analysis, Vol. 25 Issue 2 2005, pp.377-87.

tuntija-arvioille. Sen mukaan paloriskien kannalta tärkeimmät osat ovat säiliöiden varoventtiilit ja lämpösulakkeet, säiliöt itsessään ja korkeapaineputkitus.

- Iranissa on maailman eniten metaanikäyttöisiä autoja. Zamanian ym.⁵⁷ esittävät iranilaiseen dataan perustuen puolikvantitatiivisen analyysin tärkeimmistä vuotavista komponenteista, joita analyysin mukaan ovat korkeapaineputket ja -liittimet, varoventtiilit, magneettiventtiili ja paineenalennin.
- Pakistanissa, jossa on maailman toiseksi eniten metaanikäyttöisiä ajoneuvoja, yleisimmät vuotopaikat ja vauriotyypit konversioautoissa ovat olleet⁵⁸
 - Korkeapaineputkituksen vuodot (syynä murtuminen, liitosten liikkuminen, vauriot vierasesineiden osumista, mekaanisesta kulumisesta ja värähtelyistä)
 - Kaasusäiliön irtoaminen
 - Ei-hyväksytyn säiliön repeäminen
 - Ei-hyväksytyn venttiilin pettäminen
 - Kaasuvuoto säiliöventtiilistä
 - Kaasuvuoto täyttöventtiilistä
 - Kaasuvuoto paineenalentimesta

Tulokset viittaavat vahvasti suomalaiselle yhteiskunnalle vieraaseen turvallisuuskulttuuriin, mutta vahvistavat osaltaan korkeapainevuotojen merkitystä vaaran aiheuttajana matalapainevuotoihin verrattuna.

5.2.2 Kanadalainen onnettomuusriskiraportti

Kanadassa julkaistiin vuonna 2013 laaja tutkimus, jossa selvitettiin maakaasun (CNG) vuotoihin liittyviä riskejä suljetuissa tiloissa, kuten monikerroksisissa pysäköintihalleissa⁵⁹. Tutkimuksessa selvitettiin aluksi kirjallisuuskatsauksen avulla tarvittavat parametrit maakaasun vuotojen laskennallista mallinnusta varten. Sen jälkeen valittiin onnettomuuskenaariot, joissa maakaasuvuotojen vaikutuksia tarkasteltiin ja suoritettiin laskennallinen mallinnus.

Rakentamismääräykset Kanadassa

Mallinnuksessa otettiin huomioon Kanadan rakentamismääräykset ja -standardit. Kanadan rakentamismääräysten (The National Building Code of Canada 2005, Volume 1, Division B 6-3) mukaan suljetussa pysäköintihallissa tulee olla:

1. Mekaaninen ilmanvaihto, joka on mitoitettu a) rajoittamaan sisäilman häkäpitoisuus alle 100 ppm tasolle, b) rajoittamaan sisäilman typpidioksidipitoisuus alle 3 ppm tasolle (kun suurin osa pysäköintihallissa pidetyistä ajoneuvoista on varustettu dieselmoottorilla) tai c) takaamaan aukioloaikoina jatkuvasti ulkoilmaa vähintään 3,9 litraa per sekunti sisätiloihin jokaista lattianeliometriä kohti.
2. Kohdan 1 a) mukainen ilmanvaihtojärjestelmä on varustettava häkävaroittimilla ja kohdan 1 b) mukainen ilmanvaihtojärjestelmä on varustettava typpidioksidipitoisuuden tarkkailujärjestelmällä tai muilla hyväksyttävillä tarkkailujärjestelmillä.

Verrattuna Suomen rakennusmääräyksiin ilmanvaihdosta, lukuarvot häkäpitoisuudelle ovat jokseenkin samaa suuruusluokkaa: uudessa asetuksessa (1009/2017) Häkäpitoisuus moottoriajoneuvosuojissa kriittisimmäksi arvioituna käyttötuntina ei saa ylittää pitoisuutta 30 ppm. Typpidioksidipitoisuudesta ei määrätä Suomen rakennusmääräyksissä.

57 Zamanian, A., Ghafghazi, M., & Sabeti, M. (2009). CNG cars safety in accidents (case study: Iran), Paper number 09-0275.

58 Riaz, A. (2012). Investigation of CNG Vehicle Accidents in Pakistan Reveal Actual Causes. NGV Global News, 19.01.2012.

59 Hernandez, M., Ma, L., Huang, C., Rossetto, M., Martin, J., & Poisson, D. (2013). Safety Investigation of CNG leaks in enclosed parking structures: computational fluid dynamics modelling and analysis. National Research Council Canada, IFCI Report; no. IFCI-OTHER-CTR-003.

Onnettomuusskenaariot

Onnettomuusskenaarioita mallinnettiin lähtökohtaisesti sellaisille kaasuvuodoille, joilla on suurin vaikutus. Tarkasteltaviksi onnettomuusskenaarioiksi valittiin:

1. **Vuoto lämpösulakkeesta**, täysi säiliön paine. Vuoto täydellä paineella 8 mm aukosta. Vuotonopeus laskeva, vuodon kesto 250 sekuntia.
2. **Vuoto korkeapaineputkesta** moottorin ollessa käynnissä, täysi säiliön paine. Vuoto noin 1,8 mm aukosta, vuoto 500 kg/h (josta vähennetään moottorin kulutus). Vuotonopeus 0,12 kg/s, vuodon kesto 460 sekuntia.
3. **Vuoto matalapainelinjasta** moottorin ollessa käynnissä. Vuodon aiheuttajina vika magneettiventtiilissä ja regulaattorissa. Vuotonopeus vastaa maksimivirtaamaa kaasujärjestelmästä moottorille; vuotonopeus 0,02 kg/s ja vuodon kesto 2 760 sekuntia.

Mallinnuksessa käytettiin lisäksi seuraavia oletuksia/ lähtötietoja:

- Vuoto luokan 2 kuorma-autosta (suurehko pick-up)
- Auton kaasujärjestelmässä vain yksi kaasusäiliö, jonka koko (vesitilavuus) on 274 litraa ja mitoituspaine 250 bar
- Mallinnus tehtiin 100 % metaanikaasulla, raskaammalla maakaasulla (85 % metaania, 8 % etaania ja 7 % typpeä) ja vertailun vuoksi vedyllä. 100 % metaanikaasu todettiin vaikutusten kannalta pahemmaksi vaihtoehdoksi kuin raskaampi maakaasu.
- Vuoto jatkuu, kunnes kaasusäiliö on tyhjä
- Isotermiset (lämpötila säilyy vakiona, 27 °C) tai ei-isotermiset olosuhteet (10 °C lämpötilaero sisään tulevan ulkoilman, 37 °C, ja pysäköintihallin ilman, 27 °C, välillä)⁶⁰
- Pysäköintihallissa koneellinen ilmanvaihto/ ei koneellista ilmanvaihtoa.

Onnettomuusskenaariot mallinnettiin kahdessa erikokoisessa pysäköintihallissa (keskikokoinen ja suurikokoinen suljettu halli). Tutkimuksessa tehtiin kaksitoista virtausmallinnusta kummallekin hallille, ja tuloksina raportoitiin syttyvän kaasupilven tilavuus ajan funktiona.

Mallinnuksen tulokset

Pysäköintihallin koon vaikutus riskeihin

Pysäköintihallin koko ei vaikuttanut syttyvän kaasupilven kokoon pienten vuotojen tapauksessa. Onnettomuusskenaarioissa, joissa vuoto aiheutui joko lämpösulakkeen vioittumisesta tai korkeapainelinjan vuodosta, keskisuudessa pysäköintihallissa syntyi suurempi syttyvän kaasun pilvi kuin suuressa pysäköintihallissa, mikä tarkoittaa suurempaa todennäköisyyttä palolle ja paineallolle. Siten keskisuuren pysäköintihallin syttymisriski todettiin suuremmaksi. Syttyvän kaasupilven todettiin lisäksi hajoavan hitaammin keskisuudessa kuin suuressa pysäköintihallissa. Tämän perusteella tutkimuksessa tehtiin päätelmä, että suurella nopeudella tapahtuva vuoto pienemmässä pysäköintihallissa aiheuttaa suuremmat riskit kuin samansuuruisen vuoto suuremmassa pysäköintihallissa.

Ilmanvaihdon ja lämpötilojen vaikutukset riskeihin

Tutkimuksessa saadut tulokset osoittavat, että pienet kaasuvuodot ilmanvaihdon avulla varustetuissa pysäköintihalleissa muodostavat tilavuudeltaan pienemmän syttyvän kaasupilven ja tilavuudeltaan vielä pienemmän syttyvän kaasupilven verrattuna keskisuuriin tai suuriin kaasuvuotoihin. Tulosten perusteella todettiin, että ilmanvaihdon avulla varustetuissa pysäköintihalleissa tapahtuvat pienet kaasuvuodot aiheuttavat vain vähäisen riskin. Mitä suurempi on kaasun vuotonopeus, sitä suuremman syttyvän pilven kaasu muodostaa. Suuremmilla syttyvillä pilvillä on suurempi todennäköisyys syttyä ulkoisista syttymislähteistä. Suurempi vuoto kuitenkin hajoaa pientä vuotoa nopeammin.

⁶⁰ Suomen olosuhteissa ei merkittävä parametri

Ilmanvaihdolla ei havaittu olevan merkittävää vaikutusta syttyvien pilvien (metaanipitoisuus 5-15 tilavuusprosenttia) maksimitilavuuksiin onnettomuusskenaarioissa, joissa vuoto tapahtui suuressa pysäköintihallissa lämpösulakkeesta tai korkeapainelinjasta. Ilmanvaihdon ei todettu vaikuttavan oleellisesti myöskään pilven laimenemisnopeuteen, vaan laimeneminen tapahtui enemmän tilassa olevaan ilmaan.

Ilmanvaihdolla ei havaittu olevan merkittävää (yli 10 %) vaikutusta syttyvien pilvien maksimitilavuuksiin myöskään keskisuudessa pysäköintihallissa, jos vuoto tapahtuu lämpösulakkeesta. Sen sijaan korkeapainelinjan vuodosta aiheutuvat kaasupilvet olivat keskisuudessa pysäköintihallissa selvästi suurempia, jos ilmanvaihtoa ei ollut. Keskisuudessa pysäköintihallissa ilmanvaihdon puuttuminen hidastaa pilven hajoamista selvästi. Ilmanvaihto vaikutti kaiken kokoisissa pysäköintihalleissa kaasupilven muotoon: jos ilmanvaihtoa ei ole, kaasupilvet kasvavat kattoa kohti, kun taas ilmanvaihdolla varustetussa tilassa kaasupilvien muoto seuraa ainakin osittain ilmanvaihdon ilmavirtojen suuntaa.

Maakaasuautojen riskien suuruuden hahmottamiseksi mallinnettiin myös vuoto vetyautosta. Vetyautosta tapahtuvien vuotojen aiheuttamat syttyvät kaasupilvet todettiin pienemmiksi kuin metaanikaasupilvet vastaavissa olosuhteissa. Vetykaasupilven syttymistodennäköisyys on kuitenkin merkittävästi suurempi. Samoin tiedetään, että vedyn laminaarinen palamisnopeus on noin 10-kertainen metaaniin nähden ja sen taipumus detonoida kaasupilvipaloissa on merkittävä.

5.2.3 Muita onnettomuusmallinnuksia

Berghmans ja Vanierschot⁶¹ esittävät vertailevan analyysin bensiinin, maakaasun ja neste-kaasun riskeistä maanalaisissa tiloissa. Heidän mukaansa relevantteja onnettomuusskenaarioita ovat vuodot ja niistä seuraavat palot lammikko- tai suihkupalot, sekä säiliön repeäminen ja siihen mahdollisesti liittyvä kaasupallo. Johtopäätöksenä on, että metaanikäyttöisiin ajoneuvoihin liittyy useampia vaaraskenaarioita kuin bensiinijajoneuvoihin, mutta niiden todennäköisyys on hyvin pieni. Nestekaasuajoneuvoista arvioidaan, että ne ovat selvästi vaarallisempia kuin metaanikäyttöiset ajoneuvot.

Ekoto ym.⁶² esittävät maakaasun leviämisen virtauslaskentasimulointeja autojen korjaustiloja koskevien Yhdysvaltojen standardien ja rakentamismääräysten kehittämisen tueksi. Skenaarioina tutkitaan mm. LNG-auton polttoaineen höyrystymistä, kun sitä säilytetään ohjeiden vastaisesti sisätiloissa, metaanikäyttöisen ajoneuvon polttoainelinjan murtumista sekä lämpösulakkeen pettämistä ja metaanisäiliön tyhjenemistä sisätilaan. Tulosten mukaan syttymiskelpoisen kaasupilven koko näissä skenaarioissa on mitätön ja paineenousu pientä. On kuitenkin huomattava, että nykymääräysten mukainen ilmanvaihto näissä tiloissa on lähes 100-kertainen suomalaisten pysäköintihallien ilmanvaihtoon verrattuna. Myöhemässä korjausraportissa⁶³ on mallinnettu päästön lämpötila uudelleen ja todettu, että syttyvä seos nousee tilan kattoon.

UNECE:n vaarallisten aineiden kuljetustyöryhmässä on pohdittu kaasukäyttöisten ajoneuvojen käyttöä vaarallisten aineiden maantiekuljetuksissa⁶⁴. Selvityksen kirjallisuuskatsauksessa viitataan huoltotilojen osalta ym. Ekoton raporttiin. Tunneleiden osalta viitataan useisiin selvityksiin⁶⁵, joissa todetaan, että tutkituissa skenaarioissa kaasubussit ovat turvallisempia kuin dieselajoneuvot. Ainakin Ranskassa tehdyt selvitykset on kuitenkin rahoittanut kaasuteollisuus tilanteessa, jossa Ranskan tieliikenneonnettomuustoimisto BEATT on ehdottanut

61 Berghmans, J. & Vanierschot, M. (2014). Safety Aspects of CNG Cars. *Procedia Engineering* Vol. 84, 2014, pp. 33-46.

62 Ekoto, I., Blaylock, M., LaFleur C., LaChance J., & Horne, D. (2014). Analyses in Support of Risk-Informed Natural Gas Vehicle Maintenance Facility Codes and Standards: Phase I. Sandia Report SAND2014-2342.

63 Blaylock, M., Bozinovski, R., & Ekoto, I. (2016). Analysis of a Full Scale Blowdown Due to a Mechanical Failure of a Pressure Relief Device in a Natural Gas Vehicle Maintenance Facility. Sandia Report SAND2016-4534. Albuquerque, New Mexico 87185 and Livermore, California 94550: Sandia National Laboratories.

64 Economic Commission for Europe, Inland Transport Committee (2015). Additional information for ECE/TRANS/WP.15/2015/6e – Use of Liquefied Petroleum Gas (LPG) and Compressed Natural Gas (CNG) as fuel for vehicles carrying dangerous goods: Focus on CNG safety.

65 Shaaban, S H., Zuzovsky, M., & Anigstein, R. (1989). Safety Analysis of Natural Gas Vehicles Transiting Highway Tunnels. Ebasco Services Incorporated, New York.
Center for Fire Safety Studies (1994). Dispersion of CNG Fuel Releases in Naturally Ventilated Tunnels. Worcester Polytechnic Institute, Massachusetts. 11/1994.

Bordelanne, O. (2010). Comparative study of the inherent risks of CNG and Diesel Buses/Heavy Duty Vehicles (HDVs) & Garbage Trucks (GTs) in Tunnels. GDFSUEZ. 8.6.2010, (PowerPoint pre-sentation to NGVA Europe conference, Rome) Selvitys ei ole julkisesti saatavilla.

myös kaasuajoneuvojen kieltämistä tunneleissa, joissa vaarallisten aineiden kuljetukset on kielletty⁶⁶. Raportteja ei ole vertaisarvioitu.

Fredriksdalin varikon rakennussuunnittelun yhteydessä tehtiin turvallisuusriskinarvioita^{67,68}. Ruotsissa bussiterminalien sijoittamisessa käytetään yleisenä ohjeena 200 metrin etäisyyttä terminaalista lähimpiin asuinrakennuksiin, bussien polttoaineesta riippumatta⁶⁹. Tukholman Lääninhallitus on lisäksi asettanut vaatimuksia koskien riskianalyyseiden laatimista sekä turvaetäisyyksiä vaarallisten aineiden kuljetuksiin käytettävien väylien ja asuinrakennusten välillä⁶⁹. Bussivarikko sijaitsee Hammarbyn lämpövoimalaitoksen ja asuinalueen välissä. Hammarbyn lämpövoimalaitoksella varastoidaan mm. polttoöljyä ja ammoniakkaa. Lämpövoimalaitos ja asuinalue on otettu huomioon bussivarikon riskianalyyseissa. Vuonna 2008 tehdyn riskianalyyseiden mukaan suurimmat riskitekijät liittyvät pysäköintihalliin ja korjaamoihin, lämpövoimalaitoksen pellettihalliin sekä vaarallisten aineiden kuljetuksiin varikon ympäristössä. Vuonna 2010 laadittiin riskinarvio bussivarikon vaikutuksista kolmannelle osapuolelle (varikolla käyvä tai työskentelevä henkilö tai sen läheisyydessä asuva henkilö).

Vuonna 2010 laaditun riskinarvion yhteydessä laadittiin onnettomuusskenaarioita bussivarikon aiemmin tunnistetuille riskikohteille⁶⁸:

1. **Kaasuvouto huoltoasemalla tankkauksen yhteydessä.** Tuulen suunta Hammarbyverketin voimalaitosta kohti. Huoltoasemalta tuulen mukana siirtyvä syttyvä kaasupilvi syttyy ulkoisesta syttymislähteestä ja palo leviää pellettivarastoon. Todennäköisenä syynä kaasuvuotoon tankkausletkun repeämä.
2. **Kaasuvouto bussin kaasujärjestelmästä tankkauksen yhteydessä.** Oletetaan, että kaasubussin polttoainejärjestelmä ei ole tiivis ja kaasua pääsee vuotamaan tankkauksen yhteydessä huoltoasemalla. Kaasuvuodon osalta oletetaan samat seuraukset kuin kohdassa 1.
3. **Kaasuvouto bussin kaasujärjestelmästä pysäköintihallissa.** Oletetaan, että kaasubussin polttoainejärjestelmä ei ole tiivis (liitännät tai venttiilit vuotavat) ja kaasua pääsee vuotamaan pysäköintihallin sisäilmaan. Oletetaan lisäksi, että vuotoa ei onnistuta rajoittamaan ja ilmanvaihto ei toimi. Syttyvä kaasupilvi pääsee syntymään ja leviää pysäköintihallissa. Oletetaan, että kaasupilvi syttyy ulkoisesta syttymislähteestä.
4. **Kaasuvouto bussin kaasujärjestelmästä korjaamolla.** Oletetaan, että bussin kaasujärjestelmästä tulee kaasuvuoto bussin korjaustöiden yhteydessä varikon korjaamolla. Oletetaan lisäksi, että korjaamon ilmanvaihto ei toimi riittävällä tavalla ja syntyy syttyvä kaasupilvi, joka syttyy ulkoisesta syttymislähteestä ja aiheuttaa tulipalon.

Edellä mainittujen onnettomuusskenaarioiden lisäksi laadittiin onnettomuusskenaarioita Hammarbyverketin voimalaitokselle. Näillä skenaarioilla arvioitiin olevan vaikutus Fredriksdalin bussivarikkoon.

Laadituille onnettomuusskenaarioille tehtiin frekvenssianalyysi, jossa onnettomuuden tapahtumistaajuus arvioitiin. Lisäksi arvioitiin onnettomuusskenaarioiden vaikutusten suuruus ihmisen terveydelle ja turvallisuudelle. Sen jälkeen tehtiin riskinarviointi, missä riskit arvioitiin tapahtumistaajuuden ja onnettomuuden vaikutusten suuruuden tulona.

Riskianalyyseiden tuloksena todettiin, että bussivarikon osalta riskit ylittivät hyväksyttävän tason pysäköintihallissa ja korjaamolla tapahtuvien kaasuvuotojen osalta. Samalla kuitenkin todet-

66 Bordelanne, O. (2012). Comparative study of the inherent risks of CNG and Diesel Buses/Heavy Duty Vehicles (HDVs) & Garbage Trucks (GTs) in tunnels. 25th World Gas Conference. <http://members.igu.org/old/IGU%20Events/wgc/wgc-2012/wgc-2012-proceedings/speaker-presentations/committee-session/wednesday/cs5-3-woc5-n-gas-vehicles/comparative-study-of-the-inherent-risks-of-cng-and-diesel-buses-heavy-duty-vehicles-hdvs-garbage-trucks-gts-in-tunnels/@download/download>

67 Serti, S. (2008). Riskanalys Fredriksdal avseende tredje man, Grovanalys. Sweco 18.1.2008.

68 Serti, S. (2010). Riskanalys – bussdepåns inverkan på närboende och anställda vid kv Fredriksdal, Grovanalys. Sweco 21.1.2010.

69 Skanska, SL, Stockholms Stad ja Tyréns (2010). Miljökonsekvensbeskrivning. Utställning Mars 2010.

tiin, että näitä riskejä on tarkasteltava tarkemmin, ja että riskejä vähentävillä toimenpiteillä voidaan todennäköisesti vähentää riskejä hyväksyttävälle tasolle.⁶⁸

Yhteenveto relevanteista onnettomuusmekanismeista ja tuloksista suljetuissa tiloissa

- Kaasuvuoto kaasujärjestelmän matalapainepuolelta ei ole merkityksellinen
- Relevantit onnettomuusmekanismit ovat korkeapaineisen kaasun vuoto ja painesäiliön pettäminen eri syistä
- Relevantit vuotojen lähteet ovat säiliöiden varoventtiilit ja lämpösulakkeet, itse säiliöt sekä korkeapaineputkitus ja paineenalennin
- Suurissa pysäköintihalleissa vuodot laimenevat tehokkaammin ja tuulettuvat ulos nopeammin kuin keskisuurissa
- Ilmanvaihto tehostaa suuren vuodon laimenemista mutta ei juurikaan vaikuta syttyvän kaasupilven maksimikokoon
- Metaanikäyttöisiin ajoneuvoihin saattaa liittyä useampia vaaraskenaarioita kuin bensiinijoneuvoihin, mutta niiden todennäköisyys on hyvin pieni
- Metaanivuodossa syttyvä seos nousee yleensä tilan kattoon
- Fredriksdalin bussivarikkoa koskevan riskianalyysin tuloksena todettiin, että jotkin riskit ylittivät hyväksyttävän tason, mutta että näitä riskejä vähentävillä toimenpiteillä voidaan todennäköisesti vähentää riskejä hyväksyttävälle tasolle.

5.2.4 Suomessa tehdyt riskinarvioinnit

Suomessa on tehty onnettomuusmallinnusta lähinnä Kampin tapauksen yhteydessä. Lautkaski²⁵ on tarkastellut metaanikäyttöisten bussien oletettujen kaasuvuotojen seurauksia Kampin terminaalissa. Lautkaski arvioi yhden bussin lämpösulakkeen vuodosta syntyvän kaasupilven vaikutuksia ja toteaa odotettavissa olevan huippuylipaineen olevan noin 0,03-0,13 bar (3-13 kPa). Lautkaski toteaa, että jos terminaalissa syttyy dieselbussin palo, hallin katon läheisyyteen kertyy savua, jonka lämpösäteily saattaa avata kaasubussin kaikki lämpösulakkeet. Tällöin kaikki säiliöt tyhjenevät 2–5 minuutin aikana halliin. Lämpösulakkeiden puhaltama metaani sekoittuu osaksi savuun ja osaksi savukerroksen alapuolella olevaan ilmaan. Mahdollisen myöhäisen syttymän paine voi olla korkeampi kuin lämpösulakkeen vian tapauksessa. Selvityksessä ei kuitenkaan otettu huomioon esimerkiksi tällaisessa skenaariossa laukeavaa sprinklerijärjestelmää eikä sen jäädyttävää vaikutusta sekä savukaasuihin että bussien rakenteisiin, millä olisi todennäköisesti merkitystä lämpösulakkeiden laukeamisen kannalta.

Lautkaski oletti, että jälkimmäisessä skenaariossa purkautuva metaani syttyisi vasta säiliöiden tyhjennyttyä kokonaan. Oletusta on arvosteltu. Nylund⁷⁰ pyrki osoittamaan mm. haastatteluihin perustuen, että Lautkasken oletukset syttymättömyydestä eivät ole perusteltuja. Lisäksi Nylund osoittaa, että Lautkasken skenaariokuvaus, jossa bussin kaikki kaasusäiliöt purkautuisivat yhden osittain vuotavan lämpösulakkeen kautta, on mahdollinen vain auton syytysvirran ollessa kytketty. Nylund myös osoittaa, että korkeapainepuolen putkirikon sattuessa ajon aikana säiliökohtaiset kaasuvirtauksen rajoittimet sulkeutuvat, ja kaasuvirtaus kuristuu siten, että moottori lakkaa käymästä. Jos kuljettaja tällöin sammuttaa moottorin virrat, säiliökohtaiset magneettiventtiilit sulkeutuvat, ja vuoto lakkaa kokonaan. Auton seisossa ja magneettiventtiilien ollessa kiinni ainoa muu vuotomahdollisuus on edellä keskusteltu lämpösulakkeen vuoto. Magneettiventtiilien ja moottorin väliin jäävä kaasumäärä on niin pieni, ettei sillä liene merkitystä turvallisuusmielessä. Nylund myös huomauttaa, että Lautkaski on arvioinut kaasupalon painehuiput auton koko kaasumäärän mukaan ja toisaalta arvioimalla suljetun tilan tapausta, vaikka auton koko kaasumäärä ei edellä olevan valossa voi purkautua ja tilassa on painetta keventäviä ajoyhteyksiä.

VTT²⁶ selvitti myöhemmin kokeellisesti ja laskennallisilla menetelmin, voitaisiinko Lautkasken esittämä skenaario Kampissa estää korkeapaineisella vesisumutuslaitteistolla. Tuloksena arvioitiin, että sumutuslaitteisto kykenee laimentamaan metaania niin, että syttymää ei tapahdu.

⁷⁰ Nylund, N.-O. (2005), Maakaasuautojen turvallisuusnäkökohtia, Kampin terminaalin kaasuautokieltoon liittyen, TEC TransEnergy Consulting Oy

Eronen⁷¹ on laatinut yhteen vetävän diplomityön metaanikäyttöisten kaasujoneuvojen käytöstä maanalaisissa tiloissa.

Yhteenveto Suomessa tehdyistä riskinarvioista

- Kampin terminaalia varten tehty riskinarviointi pyrki pahimman mahdollisen onnettomuusskenaarion arviointiin
- Tätä onnettomuusskenaariota sekä siihen liittyviä arviointeja mm. huippuylipaineesta on kuitenkin pidetty epärealistisina
- Kampin selvityksessä esitettyjä yksinkertaistettuja skenaarioita sekä selvityksessä mainittuja jatkoselvitystarpeita ja selvityksen rajoitteita ei ehkä ole osattu tulkita oikein
- Korkeapainevesisumutuslaitteisto kykenee estämään kyseisen onnettomuusskenaarion etenemisen

6 VUOTOSKENAARIOIDEN VERTAILEVA ANALYYSI

6.1 Tarkasteltavat vuotoskenaariot

Korkeapainelaitteistossa voidaan erottaa kolme vuotoreittiä:

1. Vuoto lämpösulakkeesta joko sulakkeen vian tai lämmölle altistumisen takia
2. Vuoto korkeapaineputkituksesta siten, että liikavirtausventtiili ei toimi
3. Vuoto tankkausputken/yhteen kautta

Vuoto lämpösulakkeesta voi tapahtua joko kontrolloidusti, kun lämpösulake toimii suunnitellusti, tai kontrolloimattomasti, jos lämpösulake vioittuu ja alkaa vuotaa. Vuotoa korkeapaineputkituksesta samaan aikaan kuin liikavirtausventtiili ei toimi voidaan pitää epätodennäköisenä. Vuoto mm. edellyttäisi, että magneettiventtiili on auki, ts. autossa on sytytysvirta kytkettynä. Luonnollisesti kolaritilanteessa kaikki venttiilit ja putkistot voivat vaurioitua yhtäaikaa (ts. tapahtumat eivät tarkkaan ottaen ole riippumattomia), mutta on oletettavaa, että maanalaisissa tiloissa ei yleensä saada aikaan sellaisia törmäysvoimia, joilla voisi olla vaikutuksia yleensä taka-akselin tuntumaan sijoitettuihin säiliöihin ja laitteistoihin. Vuoto tankkausputken/-yhteen kautta lienee periaatteessa mahdollinen, mutta tapauksia ei ainakaan julkisessa kirjallisuudessa tunneta.

Yhteenvetona voidaan todeta, että mitä luultavimmin todennäköisin korkeapainelaitteiston vuoto tapahtuu lämpösulakkeen kautta. Sillä, mistä kohden korkeapainelaitteistoa vuoto tapahtuu, ei ole suurta merkitystä vuodon leviämisen kannalta. Eroa on lähinnä siinä, mihin polttoainesuihku, ja siten mahdollinen pistoliekki/suihkupalo suuntautuu.

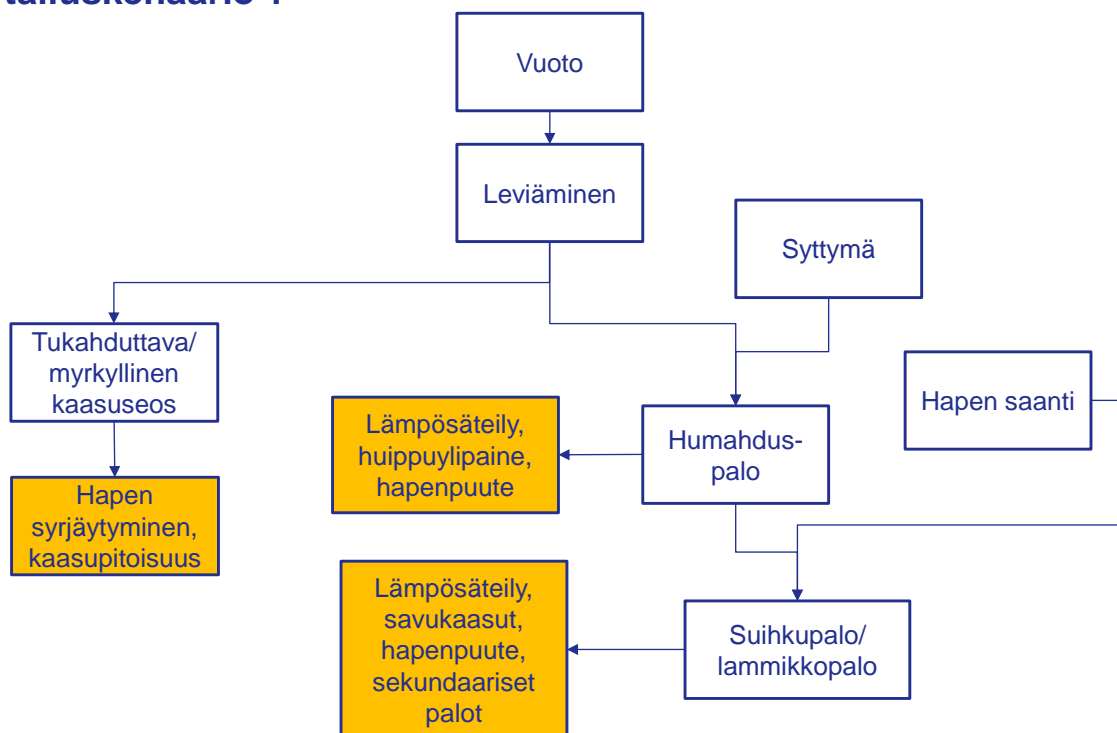
Semikvantitatiivisessa riskianalysissä tarkastelemme kahta skenaariota

1. Vuoto lämpösulakkeesta sen vaurioitumisen takia (tarkastelu kattaa varauksin myös vuodot muista korkeapainepuolen vuotoreiteistä)
2. Vuoto lämpösulakkeesta autossa tai lähistöllä syttyneen tulipalon takia ja kaasun osallistuminen tulipaloon

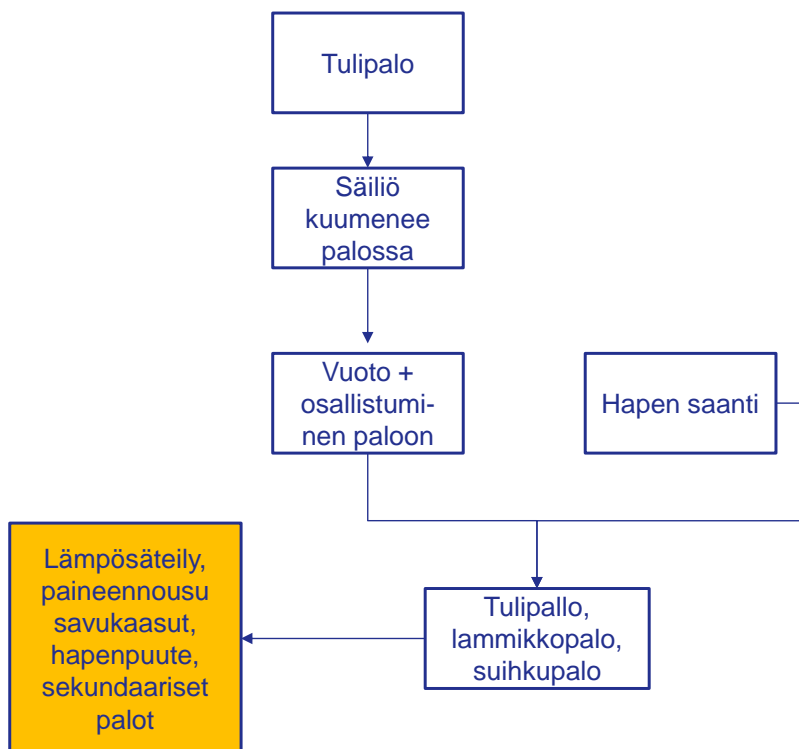
Skenaarioiden eteneminen on esitetty alla kaavioina.

⁷¹ Eronen, P. (2007). Maakaasukäyttöisten ajoneuvojen käyttö suljetuissa tai maanalaisissa tiloissa. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu.

Vertailuskenaario 1



Vertailuskenaario 2



Vastaavat skenaariot nestepolttoaineiden tapauksessa olisivat tyypillisesti suuri vuoto polttoainesäiliöstä ja nestepolttoainesäiliön altistuminen muualla alkaneelle tulipalolle.

6.2 Skenaario 1

6.2.1 Säiliökoot

Metaani

Tehdasvalmisteisissa henkilöautoissa kaasu on jaettu useisiin pienempiin säiliöihin, joista kaikissa on ECE R110 mukaiset turvalaitteet, kuten lämpösulakkeet. Siten lämpösulakkeen kautta voi purkautua aina vain yhden säiliön sisältö. Vain yksi säiliö kerrallaan on kytkettyä moottorijärjestelmään ja kaasu pääsee virtaamaan moottoriin ainoastaan sytytysvirran ollessa päällä. Maahantuojilta saatujen tietojen mukaisesti keskimääräinen säiliökoko on noin 7,5 kg ja näin on ollut lähes koko sen ajan kun autoja on Suomeen tuotu⁷². Konversioautojen säiliöt ovat suurempia. Suurin markkinoilta löydetty säiliö on kooltaan 19 kg. Tarkastellaan tässä vertailussa 19 kg säiliötä.

Bensiini

Bensiinisäiliöiden koot vaihtelevat pienten autojen noin 40 litrasta aina suurten autojen n. 70 litraan asti. Tarkastellaan tässä vertailussa objektiivisuuden vuoksi myös suurta, 70 litran polttoainesäiliötä.

6.2.2 Vuototilanne ja polttoaineen leviäminen

Metaani

Lautkasken⁷³ mukaan lämpösulakkeen avautuminen vian seurauksena ulkona aiheuttaa vuotokohdan lähistöllä turbulenttisen suihkun, jossa on suhteellisen vähän syttyvää seosta. Jos suihku ei joudu kosketukseen syttymislähteen kanssa, säiliö tyhjenee hallitusti ja vaaraa aiheuttamatta. Vuoto sisätiloissa aiheuttaa kaasun kertymistä ja syttymiskelpoisen seoksen syntymisen. Virtaus on ylikriittistä ts. ulosvirtausnopeutta rajoittaa äänen nopeus. Ulosvirtaus on tyypillisesti suurimmillaan lämpösulakkeesta tai varoventtiilistä joitakin kiloja sekunnissa. Säiliön tyhjenemisaika on tällöin muutama minuutti. Pienemmästä vuodosta massavirta on pienempi ja vuoto kestää pidempään.

Riippuen vuotosuunnasta kaasusuihku osuu sisätiloissa johonkin pintaan lähes varmasti. Tällöin virtaus kääntyy pinnan suuntaiseksi ja jatkuu eri suuntiin pintaa. Jos virtaus osuu esimerkiksi bussin tapauksessa kattoon, se synnyttää suljetussa tilassa merkittävän pyöremäisen takaisinvirtauksen. Jos auton katto on lähellä tilan kattoa, takaisinvirtaus rikastuttaa kaasupitoisuutta alueessa. Muussa tapauksessa se lisää sekoittumista. Jos kaasusuihku osuu lattiaan tai toiseen autoon, kirjallisuuden⁷⁴ perusteella merkittävää tilan kokoista sekoittumista suihkun vaikutuksesta ei synny, ja kaasu nousee ylöspäin, ja virtaukset määräytyvät suurimittakaavaisista tilan ilmanvaihtovirtauksista.

Kun kaasun virtauksessa paine laskee ja virtausnopeus kasvaa, se jäähtyy. Tarkka lämpötilamallinnus on hyvin vaikeaa, sillä tilanne on hyvin transientti. Suuri merkitys on sillä, miten lämpöä siirtyy ympäristöstä säiliöön ja ulos purkautuvaan kaasuun. Lämpötilalla voi olla vaikutusta kaasun käyttäytymiseen leviämistilanteessa. Yleensä arvioidaan, että purkautuva kaasu nousee tilan kattoon ja muodostaa siellä patjan, jonka suuruus ja paksuus riippuvat päästönopeuden ja ilmanvaihdon suhteesta. Kirjallisuudessa on kuitenkin esitetty myös näkemys, jonka mukaan kylmä kaasu ei heti nousisikaan ylös⁷⁵. Kirjallisuudessa esitettyissä CFD-laskennoissa lämpötilan vaikutusta ei kovin usein ole huomioitu. On kuitenkin oletettavaa, että syttymiskelpoinen seos syntyy tilan yläosaan.

Metaanipilvi on syttyvä niiltä osin kuin metaanipitoisuus on 5-15 % (vol.). NTP-olosuhteissa 19 metaanikiloa on noin 30 m³. Teoriassa voidaan arvioida, että tästä määrästä voi siis syntyä suuruusluokaltaan noin 200–600 m³ syttymiskelpoista seosta. Arvio on konservatiivinen,

⁷² Haastattelu Helkama-auto (Skoda) ja VV-Auto (Volkswagen, Audi, Seat), 15.12.2017

⁷³ Lautkaski, R. (2005). Maakaasubussien käyttö Kampin terminaalissa 1. Vaaratilanteiden tunnistaminen ja kuvaus. VTT. Tutkimusselostus PRO1/1029/05. Luottamuksellinen.

⁷⁴ edellisen viitteen kirjallisuuskatsaus

⁷⁵ Gaumer, R. L. & Raj, P. K. (1996). Dispersion of CNG following a high pressure release. Final report. Washington, DC: U.S. Department of Transportation, Federal Transit Administration. (FTAMA267021962.)

koska sekoitus ei ole täydellistä, mutta suuruusluokaltaan linjassa esimerkiksi edellä kuvattun Kanadan raportin tulosten kanssa.

Ilmanvaihto siirtää vuotaneen metaanin tilasta ulos ja pienentää näin syttymiskelpoista pilveä. Suomen rakentamismääräyskokoelman mukainen ilmanvaihto autosuojissa on suuruusluokaltaan muutamia kuutiometrejä sekunnissa. Syttymiskelpoisen seoksen määrä vähenee kahdella tavalla: ensinnä suljetun tilan ilmavirtaukset laimentavat metaanipitoisuutta alle alemman syttymisrajan (5 %) ja toisaalta ilmanvaihto kuljettaa metaania ulos. Jos oletetaan että, tilan tilavuus on 10 kertaa syttyvän pilven koko, ja ilmanvaihto vaihtaa ilmaa 2-6 m³/s, syttymiskelpoisen seoksen määrä putoaa 5 % alkuperäisestä määrästä noin 10 minuutissa.

Metaanin syttymisenergia on 0,3 mJ⁷⁶ ja itsesyttymislämpötila lähteestä riippuen noin 550 °C. Syttymisenergia tarkoittaa sitä energiamäärää, joka kipinällä tulee olla, jotta metaani syttyy. Itsesyttymislämpötila tarkoittaa lämpötilaa, jossa metaani-ilmaseos syttyy ilman kipinää tai liekkiä.

Bensiini

Vastaava vuoto syntyy, jos bensiinisäiliö tai putkisto on esimerkiksi vaurioitunut ajossa tai korrodoitunut, tätä ei ole huomattu, ja auto ajetaan pysäköintihalliin. Vuotava bensiini valuu tilan lattialle, jossa yleensä kaadot ovat kohti hulevesiviemäreitä, joissa on tyypillisesti öljynerotimet. Kaadot eivät yleensä ole järin jyrkkiä, joten voidaan olettaa, että bensiini leviää hitaasti valuvaksi leveähköksi puroksi tai lammikoksi, joka valuu kohti hulevesikaivoa. On hyvin mahdollista, että suurin osa nesteestä lammikoituu tilan lattialle.

Kun oletetaan valumisnopeus viemäriin merkityksettömäksi ja lammikon keskisyvyydeksi 0,3 cm (sileä betoni), voidaan arvioida, että vuodosta voisi syntyä lammikko, jonka pinta-ala on noin 23 m² (ts. ympyränmuotoisen lammikon halkaisija olisi noin 5,4 m).

Bensiini haihtuu lammikosta muodostaen syttymiskelpoisen ilma-kaasuseoksen. Haihtumisen massavirta ilmaan on monimutkainen prosessi ja riippuu monista tekijöistä. Määräviä tekijöitä ovat lämpötila, lammikon ala, aineen höyrynpaine ja muut ominaisuudet sekä ilman liikkumistapa ja -nopeus lammikon yllä. Moottoribensiini on OVA-ohjeiden⁷⁷ mukaan erittäin helposti haihtuva ja sen höyrynpaine on laadusta riippuen 0,3-0,5 bar (30–50 kPa), joka on varsin korkea (esimerkiksi veden höyrynpaine on 20 °C lämpötilassa 2,33 kPa).

Jos arvioidaan, että ilmanvaihto ja erilaiset lämpötilaerot saisivat aikaan esimerkiksi 0,4 m/s ilmavirran lammikon yllä, voidaan arvioida bensiinin haihtumista tekstilaatikossa esitetyllä tavalla.

Yleisesti lammikosta haihtuva massavirta on

$m' = kAM_m P_v / (RT)$, missä

- m' on massavirta (kg/s)
- k on massansiirtokerroin (ks. alla)
- A on lammikon pinta-ala
- M_m on aineen moolimassa (kg/mol)
- P_v on haihtuvan aineen höyrynpaine (Pa)
- R on yleinen kaasuvakio 8,31446 J K⁻¹ mol⁻¹
- T on lämpötila (K).

Laminaariseen ilmavirtaan haihtumisessa massansiirtokerroinena voidaan käyttää esim.⁷⁸

$k = 160 * D_m^{0,58} * u^{0,68} * R * T / (P_a - P_v)$, missä

- D_m on aineen molekulaarinen diffuusiokerroin (m²/s)
- u on ilmavirtauksen nopeus (m/s) ja
- P_a on ilmanpaine (Pa).

⁷⁶ Explosionsolutions, Minimum Ignition Energy (MIE). <http://explosionsolutions.co.uk/110411020.pdf>

⁷⁷ Työterveyslaitos. OVA-ohje: Moottoribensiini. <http://www.ttl.fi/ova/moottben.html>

⁷⁸ ks. esim. Lautkaski, R. (2003) Klooridioksidin haihtuminen, leviäminen ja räjähtäminen. Projektiraportti PRO3/P34/03, VTT 4.8.2003.

Bensiinille voidaan käyttää seuraavia lukuarvoja:

- $A = 23,3 \text{ m}^2$
- $M_m = 0,114 \text{ kg/mol}$ (oktaani)
- $P_v = 50\,000 \text{ Pa}$
- $T = 293 \text{ K}$
- $D_m = 6,3E-7$ (oktaani)
- $u = 0,4 \text{ m/s}$ (ks. teksti)
- $P_a = 101325 \text{ Pa}$.

Sijoittamalla arvot saadaan

$k = 0,001$ ja $m' = 0,056 \text{ kg/s}$.

Halkaisijaltaan noin 5,4-metrinen lammikko haihduttaa bensiinihöyryä siis noin 56 g/s kun ilmavirtaus lammikon yllä on 0,4 m/s. Kun käytetään bensiinihöyryn suhteellisenä tiheytenä arvoa 3, tämä vastaa noin 15 bensiinihöyrylitraa sekunnissa. Lammikon jäähtyminen haihtumisen vuoksi ei ole merkittävää haihtumisen kannalta tässä arvioituilla lammikon syvyyksillä ja todennäköisellä betonin paksuudella.

Bensiinin syttymisrajat ovat 1,4–7,6 % (vol.), joten ilmavirtauksella 0,4 m/s syntyisi täydellisessä sekoituksessa syttymiskelpoista seosta 0,2-1 m³ sekunnissa.

Haihtuminen kestää noin 1000 sekuntia. Kun koko 70 litran tankillinen höyrystyy ilmaan, syntyy bensiinihöyryä yhteensä noin 14 m³. Täydellisellä sekoituksella tämä vastaa noin 180–1 000 m³ syttymiskelpoista seosta. Syttymiskelpoista seosta syntyy siis suuruusluokalleen yhtä paljon kuin metaania; vaikka bensiinihöyryä on vähemmän, bensiinin syttymärajat ovat alemmat.

Bensiinihöyry leviää ilmanvaihdon mukana tilan alaosaan. Bensiinihöyry poistuu niin ikään ilmanvaihdon mukana hitaasti pois tilasta. Vaikka bensiini höyrystyy hitaammin, ilmanvaihdon merkitys ei keskimäärin ole oleellisesti erilainen kuin metaanille. Täydellisen sekoituksen oletuksella syttymiskelpoisesta seoksesta poistuu vain murto-osa verrattuna sen syntymisnopeuteen. Paikalliset erot ovat luonnollisesti suuria. Lisäksi höyry painuu hulevesiviemäreihin ja muihin kuoppiin.

Bensiinin minimisyttymisenergia on 0,8 mJ⁷⁹, leimahduspiste (ts. lämpötila jossa neste muodostaa yläpuolelleen syttyvän kaasuseoksen eli muuttuu syttyväksi) -43 °C ja itsesyttymislämpötila lähteestä riippuen 250–340 °C.

Dieselpolttoaineen höyrynpaine on alle 1 kPa (0,01 bar) ts. pienempi kuin veden, joten dieselpolttoaineen ei arvioida haihtuvan merkittävästi lammikosta. Dieselpolttoaineen leimahduspiste on 60 °C, joten lammikon syttyminenkin on epätodennäköistä.

6.2.3 Polttoaineen syttyminen

Keskeiset syttymälähteet

Pysäköintihallissa syttymälähteitä voivat periaatteessa olla ihminen, ajoneuvot ja pysäköintihallin laitteet:

- Ihmisen kantamia syttymälähteitä ovat mm. tupakka, tupakansytytin, kännykkä (periaatteessa) ja jopa vaatteiden staattinen sähkö
- Ajoneuvojen syttymälähteitä ovat mm. kuumat pinnat (pakosarja, katalysaattori, valaisimet), kipinöivät laitteet (laturi, kytketyvät ei-suojatut sähkölaitteet) sekä pako-kaasujen nokihiukkaset
- Pysäköintihallissa syttymälähteitä voivat olla mm. valaisimet, huonot sähkökytkennät tai kipinöiden kytketyvät ei-suojatut sähkölaitteet (esim. termostaatit)

79 Explosionsolutions, Minimum Ignition Energy (MIE). <http://explosionsolutions.co.uk/110411020.pdf>

Jos oletetaan, että metaani leviää hallin kattoon ja bensiinihöyry pitkin lattioita, voidaan arvioida, että bensiinihöyry kohtaa syttymälähteen (>250 °C lämpöinen kohde) selvästi todennäköisemmin kuin metaani. Jos metaanikin leviää koko tilaan, syttymistodennäköisyys on metaanilla sikäli isompi, että se kohtaa sekä tilan ala- että yläosassa olevat syttymälähteet, mutta sikäli pienempi, että sen itsesyttymislämpötila on korkeampi (syttymälähteen on oltava >550 °C lämpöinen).

6.2.4 Humahduspallo/deflagraatio

Palavat hiilivedyt aiheuttavat lämpösäteilyä ja paineen nousun palon ympäristössä. Lämpösäteily voi olla voimakasta, mutta palotapahtuma kestää vain lyhyen aikaa. Yleensä seurausanalyysissä arvioidaan, että lämpösäteilyvaikutukset voivat olla merkittäviä vain pilven sisällä, jossa syntyy liekkikosketus.

Paineennousu johtuu siitä, että kun hiilivedyt palavat, stoikiometrisesti palavan kaasuseoksen tilavuus keskimäärin kahdeksankertaistuu lämmön ja palamistuotteiden synnyn vaikutuksesta. Vastaavasti kun palo tapahtuu täysin suljetussa tilassa, paine nousee hetkellisesti⁸⁰. Käytännössä painehiiput määräytyvät tilan aukkojen pinta-alan, tilassa olevan syttymiskelpoisen seoksen määrän sekä seoksen palamisnopeuden perusteella.

Humahduspalossa (flash fire) kaasuseos palaa humahtaen sellaisella nopeudella, että paineen nousu ehtii käytännössä tasoittua tilan aukkojen kautta, eikä merkittäviä ylipainevaikutuksia synny. Kun palamisnopeus kiihtyy, mutta liekkirintama etenee alle äänen nopeudella, syntyy **deflagraatio**. Liekkirintama etenee palamisreaktion ajamana ts. palamaton aine syttyy palon seurauksena. Kun palamaton aine syttyy palossa etenevän shokkiaallon puristuksen aiheuttamasta lämmön noususta, on kyseessä **detonaatio**.

Detonaatoräjähdyksen edellytyksinä ovat riittävän iso pilvi ja liekkirintaman palonopeuden kiihtyminen. Kiihtyminen edellyttää turbulenssia palotapahtumassa. Turbulenssia syntyy, jos kaasu palaa sokkeloisessa tilassa⁸¹. Yleisesti ajatellaan, että sokkeloisuuden aste on riittävä, jos tila on niin sokkeloinen, että ihmisen on vaikea liikkua siinä. Pysäköintihalleissa alueet, joihin kaasuja tai höyryjä voi kertyä, eivät tyypillisesti ole järin sokkeloisia. Voidaan melko turvallisesti olettaa, että sekä metaani että bensiinihöyryt palavat syttyessään humahduspalona tai deflagraationa.

Palokuorma pysäköintihallien katossa on tyypillisesti varsin pieni, joten jos oletetaan, että metaani nousee kattoon, se ei humahduspalossa todennäköisesti sytytä mitään, vaan ensisijaiset vaikutukset syntyvät paineen noususta. Bensiinihöyryt palavat autojen välissä. Vaikka autoissa on merkittävä palokuorma, voidaan olettaa, että lyhyt palo aika ei ehdi sytyttää mitään. Liekkikosketus aiheuttaa kuitenkin sekä metaanin että bensiinihöyryyn tapauksessa ihmiselle palovammoja.

Suorat paineaallon vaikutukset kohdistuvat ihmisessä paineherkkiin elimiin, erityisesti korviin, keuhkoihin, sydämeen ja ruoansulatuskanavan onttoihin osiin. Epäsuorat vaikutukset voivat syntyä paineaallon aiheuttamista vaurioista rakenteille ja aallon mukana lentävistä esineistä. Paineaalto voi myös kaataa ihmisen, jolloin voi syntyä vammoja kaatumisesta.

6.2.5 Painevaikutusten ennustaminen suljetussa tilassa

Tässä työssä ei ole tarkoituksenmukaista paneutua mallintamiseen kovin syvällisesti, sillä tarkoitus on vertailla skenaarioita⁸². Karkeasti ottaen deflagraatiossa, jossa ei kehity shokkiaaltoja (ts. virtausnopeudet pysyvät paikallisen äänen nopeuden alla), huippuylipaine syntyy kolmesta tekijästä, jotka ovat palokaasujen tilavuuden kasvusta vakio-tilavuudessa johtuva staattinen paineen nousu, palokaasujen kineettisestä energiasta syntyvä dynaaminen paine sekä paineaallon ja tilan vuorovaikutus esimerkiksi erilaisten heijastusaaltojen muodossa.

⁸⁰ Lautkaski, R. (1997). Understanding vented gas explosions. VTT tiedotteita 1812.

⁸¹ Metaanin purkautuminen isolla paineella aiheuttaa turbulentsia sekoitusta, joten periaatteessa voisi olla mahdollista, että sopivasti ajoitettu syttymä ulospuhalluksen aikana johtaisi detonaatioon. Sopivasti ajoitetun syttymän todennäköisyys on kuitenkin häviävän pieni.

⁸² Deflagraatiota sisätilassa, jossa on painetta keventäviä aukkoja, kutsutaan kevennetyksi räjähdykseksi (vented explosion). Prosessiturvallisuuskirjallisuudessa lähes kaikki kevennetyt räjähdyksen mallit olettavat, että sisätila on kokonaan täytynyt syttymiskelpoisella seoksella. Tämä ei kuitenkaan yleensä kuvaa kaasuvuototilannetta umpinaisessa pysäköintihallissa. Malleja osittaiselle (ei täysin seoksella täyttyneen tilan) kevennetylle räjähdykselle on tutkittu hyvin vähän. 2010-luvulla on yleistynyt CFD-mallintaminen metaanin leviämisen laskennassa. Metaanipaloista syntyviä huippuylipaineita on sen sijaan laskettu harvoin, sillä palamisen laskeminen on varsin raskas prosessi.

Voidaan arvioida, että

- Mitä pienempi tila on, sitä suurempi on staattinen paineen nousu samalla kaasumäärällä ja sitä suuremmat ovat vuorovaikutukset tilan ja paineaallon välillä
- Mitä suurempi on paineaallon nopeus ts. aineen palonopeus tai reaktiivisuus ja mitä isompi energia palossa vapautuu, sitä suurempi on siitä syntyvä dynaaminen paine
- Mitä suurempia räjähdysluukut tai vastaavat tarkoituksella kevennetyt rakenteet ovat, sitä pienempi on paineen nousu.

Deflagraation painevaikutuksia tutkitaan tarkemmin liitteessä 4.

6.2.6 Pistoliekki/Lammikkopalo

Metaani

Mikäli kaasuvuoto syttyy vuodon aikana, humahduspalo on pienempi, mutta ulos suihkuava kaasu syttyy pitkäksi liekiksi, jota kutsutaan pistoliekeksi tai suihkupaloksi. Jos oletetaan, että kaasu ei osu mihinkään purkautuessaan, liekin pituus vuotonopeudella 0,5 kg/s 100 bar paineesta olisi noin 10 metriä ja halkaisija kärjestä noin 3 metriä⁸³. Lämpösäteily leviää seuraavasti:

- 8 kW/ m² (voi sytyttää herkästi sytyvät rakenteet): noin 5 m liekin sivulla ja 4 m edessä
- 5 kW/ m² (poistumisteiden suunnittelu-arvo): noin 7 m liekin sivulla ja 5 m edessä
- 3 kW/ m² (kipua 30 sekunnissa): noin 9 m liekin sivulla ja 7 m liekin edessä

Liekin palo-aika riippuu vuotonopeudesta ja syttymishetkestä, ja se voi olla jopa minuutteja. Liekki lyhenee paineen laskiessa. Liekki sytyttää todennäköisesti kaiken palokuorman, johon se koskettaa sekä herkästi sytyvän palokuorman alueella, jossa lämpösäteilyn intensiteetti on yli 8 kW/ m² (n. 160 m² mikäli liekki palaisi vaakasuoraan; käytännössä liekki suuntautuu ylös tai alas).

Bensiini

Jos bensiinilammikko syttyy, syttyminen tapahtuu siitä haihtuvassa höyryssä, josta palo siirtyy lammikkoon. Lammikkopalon liekin koko ja siitä lähtevä lämpösäteily riippuvat lammikon pinta-alasta ja pystypalonopeudesta. Kun oletetaan, että palavan lammikon halkaisija on edellä käytetty 5,4 m, saadaan ym. säteilyn intensiteeteille seuraavat etäisyydet lammikon reunasta:

- 8 kW/m²: noin 3 m
- 5 kW/m²: noin 4 m
- 3 kW/m²: noin 7 m

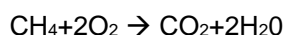
Lammikkopalon liekki sytyttää todennäköisesti kaiken palokuorman, johon se koskettaa. Herkästi sytyvä palokuorma syttyy alueella, jossa lämpösäteilyn intensiteetti on yli 8 kW/m² (n. 100 m²).

Palo-aika riippuu palonopeudesta, joka on näillä oletuksilla noin 2,5 kg/min. Palon kesto on samaa suuruusluokkaa kuin pistoliekin palo-aika.

6.2.7 Hapenkulutus ja savunmuodostus

Metaani

Palot kuluttavat happea umpinaisessa tilassa. Kun metaani palaa stoikiometrisessä suhteessa, paloreaktio on



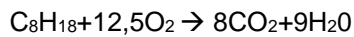
83 Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties, SZW & Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2005). Methods for the calculation of physical effects, Committee for the prevention of disasters, The Netherlands.

Täten yksi kilogramma metaania kuluttaa palaessaan tilasta 2 kilogrammaa happea ja tuottaa 1,75 kg hiilidioksidia ja 1,25 kg vettä, joten 19 kg metaanimäärä kuluttaa 38 kg happea. Lisäksi palamistuotteiden laajeneminen työntää ilmaa (ja happea) tilasta ulos.

Lyhytketjuisten hiilivetyjen palaessa riittävässä hapessa savunmuodostus primääripalossa on todennäköisesti mitätöntä. Savukaasut ovat luonnollisesti kuumia. Palokuorman syttymisestä ja palamisesta syntyy myrkyllisiä savukaasuja.

Bensiini

Kun bensiinin pääkomponentiksi oletetaan iso-oktaani C₈H₁₈, on paloreaktio



50 bensiinikilon palaminen kuluttaa siis happea 128 kg. Jos oletetaan, että palokaasut työntävät laajetessaan ilmaa ulos yhtä paljon kuin metaanipalossa, happipitoisuus on palon jälkeen matalampi kuin samankokoisessa metaanipalossa.

Pitkäketjuisten hiilivetyjen palaessa syntyy kuitenkin merkittäviä määriä nokea ja muita epäpuhtauksia. Lisäaineiden (mm. bentseeni, MTBE) palotuotteet ovat myrkyllisiä. Palon savunmuodostus on merkittävää. Palokuorman syttymisestä ja palamisesta syntyy lisää myrkyllisiä savukaasuja.

6.2.8 Evakuoitumismahdollisuudet

Metaani

Vuotoääni ja tetrahydrotiofeenin haju varoittavat vaarasta todennäköisesti hyvissä ajoin ennen syttymää. Maahan suuntautuva suihku nostaa ilmaan pölyä, mikä vaikeuttaa näkemistä ja hengittämistä. Metaani ei ole myrkyllistä ihmiselle, mutta se laimentaa ilmaa eli pienentää ilman happipitoisuutta. Ilman happipitoisuuden väheneminen ei vaaranna evakuoitumismahdollisuuksia, kun metaanin pitoisuudet ovat noin alle 35 %. Tässä pitoisuudessa tetrahydrotiofeenin haju on kuitenkin jo täysin sietämätön, mikä tekee hengittämisestä vaikeaa. Jos deflagraatio tapahtuu, se tapahtuu todennäköisesti katossa, jolloin liekkikosketusta ihmisiin ei synny. Deflagraation paineaalto saattaa estää evakuoitumisen lopullisesti, ja happipitoisuuden aleneminen vaikeuttaa evakuoitumista. Suihkupalo on lähietäisyydellä vaarallinen ihmisille.

Bensiini

Bensiinin haju varoittaa vaarasta. Bensiinihöyryjen hengittäminen voi aiheuttaa sekavuutta, uneliaisuutta, näöntarkkuuden heikkenemistä, keskushermoston lamaantumista ja isoina annoksia kouristuksia, tajunnan menetyksen ja kuoleman. Pidempiaikainen oleskelu vaarantaa evakuoitumiskyvyn. Mahdollinen aikaisempi syttymä autojen kuumista pinnoista lyhentää evakuoitumisaikaa. Deflagraatio lattian tasalla aiheuttaa vaikeita palovammoja pilveen jääneille, ja deflagraation paineaalto saattaa estää evakuoitumisen lopullisesti. Myös happipitoisuuden aleneminen vaikeuttaa evakuoitumista. Savukaasut huonontavat näkyvyyttä nopeasti. Lammikkopalo on lähietäisyydellä vaarallinen ihmisille.

Yhteenveto skenaariosta 1

- **Vuoto ja leviäminen:** Metaanin mekaaninen energia altistaa vuodoille eri tavalla kuin paineeton nestepolttoainesäiliö, mutta vastaavasti ECE R110:n mukaiset pakottavat turvatoimet ovat vaativat. Tämän vuoksi ei voida suoraan sanoa, että metaanivuodot olisivat todennäköisempiä. Metaanipilvi saattaa olla käytännössä hiukan isompi, mutta bensiinihöyrypilvi viipyy pidempään. Bensiini on myrkyllistä, metaani ei. Metaanisuihku saattaa nostaa ilmaan pölyä.
- **Syttyminen ja deflagraatio:** Bensiinihöyryt syttyvät todennäköisemmin alemman syttymislämpötilan ja pidemmän viipymääajan vuoksi sekä sen vuoksi, että sopivia syttymälähteitä on tilan ala-osassa enemmän kuin katonrajassa. Aikainen syttymä rajaa bensiinihöyrypilven kokoa ja deflagraation vaikutuksia (mutta pidentää lammikkopalon kestoa)
- **Suihku-/lammikkopalo:** Suihkupalo peittää hiukan suuremman alan kuin lammikko-

palo, mikäli se suuntautuu vaakasuoraan. Kaasuhenkilöautoissa suihkupalon liekki suuntautuu hyvin todennäköisesti alas ja kaasubusseissa se pyritään ohjaamaan ylös.

- **Evakuoitumismahdollisuudet:** Molemmat aineet laskevat palossa tilan happipitoisuutta. Bensiinin savukaasut ovat myrkyllisiä ja heikentävät näkyvyyttä.
- On huomattava, että tässä on vertailtu metaania ja bensiiniä. Dieselpolttoainevuotoon verrattuna erityisesti deflagraation mahdollisuudessa on merkittävä ero, koska dieselpolttoaine ei juurikaan haihdu. Tämä on erityisesti oleellista ajateltaessa busseja ja bussivarikkoja/-terminaaleja.

6.3 Skenaario 2

Tarkastellaan toisena skenaariona polttoainesäiliön osallistumista jo käynnissä olevaan paloon. Toisin kuin edellä, tässä esitetty vertailu koskee nestepolttoaineiden osalta sekä bensiiniä että dieselöljyä.

6.3.1 Lämpeneminen tulipalossa

Metaani

Ulkoisen palon vaikutuksesta metaanisäiliön paine ja lämpötila nousevat 260 bar / 110 °C asti, jolloin lämpösulake aukeaa ja kaasu virtaa ulos. Kaasu syttyy hyvin todennäköisesti ja palaa suihkupalona n. 2-3 minuuttia. Jos liekki saa palaa vapaasti eikä osu mihinkään, sen pituus on aluksi 10–15 metriä, josta se lyhenee paineen laskiessa. Mikäli lämpösulake ei jostain syystä toimisi, paineen nousu jatkuu, kunnes säiliö repeää. Repeämisestä syntyy paineaalto. Lisäksi sisältö syttyy ja palaa tulipallona/deflagraationa osallistuen meneillään olevaan paloon. Lämpösulakkeen toimimattomuuden todennäköisyys on pieni.

Bensiini ja dieselöljy

Ulkoisen palon vaikutuksesta polttoaine kuumenee säiliössä ja höyrystyy jatkuvasti voimakkaammin. Jossakin vaiheessa säiliön huohotuskapasiteetti ei enää riitä ja säiliön paine nousee. Säiliö ei kestä paineen nousua ja repeää käytännössä viimeistään polttonesteen kiehumispisteessä. Tällöin polttoaine syttyy ja palaa hyvin nopeasti tulipallona ja/tai lammikkopalona. Säiliö ei repeä räjähdysmäisesti.

6.3.2 Merkitys palon kannalta

Metaani

Polttoaineen energia vapautuu vuotoaikana ts. 2-3 minuutin kuluessa. Suihkupalo levittää todennäköisesti tulipaloa, mutta leviäminen riippuu palon suunnasta. Mikäli lämpösulake ei toimi, säiliön repeämisestä syntyvä paineaalto rikkoo todennäköisesti rakenteita hallissa. Sisällön palaminen levittää paloa ja aiheuttaa toisen paineaallon tilaan (vrt. deflagraatio). Varsinainen palo on aiheuttanut jo todennäköisesti myrkyllisiä savukaasuja ja happipitoisuus tilassa on alentunut. Paloa rajoittaa todennäköisesti hapen saanti.

Bensiini ja dieselöljy

Polttoaineen energia vapautuu nopeasti. Tulipallo/lammikkopalo levittää todennäköisesti tulipaloa voimakkaasti. Paloa rajoittaa todennäköisesti hapen saanti.

6.3.3 Evakuoitumismahdollisuudet

Kun tilassa on jo käynnissä tulipalo, tilanne on evakuoitumisen kannalta jo hyvin hankala. Näkyvyys on olematon, savukaasut estävät hengittämisen ja tilassa on kuuma. Sillä, mikä polttoaine osallistuu paloon, ei ole käytännössä merkitystä evakuointimahdollisuuksien kehittymisen kannalta.

6.3.4 Lämpösulakkeen toimivuudesta

Saksassa tiedetään ainakin yhden bussin säiliön revenneen palossa sulakkeen toimimattomuuden takia vuonna 2003. Syynä oli se, että säiliöiden suojakuori esti lämpösulakkeen

lämpötilan nousun samanaikaisesti, kun kaasusäiliöön kohdistui merkittävä paikallinen lämpökuorma. Ranskassa bussin säiliö repesi palossa 2005. Mahdollisia syitä olivat vanhan rajoituksen mukainen lämpösulake, joka rajoitti ulosvirtauksen ECE R110:n vastaisesti liian pieneksi tai säiliön manuaalinen eristys muista (varasäiliöksi) sekä paikallinen säiliöön kohdistunut merkittävä lämpökuorma.⁸⁴

Edellä kuvatuissa onnettomuustilastoissa mm. Yhdysvalloissa havainnoiduissa metaanikäytösten ajoneuvojen onnettomuuksissa lämpösulake ei ole toiminut. Myös Suomessa ja Ruotsissa on 2000-luvulla raportoitu lämpösulakkeista, joiden purkuputkiin on kertynyt sadevettä, joka on jäänyt ja rikkonut sulakkeen aiheuttaen vuotoja.

Nämä onnettomuudet ovat olleet tyypillisesti suunnitteluvirheitä tai lastentauteja. Nyttemmin mm. iskurytymisestä jousitoimisista lämpömurtolevyistä on siirrytty kaasunpaineitoimisiin lämpösulakkeisiin, jotka ovat toimintavarmempia. Voitaneen melko turvallisesti olettaa, että tätä nykyä lämpösulakkeen väärän toiminnan todennäköisyys on varsin pieni.

Yhteenveto skenaariosta 2

- **Lämpeneminen palossa:** ei oleellista eroa, jos kaasusäiliön lämpösulake toimii
- **Osallistuminen paloon:** lämpösulake jakaa kaasupalon usealle minuutille, mutta mikäli kaasun suihkupalo suuntautuu vaakasuoraan, se saattaa levittää paloa kauemmas ja nopeammin kuin miten palo muuten etenisi. Nestepolttoaine palaa toisaalta hyvin nopeasti lämmitettyään ennen syttymistään jo kiehumispisteeseensä. Mahdolliset erot ovat tapauskohtaisia.

6.4 Yhteenveto

Sekä kaasu- että bensiinivuoto ovat maanalaisissa tiloissa vaarallisia tilanteita. Skenaarion 1 keskeinen huomio on bensiinin tehokas haihtuminen vuototilanteessa, mikä johtaa samankaltaisiin ja joiltakin osin jopa pahempiin palovaikutuksiin kuin kaasuvuodossa. Vuototilanteiden vertailussa näyttäisi siltä, että kaasuvuodon syttymistodennäköisyys saattaa olla pienempi kuin bensiinivuodon, mutta jos kaasu syttyy, sen painevaikutukset ovat isommat. Tämä johtuu lähinnä siitä, että bensiinihöyry saattaa syttyä jo leviämisen alkuvaiheessa kuumasta pinnasta esimerkiksi jossakin toisessa autossa. Toisaalta kaasun suihkupalaa ei synny, mutta bensiinin lammikkopalo on vastaavasti pidempi. Bensiinihöyryn aikaisempi syttyminen saattaa lyhentää evakuointiaikaa. Joka tapauksessa sekä bensiini- että kaasupalossa olosuhteet syttymän jälkeen ovat suljetussa tilassa hyvin vaikeat.

Skenaarion 2 mukaisesta tulipaloon osallistumisesta ei pystytä vetämään selviä johtopäätöksiä suuntaan tai toiseen. Sekä kaasumaiset että nestemäiset polttoaineet sisältävät merkittäviä energiamääriä, jotka lisäävät tulipalon palotehoa merkittävästi, vaikkakin hetkellisesti. On mahdollista, että vaakasuoraan palava lämpösulakkeen tai muun kaasuvuodon aikaansaama suihkupalo levittää paloa nopeammin tai kauemmas kuin nestepolttoaine, mutta varmoja johtopäätöksiä ei voida tehdä. Mikäli kaasusäiliön lämpösulake ei toimi, aiheuttaa kaasusäiliö palossa repeämisvaaran, jonka vaikutukset olisivat merkittävät. Lämpösulakkeen toimimattomuutta on pidettävä kuitenkin varsin epätodennäköisenä.

Keskeiset asiat vuotoskenaarioiden vertailusta

- Sekä kaasu- että bensiinivuoto ovat maanalaisissa tiloissa vaarallisia tilanteita
- Sekä kaasumaiset että nestemäiset polttoaineet sisältävät merkittäviä energiamääriä, jotka lisäävät tulipalon palotehoa merkittävästi, joskin hetkellisesti

⁸⁴ Perrette, L. & Wiedemann, H.K. (2007). CNG buses fire safety: learnings from recent accidents in France and Germany. Society of automotive engineer world Congress 2007, April 2007, Detroit, United States. SAE International.

7 YHTEENVETO JA KEHITTÄMISEHDOTUKSET

7.1 Yhteenveto

Tässä raportissa on tarkasteltu kaasukäyttöisten ajoneuvojen riskejä maanalaisissa tai muuten suljetuissa tiloissa.

Kysymyksen laajuutta on hahmotettu kartoittamalla kaasukäyttöisten ajoneuvojen lukumäärää ja sen oletettua kehitystä, asetettuja tavoitteita sekä kieltojen nykytilannetta. Erityisesti on tarkasteltu Helsingin Kampin terminaalien monipolvista suunnittelu- ja rakentamisprosessia, jonka seurauksena kaasubussien käyttö terminaalissa on kielletty. Ajoneuvo- ja kieltoilanne on myös selvitetty kahdessa vertailumaassa – Ruotsissa ja Saksassa.

Kaasukäyttöisten ajoneuvojen yleistä onnettomuusalttiutta on verrattu kirjallisuusselvityksen pohjalta nestepolttoainekäyttöisten ajoneuvojen onnettomuusalttiuteen. Kaasu- ja nestepolttoaineille on suoritettu vertaileva puolikvantitatiivinen riskianalyysi, jossa on verrattu metaani- ja bensiinisäiliön vuodon vaikutuksia sisätiloissa sekä tilanteessa, jossa säiliö osallistuu muualla syttyneeseen tulipaloon. Samassa yhteydessä on virtauslaskennan keinoin demonstroitu kaasun leviämistä vuototilanteessa sekä syttymän painevaikutuksia.

Kaasukäyttöisten ajoneuvojen lukumäärä Suomessa on pieni, vain prosentin osia kaikista ajoneuvoista. Mikäli valtion tavoitteet (50 000 ajoneuvoa vuonna 2030) täyttyisivät, kaasukäyttöisiä ajoneuvoja olisi noin 1 % kaikista ajoneuvoista. Kaasukäyttöisiä busseja tullaan todennäköisesti hankkimaan lähinnä kunnallisten biokaasuratkaisujen yhteydessä – markkinavetoisesti kaasubussit eivät juuri ole yleistyneet. Täten voidaan todeta, että kysymys kaasukäyttöisten ajoneuvojen mahdollisesti erilaisista riskeistä muihin ajoneuvoihin verrattuna maanalaisissa tiloissa on yleisesti ottaen melko marginaalinen.

Suomesta ei juurikaan löydy kaasukäyttöisten ajoneuvojen käyttökieltoja maanalaisissa tiloissa. Vain Helsingin Kampin terminaalissa on kaasukäyttöisten ajoneuvojen käyttökielto. Kieltoon johtanut prosessi on monipolvinen, eikä siitä voida suoraan päätellä, että kielto tulisi yleistää koskemaan kaikkia muitakin bussiterminaaleja.

Vertailumaissa kaasukäyttöisiä ajoneuvoja on prosentuaalisesti ja absoluuttisesti huomattavasti enemmän. Mitään yleisiä kieltoja kaasujoneuvojen käytölle suljetuissa tiloissa ei ole. Ruotsissa lähtökohta on, että liikenteeseen tyyppihyväksytyllä ajoneuvolla tulee voida ajaa kaikkialle, ja Saksassa, missä nestekaasua on käytetty liikenteessä pitkään, kysymystä ei ilmeisesti ole viime aikoina edes pohdittu, vaan turvallisuutta on pidetty itsestään selvänä.

Työssä referoidut tilastot osoittavat, että polttoaineen merkitys onnettomuustihedelle tai seurauksille ei ole merkittävä. Kaasukäyttöisille ajoneuvoille sattuu onnettomuuksia yhtä paljon kuin nestepolttoainekäyttöisille, eivätkä ne poikkea seurauksiltaan toisistaan.

Sisätiloissa relevantit onnettomuusskenaariot ovat suuri kaasuvuoto kaasulaitteiston korkeapainepuolelta sekä säiliön repeäminen. Säiliön repeämismekanismit liittyvät käytännössä säiliön heikentymiseen korroosion seurauksena, jolloin säiliö repeää tankkausvaiheessa paineen noustessa nopeasti. Voidaan arvioida, että säiliön spontaani repeäminen pysäköintihallissa tai vastaavassa tilassa, jossa ei järjestetä tankkausta, on hyvin epätodennäköistä.

Suoritettu vertaileva riskinarviointi osoittaa, että polttoainevuototilanteessa kaasujoneuvojen vaarat eivät oleellisesti poikkea bensiinikäyttöisten ajoneuvojen vaaroista. Riskiprofiilit ovat joiltakin osin erilaiset, mutta oleellisia eroja ei tämän tason analyysissä ole tunnistettu. Keskeisin ero on, että vuototilanteessa kaasupilvi syttyy epätodennäköisemmin kuin bensiinihöyry, mutta mikäli syttymä tapahtuu, paineen nousu saattaa olla korkeampi kuin bensiinipalossa. Dieselikäyttöisiin ajoneuvoihin verrattuna erot ovat samansuuntaiset kuin verrattaessa bensiini- ja dieselikäyttöisiä ajoneuvoja keskenään. Säiliöiden osallistumisessa jo käynnissä olevaan tulipaloon ei ole erityisiä eroja nestepolttoainekäyttöiseen autoon edellyttäen, että metaanisäiliön lämpösulake toimii. Lämpösulakkeen toimimattomuus on mm. sitovan normituksen vuoksi varsin epätodennäköistä.

Valtaosa Suomen henkilöautokannasta on bensiinikäyttöistä. Raportin valossa voidaan todeta, että kaasujoneuvojen riskilisiä bensiinikäyttöisiin ajoneuvoihin verrattuna maanalaisissa tiloissa on korkeintaan pieni.

Koska bussit ovat pääsääntöisesti dieselikäyttöisiä, kaasupolttoaineet aiheuttavat maanalaiseen/suljettuun terminaaliiin jonkinasteisen riskilisen. Raportissa kuvatussa Kampin tapauk-

sesta ei kuitenkaan suoraan voida vetää johtopäätöstä, että totaalikielto olisi tarpeen, vaan tarvitaan tapauskohtaista pohdintaa. Hyvän esimerkin tapauskohtaiselle varautumiselle antaa raportissa kuvattu Tukholman Fredriksdalin kaasubussivarikko.

Edellisen pohjalta voidaan todeta, että kaasukäyttöiset ajoneuvot eivät näyttäisi aiheuttavan sellaista riskilisää, jota olisi perusteltua hallita laajamittaisilla lainsäädännön tai esimerkiksi rakentamismääräysten muutoksilla. Ainoa selkeä selvityksessä tunnistettu tarve määräsmuutoksille on säiliöiden repeämistapausten yhteydessä esiin tullut tarve kaasusäiliöiden määräaikaistarkastuksille. Trafi on alkanut valmistella hanketta, jossa selvitetäisiin katsastusdirektiivin ja E-säännön ristiriitaisuuden ratkaisemista säiliöiden määräaikaistarkastusten suhteen.

Joitakin yleisiä, maanalaisiin tiloihin tai suljettuihin autosuojoihin liittyviä huomioita rakentamismääräyskokoelmaan liittyen nousi hankkeen aikana esiin. Ensinnä kokoelman autosuojia koskevat ilmanvaihtomääräysten lähtökohdat ovat normaalitoiminnan henkilöturvallisuudessa eli pysäköintisuojaan ilmanlaadussa. Voisi olla perusteltua pohtia sitä, pitäisikö määräksi laajentaa niin, että polttoaineen vuototilanteissa suljetuissa pysäköintihalleissa ilmanvaihdon avulla kyettäisiin nopeuttamaan haihtuvien höyryjen poistoa tilasta. Tällöin olisi tosin huolehdittava myös siitä, että kaasupalomahdollisuus ei siirry ilmanvaihtokanaviin. Toiseksi, suljetussa pysäköintihallissa tapahtuva paineen nousu kaasu- tai bensiinihöyrypalon seurauksena on merkittävä ja kohdistuu myös tilan ilmanvaihtokanaviin. Rakentamismääräyksissä ei kuitenkaan edellytetä erityisesti varautumista ilmanvaihtokanavien paineenkeston. Näin ollen on mahdollista, että paineen nousu rikkoo ilmanvaihtokanavia ja niiden paloeristyksen. Mainitut huomiot eivät riipu käytettävästä polttoaineesta.

Yhteenveto
<ul style="list-style-type: none">• Kaasukäyttöisten henkilöajoneuvojen riskilisa maanalaisissa/suljetuissa tiloissa on bensiinikäyttöisiin ajoneuvoihin verrattuna korkeintaan pieni.• Kaasukäyttöiset bussit edustavat jonkinasteista riskilisää dieselkäyttöisiin busseihin verrattuna, mikä on syytä ottaa huomioon maanalaisten bussiterminaalien ja vastaavien tilojen suunnittelussa

7.2 Kehittämis- ja toimintatapaehdotuksia

Seuraavassa on esitetty eräitä konkreettisia kehittämissuhteita. Mikäli suljettujen tilojen riskejä halutaan ylipäättään pienentää, olisi huomioitava sekä bensiini että kaasupolttoaineet. Nykyistä riskitasoa lienee kuitenkin pidettävä yhteiskunnallisesti hyväksyttävänä. Kehittämissuhteiden lähtökohdaksi on näin ollen vain osittain kaasukäyttöisten ajoneuvojen turvallisen käytön lisääminen.

- Seurataan R110-säännön kehittymistä sekä sen riittävyyttä estää ja rajoittaa vika- ja onnettomuustilanteita.
- Pienissä ja huonosti tuulettuvissa autosuojissa voi olla perusteltua tarkastella bensiinihöyry- tai metaanipalon painevaikutuksia onnettomuustilanteessa.
- Linja-autoterminaaleissa on syytä huomioida kaasujoneuvokäyttö jo aikaisessa suunnitteluvaiheessa. Riskilisa dieselkäyttöisiin ajoneuvoihin verrattuna on jonkinasteinen, ja terminaaleissa voi olla paljon ihmisiä.
- Arvioidaan tarvetta selvittää tarkemmin, tulisiko autosuojien onnettomuuksien paineen nousuvaikutukset palotilanteissa ylipäättään huomioida nykyistä tarkemmin ilmanvaihtokanavien sijoittelussa ja erityisesti kanavien vetämisessä muiden palo-osastojen läpi.
- Polttoainevuotoja ei liene otettu huomioon ilmanvaihtoa koskevissa rakennusmääräyksissä huomioon. Arvioidaan tarvetta selvittää tarkemmin, olisiko hyödyllistä varautua ilmanvaihdon keinoin erilaisten polttoainevuotojen tuulettamiseen suljetuista tiloista.
- Tarvittaessa jo olemassa olevista ohjeista ja määräyksistä sekä täydentävistä tiedoista on mahdollista muodostaa paketti, joka helpottaa suljettujen ja metaanikäyt-

töisten ajoneuvojen käytössä olevien tilojen suunnittelua. Selkeitä perusteita erityisesti kaasuajoneuvojen huomioimiseksi ei kuitenkaan ole.

- Kaasukäyttöisten autojen tankkaus- tai huoltotoimintaa ei tule järjestää sisätiloissa.
- Pelastustoimen näkökulmasta kaasubussien sammuttamista ja palavan kaasubussin lähestymistä ajatellen olisi todennäköisesti oleellista tietää, mihin suuntaan suuri ja lyhytkestoinen suihkupalo suuntautuu (ts. tietää kaasun purkautumisen suunta). Itse suihkupaloa ei voida sammuttaa, koska se johtaisi syttymättömän kaasun leviämiseen ja jälkisyttymään.
- Henkilöautoilla sekä kaasusäiliöt että purkausventtiilien polttoaineen purkunopeudet ovat pienemmät, minkä lisäksi purkaus suuntautunee enemmän alas kuin sivulle tai ylös. Näin ollen tulipalon leviämisen riski nestepolttoainepaloihin verrattuna on henkilöauton tapauksessa ilmeisesti vähemmän merkittävä.

LÄHTEITÄ JA TAUSTA-AINEISTOJA

ADAC. Aktuelle Informationen der ADAC Fahrzeugtechnik. Folgen der geborstenen Erdgastanks bei VW-Modellen, https://www.adac.de/infotestrat/tanken-kraftstoffe-und-antrieb/alternative-kraftstoffe/erdgas/erdgas_unfall.aspx

ADAC. Autogas https://www.adac.de/infotestrat/tanken-kraftstoffe-und-antrieb/alternative-kraftstoffe/autogas/autogas_technik_angebot_umwelt_wirtschaftlichkeit.aspx

Adams, R., Horne, D.B. (2010). Compressed Natural Gas (CNG) Transit Bus Experience Survey April 2009 – April 2010. Subcontract Report NREL/SR-7A2-48814, 9/2010
<https://www.nrel.gov/docs/fy10osti/48814.pdf>

ALIISA-autokantamalli, menetelmäkuvaus, tuloksia. <http://www.lipasto.vtt.fi/aliisa/index.htm>;
http://www.lipasto.vtt.fi/aliisa/aliisa_menetelma.pdf; http://www.lipasto.vtt.fi/aliisa/aliisa_tulokset.htm

Assael, M. J., & Kakosimos, K. E. (2010). Fires, explosions, and toxic gas dispersions: effects calculation and risk analysis. Boca Raton: CRC Press.

Berghmans, J. & Vanierschot, M. (2014). Safety Aspects of CNG Cars. Procedia Engineering Vol. 84, 2014, pp. 33-46. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.407>

Blaylock, M., Bozinoski, R., & Ekoto, I. (2016). Analysis of a Full Scale Blowdown Due to a Mechanical Failure of a Pressure Relief Device in a Natural Gas Vehicle Maintenance Facility. Sandia Report SAND2016-4534. Albuquerque, New Mexico 87185 and Livermore, California 94550: Sandia National Laboratories. <http://energy.sandia.gov/download/37486/>

Bordelanne, O. (2010). Comparative study of the inherent risks of CNG and Diesel Buses/Heavy Duty Vehicles (HDVs) & Garbage Trucks (GTs) in Tunnels. GDFSUEZ. 8.6.2010, (PowerPoint presentation to NGVA Europe conference, Rome) Selvitys ei ole julkisesti saatavilla.

Bordelanne, O. (2012). Comparative study of the inherent risks of CNG and Diesel Buses/Heavy Duty Vehicles (HDVs) & Garbage Trucks (GTs) in tunnels. 25th World Gas Conference.
http://members.igu.org/old/IGU%20Events/wgc/wgc-2012/wgc-2012-proceedings/speaker-presentations/committee-session/wednesday/cs5-3-woc5-n-gas-vehicles/comparative-study-of-the-inherent-risks-of-cng-and-diesel-buses-heavy-duty-vehicles-hdvs-garbage-trucks-gts-in-tunnels/@_@download/download

Bremer Offensive, Erdgas als Kraftstoff - Maakaasu polttoaineena. <http://www.bremer-erdgasfahrzeug.info/index.php?obj=page&id=194&unid=59eaa957f8e01e1fcc904f7c62969765>

Center for Fire Safety Studies (1994). Dispersion of CNG Fuel Releases in Naturally Ventilated Tunnels. Worcester Polytechnic Institute, Massachusetts. 11/1994.

Chamberlain, S. & Modarres, M. (2005). Compressed Natural Gas Bus Safety: A Quantitative Risk Assessment. Risk Analysis, Vol. 25 Issue 2 2005, pp.377-87.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15876211/>

Deutscher Verband Flüssiggas (Saksan nestekaasuyhdistys) <https://www.dvfg.de/>

Economic Commission for Europe, Inland Transport Committee (2015). Additional information for ECE/TRANS/WP.15/2015/6e – Use of Liquefied Petroleum Gas (LPG) and Compressed Natural Gas (CNG) as fuel for vehicles carrying dangerous goods: Focus on CNG safety.
<https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2015/dgwp15/ECE-TRANS-WP15-98-GE-inf4e.doc>

Ekoto, I., Blaylock, M., LaFleur C., LaChance J., & Horne, D. (2014). Analyses in Support of Risk-Informed Natural Gas Vehicle Maintenance Facility Codes and Standards: Phase I. Sandia Report SAND2014-2342. <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2014/142342.pdf>

Energigas Sverige (2017). Statistik om fordonsgas. Päivitetty 24.3.2017.
<http://www.energigas.se/fakta-om-gas/fordonsgas-och-gasbilar/statistik-om-fordonsgas/>

- Energigas Sverige (2017). Säkerhetsarbete med fordonsgasdrivna bilar. Lehdistöiedote 24.8.2017. http://www.bilsweden.se/i-debatten/bilsweden_tycker/sakerhetsarbete-med-fordonsgasdrivna-bilar
- Eronen, P. (2007). Maakaasukäyttöisten ajoneuvojen käyttö suljetuissa tai maanalaisissa tiloissa. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu.
- Explosionsolutions, Mimimum Ignition Energy (MIE). <http://explosionsolutions.co.uk/110411020.pdf>
- Gaumer, R. L. & Raj, P. K. (1996). Dispersion of CNG following a high pressure release. Final report. Washington, DC: U.S. Department of Transportation, Federal Transit Administration. (FTA-MA267021962.) <https://trid.trb.org/view/460339>
- Hernandez, M., Ma, L., Huaung, C., Rossetto, M., Martin, J., & Poisson, D. (2013). Safety Investigation of CNG leaks in enclosed parking structures: computational fluid dynamics modelling and analysis. National Research Council Canada, IFCI Report; no. IFCI-OTHER-CTR-003. <http://doi.org/10.4224/21268984>
- Horne, D. (2012). CNG Cylinder safety Issues & Opportunities, NGVTF Meeting, October 12, 2012. http://www1.eere.energy.gov/cleancities/pdfs/ngvtf10_cyl_safety.pdf
- Huttunen, R. (2017). Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030, Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja, Energia 4/2017: http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/79189/TEMjul_4_2017_verkkojulkaisu.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Ibarreta, A., Myers, T., Bucher, J. & Marr, K. (2012). Explosion severity: propane versus natural gas. ISFI 2012. https://www.dropbox.com/s/ot29n5bqkm81wag/ISFI2012Proceedings_ExplosionSeverity_PropanevsNaturalGas.pdf?dl=0
- International Organization for Standardization (2013). ISO 11439:2013 Gas Cylinders - High pressure cylinders for the on-board storage of natural gas as a fuel for automotive vehicles. <https://www.iso.org/standard/44755.html>
- Laaksonen, J.-P. (2013) Vaihtoehtotarkasteluja kaasubussien käyttömahdollisuuden palauttamiseksi Kampin keskuksessa 2013. L2 Paloturvallisuus Oy, 12.3.2013.
- Lautkaski, R. (1997). Understanding vented gas explosions. VTT tiedotteita 1812 <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/1997/T1812.pdf>
- Lautkaski, R. (2003). Klooridioksidin haihtuminen, leviäminen ja räjähtäminen. Projektiraportti PRO3/P34/03, VTT 4.8.2003. <http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2003/CLO2.pdf>
- Lautkaski, R. (2005). Maakaasubussien käyttö Kampin terminaalissa 1. Vaaratilanteiden tunnistaminen ja kuvaus. VTT. Tutkimusselostus PRO1/1029/05. Luottamuksellinen.
- Lautkaski, R. (2013). Kampin terminaalin muuttaminen kaasubusseille. VTT. Raportin numero VTT-CR-02061-13. Luottamuksellinen.
- Liikennevirasto (2017). Tietunnelin rakennetekniset ohjeet. Liikenneviraston ohjeita 34/2017. Helsinki 29.6.2017. https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lo_2017-34_tietunnelin_rakennetekniset_web.pdf
- Liikenteen turvallisuusvirasto Trafi (2017). Ajoneuvokannan käyttövoimatilastot 2012-2016. Päivitetty 26.1.2017. https://www.trafi.fi/tietopalvelut/tilastot/tieliikenne/ajoneuvokanta/ajoneuvokannan_kayttovoimatilastot
- Meriläinen, T. (2013). Kampin keskus, Espoon terminaalii, Maakaasubussien käyttömahdollisuus ja siihen liittyviä rakenteellisia riskitekijöitä. Lausunto, Aaro Korhonen Oy, 8.4.2013.
- Metsälä, J. (2017). Raskaat pyörät pyörivät biokaasulla -esitys. Gasum, 25.10.2017.
- Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties, SZW & Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2005). Methods for the calculation of physical effects, Committee for the prevention of disasters, The Netherlands. <http://content.publicatiereeksgevaarlijkstoffennl/documents/PGS2/PGS2-1997-v0.1-physical-effects.pdf>

Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (2016). Begränsningar för arbete med gasdrivna fordon, eller fordon med tankar för brandfarlig gas enligt ADR, inomhus. 26.2.2016.

Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (2017). Tryckkärlexplosion i biogasdriven sopbil. Olycksutredning. <https://www.msb.se/sv/Produkter--tjanster/Publikationer/Publikationer-fran-MSB/Tryckkarlexplosion-i-biogasdriven-sopbil--olycksutredning/>

Nylund, N.O. (2005). Maakaasuautojen turvallisuusnäkökohtia, Kampin terminaalin kaasuautokieltoon liittyen. TEC TransEnergy Consulting Oy.

Perrette, L. & Wiedemann, H.K. (2007). CNG buses fire safety: learnings from recent accidents in France and Germany. Society of automotive engineer world Congress 2007, April 2007, Detroit, United States. SAE International. <https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-00976180>

Ramboll, Fredriksdalsdepån. <http://www.ramboll.se/Projekt/rse/fredriksdalsdepan>

Riaz, A. (2012). Investigation of CNG Vehicle Accidents in Pakistan Reveal Actual Causes. NGV Global News, 19.01.2012. <http://www.ngvglobal.com/investigation-of-cng-vehicle-accidents-in-pakistan-reveal-actual-causes>

Rontu, K. (2013). Lausunto Tennispalatsin aukion asemakaavatilanteesta. Helsingin kaupunki, rakennusvalvontavirasto.

Seisler, J.M. (2014). CNG: A safe fuel for ADR trucks, presented to WP15 -Transport of Dangerous Goods 4.11.2014 United Nations, Geneva https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2014/dqwp15/ECE-TRANS-WP15-97-inf23_NGV_GLOBALe.pdf

Shaaban, S H., Zuzovsky, M., & Anigstein, R. (1989). Safety Analysis of Natural Gas Vehicles Transiting Highway Tunnels. Ebasco Services Incorporated, New York. <https://trid.trb.org/view/355795>

Skanska, Fredriksdals bussdepå, Stockholm. <https://www.skanska.se/vart-erbjudande/vara-projekt/57873/Fredriksdals-bussdepa,-Stockholm/>

Skanska, SL, Stockholms Stad & Tyréns (2010). Miljökonsekvensbeskrivning. Utställning 03/2010. <https://insynsverige.se/documentHandler.ashx?did=35650>.

Slovic, P. (1987). Perception of Risk. Science, New Series, Vol. 236, No. 4799, 1987, pp.208-285. http://www.jstor.org/stable/1698637?origin=JSTOR-pdf&seq=1#page_scan_tab_contents

Serti, S. (2008). Riskanalys Fredriksdal avseende tredje man, Grovanalys. Sweco 18.1.2008. http://insynsbk.stockholm.se/templates/main/pages/xGetDocument.aspx?FileId=264881&FileName=264881_1_1.PDF&DataSource=2&JournalNumber=2007-36164

Serti, S. (2010). Riskanalys – bussdepåns inverkan på närboende och anställda vid kv Fredriksdal, Grovanalys. Sweco 21.1.2010. http://insynsbk.stockholm.se/templates/main/pages/xGetDocument.aspx?FileId=1557678&FileName=1557678_2_3.PDF&DataSource=2&JournalNumber=2007-36164

Technology Committee Bulletin (1999, revised 2010). How safe are natural gas vehicles. <http://www.westport.com/is/natural-gas/how-safe-are-natural-gas-vehicles.pdf>

Työterveyslaitos. OVA-ohje: [Moottoribensiini](http://www.ttl.fi/ova/moottben.html). <http://www.ttl.fi/ova/moottben.html>

Vaasan kaupunki (2017). Vaasa tekee historiaa: 12 tuliterää biokaasubussia liikenteeseen. Tiedote 8.2.2017. <https://www.vaasa.fi/tiedote/vaasa-tekee-historiaa-12-tuliteraa-biokaasubussia-liikenteeseen;>

Vaija, M. (2014). Polttoaineen varastointi vetyautoissa. Opinnäytetyö MAMK, Auto- ja kuljetustekniikka, Huhtikuu 2014. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/75645/Vaija_Mia.pdf?sequence=1

VTT (2008). Korkeapaineisen vesisumujärjestelmän toimivuus maakaasun syttymisen ehkäisemisessä

Wong, J. (2009). CNG & Hydrogen Tank Safety, R&D, and Testing. Powertech Labs Inc. https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/cng_h2_workshop_8_wong.pdf

Ympäristöministeriö. http://www.ymp.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Paloturvallisuus

Ympäristöministeriö. http://www.ymp.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Rakenteiden_lujuus_ja_vakaus

Ympäristöministeriö. http://www.ymp.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Terveellisyys

Zamanian, A., Ghafghazi, M., & Sabeti, M. (2009). CNG cars safety in accidents (case study: Iran), Paper number 09-0275. <https://trid.trb.org/view/1099735>

Zukunft Erdgas (Saksalainen yhdistys Maakaasun tulevaisuus). Näin turvallisia maakaasuautot ovat. <https://www.erdgas.info/erdgas-mobil/vergleich-cng-und-lpg/so-sicher-sind-erdgas-fahrzeuge/>

Zukunft Erdgas (Saksalainen yhdistys Maakaasun tulevaisuus). Vertailu CNG vs. LPG. <https://www.erdgas.info/erdgas-mobil/vergleich-cng-und-lpg/>

Saksankielisiä uutisia ja keskusteluja, mm. <https://www.welt.de/motor/article158271124/Sind-Erdgasautos-rollende-Zeitbomben.html>, <http://www.erdgasfahrer-forum.de/viewtopic.php?t=13658> ja <http://www.erdgasfahrer-forum.de/viewtopic.php?t=14568/>

LIITE 1: HAASTATELLUT TAHOT JA HENKILÖT SEKÄ TYÖPAJAN OSALLISTUJAT

Pelastuslaitosten haastattelut:

Pelastuslaitos	Henkilö ja titteli
Helsingin kaupungin pelastuslaitos	Esko Rantanen (johtava palotarkastaja)
Itä-Uudenmaan pelastuslaitos	Tomi Pursiainen (riskienhallintapäällikkö)
Keski-Suomen pelastuslaitos	Jarkko Jäntti (riskienhallintapäällikkö)
Keski-Uudenmaan pelastuslaitos	Kati Tillander (riskienhallintapäällikkö vs.)
Oulu-Koillismaan pelastuslaitos	Tomi Honkakunnas (riskienhallintapäällikkö)
Pirkanmaan pelastuslaitos	Pekka Mutikainen (johtava palotarkastaja)
Pohjanmaan pelastuslaitos	Thomas Nyqvist (riskienhallintapäällikkö)
Pohjois-Savon pelastuslaitos	Ilkka Itkonen (johtava palotarkastaja)
Päijät-Hämeen pelastuslaitos	Marjo Oksanen (riskienhallintapäällikkö)
Varsinais-Suomen pelastuslaitos	Petri Tassila (riskienhallintapäällikkö)
	Anssi Ylhä (kemikaali-insinööri)

Muut haastattelut:

Toimija/yritys	Henkilö ja titteli
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)	Georg W. Mair (Fachbereich Gefahrgut tanks und Unfallmechanik)
Europark	Reijo Mesiniemi
Finpark	Tami Koivuniemi
Gasum	Aki Huomo (ympäristö- ja turvallisuuspäällikkö)
Helkama-auto (Skoda)	
Helsingin kaupungin rakennusvalvonta	Kirsi Rontu (tarkastusinsinööri)
Helsingin kaupungin ympäristökeskus, nykyisin HSY	Outi Väkevä (ympäristötarkastaja)
HKL	Artturi Lähdetie (yksikön johtaja, HKL-Infra ja kalusto)
HSL	Mäkinen Reijo (BioSata-hankkeen johtaja)
	Petri Saari (Kalustoinsinööri)
Keski-Suomen liitto & Suomen Bio-kaasuyhdistys	Outi Pakarinen (projektipäällikkö/CIRCWASTE -hanke & yhdistyksen hallituksen jäsen)
L2 Paloturvallisuus Oy	Juha-Pekka Laaksonen (toimitusjohtaja)
Miljöförvaltningen, Miljöbilar i Stockholm	Per Erik Österlund

Ministerium für Infrastruktur und Landesplanung des Landes Brandenburg	Michael Schiller (Oberste Bauaufsicht, rakennusvalvonta)
Ministerium für Inneres, Bauen und Sport des Landes Saarland	Isabell Schmid (Oberste Bauaufsicht, rakennusvalvonta)
Ministerium für Heimat, Kommunales, Bau und Gleichstellung des Landes Nordrhein-Westfalen	Knut Czepuck (Obmann des Arbeitskreises Technische Gebäudeausrüstung der Fachkommission Bauaufsicht, rakennusvalvonta)
Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB)	Erik Egardt (Brandingenjör)
	Lars Synnerholm (Expert, Enheten för säker hantering av farliga ämnen)
Onnettomuustietoinstituutti (OTI)	Tapio Koisaari (yhteyspäällikkö)
Onnettomuustutkintakeskus	Veli-Pekka Nurmi (johtaja)
Pelastusopisto	Johannes Ketola (suunnittelija)
Ramboll Sverige AB	Richard Lundmark
Stockholms läns landsting	Johan Böhlin
TEM	Harri Hillamo (erityisasiantuntija, TEM Energiaosasto)
Trafi	Aki Tilli (johtava asiantuntija)
	Otto Lahti (johtava asiantuntija)
Transportstyrelsen	Per Öhlund (Handläggare)
Vaasan kaupunki	Pertti Hällilä
VTT	Juhani Laurikko (johtava tutkija)
	Nils-Olof Nylund (tutkimusprofessori)
VW-Auto (Volkswagen, Audi, Seat)	
Ympäristöministeriö, rakennetun ympäristön osasto	Jorma Jantunen (yli-insinööri; rakennusten rakenteellinen paloturvallisuus)
	Jukka Bergman (rakennusneuvos; rakenteellinen turvallisuus)
	Kirsi Martinkauppi (lainsäädäntöneuvos; rakentamisen turvallisuus ja lainsäädäntö)

Työpajan osallistajat:

Toimija/yritys	Henkilö ja titteli
Detector Oy (Suomen Biokaasuyhdistyksen jäsen)	Pentti Maunu (toimitusjohtaja)
Gasum	Jussi Vainikka (Business Development Manager, Biogas)
	Tapani Karhinen (Head of Business support)
Helsingin kaupungin pelastuslaitos	Esko Rantanen (johtava palotarkastaja)
Helsingin kaupungin ympäristökeskus, nykyisin HSY	Outi Väkevä (ympäristötarkastaja)

Helsingin kaupungin ympäristönsuojeluyksikkö	Antti Venho (vs. ympäristötarkastaja)
Keski-Suomen liitto & Suomen Bio-kaasuyhdistys	Outi Pakarinen (projektipäällikkö/CIRCWASTE -hanke & yhdistyksen hallituksen jäsen)
Keski-Suomen pelastuslaitos	Pasi Vilhunen (paloinsinööri)
Kuntaliitto	Vesa-Pekka Tervo (pelastustoimen kehittämispäällikkö)
L2 Paloturvallisuus Oy	Juha-Pekka Laaksonen (toimitusjohtaja)
LVM	Saara Jääskeläinen (liikenneneuvos)
MMM	Veli-Pekka Reskola (ylitarkastaja)
Pirkanmaan pelastuslaitos	Tapio Stén (palotarkastusinsinööri)
Prizztech Oy	Matti Luhtanen (projektipäällikkö/Satakunnan kaasutalous 2020, PKV Kaasuautoilu, Kaasua!)
Suomen Kaasuyhdistys ry	Hannu Kauppinen (toimitusjohtaja)
TEM	Harri Hillamo (erityisasiantuntija, TEM Energiaosasto)
Trafi	Otto Lahti (johtava asiantuntija)
VTT	Minna Nissilä (Senior Scientist)
Ympäristöministeriö, rakennetun ympäristön osasto	Jorma Jantunen (yli-insinööri; rakennusten rakenteellinen paloturvallisuus)

LIITE 2: MUUT POLTTOAINETEKNIIKAT

A: LNG ja LBG

Tässä tekniikassa polttoaine on nesteytettyä maa- tai biokaasua, joka säilytetään yleensä tyhjiöeristetyssä kaksivaippasäiliössä, jossa kaasu on noin $-140...-160\text{ °C}$ lämpötilassa. Säiliön paine on korkeintaan muutamia baareja. Kaasu pumpataan käytössä höyrystimelle ja syötetään kaasumaisena moottorille. Säiliössä nesteestä itsekseen haihtuva kaasu ohjataan moottorille polttoon. Kun moottori on pysähdyksissä pitkään, paine säiliössä nousee ja lopulta kaasu alkaa vuotaa varoventtiilistä ulos. Tämän vuoksi tekniikka on tarkoituksenmukainen jatkuvassa ajossa oleville ajoneuvoille, kuten esimerkiksi kuorma-autoille, mutta sen yleistymistä henkilöajoneuvoissa tai busseissa ei pidetä järkevänä.

Nesteytetyn kaasun tankkausasemaverkosto laajenee koko ajan Euroopan alueella ja Suomessa on tätä kirjoitettaessa neljä LNG/LBG tankkausasemaa: Vuosaarella, Turussa, Jyväskylässä ja Vantaalla. Useat kansainväliset yritykset, kuten IKEA, Lidl ja Unilever ovat ottaneet tai ottamassa käyttöön nesteytettyä maa- ja biokaasua käyttäviä kuorma-autoja Euroopan alueella.⁸⁵

Vuototilanteessa LNG/LBG valuisi tilan lattialle ja höyrystyisi voimakkaasti sekä muodostaisi puristetun maa- tai biokaasun tapaan palavan pilven. Pilven lämpötila olisi kuitenkin niin matala, että se täyttäisi tilan syttymiskelpoisella seoksella myös tilan alaosasta. Kylmästä höyrystä olisi mahdollista saada myös merkittäviä paletumavammoja.

B. Vety

Myös vetyä voidaan käyttää moottoripolttoaineena. Lisäksi vetyä voidaan käyttää polttokenotekniikassa sähkön tuottamiseen polttokenolla. Autoissa vety voidaan varastoida säiliöissä, joiden rakenne ja koko riippuvat vedyn olomuodosta. Säiliöiden kehityksessä ja käyttöön- otossa on huomioitava erityisesti säiliöille asetetut turvallisuus- ja kestävyysvaatimukset, joita ovat EU-alueella mm. lämmön- ja iskunkestävyys sekä säiliömateriaalin kyky sietää kosketusta vedyn kanssa.

Vety heikentää joitakin materiaaleja. Vetyhauraudessa molekylaarinen vety adsorboituu metallipintaan ja muodostaa siinä yksiatomista vetyä. Vedyn liukeneminen metalliin aiheuttaa reaktion, joka saa rakenteen haurastumaan. Toinen säiliömateriaalia heikentävä ilmiö on vetyhyökkäys, jossa säiliömateriaalin hiili (esim. hiiliteräs) voi reagoida vedyn kanssa ja muodostaa metaania. Metaani kerääntyy korkeissa paineissa materiaalin tyhjiin huokosiin ja aiheuttaa halkeamia ja hiilipitoisuuden alenemista, jolloin materiaalin lujuus kärsii merkittävästi.

Tällä hetkellä yleisin keino vedyn varastointiin on varastointi puristettuna kaasuna. Ajoneuvokäytössä vetysäiliön paine on 350 tai 700 bar (vrt. metaani 250 bar). Suuri paine on kaasumaisen vedyn varastoinnissa välttämätön, sillä alemmalla paineella ei voida saavuttaa järkevää käyttöä kohtuullisella säiliökoolla. Paineistetun vedyn järjestelmiä sääntelee E-sääntö R-134.

Tankatun vedyn energiatiheyttä voidaan parantaa varastoimalla se nesteenä -253 °C :ssa. Vety voidaan myös sitoa metallipulveriin, jolloin muodostuu metallihydridejä. Metallihydridejä muodostavat metallit ja seokset, jotka voivat absorboida vetyä vapauttaen prosessissa samalla lämpöä. Vety irrotetaan metallista lämmittämällä. Lisäksi vetyä voidaan varastoida hiiliveytinä tai muina kemikaaleina, joista sitä irrotetaan kemiallisten reaktioiden avulla.⁸⁶

Sisätiloissa hankalimmat onnettomuusmekanismit paineistetulla vedyllä ovat säiliön repeäminen ja vetyvuoto. Korkeat säiliöpaineet aiheuttavat suljetussa tilassa huomattavasti metaanisäiliön repeämistä suuremmat vaikutukset. Lisäksi vedyn syttymisenergia on niin pieni, että se syttyy lähes aina omasta virtauksestaan. Vetypilven palomekanismi on hyvin herkästi detonaatio ts. vetypilven palaminen aiheuttaa huomattavasti suuremmat painevaikutukset

⁸⁵ Jukka Metsälä, Gasum. Raskaat pyörät pyörivät biokaasulla -esitys 25.10.2017

⁸⁶ ks. Mia Vaija (2014) Polttoaineen varastointi vetyautoissa. Opinnäytetyö MAMK, Auto- ja kuljetustekniikka, Huhtikuu 2014.

kuin metaanipilvi. Nestemäisellä vedyllä on samantyyppiset turvallisuushaasteet kuin LNG:llä lisättyinä kaasumaisen vedyn haasteilla. Metallihydridityyppinen varastointi on turvallisin mutta myös käytännössä hankalin keino.

Vedyn turvallisuudesta on tehty erilaisten polttokenno- ja muiden tutkimusohjelmien yhteydessä paljon tutkimusta.

C: Nestekaasu

Nestekaasuajoneuvoilla on iso markkina Keski-Euroopassa, jossa syntyy öljynjalostusteollisuuden sivutuotteena suuria määriä butaania. Suomessa tällaista tarjontaa ei ole, ja nestekaasun (propaani tai butaani) käyttö on veroteknisesti käytännössä estetty.

Nestekaasuajoneuvon merkittävin onnettomuusskenaario suljetussa tilassa olisi kaasuvuoto. Säiliöpaineet ovat normaalilämpötiloissa 6 baarin luokkaa, joten säiliön repeäminen ei ole todennäköistä tai vaikutuksiltaan järin merkittävä. Nestekaasu on ilmaa raskaampaa, joten se leviää ja syttyessään palaa tilan alaosaan. On myös huomattava, että ilmaa raskaammat kaasut voivat kertyä ilmanvaihtokanavien mutkiin, syvennyksiin, sadevesikaivoihin, alempiin kerroksiin, lattianrajaan tai vastaaviin paikkoihin myös hitaasti ja säilyä näissä merkittävän pitkään vähintään osin syttymiskelpoisena seoksena.

Ibarreta ym. (2012)⁸⁷ vertailevat metaanin ja propaanin räjähdysvoimakkuutta. He toteavat, että kevennettyjen sisätiloissa tapahtuvien propaaniräjähdysten huippuylipaine on eri standardien mukaan laskettuna lähes puolitoistakertainen verrattuna saman metaanimäärän deflagraatioon.

87 Ibarreta, A., Myers, T., Bucher, J. & Marr, K. (2012) Explosion severity: propane versus natural gas. ISFI 2012.

LIITE 3: RELEVANTIT RAKENTAMISMÄÄRÄYKSET JA LIIKENNEVIRASTON TUNNELIOHJE

Paloturvallisuus

Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta (848/2017)

Uusi asetus määrää autosuojien palo-osastojen enimmäisalat ja osastojen jaon osiin sekä rakennuksen paloluokan ja palokuormaryhmän. Myös sisäpuolisten pintojen luokkavaatimukset on esitetty. Paloluokkien osalta kerrosmäärärajoitukset ovat seuraavat: paloluokan P3 autosuoja voi olla enintään yksikerroksinen, luokan P2 enintään kaksikerroksinen ja paloluokan P1 autosuojalle ei ole kerrosmääräistä rajoitusta. Paloluokan P3 autosuoja ei saa olla maanalainen. Myös rakennuksen maksimikorkeus ja kerrosala on osissa paloluokkia rajoitettu.

Lujuus ja vakaus

Ympäristöministeriön asetus kantavista rakenteista (477/2014)

Asetusta sovelletaan rakenteiden suunnittelun ja toteutuksen lisäksi rakenteiden korjaus- ja muutostöihin. Rakenteiden lujuuden ja vakauden tulee säilyä koko suunnitellun käyttöajan ajan. Suunniteltu käyttöikä on määrättävä suunnitteluvaiheessa. Mikäli rakenteet suunnitellaan ja toteutetaan eurokoodien sekä niitä koskevien ympäristöministeriön asetuksina annettujen kansallisten valintojen mukaisesti, rakennuksen kantavien ja jäykistävien rakenteiden olennaisten teknisten vaatimusten katsotaan täyttyvän. Muussa tapauksessa lujuuden ja vakauden toteutuminen tulee osoittaa rakennusvalvontaviranomaiselle erikseen. Rakennuksen riskialttius sekä mahdollisten vaurioiden ja vikojen seuraukset tulee huomioida. Soveltuvassa laajuudessa rakennesuunnitelmissa on esitettävä mm. seuraamusten vakavuus, voimasuureet, onnettomuusmitoitustarkastelut ja mitoitus palotilanteessa sekä jäykistys- ja vakavuustarkastelu. Edelleen asetus määrää, millaisia asiakirjoja tulee laatia rakenteita suunniteltaessa. Näitä ovat mm. rakenteiden toteutusasiakirjat, rakennesuunnitelmat, rakennesuunnitelmien tarkastussuunnitelma sekä rakenteiden toteutuksen työsuunnitelma. Mikäli rakenne vaatii käytönaikaisia määräaikaistarkastuksia, tämä tulee huomioida rakennuksen käyttö- ja huolto-ohjeessa. Rakenteiden ja rakennustuotteiden kelpoisuus ja niille asetettujen vaatimusten täyttyminen tulee varmistaa.

Ilmanvaihto

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta (1009/2017)

Uusi asetus rajoittaa merkittävästi ajoneuvosuojien hiilimonoksidipitoisuutta. Määräykset moottoriajoneuvosuojaan liittyen ovat seuraavat:

11 § Moottoriajoneuvosuojan ilmavirrat

Erityissuunnittelijan on mitoitettava moottoriajoneuvosuojan ilmanvaihdon ilmavirrat siten, etteivät ilman epäpuhtaudet aiheuta terveydellistä haittaa käyttäjille. Ilmavirrat on mitoitettava siten, että moottoriajoneuvosuojassa hiilimonoksidin keskiarvopitoisuus kriittisimmäksi arvioituna käyttötuntina ei ylitä arvoa 35 mg/m^3 (30 ppm). Moottoriajoneuvosuojan jatkuvan työskentelyalueen ilmavirrat on mitoitettava niin, että hiilimonoksidin hetkellinen pitoisuus ei ylitä 7 mg/m^3 (6 ppm).

Liikenneviraston tunneliohjeen keskeiset sisällöt

Liikenneviraston antamaa ohjetta⁸⁸ käytetään tietunneleiden rakenneteknisessä suunnittelussa. Tämän työn kannalta olennaisimmat sisällöt koskevat räjähdyspaineuormaa ja paloteknistä mitoitusta. Tietunnelin hallintoviranomainen tekee hankekohtaisen tulkinnan sekä räjähdyspaineen tyypistä ja sen huomioimisesta tunnelin rakentamisessa että palonkestovaati-

⁸⁸ Liikennevirasto (2017). Tietunnelin rakennetekniset ohjeet. Liikenneviraston ohjeita 34/2017. Helsinki 29.6.2017.

muksista. Sekä räjähdyspainekuormien että palonkeston mitoituksessa noudatetaan ohjeen sisältämän liitteen 3 taulukon luokittelua lähtökohtaisesta laajuudesta.

Ohje neuvoa mitoittamaan tietunnelin kantavat rakenteet, suuaukon sekä seinän alaosan tunnelissa tapahtuvalle räjähdykselle ja määrättyille räjähdyspaineille. Lähtökohtaisesti tunnelin kantavat rakenteet mitoitetaan kestävään deflagraatio (tässä: 1 bar ylipaine, jonka kesto on 50 ms), mutta ei detonaatiota (tässä: 50 bar ylipaine, jonka kesto on 5 ms). Betonitunnelien vaaditaan yleisesti kestävä deflagraatio. Kalliotunnelin rakenteiden vaaditaan kestävä deflagraatio vain, mikäli kyseessä on päällerakennettu tunneli alueella, jossa kalliokaton kestävyys ei välttämättä riitä estämään sortumista onnettomuustilanteessa.

Räjähdyspainekuorman mitoituksessa sovelletaan eurokoodia SFS-EN 1991-1-7 seuraavien periaatteiden mukaisesti:

- Tunnelin sekundääriset rakenteet sekä varusteiden ja laitteiden kiinnitysosat saavat vaurioitua.
- Varusteisiin ja laitteisiin kuuluvat yhdyskäytävään tunneliputkesta johtavat ovet eivät saa sortua deflagraation voimasta, mutta niiden tiiveys saa osittain heikentyä.
- SFS-EN 1991-1-7 kohdan 5.3 (1) P mukaisesti kantavien rakenteiden jatkuva sortuma tulee estää.
- Räjähdys saa aiheuttaa suuria muodonmuutoksia, mutta ei sortumaa.
- Yhdyskäytävän ja tunneliputken välisen seinän tiiveys saa heikentyä vain osittain.
- SFS-EN 1991-1-7 kohdan 5.3. (8) mukaisesti ylipainetta seuraa alipaine, mikä otetaan huomioon yllä esitetyn mukaisesti.

Ohjeen liite 4 käsittelee lisäksi räjähdyskuorman dynaamisen kuormakertoimen määrittämistä.

Palotekninen mitoitus tehdään eurokoodien ja niiden kansallisten liitteiden mukaisesti noudattaen tässä Liikenneviraston ohjeessa annettavia erityisohjeita. Betonirakenteen kantavuus sekä betonipinnan räjähdysmäisen lohkeilun rajoittaminen tulee varmistaa. Tunnelin eri rakenneosille on eri palonkestovaatimukset.

Paloteknisessä mitoituksessa noudatetaan seuraavaa:

- Kantavat rakenteet eivät saa vahingoittua niin, että ne täytyy uusida. Lievät pinnan korjausta edellyttävät vauriot ovat hyväksyttäviä.
- Tunnelin rakenteiden jatkuva sortuma tulee estää.
- Verhousrakennetta saa vaurioitua palossa niin, että se täytyy uusida. Verhousrakenteen raudoiteverkon maksimilämpötila on 600 °C. Verhousrakenteen takana olevat materiaalit eivät saa syttyä verhousrakenteen betonisen suojakuoren lämpötilan nousun seurauksena.
- Palosuojamateriaali saa vahingoittua niin, että se täytyy uusida.
- Eristemateriaalin lämpötila ei saa nousta 60 minuutin palon aikana niin korkeaksi, että eristemateriaalista vapautuu ihmisille haitallista savua, kaasua tai nestettä. Eristemateriaali ei saa kuumentua syttymislämpötilaan.
- Betonin räjähdysmäistä lohkeilua rajoitetaan lisäämällä palolle alttiiseen seinän yläosaan ja holvin verhousrakenteeseen standardisoitu määrä mikropolymeerikuituja Liikenneviraston ohjeen kappaleen 2.4 ja liitteen 5 mukaisesti, tai muulla vastaavan vaikutuksen antavalla tavalla. Tätä ei lasketa palonsuojausmenetelmäksi.
- Rakenteiden palonkeston mitoituksessa noudatetaan seuraavia eurokoodeja ja niiden kansallisia liitteitä (YM):
 - Betonirakenteet SFS-EN 1992-1-2
 - Teräsrakenteet SFS-EN 1993-1-2
 - Liittorakenteet SFS-EN 1994-1-2

Tietunnelin kantavat rakenteet palosuojataan ensisijaisesti palosuojalevyillä tai ruiskutettavalla palosuojamassalla ja vain toissijaisesti ylimitoittamalla, esimerkiksi tavallista paksummalla suojabetonilla. Liikennevirastolta tulee hakea hyväksyntää palosuojaukseen käytettäville tuot-

teille ml. kiinnitysmenetelmä ja kiinnikkeet. Palonsuojarakenteen kiinnityksen tulee täyttää niin palonkestovaatimukset kuin vaatimukset kosteuden ja huoltotoimien kestosta (ohjeen kappale 2.9 Käyttöikävaatimukset). Suojatut rakenteet täytyy pystyä tarkistamaan.

Palonsuojaustuote - sekä hallintoviranomaisen niin vaatiessa myös palonsuojaamaton tunneli-rakenne - tulee testauttaa kolmannen osapuolen toteuttamalla polttokokeella.

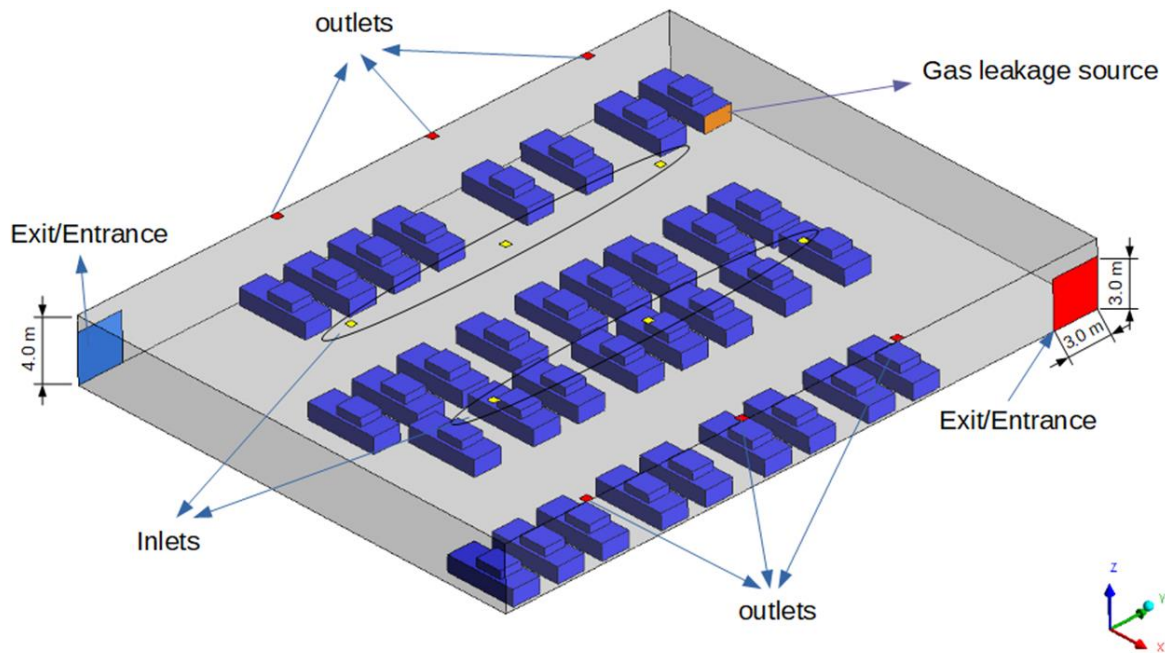
Rakenteiden palotekninen mitoitus perustuu aika-lämpötilariippuvuuksiin, joita kuvataan HCM- sekä SFS-EN 1363-1 (ISO 834)-palokäyrillä. Lähtökohtaisesti mitoitus ei huomioi sammutusjärjestelmiä, kuten sprinklereitä - ellei hallintoviranomainen toisin päättä.

Tietyille rakenteille sekä läpivienneille on lisäksi tarkempia vaatimuksia. Poistumisreittien ovil-
le on määrätty lisävaatimuksia Liikenneviraston ohjeessa 16/2016 ”Tietunnelien turvalliseen poistumiseen ja poikkeustilanteiden viestintään liittyvien järjestelmien suunnitteluohje”.

LIITE 4 SEURAUSSANALYYSI JA MALLINNUS METAANI- VUODOSTA PIENESSÄ PYSÄKÖINTIHALLISSA

SISÄLTÖ

1	Johdanto	66
2	Tarkasteltava pysäköintihalli	66
2.1	Pysäköintihallin geometria ja reunaehdot	66
2.2	Pysäköintihallin ilmanvaihto	67
3	Tarkasteltavat vuodot	67
3.1	Säiliökoot	67
3.2	Vuodon sijoittuminen hallissa	67
3.3	Vuotojen kuvaus	68
4	Laskentamenetelmät	70
4.1	Yleistä	70
4.2	Metaanin leviämislaskenta	71
4.3	Metaanin palamisen laskenta	73
5	Tulokset	73
5.1	7,5 kg vuodon leviäminen	73
5.2	19 kg vuodon leviäminen	75
5.3	Yhteenveto leviämisestä	77
5.4	Palosimulaatioiden oletettu alkutilanne	78
5.5	7,5 kg vuodon palaminen ja paineennousu	79
5.6	19 kg vuodon palaminen	81
6	Johtopäätökset	82



Kuva 7. Pysäköintihallin geometrinen malli.

2.2 Pysäköintihallin ilmanvaihto

Hallissa on kuusi ilman tuloaukkoa ja kuusi poistoaukkoa, joiden sijainti käy ilmi kuvasta 7. Tuloaukot hallin keskellä ovat kooltaan $0,45\text{ m} \times 0,45\text{ m}$ ja poistoaukot seinien tuntumassa hallin pitkällä sivulla $0,5\text{ m} \times 0,5\text{ m}$. Ilmanvaihdon kokonaisvirtausnopeus on $0,9\text{ m}^3/\text{s}$, mikä on rakentamismääräysten vähimmäisvaatimusten mukainen. Tämä on kaasuvuodon suhteen pahin skenaario. Ilma tulee halliin normaalissa huonelämpötilassa ($293\text{ K} \approx 20\text{ }^\circ\text{C}$).

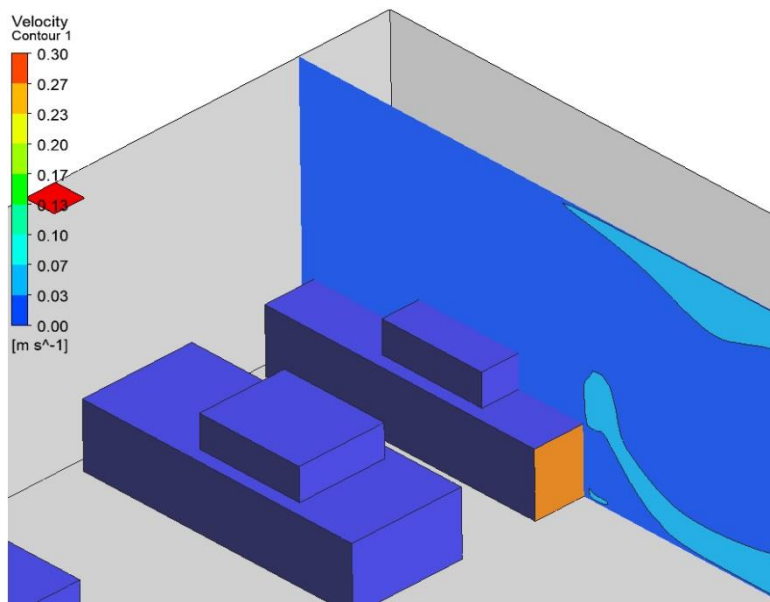
3 TARKASTELTAVAT VUODOT

3.1 Säiliökoot

Tyypillisesti tehdasvalmisteisissa kaasuautoissa kaasu on jaettu useaan säiliöön, jotka on varustettu kukin omilla turvavarusteillaan. Säiliökoot ovat alle 10 kg . Tässä työssä tarkastellaan $7,5\text{ kg}$ säiliön vuotoa. Pahimpana tapauksena tarkastellaan suurimman markkinoilta löytyvän konversiosäiliön, vesitilavuudeltaan 120 litraa (19 kg metaania) vuotoa.

3.2 Vuodon sijoittuminen hallissa

Vuodon oletetaan tapahtuvan hallin nurkassa sijaitsevasta autosta. Tällä alueella ilmanvaihto on vähäisintä ts. auton sijoitus on pahimman tapauksen mukainen (ks. kuva 8).

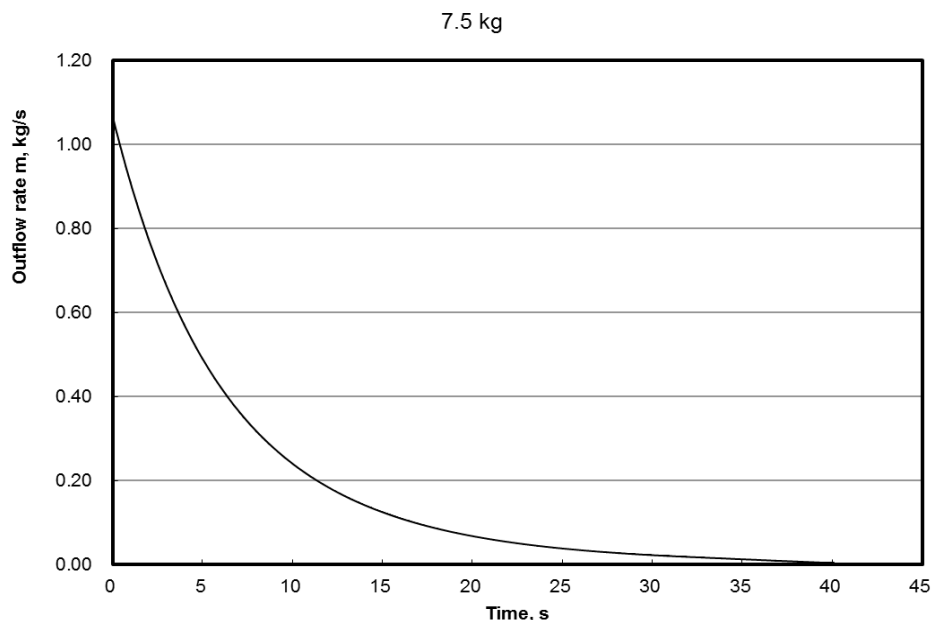


Kuva 8. Ilmanvaihdon nopeuskäyrät lähellä vuotokohtaa.

3.3 Vuotojen kuvaus

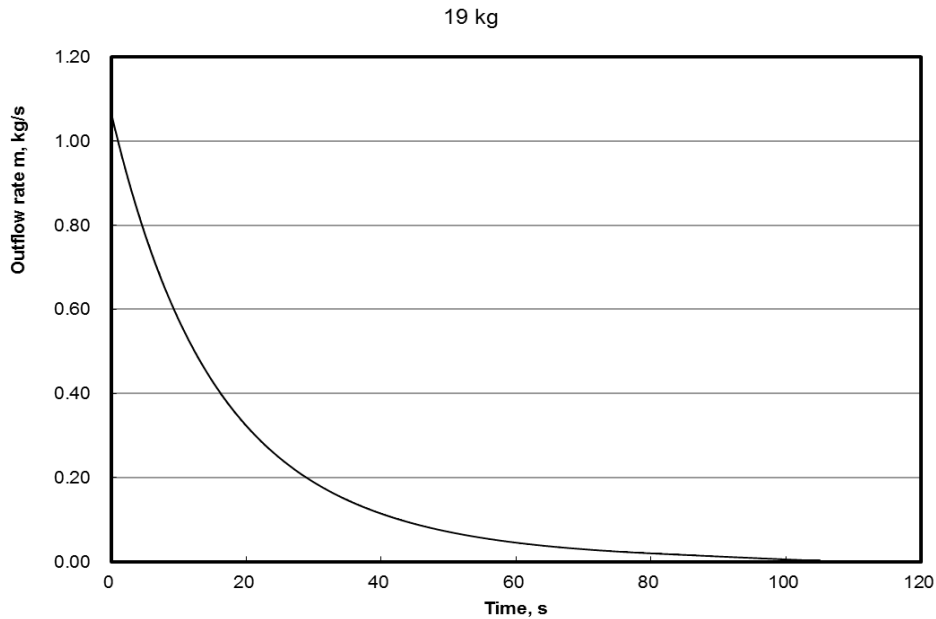
Työssä oletetaan, että vuoto tulee kaasulaitteiston korkeapainepuolelta, esim. viallisesta lämpösulakkeesta. Vuotoaukkona on käytetty halkaisijaltaan 6 mm pyöreää reikää/lyhyttä putkea. Tämä on tyypillinen koko lämpösulakkeen vuotoaukolle.

Kun oletetaan, että säiliöt on täytetty 200 bar paineeseen, voidaan laskea⁸⁹, että massavirrat aukosta ovat ajan funktiona 7,5 kg ja 19 kg säiliöiden tapauksissa kuvien 9 ja 10 mukaiset. 7,5 kg säiliö tyhjenee noin 40 sekunnissa ja 19 kg säiliö noin 110 sekunnissa.



Kuva 9. Ajasta riippuva vuodon massavirta 7,5 kg säiliöstä.

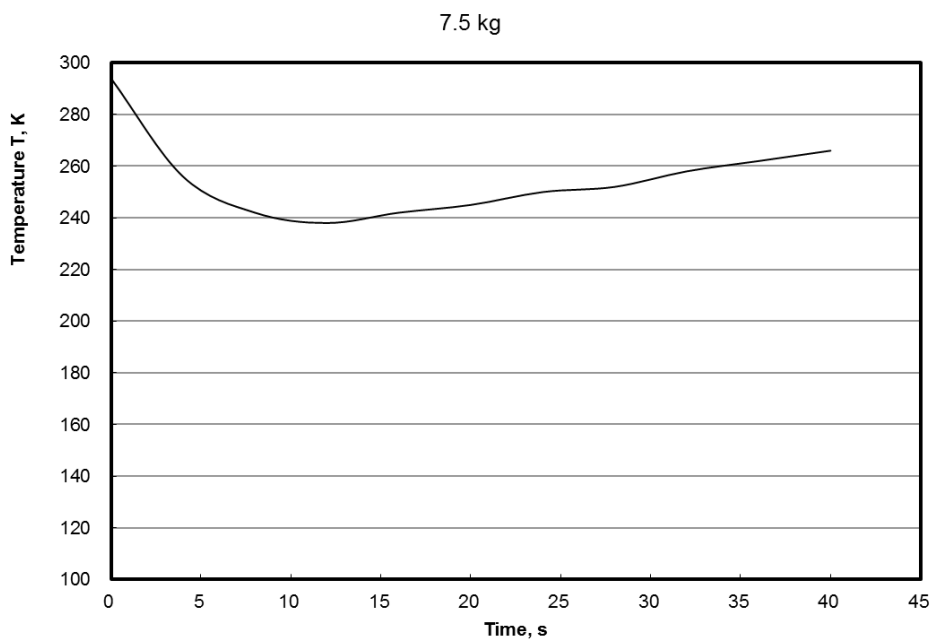
⁸⁹ Ks. esim. Assael, M. J., & Kakosimos, K. E. (2010). Fires, explosions, and toxic gas dispersions: effects calculation and risk analysis. Boca Raton: CRC Press.



Kuva 10. Ajasta riippuva vuotava massavirta 19 kg säiliöstä.

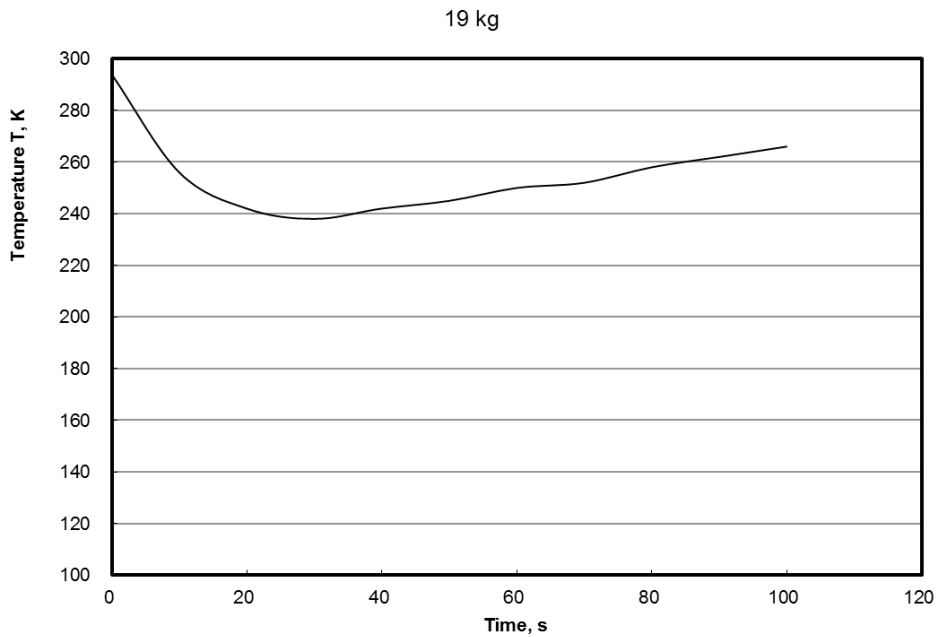
Oletuksena on, että purkautuvan kaasun suihku osuu maahan tai auton sisäpuolen rakenteisiin, jolloin suihkun liike-energia vähenee merkittävästi.

Ulospurkautuvan kaasun lämpötila laskee kaasun laajetessa ja suihkutessa äänen nopeudella, mutta vastaavasti kaasu ja säiliö ottavat ympäristöstään lämpöä. Kokonaisuus on hyvin monimutkainen, eikä tarkkaa lämpötilakäyttäytymistä ollut mahdollista mallintaa tämän hankkeen puitteissa. Tämän vuoksi käytettiin muualla laskettua lämpötilaprofiilia⁹⁰, joka skaalattiin ajallisesti sopivaksi tähän vuotoon. Tällä lämpötilaprofiililla kaasu nousee välittömästi tilan kattoon. Joissakin olosuhteissa voisi olla teoriassa mahdollista, että metaani purkautuisi niin kylmänä, että se kulkeutuisi jonkin matkaa lattianrajassa ennen lämpenemistään ympäristön lämpötilaan. Lämpötilakäyrä 7,5 kg kaasusäiliön purkautumiselle on esitetty kuvassa 11 ja 19 kg säiliölle kuvassa 12.



Kuva 11. Säiliöstä purkautuvan kaasun lämpötila ajan funktiona 7,5 kg säiliöllä.

⁹⁰ Blaylock, M., Bozinowski, R., & Ekoto, I. (2016). Analysis of a Full Scale Blowdown Due to a Mechanical Failure of a Pressure Relief Device in a Natural Gas Vehicle Maintenance Facility. Sandia Report SAND2016-4534. Albuquerque, New Mexico 87185 and Livermore, California 94550: Sandia National Laboratories.



Kuva 12. Säiliöstä purkautuvan kaasun lämpötila ajan funktiona 19 kg säiliöllä.

4 LASKENTAMENETELMÄT

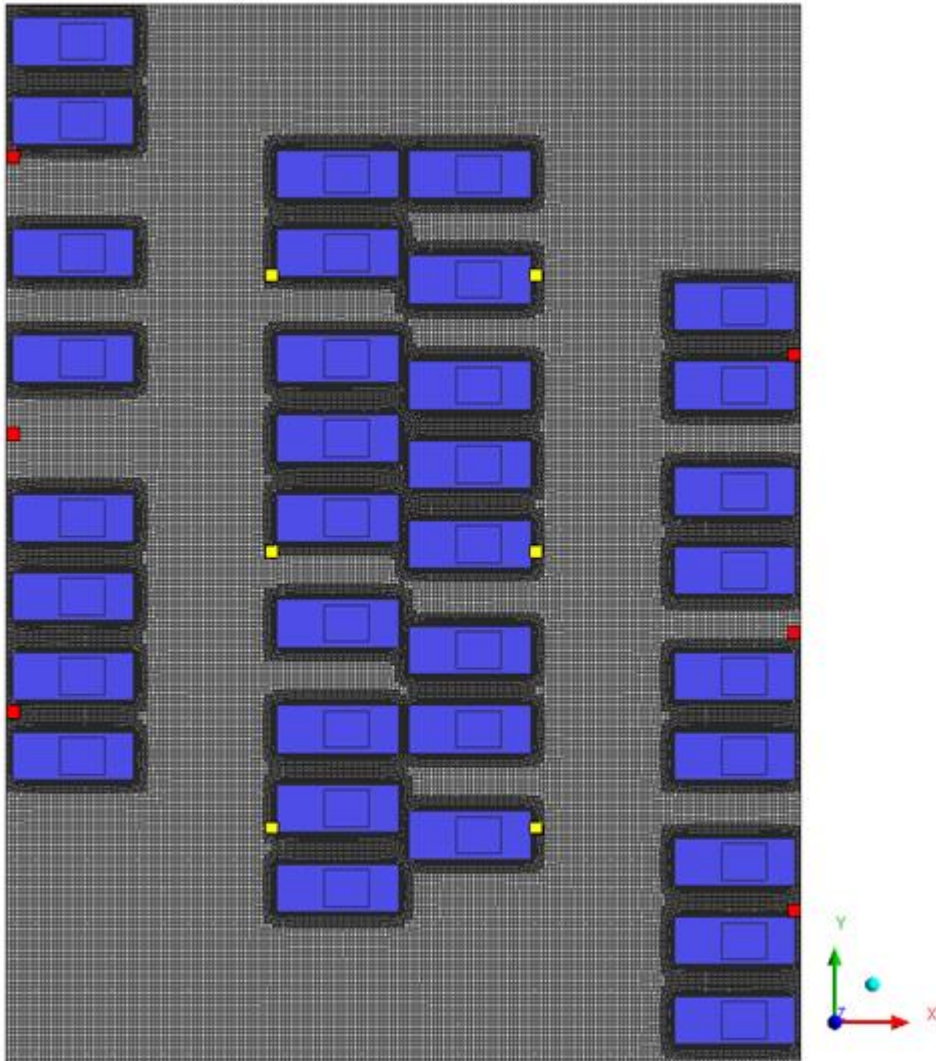
4.1 Yleistä

Simulaatiot on tehty aikariippuvina käyttäen ANSYS Fluent 17.2 -ohjelmistoa. Verkotukseen on käytetty CutCell-tyyppistä verkkoa, joka mahdollistaa tasaisen ja säännöllisen verkon koko laskentatilassa. Säännöllisellä verkolla päästään mahdollisimman korkeaan numeeriseen tarkkuuteen. Laskentakoppien lukumäärä on 7,5 miljoonaa (ks. kuva 13). Verkon koppikokoa on tihennetty lähellä pysäköintihallin seinämiä, jolloin nopeusrajakerrokset ja mm. kaasun sekoittuminen lasketaan suuremmalla resoluutiolla pintojen lähellä.

Laskentaverkolle on tehty myös verkkoriippumattomuustarkastelu, jossa havaittiin, ettei verkon tihentämisellä saavuteta eroja laskentatuloksissa. Tällöin voidaan perustellusti olettaa verkon tiheyden olevan riittävä laskentojen suorittamiseksi.

Laskentatilavuuden seinät, lattia ja katto on mallinnettu hyvin eristettyinä lämpöä läpäisemättöminä pintoina.

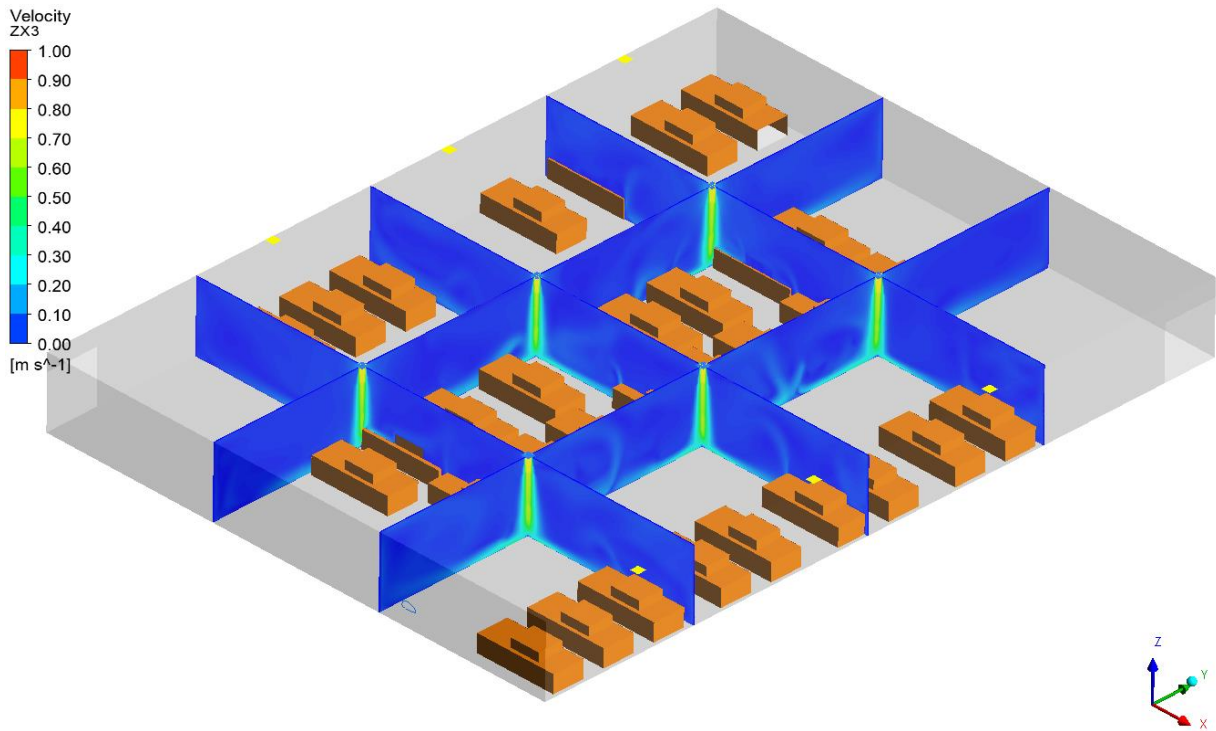
Laskennat on suoritettu Linux-klusterissa 128 laskentaytimellä, jolloin yksi laskenta kestää noin vuorokauden.



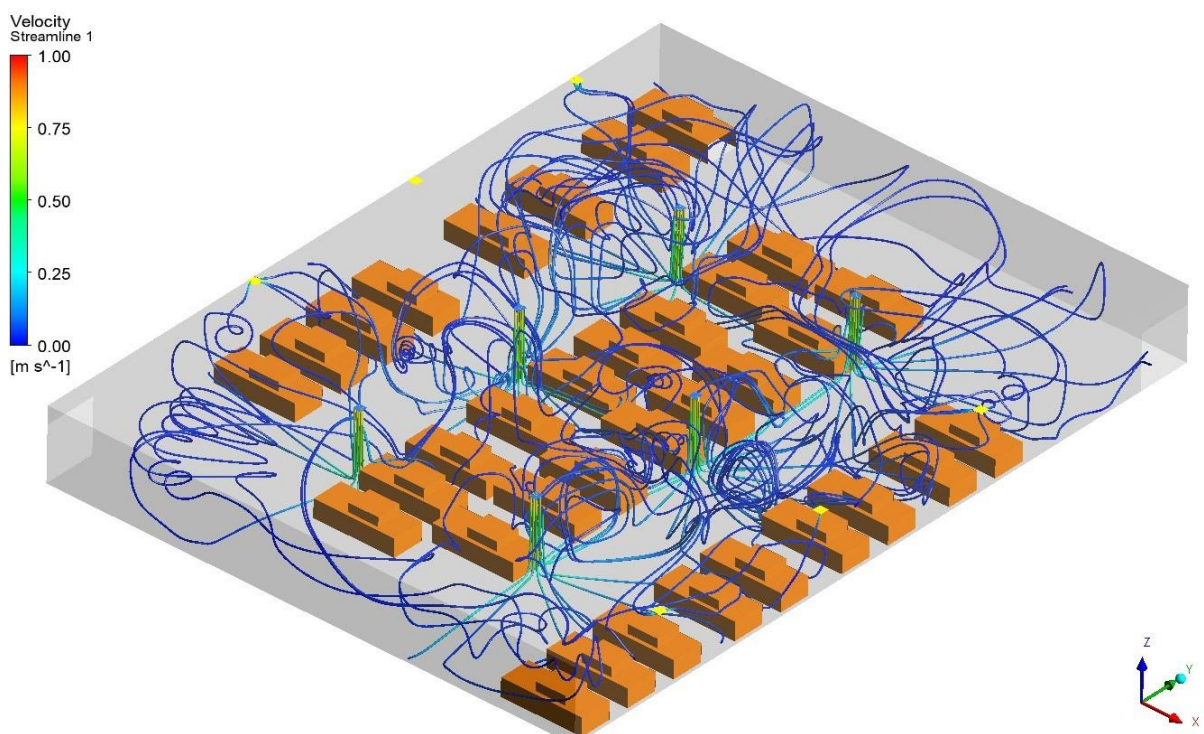
Kuva 13. Laskentaverkko ylhäältä katsottuna. Laskentakoppien määrä on 7,5 miljoonaa.

4.2 Metaanin leviämislaskenta

Maa- tai biokaasun leviämistä simuloidaan metaanilla käyttäen hallin alkutilana täysin kehittyntä ilmanvaihtoa, jossa hallin tuuletus on saavuttanut tasapainotilanteen (ks. kuva 14). Tuuletusilman kulku on esitetty kuvassa 15.



Kuva 14. Nopeusjakauma täysin kehittyneestä ilmanvaihdosta ennen kaasuvuotoa.



Kuva 15. Tuuletusilman kulku esitettyä virtaviivajäljityksen avulla. Virtaviivojen väri kuvastaa virtausnopeutta.

Metaanin vuotoa ja kulkeutumista simuloidaan ANSYS Fluent -ohjelmiston Species-mallin avulla päästämällä metaania vuotokohdasta edellä esitettyjen käyrien mukaisilla massavirroilla niiden osoit-

tamassa lämpötilassa. Species-mallilla voidaan simuloida samassa faasissa olevien eri kaasukomponenttien liikettä ja kulkeutumista.

Ajasta riippuvaa laskentaa on jatkettu, kunnes halliin vuotanut metaani on tuulettunut hallista kokonaan pois.

4.3 Metaanin palamisen laskenta

Hallin sisään- ja uloskäyntiovet mallinnettiin avonaisina palamislaskennassa. Tällä kuvataan kevytrakenteisten ovien pettämistä paineen noustessa. Mallinnettu palotila käsittää koko pysäköintihallin.

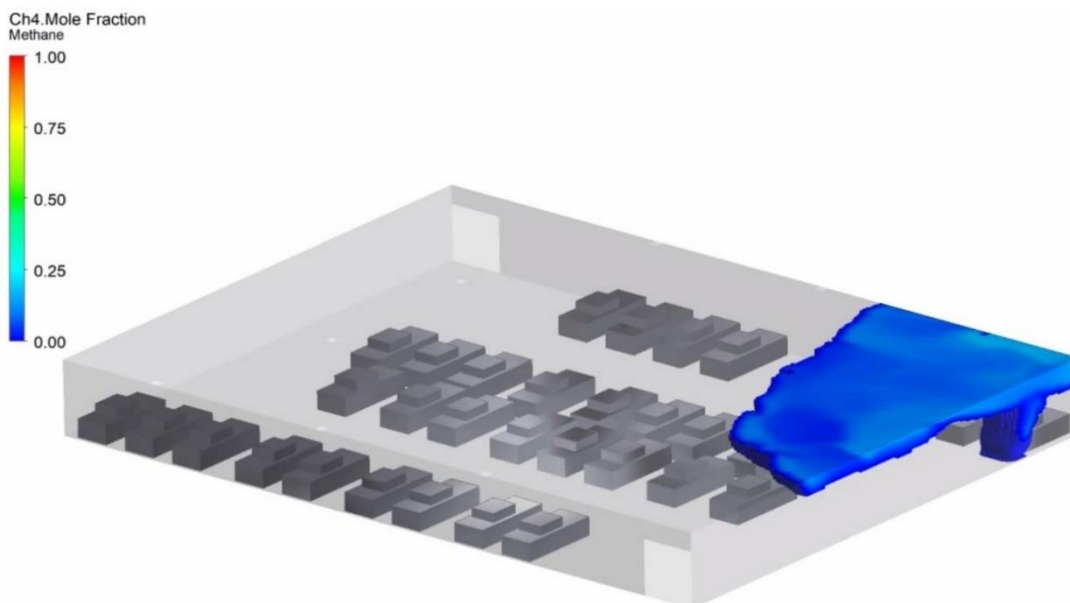
Metaanin palamista simuloitiin 0,1–0,2 millisekunnin aika-askelella. Palamislaskentaa on jatkettu, kunnes kaikki metaani on ehtinyt reagoida. Tällöin hallissa saavutetaan suurimmillaan 0,65 bar (7,5 kg vuoto) tai 1,5 bar (19 kg vuoto) ylipaine. Paineheijastumat tämän tilanteen jälkeen ja paineaallon vaimeneminen eri rakenteiden tai pintojen heijastusten johdosta on jätetty huomiotta, sillä niiden laskeminen vaatisi vielä enemmän laskentakapasiteettia.

Simuloitavan ajanjakson pituus on noin 0,1 sekuntia syttymishetkestä tilanteeseen, missä kaikki kaasu on ehtinyt palaa.

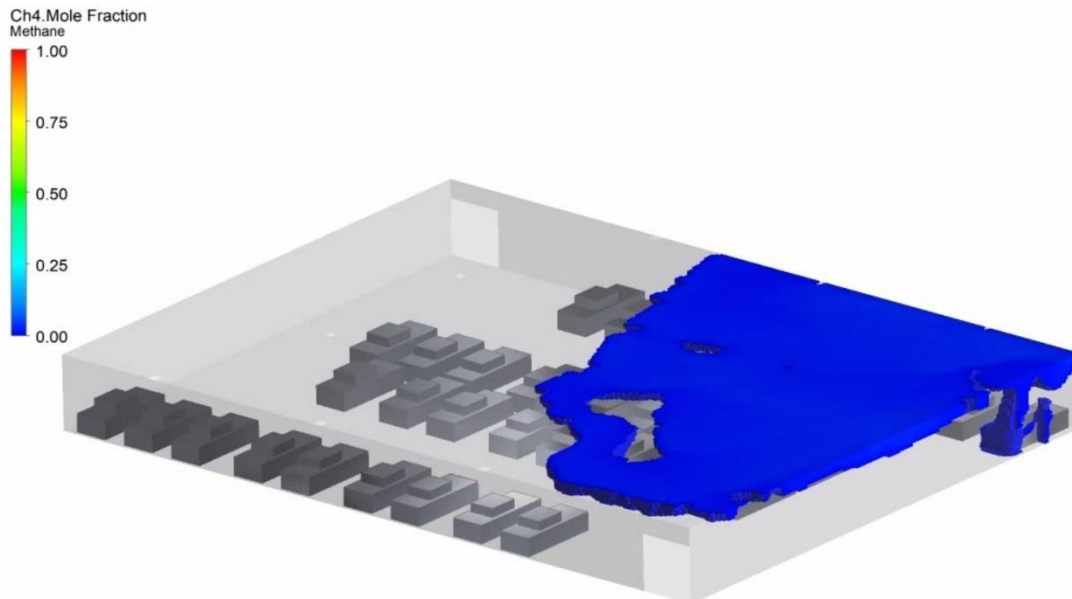
5 TULOKSET

5.1 7,5 kg vuodon leviäminen

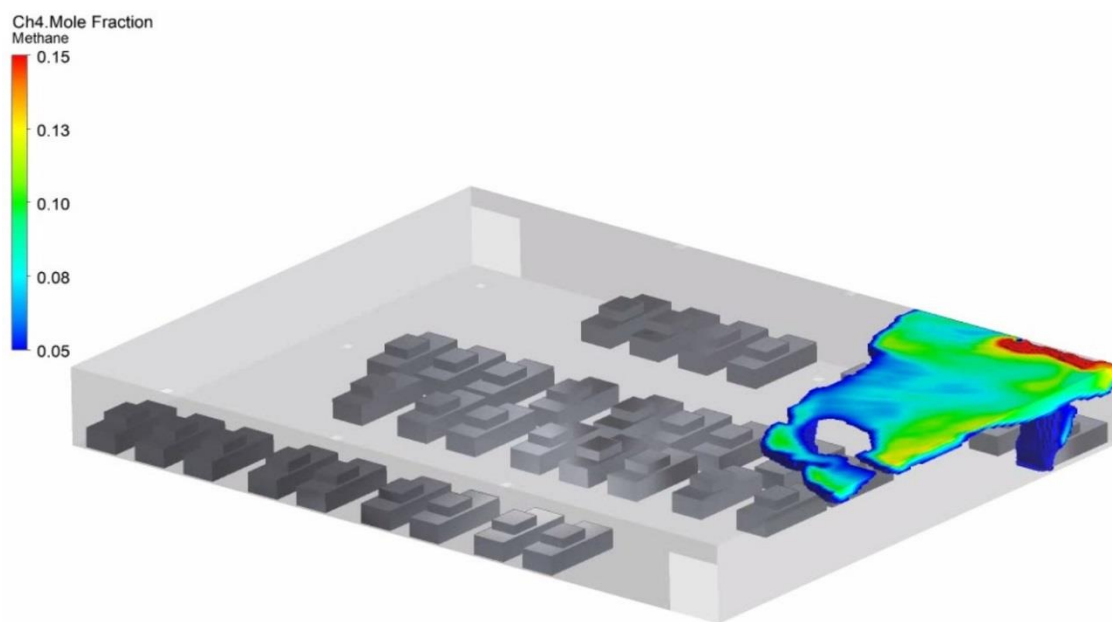
Kaasun leviämislaskennassa oletetaan, että nosto-ovet ovat kiinni. Seuraavassa neljässä kuvassa on esitetty metaanipitoisuus asteikolla 0-100 % sekä asteikolla 5-15 % (alempi ja ylempi syttymäraja) ajanhetkillä 25 s ja 73 s vuodon alusta lähtien.



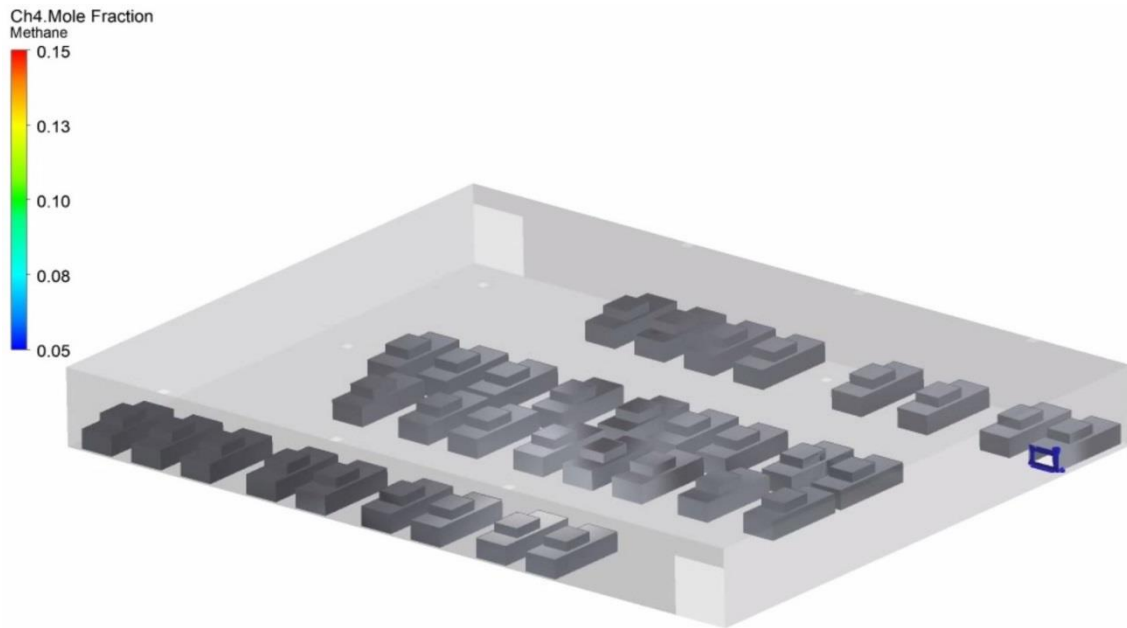
Kuva 16. Metaanipitoisuus 7,5 kg vuodossa 25 sekuntia vuodon alusta asteikolla 0-100 %.



Kuva 17. Metaanipitoisuus 7,5 kg vuodossa 73 sekuntia vuodon alusta asteikolla 0-100 %.



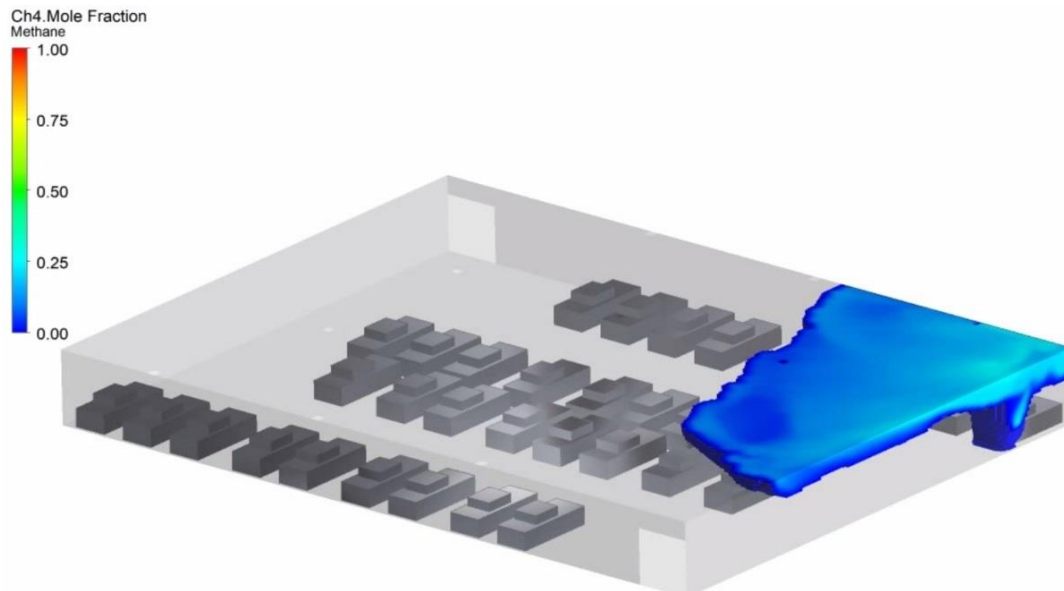
Kuva 18. Metaanipitoisuus 7,5 kg vuodossa 25 sekuntia vuodon alusta asteikolla 5-15 % (alempi ja ylempi syttymäraja).



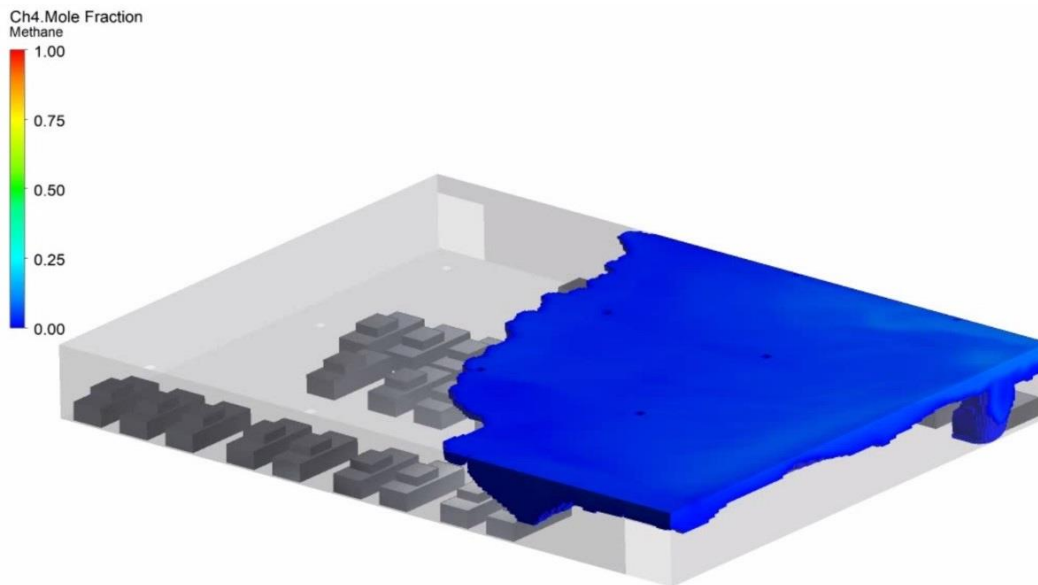
Kuva 19. Metaanipitoisuus 7,5 kg vuodossa 73 sekuntia vuodon alusta asteikolla 5-15 % (alempi ja ylempi syttymäraja).

5.2 19 kg vuodon leviäminen

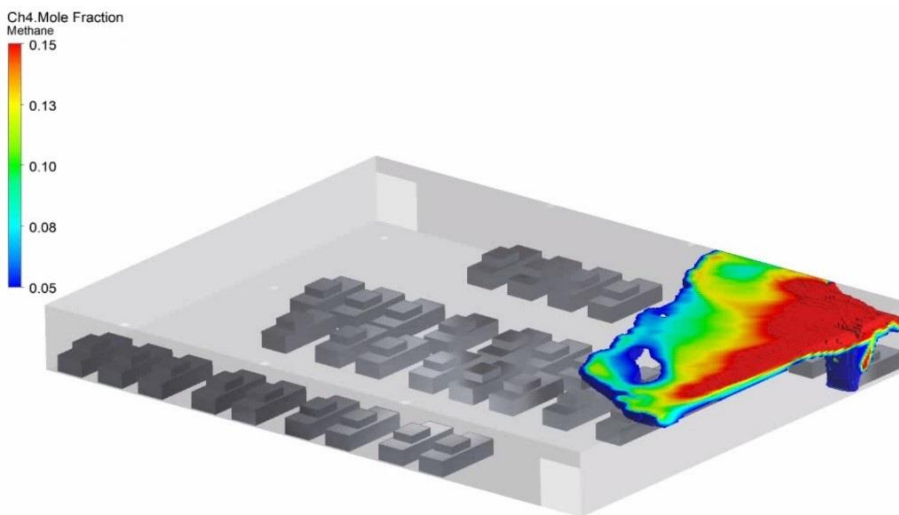
Pahimmassa tapauksessa oletetaan 19 kg säiliön vuotavan tyhjäksi. Seuraavassa neljässä kuvassa on esitetty metaanipitoisuus asteikolla 0-100 % sekä asteikolla 5-15 % (alempi ja ylempi syttymäraja) ajanhetkillä 25 s ja 73 s vuodon alusta lähtien.



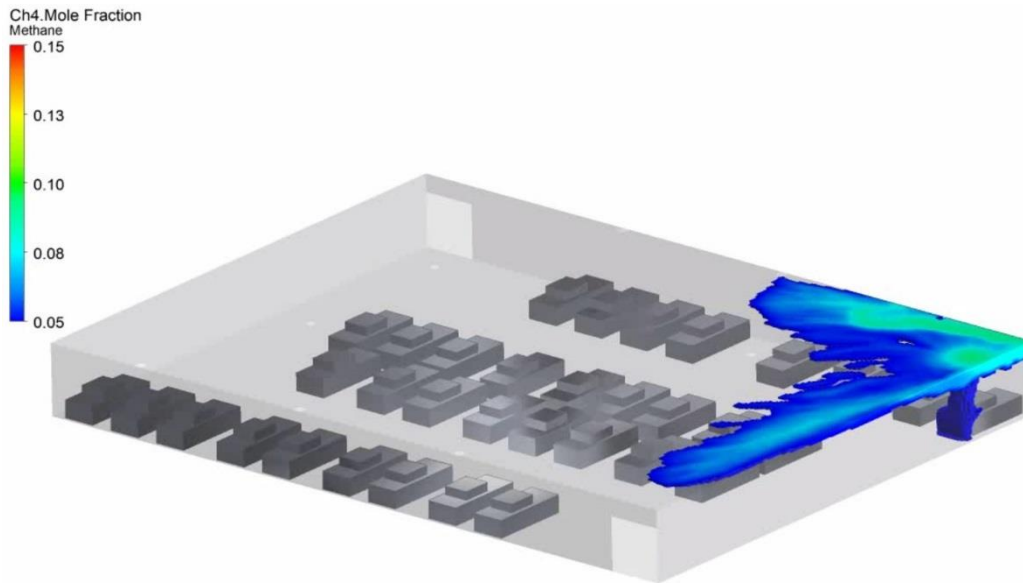
Kuva 20. Metaanipitoisuus 19 kg vuodossa 25 sekuntia vuodon alusta asteikolla 0-100 %.



Kuva 21. Metaanipitoisuus 19 kg vuodossa 73 sekuntia vuodon alusta asteikolla 0-100 %.



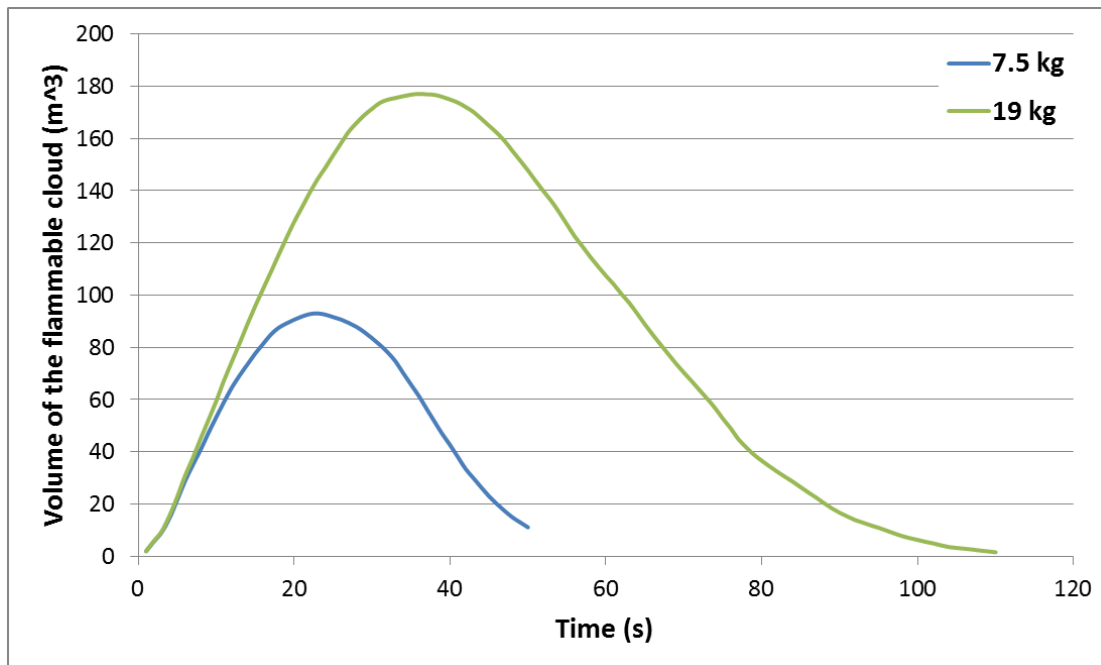
Kuva 22. Metaanipitoisuus 19 kg vuodossa 25 sekuntia vuodon alusta asteikolla 5-15 % (alempi ja ylempi syttymäraja).



Kuva 23. Metaanipitoisuus 19 kg vuodossa 73 sekuntia vuodon alusta asteikolla 5-15 % (alempi ja ylempi syttymäraja).

5.3 Yhteenveto leviämisestä

Kuvassa 24 on esitetty syttyvän kaasupilven tilavuus ajan funktiona. Suurin syttyvän kaasupilven tilavuus on 7,5 kg tapauksessa noin 90 m³. Tämän kaasuvuodon aiheuttama vuotopilven syttymävaara on ohi noin 50 sekunnin kuluttua vuodosta. Suurin syttyvän kaasupilven tilavuus 19 kg vuodolla on noin 180 m³, ja vuoto tuulettuu tilassa vaarattomaksi noin kahdessa minuutissa.



Kuva 24. Syttyvän kaasupilven tilavuus vuodon alusta pilven häviämiseen ajan funktiona.

Miniminormit täyttävä tuuletus näyttäisi siis poistavan syttyvän kaasun pilven melko nopeasti. Molemmissa tapauksissa syttymiskelpoinen kaasupilvi kulkee lähellä katonrajaa. Ilmanvaihtoon käytetyt poistoilmanaukot sijaitsevat laskentaesimerkissä katonrajassa, jolloin näiden avulla kaasun poistumi-

nen tilasta on tässä tapauksessa melko tehokasta. On huomattava, että mikäli poistoilma-aukot sijaitsevat katossa, bensiinihöyryt eivät tuuletu yhtä tehokkaasti tilasta ulos.

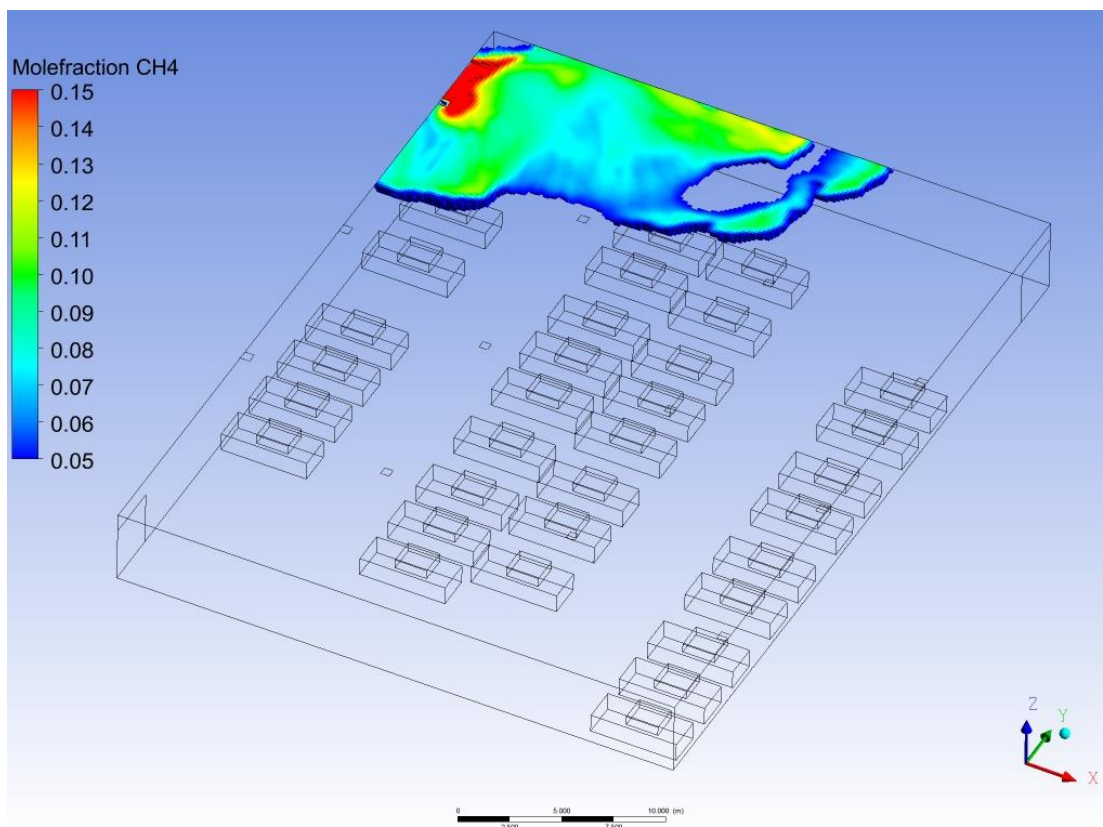
5.4 Palosimulaatioiden oletettu alkutilanne

Kaasupalon syttymähetkeksi on valittu kummassakin tapauksessa pahin mahdollinen skenaario, jossa vuotaneen kaasun määrä hallissa on suurimmillaan. Kuten edellä nähtiin, syttyvät pilvet ovat suurimmillaan 93 m³ ajanhetkillä 25 s (7,5 kg säiliö) ja 177 m³ 38 s (19 kg säiliö). Pilvissä on metaania tällöin vastaavasti 4 kg tai 9 kg.

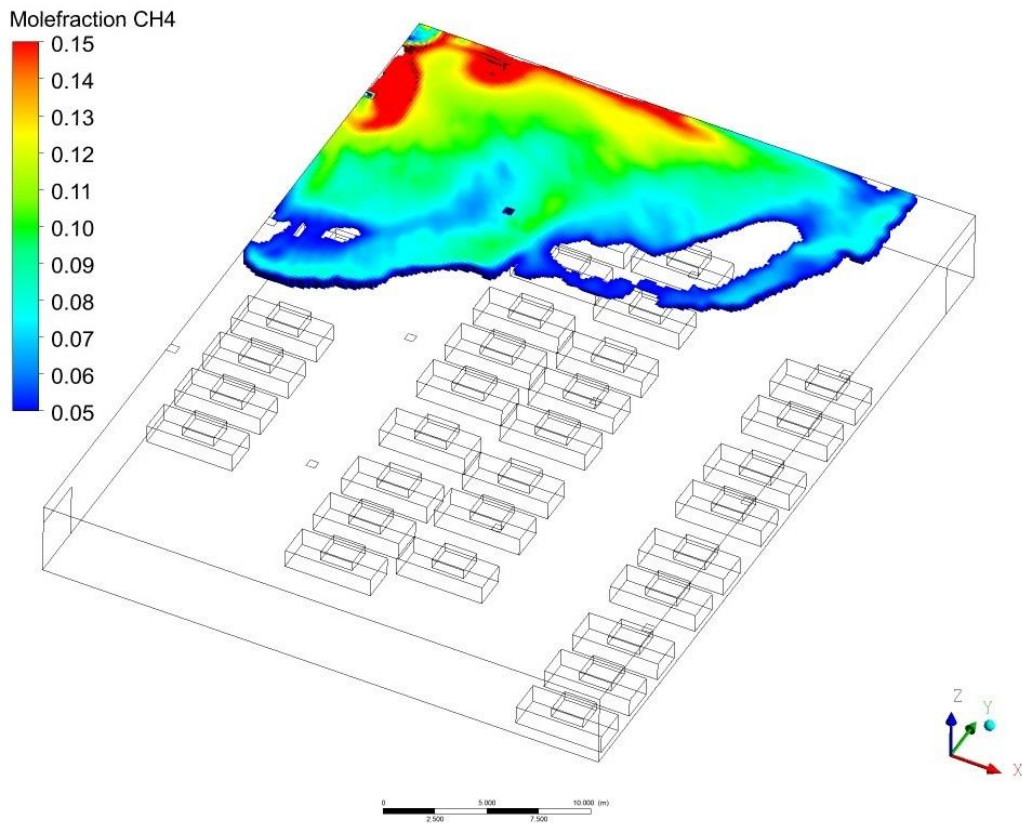
Palosimulaatioiden alkutilanteet on kerätty taulukkoon 8. Kaasupilvien muoto on havainnollistettu tasa-arvopintojen avulla kuvissa 25 ja 26. Pinnat on väritetty metaanipitoisuuden perusteella.

Taulukko 8. Syttymishetki ja halliin muodostunut kaasupilvi.

Alkuolosuhteet	7,5 kg säiliö	19 kg säiliö
Aikaa kulunut vuodon alkamisesta (s)	25	38
Syntyvän pilven maksimikoko (m ³)	~ 93	~ 177
Metaanin määrä kaasupilvessä (kg)	~ 4	~ 9



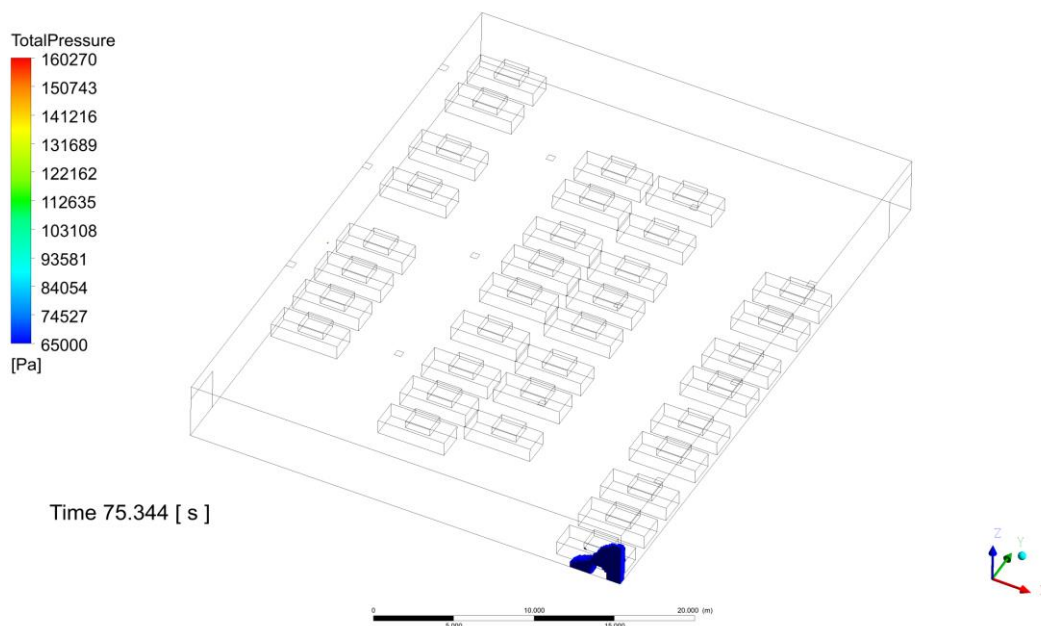
Kuva 25. Kaasupilvi syttymishetkellä 7,5 kg vuototapauksessa.



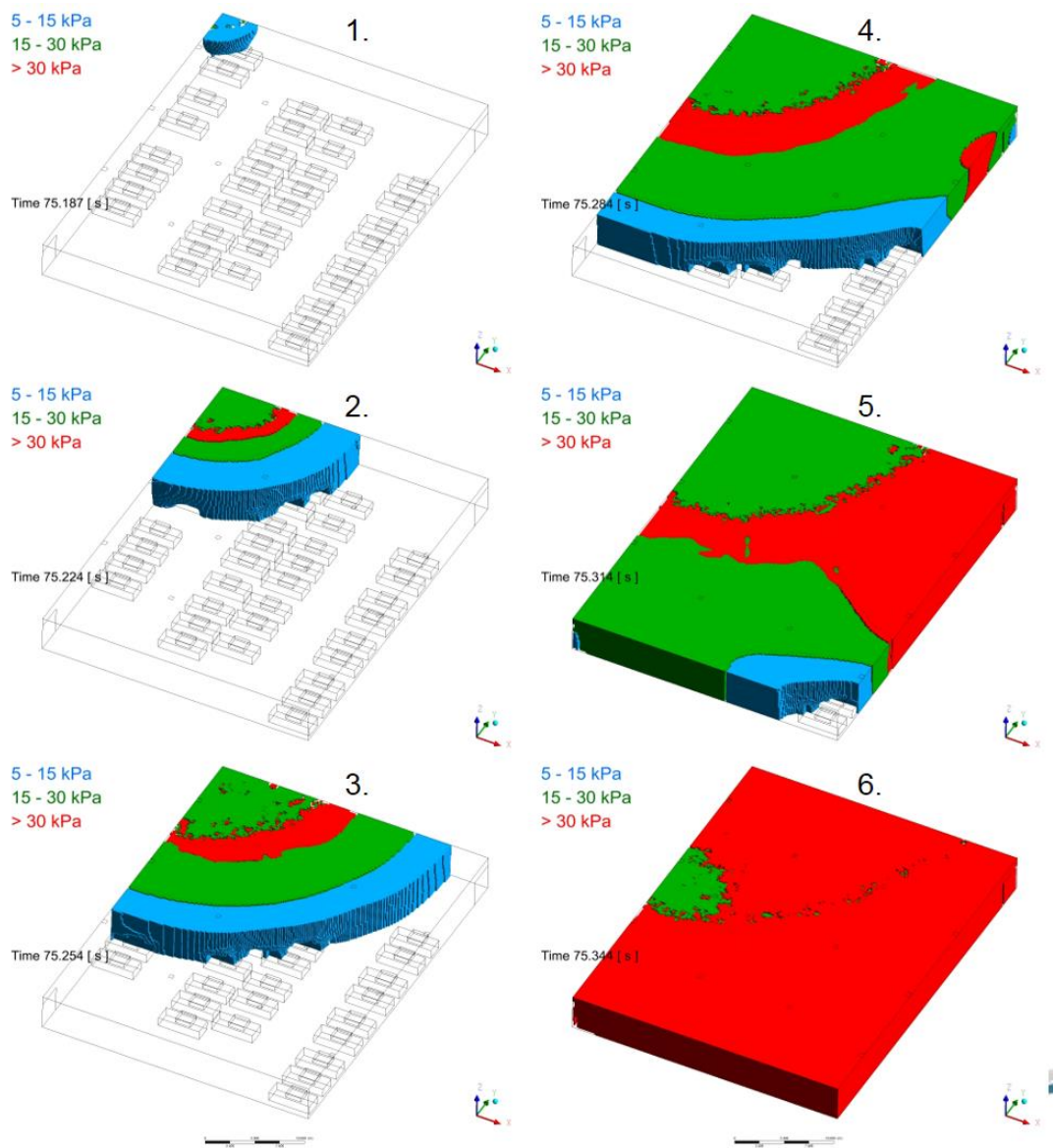
Kuva 26. Kaasupilvi syttymishetkellä 19 kg vuototapauksessa.

5.5 7,5 kg vuodon palaminen ja paineennousu

Huippuyliaine on korkeimmillaan 0,65 bar ja tämä alue sijaitsee syttymispisteen vastaisessa nurkassa (ks. kuva 27). Pysäköintihallin keskimääräinen huippuyliaine on 0,39 bar. Kuvassa 28 on esitetty paineaallon etenemistä kokonaispaineen avulla painetasoilla 0,05-0,15 bar (5–15 kPa), 0,15–0,4 bar (15–40 kPa) ja yli 0,3 bar (30 kPa).



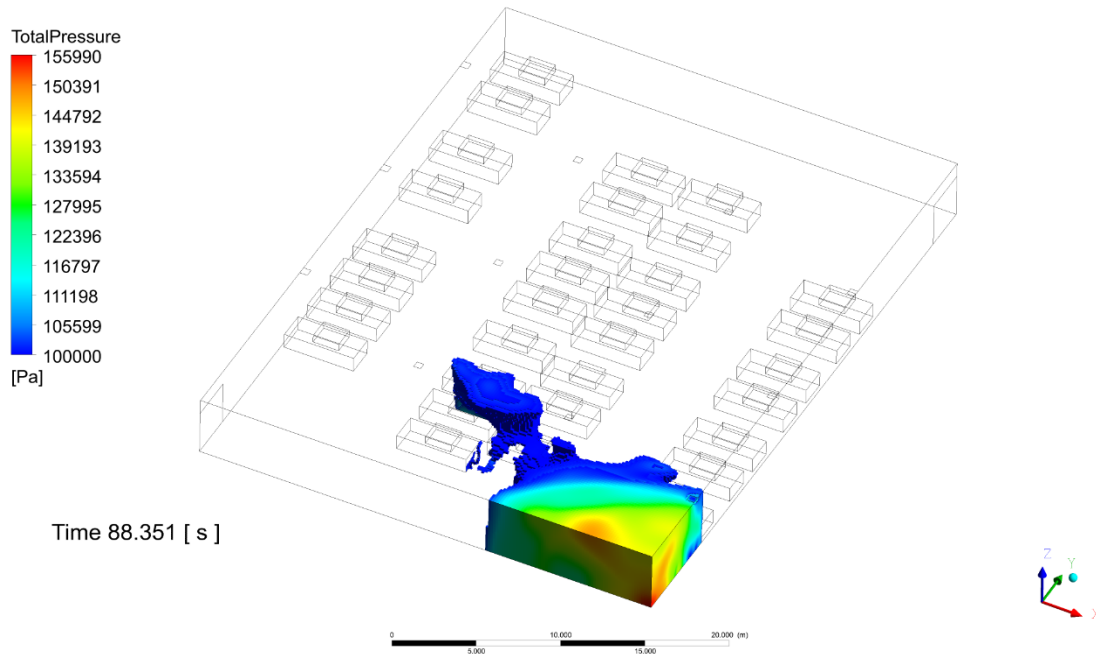
Kuva 27. Alue, johon kohdistuu suurin kokonaispaine 7,5 kg vuodon palossa.



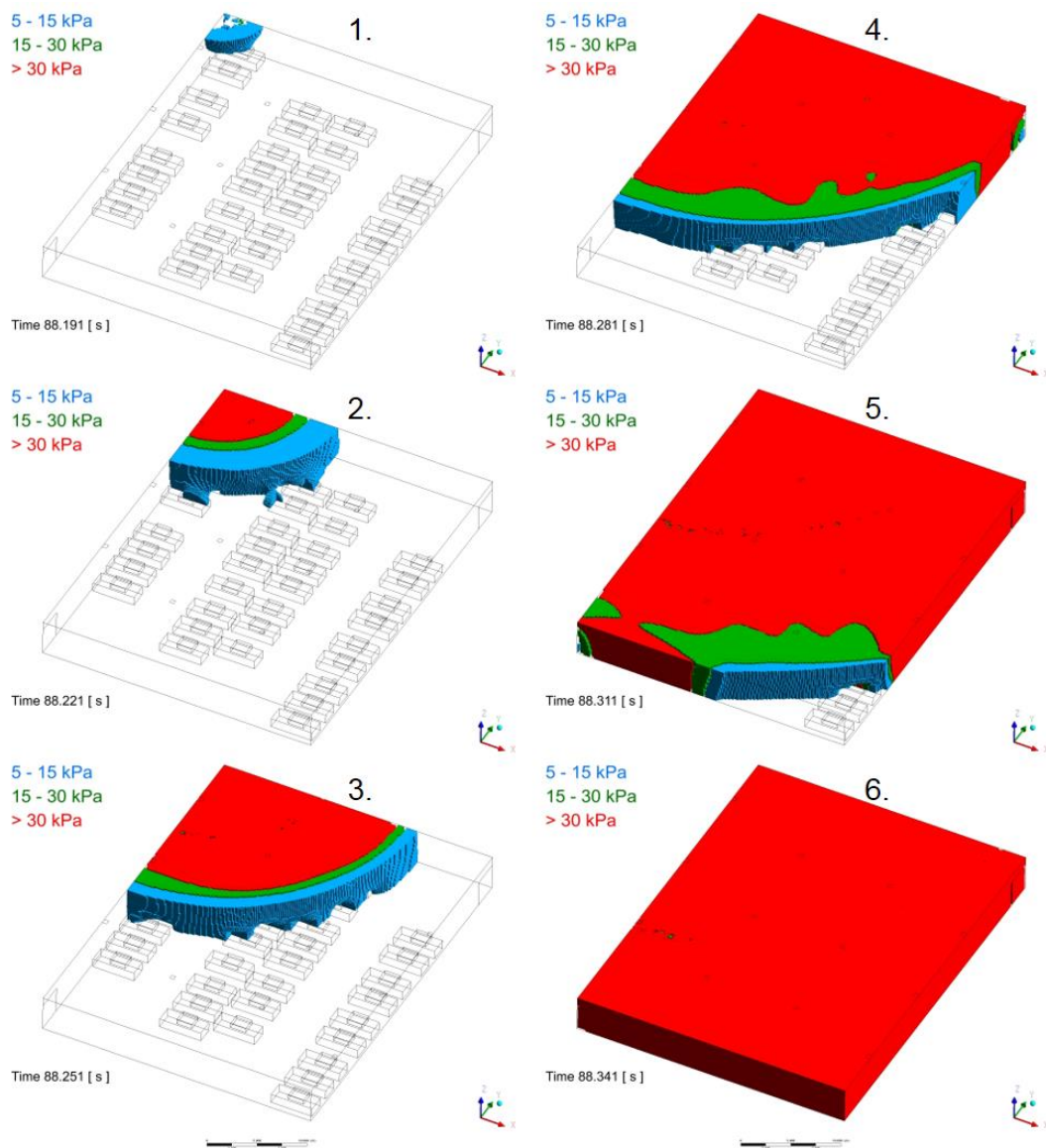
Kuva 28. Paineaallon eteneminen 7,5 kg vuodon palaessa.

5.6 19 kg vuodon palaminen

Huippuylipaine kohoaa korkeimmillaan 1,5 bar arvoon. Korkein paine esiintyy syttymispisteen vastakkaisessa nurkassa (ks. kuva 29). Pysäköintihallin keskimääräinen huippuylipaine on 0,66 bar. Kuvassa 30 on esitetty paineaallon etenemistä yhden millisekunnin aikana kokonaispaineen avulla eri painetasoilla, kun vuotava säiliö sisältää alkutilassa 19 kg kaasua.



Kuva 29. Painetasot suurimman paineen nousun alueella 19 kg vuodon palossa.



Kuva 30. Paineaallon eteneminen 19 kg vuodon palaessa.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä työssä on tutkittu pysäköintihallin kaasuvuotoa kahdessa eri skenaariossa, joista toisessa on käsitelty tyypillisen (7,5 kg) kaasusäiliön vuotoa ja toisessa tapauksessa suurimman mahdollisen säiliön (19 kg) vuotoa. Lähtökohdana on tilanne, jossa pysäköintihalli on normaalisti tuuletettu.

Kaasu kulkeutuu välittömästi vuotokohdasta kattoon ja leviää kattoa myöden laimentuen hallin ilmaan. Katossa olevat ilmanpoistoaukot imevät kaasun melko tehokkaasti pois hallista: 7,5 kg säiliön vuoto muuttuu vaarattomaksi alle minuutissa ja 19 kg säiliö vastaavasti noin kahdessa minuutissa ilmanvaihdon ansiosta.

Syttymistilannetta tarkasteltiin käyttäen lähtökohdana suurinta kaasutilavuutta, joka hetkellisesti saatutetaan säiliön purkautuessa halliin, kun samalla osa kaasusta poistuu ilmanvaihdon kautta. Syttävässä pilvessä on metaania enimmillään pienemmässä vuodossa noin 4 kg ja suuremmassa noin 9 kg. Kaasun syttyminen saa kummassakin tapauksessa aikaan voimakkaan paineaallon. Suurin paine muodostuu tässä tapauksessa syttymis- ja vuotopisteen vastakkaiseen nurkkaan. Suurin huip-puylipaine on 7,5 kg vuodossa 0,65 bar ja suuremmalla säiliöllä 1,5 bar.

Syttymistapahtumaa voidaan pitää hyvin epätodennäköisenä. Mikäli syttymä kuitenkin tapahtuisi, siitä muodostuisi paineaalto, joka aiheuttaisi laskennan mukaan merkittäviä vaurioita ympäröiviin rakentei-

siin sekä samassa tilassa oleskeleville ihmisille. Laskelmat on tässä suoritettu metaanille, mutta voidaan arvioida, että tulokset olisivat vastaavanlaisia myös höyrystyneelle bensiinille. On jopa mahdollista, että mikäli poistoaukot ovat katossa, bensiinihöyryt eivät poistu kuten metaani, jolloin syttyvä pilvi on isompi ja viipyy tilassa pidempään. Tilan alaosassa oleva pilvi altistuu myös syttymälähteille eri tavalla kuin katossa oleva pilvi.

On syytä huomioida, että tämä simuloitu parkkihalli on verrattain pieni. Valinta on tehty sekä laskenta-teknisistä syistä että selvittämään, millaisia vaikutuksia maanalaisessa tai suljetussa tilassa ylipäättään voi ilmetä. Laskennassa on oletettu ilman täydellinen sekoittuminen tilassa ja ilmanvaihdon suuruuden määrääntyminen koko ilmatilavuuden vaihtoon tiettyssä ajassa. Näin ollen hallin koko ei vaikuta kaasun ulostuuletusaikaan. Todellisuudessa ilmanvaihdon geometria tilassa kuitenkin vaikuttaa siten, että ilma ei ole täydellisesti sekoittunut, jolloin tuloksia ei voida yleistää koskemaan kaikkia pysäköintitiloja.

Pysäköintihallin koko vaikuttaa kuitenkin huippuylipaineen suuruuteen. Tämä johtuu siitä, että samankokoisen kaasuvuodon aiheuttama suurin syttyvän kaasun pilvi on pienessä tilassa suurempi suhteessa ilmamäärään ja näin ollen pienessä tilassa painevaikutus on isompi kuin suuressa tilassa.⁹¹

Tulokset pätevät suuntaa-antavasti mille tahansa palavalle kaasulle, myös höyrystyneelle bensiinille.

91 Lautkaski, R. (1997). Understanding vented gas explosions. VTT tiedotteita 1812.

gaia 



VALTIONEUVOSTON
SELVITYS- JA TUTKIMUSTOIMINTA

tietokayttoon.fi

ISSN 2342-6799 (pdf)

ISBN 978-952-287-513-6 (pdf)

