



# Biokaasun, nesteytetyn biometaanin ja vedyn vuotojen, sekä paine- ja lämpösäteilyvaikutusten mallinnusraportti

Ci Abf I Fin Devco Oy

Tekijä:  
Saku Kimpimäki  
+358 50 599 3783  
saku.kimpimaki@wega.fi

Tarkastaja:  
Tino Waldén  
+358 50 470 6670  
tino.walden@wega.fi

## Sisällysluettelo

1	Vuotojen mallinnus.....	3
1.1	Käytetty ohjelmisto .....	3
1.2	Määritelmät.....	3
1.2.1	Biokaasun ja LBG:n leviäminen ilmaan.....	3
1.2.2	Vetykaasun leviäminen ilmaan.....	4
1.2.3	Lämpösäteily .....	4
1.2.4	Painevaikutukset.....	4
1.2.5	Terveysvaikutukset.....	5
1.2.6	OVA-ohjeet.....	5
1.3	Sääolosuhteet.....	6
2	Nesteytetyn biometaanin vuotoskenaariot.....	6
2.1	Säiliövuoto suihkuna.....	7
2.2	Rajattu lammikkopalo .....	8
2.3	Letkuvuoto.....	9
3	Biokaasuvuoto .....	10
3.1	Biokaasuvaraston vuoto suihkuna .....	11
4	Vetyvuoto.....	11
5	Tulokset.....	12
6	Viitteet.....	17

## Johdanto

CI ABF I Fin Devco Oy suunnittelee nesteytetyn bio- ja e-metaanin tuotantolaitosta Nivalaan. Laitoksella tuotetaan nesteytettyä biometaania anaerobisesti mädättämällä maatalouden sivuvirtoja ja jätteitä, kuten lantoja ja peltobiomassoja. Lisäksi tarkastellaan mahdollisuutta tuottaa e-metaania biokaasun tuotannossa syntyvän raakakaasun sisältämästä hiilidioksidista. E-metaani tuotetaan yhdistämällä elektrolyysillä tuotettu vety sekä raakakaasun jalostuksessa talteen otettu hiilidioksidi erillisessä metanointiprosessissa. Nesteytetty metaani kuljetetaan laitokselta rekkakuljetuksilla loppukäyttäjälle.

Tässä raportissa tarkastellaan kemikaaleista aiheutuvaa onnettomuusvaaraa biometaanin ja vedyn tuotantolaitoksella (lämpösäteily, paineaalto, terveysvaikutukset, ympäristövaikutukset). Muita mahdollisia haittavaikutuksia ei tarkastella tässä raportissa. Työ tehtiin toimeksiantona CI ABF I Fin Devcolle YVA-menettelyn selostusvaiheen tarpeisiin.

Raportissa esitetään laskelmat onnettomuustilanteissa aiheutuvista terveys-, lämpösäteily- ja painevaikutuksista. Onnettomuusskenaariot on valittu ja mallinnettu Tukesin tuotantolaitosten sijoitusohjeen ja Tukesin turvallisuusselvitysohjeen mukaisesti. Tässä mallinnuksessa on mallinnettu kolme eri vuotavaa kemikaalia: raaka biokaasu, nesteytetty biometaani sekä vety.

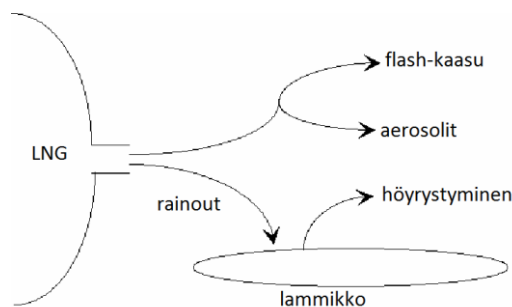
Muutoshistoria:

Versio	Päivämäärä	Kuvaus/muutokset
1.0	9.7.2024	Ensimmäinen versio YVA-selostuksen liitteeksi

## 1 Vuotojen mallinnus

Biokaasu on mädätysreaktoreissa tuotettua raakakaasua, joka sisältää noin 55–65 % metaania ja 35–45 % hiilidioksidia sekä pieniä määriä muita epäpuhtauksia. Biokaasua varastoidaan tuotantolaitoksella mädätysreaktoreissa, raakakaasuputkistoissa sekä raakakaasukelloissa.

Nesteytetty biometaani (liquefied biomethane, LBG) vastaa ominaisuuksiltaan nesteytetyn maakaasun (liquefied natural gas, LNG) ominaisuuksia. LNG purkautuu säiliön yhteestä tai täyttöletkusta kaksifaasipurkauksena, eli reiän päässä oleva aine jakautuu flash-höyryksi ja pisaroiksi, jotka kulkeutuvat suihkun mukana (aerosolit) sekä nesteeksi, joka kerrostuu maahan (rainout). Aerosolit eivät kerrostu maahan vaan siirtyvät höyrypilveen, koska ne sisältävät vain ilman kanssa muodostuneita pisaroita. Rainout sisältää nestettä, joka kerrostuu heti reiän jälkeen sekä kauempana nestepisaroiden tippuessa alas.



Kuva 1. Kaksifaasipurkaus, ilmiön kuvaus (SFS-EN 13645)

Vety on ilmaa kevyempi, erittäin helposti syttyvä, väritön ja hajuton kaasu. E-metaanin tuotannossa käytetään laitosalueella vesielektrolyysillä tuotettua vetyä. Vetyä ei varastoida merkittäviä määriä. Ilmaa kevyempänä kaasuna vety nousee vuototilanteissa ylöspäin.

### 1.1 Käytetty ohjelmisto

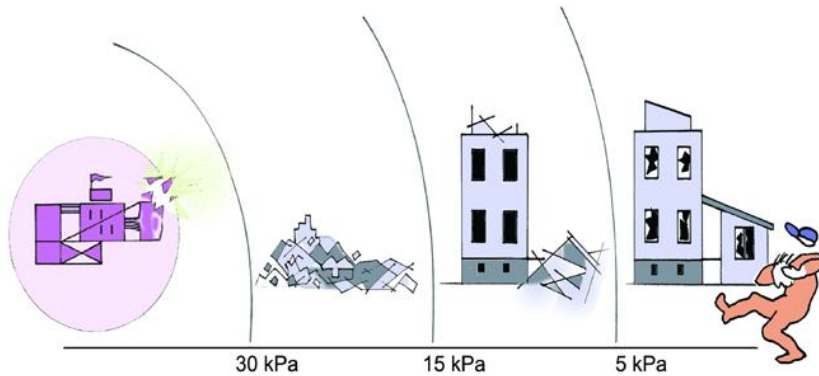
Laskelmat suoritettiin CAMEO software ohjelmistopakettin ALOHA ohjelmistolla, joka käyttää CAMEO tietokantaa kemikaalien ainearvoihin. CAMEO software ohjelmistopaketti on EPA:n (United States Environmental Protection Agency) ja NOAA:n (National Oceanic and Atmospheric Administration) kemikaalionnettomuuksien mallintamiseen ja varautumisiin kehittämä kokonaisuus. Se sisältää kemikaalien datapankin sekä ALOHA-ohjelmiston, jolla voidaan mallintaa vaarallisten kemikaalien leviämistä huomioiden kemikaalien ominaisuudet sekä sääolosuhteet. Tutkittavia skenaarioita voivat olla vahinkotilanteissa ja vuodoissa toksisten kaasupilvien leviäminen, tulipalot ja räjähdykset. Lisätietoa ohjelmistoista löytyy EPA:n internetsivuilta. ALOHA ohjelmistoon sisältyy kaksi dispersiomallia, "Heavy gas" ja "Gaussian dispersion". Aerosolipurkaukset mallinnettiin Heavy gas -mallilla, koska aerosolipurkaukset käyttäytyvät raskaan kaasun tavoin.

### 1.2 Määritelmät

#### 1.2.1 Biokaasun ja LBG:n leviäminen ilmaan

Biokaasu (metaani) on ilmaa raskaampaa ja leviää maata pitkin, kun sen lämpötila on alle -110 °C. Metaanin ja ilman palavan seoksen syttymisrajoina on käytetty mallinnuksessa





Kuva 3. Painevaikutukset (TUKES, 2015)

### 1.2.5 Terveysvaikutukset

Metaanipäästön aiheuttaman terveysriskin arvioitiin metaanin PAC / TEEL arvojen perusteella. Suomessa ei ole omia kansallisia raja-arvoja, joten näihin tilanteisiin sovelletaan Suomessa yleensä yhdysvaltalaisia akuutin altistumisen raja-arvoja (PAC-arvoja), joita ovat AEGL-, ERPG- ja TEEL-arvot. Metaanin ja vedyn akuutin altistumisen TEEL raja-arvot on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Metaanin ja vedyn akuutin altistumisen TEEL raja-arvot.

Raja-arvot	Kuvaus
PAC 1 / 65 000 ppm / TEEL 1 60 min	Huomattavaa haittaa, ärsytystä tai tiettyjä sellaisia haittavaikutuksia, jotka eivät aiheuta oireita ja joita ei voi todeta aisteilla. Vaikutukset lakkaavat altistumisen jälkeen eivätkä ole palautumattomia.
PAC 2 / 230 000 ppm / TEEL 2 60 min	Pysyvää tai muuten vakavaa ja pitkäaikaista terveyshaittaa tai oireita, jotka vähentävät suojautumisiskykyä altistumiselta.
PAC 3 / 400 000 ppm / TEEL 3 60 min	Hengenvaarallista terveyshaittaa tai kuolema.

TEEL (Temporary Emergency Exposure Limit) -arvot ovat yhdysvaltalaisen SCAPA:n (Subcommittee on Consequence Assessment and Protective Actions) määrittelemiä. Metaanin OVA-ohjeessa käytetään samoja TEEL raja-arvoja.

### 1.2.6 OVA-ohjeet

OVA ohjeissa annetaan toiminta ohjeita onnettomuustapauksissa. Nestemäisen metaanin säiliöiden yhteydessä olevan pidempiaikaisen palon yhteydessä suositellaan varoalueeksi

200 m. Yli 2 kg/s vuotoilanteessa eristysalue on 50 m kaikkiin suuntiin ja 150 m tuulen alapuolella. Vetyliekin kosketus sulattaa useat metallit, mikä voi aiheuttaa vetysäiliön tai -pullon repeämisen. Vetypalojen yhteydessä vetypullojen ympäristö eristetään 100 m säteellä ja säiliön 200 m säteellä.

### 1.3 Sääolosuhteet

Vuototapaukset mallinnetaan kahdessa eri sääolosuhteessa Tukes-ohjeen mukaisesti; stabiilissa ilmanalassa (F) tuulennopeudella 2 m/s ja neutraalissa ilmanalassa (D) tuulennopeudella 5 m/s. Pasquillin stabiilisuusluokista A – F, stabiilisuusluokka F on kaikista stabiilein. Turbulenssi lisää kaasun sekoittumista ilmaan ja pienentää kaasun pitoisuutta. Syttymiskelpoinen kaasuseos leviää siten kauemmas vuotokohdasta stabiiliin ilman vallitessa.

ALOHA:n asetuksissa mallinnuksen ympäristöksi valitaan urbaani/metsä. Sääolosuhteina mallinnuksissa on käytetty seuraavia taulukon 2 oletuksia:

Taulukko 2. Mallinnuksessa käytetyt sääolosuhteet.

Sääolosuhteet		
Tuulen nopeus	2 m/s	5 m/s
Pilvisuus	puolipilvistä	puolipilvistä
Lämpötila	10 °C	10 °C
Stabiilisuusluokka	F	D
Suhteellinen kosteus	50 %	50 %

## 2 Nesteytetyn biometaanin vuotoskenaariot

Nesteytetyn biometaanin vuotomallinnuksissa käytetään kemikaalina puhdasta metaania, jonka parametrit löytyvät ALOHA:n kemikaaliluettelosta. LBG:n metaanipitoisuus on yleensä yli 95 %, eli vuodon mallintaminen metaanilla soveltuu hyvin. Kyseiset parametrit on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. ALOHAN:n parametrit metaanille

Metaani	
CAS:	74-82-8
Moolimassa:	16,04 g/mol
Kiehumispiste ilmanpaineessa:	-161,5 °C
Alempi syttymisraja (LEL):	5,0 %
Ylempi syttymisraja (UEL):	15,0 %
Itsesyttymislämpötila	550 °C

LBG purkautuu kaksifaasipurkauksen (katso kuva 1), jolloin osa pisaroista haihtuu välittömästi ja osa tippuu maahan. ALOHA:lla ei ole mahdollista mallintaa kaksifaasipurkauksia, joten LBG-vuodon haihtuminen arvioidaan seuraaville kahdelle rajatapauksille:

- Säiliövuoto suihkuna, kaikki pisarat haihtuvat (kohta 2.1)

- Säiliövuoto lammikkoon, kaikki pisarat tippuvat maahan ja vuotavat lammikkoon (kohta 2.2)

Todelliset vaara-alueet jäisivät näille rajatapauksille saatujen vaara-alueiden väliin.

## 2.1 Säiliövuoto suihkuna

Nesteytetyn metaanin varasto koostuu kahdesta kaksoisvaippaisesta, tyhjiöeristetystä pystysäiliöstä, joiden molempien bruttotilavuus on 150 m<sup>3</sup> ja nettotilavuus (95 %) 142,5 m<sup>3</sup>. Yhteistilavuus on täten 300 m<sup>3</sup> ja nettotilavuus (95 %) 285 m<sup>3</sup>. Mallinnuksessa säiliön käyttöpaine on 2,0 bar(g). Säiliöiden suurin sallittu käyttöpaine (MAWP) on yleisesti noin 10 bar(g) tai suurempi, mutta nesteytyslaitokselta suoraan säiliöihin tuleva kaasu on kylmää ja varastointiaika on lyhyt, jolloin paine ja lämpötila pysyvät alhaisina. Mallinnuksessa käytetyt säiliön mitat on esitetty taulukossa 4.

Tukes-ohjeen mukainen vuotoskenaario on suurimman säiliöyhteen tai venttiilin vuoto. Käytetyn säiliön tapauksessa suurin säiliöyhde on LBG:n täyttö- tai purkuyhde, jotka ovat kooltaan DN65, eli sisähalkaisijaltaan noin 65 mm. Vuodon oletetaan tapahtuvan vain yhdestä säiliöstä kerrallaan. Kahden säiliön samanaikainen vuoto on paitsi epätodennäköistä, myös mahdollisen vuodon sattuessa vuoto havaittaisiin vuoto- ja kaasuhälyttimillä, jotka keskeyttäisivät LBG-prosessin sulkien muiden säiliöiden automaattiset sulkuventtiilit.

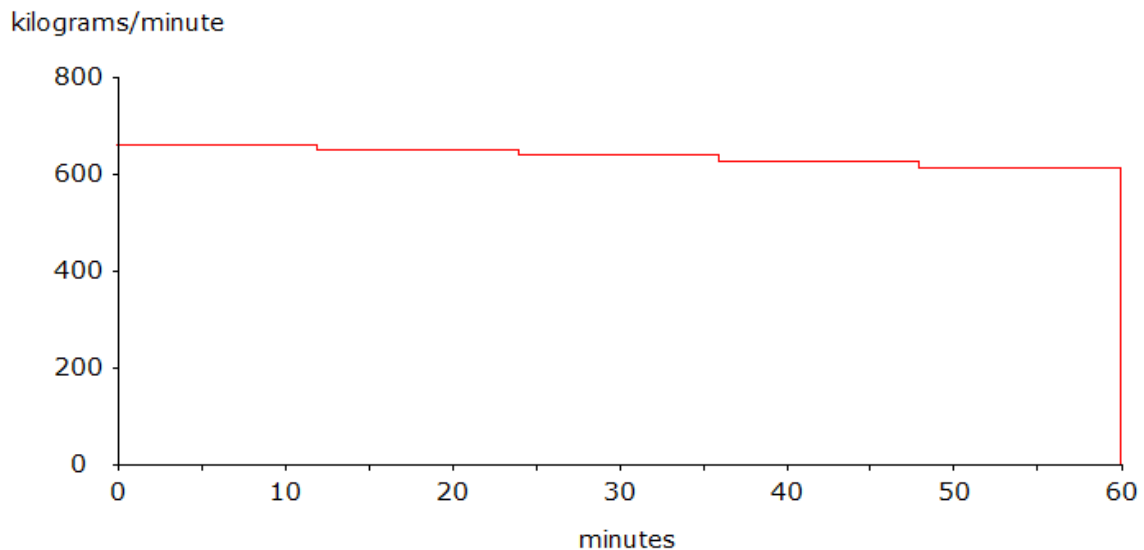
Taulukko 4. Mallinnuksessa käytetyt säiliön ominaisuudet

Säiliön tiedot	
Bruttotilavuus:	150 m <sup>3</sup>
Nettotilavuus:	142,5 m <sup>3</sup>
Maksimipaine:	10 bar(g)
Käyttöpaine:	2,0 bar(g)
Vuotoyhde:	DN65
Pituus (sisäsäiliö, arvio):	20,0 m
Halkaisija (sisäsäiliö, arvio):	3,09 m

Vuototilanteessa säiliöpaineen oletetaan olevan käyttöpaineessa 2,0 bar(g), ja yksinkertaisuuden vuoksi myös pysyvän samana vuodon aikana. Oletus, että paine pysyy käyttöpaineessa, voidaan pitää konservatiivisena arviona vuotomäärän ja kaasun leviämisen osalta.

2,0 bar(g) käyttöpaine tarkoittaa, että saturoituneen LBG:n lämpötila säiliössä on noin -146 °C. Kun ALOHA:ssa valitaan LBG:n lämpötilaksi -146 °C, saadaan säiliöpaineen vaikutus huomioitua, ja piirrettyä vuodon massavirta ajan funktiona. Vuodon suuruus on maksimissaan 659 kg/min. Vuodon edetessä vuotonopeus laskee, kun säiliössä olevan nestepatsaan korkeus pienenee, eli hydrostaattinen paine laskee (kuva 4).





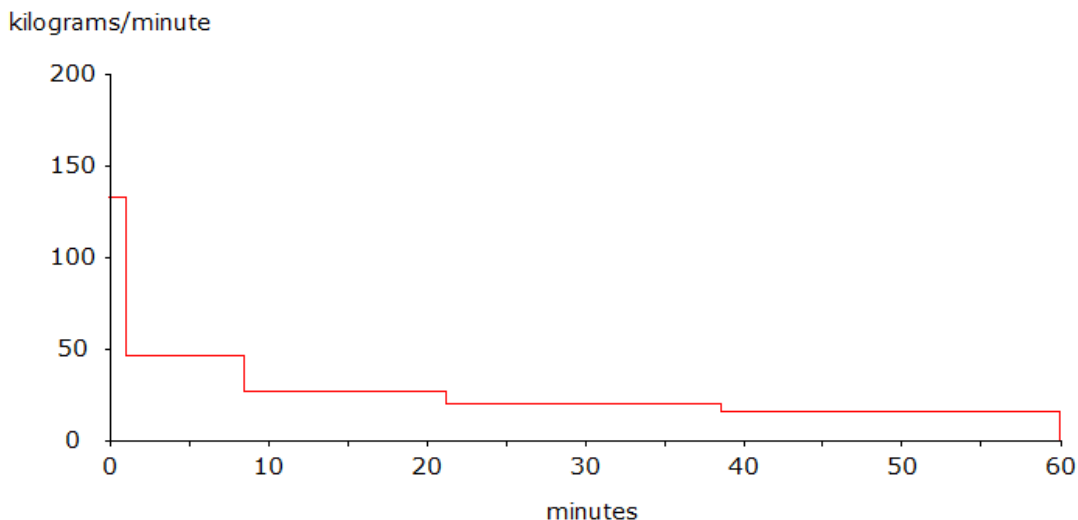
Kuva 4. Säiliövuodon vuoto nopeus ajan funktiona säilöpaineen ollessa 2,0 bar(g).

## 2.2 Rajattu lammikkopalo

Kaasupilven- ja lammikkopalon vakavuutta voidaan pienentää ohjaamalla vuodot vuotoaltaaseen, jolloin vuodossa muodostuvan lammikon pinta-ala pienenee. Pienempi pinta-ala tarkoittaa hitaampaa höyrystymisnopeutta, jolloin muodostuva kaasupilvi jää pienemmäksi. Vastaavasti pienemmän pinta-alan lammikko tarkoittaa myös pienempää lämpösäteilyä mahdollisessa lammikkopalossa. Tässä luvussa havainnollistetaan vuodon rajaamisen vaikutusta kaasun leviämiseen, lämpösäteilyvaikutuksiin ja painevaikutuksiin syttymistilanteissa.

Vuotoallas on syytä sijoittaa LBG-aseman viereen, jotta vaikutukset saadaan rajattua terminaali-alueelle. Jos lammikon pinta-ala rajataan vuotoaltaalla 12 neliömetriin (esimerkiksi: 3 m x 4 m), lämpösäteilyvaikutukset pienenevät merkittävästi.

Vuodon kestäessä 10 minuuttia, altaaseen vuotaa noin 6 590 kg LBG:tä. Pinta-alaltaan 12 neliömetrin lammikosta haihtuvan maakaasun massavirta on alussa 133 kg/min, jonka jälkeen se hidastuu, kun ympäristön lämpötila laskee. LBG:n höyrystymisnopeus on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. LBG:n höyrystymisnopeus vuotoaltaasta, jonka pinta-ala on 12 m<sup>2</sup>.

Onnettomuusskenaariossa säiliövuoto suihkuna (kohta 2.1) vuotaa maakaasua nopeudella 659 kg/min, joten vuotoaltaasta haihtuva kaasu leviää huomattavasti pienemmälle alueelle.

Vuodon rajaaminen pienentää lämpösäteilyvaikutuksia merkittävästi. Mallinnettu rajoitetun lammikkopalon lämpösäteilyvaikutus ja vuotoaltaan mitoitus perustuu äärimmäisen epätodennäköiseen skenaarioon, jossa LBG-putki katkeaa säiliön tyvessä ennen sulkuventtiilejä säiliön purkulinjassa. Skenaario voisi toteutua käytännössä vain, jos LBG-putki katkaistaisiin ilkevaltaisesti. Putkirikot muualla prosessissa eivät aiheuta vastaavan suuruisia vuotoja toimilaitteventtiilien ja hätäpysäytysjärjestelmän toimiessa.

## 2.3 Letkuvuoto

Letkuvuoto voi tapahtua säiliöauton täytön yhteydessä. Lastausaseman pumpun tuotto oletetaan olevan 600 l/min. Mallinnuksessa vuoto arvioidaan tapahtuvan kokonaan rikkoutuneesta letkusta ja olevan koko pumpun tuoton suuruinen. Lastauslinjan vastapaineen katoamista ja sen vaikutusta pumpun tuottoon ei huomioida.

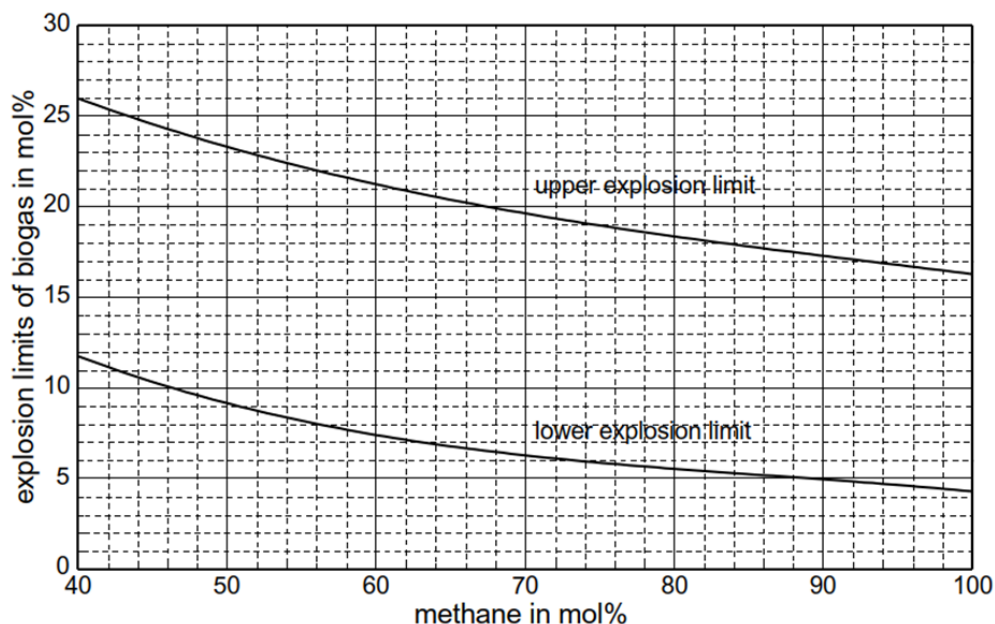
LBG:tä lastataan säiliöautoihin nesteytyslaitoksen LBG-varastosäilöstä. LBG varastoidaan kiehumispisteessä mahdollisimman lähellä normaali-ilmanpainetta, jolloin LBG:n lämpötila on noin -161,5 °C. Varastosäiliössä LBG lämpenee jonkun verran ja lastattavan LBG:n lämpötila oletetaan olevan muutama astetta korkeampi ja 2 bar(g) paineessa. LBG:n tiheys 2 bar(g) paineessa on noin 400 kg/m<sup>3</sup>, joten massavirta on noin 240 kg/min. LBG purkautuu letkun päästä kaksifaasipurkauksena.

Mallinnettu letkuvuoto on voimakkuudeltaan selvästi heikompi kuin aiemmin mallinnettu säiliövuoto, minkä vuoksi myös siitä aiheutuvat vaikutukset rajoittuvat pienemmälle alueelle. Tästä syystä letkuvuodosta aiheutuvia vaikutuksia ei mallinneta tässä tarkemmin.

### 3 Biokaasuvuoto

Mallinnuksissa käytetään biokaasun sijasta puhdasta metaania, jonka parametrit löytyvät ALOHA:n kemikaaliluettelosta. Biokaasun metaanipitoisuus on tyypillisesti 55–65 %, ja loppuosa on pääosin hiilidioksidia. Koska biokaasun tiheys on noin 1,05–1,3 kg/m<sup>3</sup>, käytetään mallinnuksessa -100 °C metaania, jonka tiheys normaali-ilmanpaineessa on noin 1,125 kg/m<sup>3</sup> ja tällöin kaasu käyttäytyy vuototapauksessa samankaltaisesti. Mallinnukset on tehty Gaussian dispersion mallinnuksina. Heavy gas -mallinnuksella vaikutusalueet jäävät pienemmiksi, joten mallinnuksen vaikutusalueiden voidaan ajatella olevan konservatiivisia arvioita onnettomuusskenaarioiden seurauksista.

Kuten todettua biokaasun metaanipitoisuus on noin 55–65 %, sen syttymisrajat eivät ole samat kuin metaanilla. Tutkimuksen Schroeder et al. perusteella (Kuva 6), biokaasun, jonka metaanipitoisuus on 65 %, alempi syttymisraja on hieman alle 7 %mol. Mooliprosentteina määriteltynä syttymisraja ovat hieman alhaisemmat kuin tilavuusprosentteina, joten varsin tarkka arvio saadaan, kun käytetään syttymisrajana 7 tilavuusprosenttia. Taulukossa 5 on esitetty biokaasumallinnuksessa käytetyt parametrit.



Kuva 6. Biokaasun syttymisrajat metaanipitoisuuden funktiona.

Lähde: Schroeder, Schalau, Molnarne, *Explosion Protection in Biogas and Hybrid Power Plants*, 2014

Taulukko 5. Käytetyt ALOHA:n parametrit "biokaasulle" (metaani)

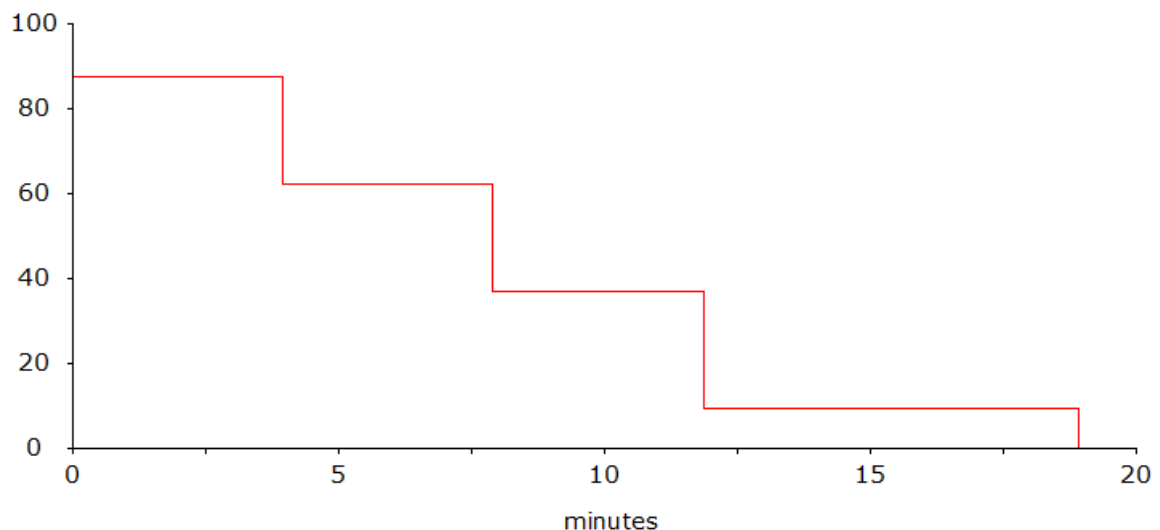
Metaani	"Biokaasu" (Metaani)
CAS:	74-82-8
Moolimassa:	16,04 g/mol
Kiehumispiste ilmanpaineessa:	-161,5 °C
Tiheys -100 °C	1,125 kg/m <sup>3</sup>
Alempi syttymisraja (LEL):	7 %
Mahdolliset paikalliset syttymät (60 %LEL):	4,2 %

### 3.1 Biokaasuvaraston vuoto suihkuna

Biokaasuvarasto koostuu neljältä tilavuudeltaan 8000 m<sup>3</sup> kaasupallosta, joiden kunkin paine on noin 10 mbar. Mallinnuksessa varasto oletetaan täydelliseksi pallon muotoiseksi säiliöksi. ALOHA:n minimipaine kaasusäiliölle on 101 mbar, joten mallinnuksen vuotoskenaario on jonkin verran todellista suurempi. Toisaalta korkeamman paineen voidaan olettaa simuloivan kaasupallon kokoon painumista vuodon aikana.

Vuototapaukseksi valitaan Tukes-ohjeen mukainen vuoto yksittäisen varaston suurimmasta yhteestä, joka on täyttö-/käyttöyhde kooltaan DN 150. Tällaisessa vuotoskenaariossa kaasua vuotaa maksimissaan 87,3 kg minuutissa ja vuoto kestää yhteensä noin 19 minuuttia. Vuodon suuruus ajan funktiona on esitetty kuvassa 7

kilograms/minute



Kuva 7. Biokaasuvuodon voimakkuus ajan funktiona

## 4 Vetyvuoto

Koska vetyä ei varastoida, valitaan vuotoskenaarioksi Tukesin tuotantolaitosten sijoitusohjeen mukaisesti yksittäisen eristettävissä olevan tuotantoyksikön vuoto. Vuotomääräksi asetetaan elektrolyysiyksikön tuotantokapasiteettia vastaava massavirta, joka kestää 30 minuutin ajan. Eristettävissä olevan elektrolyyseriyksikön kapasiteetti on n 89 kg/h. Vuodon oletetaan jatkuvan tasaisena koko vuodon keston ajan.

## 5 Tulokset

Kaasuvuotoja ja niistä aiheutuvia onnettomuustilanteita arvioitiin nesteytetyn biometaanin, biokaasun sekä vedyn osalta. Työssä mallinnettiin skenaariot onnettomuustilanteissa aiheutuvista terveys-, lämpösäteily- ja painevaikutuksista. Onnettomuusskenaariot valittiin ja mallinnettiin Tukesin tuotantolaitosten sijoitusohjeen ja Tukesin turvallisuus selvitysohjeen mukaisesti.

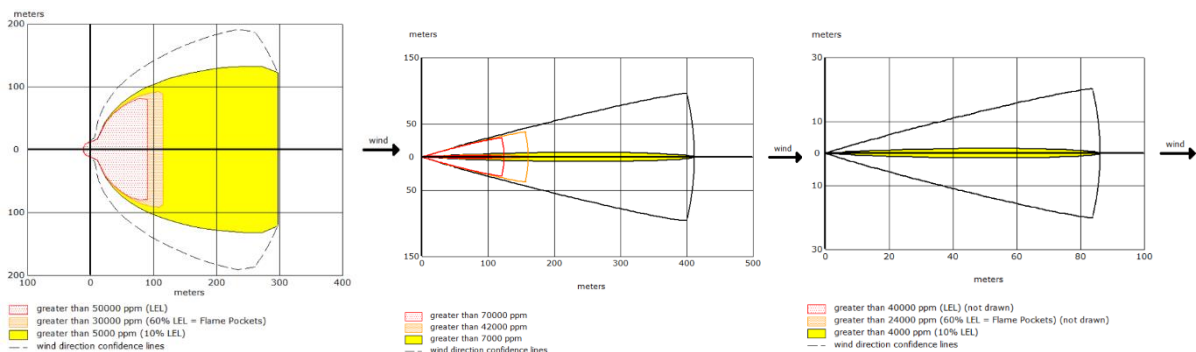
Mallinnukset ja tulokset perustuvat laitoksen esisuunnittelun mitoituksiin ja teknisiin arvoihin, ja suunnittelun edetessä ja laitevalintojen tarkentuessa mallinnukset tulee päivittää lopullisten laitteistovalintojen mukaisiksi. Nykyisellään mallinnus kuitenkin antaa kattavan kuvan onnettomuuksien aiheuttamista vaara-alueista laitosalueen sisäpuolella sekä niiden mahdollisista vaikutuksista laitosalueen ulkopuolella. Syttymiskelpoisen seoksen leviäminen

Kaikkien mallinnettujen kaasujen leviämismallinnuksen perusteella, voidaan todeta, että tuulenopeus ja stabiilisuus vaikuttavat hyvin voimakkaasti syttymiskelpoisen kaasupilven leviämiseen. Tyynellä ja vähätuulisella säällä vuotanut kaasu voi muodostaa syttymiskelpoisen ilmaseoksen huomattavasti kauempana vuotokohdasta kuin kovemalla tuulella, jolloin kaasun sekoittuminen on voimakkaampaa. Tällöin syttymiskelpoinen kaasuvuoto rajautuu etäisyydeltään huomattavasti stabiilia ilmanalaa pienemmälle, jopa puoli tai neljäsosan, alueelle.

Kaasu leviää voimakkaasti tuulen suuntaan, ja muodostaa kiilamaisen alueen, joskin nesteytetyn biometaanin vuodossa vaikutusalue on leveämpi. Nesteytetyn biometaanin säiliövuodossa syttymiskelpoinen seos voi stabiilissa ilmanalassa levitä 90 metrin etäisyydelle vuotopaikasta ja paikallisia syttymiä voi muodostua 116 metrin etäisyydellä tuulen alapuolella. Vuotoaltaasta haihtuvalla kaasulla vastaavat etäisyydet ovat 46 metriä (100 %LEL) ja 48 metriä (60 %LEL).

Biokaasuvaraston vuodossa syttymiskelpoinen alue yltyä kauemmas, 124 metrin etäisyydelle tuulen alapuolella, mutta kuten kuvasta 8 nähdään, alue on hyvin kapea. 60 %LEL alue ulottuu jopa 161 metrin etäisyydelle.

Vedyn vuotoskenaariossa syttymiskelpoinen kaasuseos jää 27 metrin etäisyydelle ja 60 %LEL aluekin 34 metriin. Kaasupilven muoto on samantyyppinen kuin biokaasun tapauksessa.



Kuva 8. Kaasupilven leviämisen muoto 2 m/s tuulella stabiilissa ilmanalassa. Vasemmalla LBG-säiliövuoto, keskellä biokaasuvaraston vuoto ja oikealla vetyputkiston vuoto.

Taulukko 6. Syttymiskelpoisen kaasupilven leviäminen eri vuotoskenaarioissa.

Syttymiskelpoisen seoksen leviäminen			Kaasun pitoisuus		
Skenaario	Sääolosuhde	Vuoto	100 %LEL	60 %LEL	10 %LEL
<b>7.1 LBG-säiliövuoto suihkuna</b>	2 m/s (F)	DN65	90 m	116 m	298 m
<b>7.2 LBG-säiliövuoto suihkuna</b>	5 m/s (D)	DN65	46 m	63 m	197 m
<b>7.9 Rajattu LBG-lammikko</b>	2 m/s (F)	12 m <sup>2</sup> vuotoallas	29 m	48 m	178 m
<b>7.10 Rajattu LBG-lammikko</b>	5 m/s (D)	12 m <sup>2</sup> vuotoallas	31 m	45 m	133 m
<b>7.15 Biokaasuvuoto</b>	2 m/s (F)	DN150	124 m	161 m	412 m
<b>7.16 Biokaasuvuoto</b>	5 m/s (D)	DN150	28 m	37 m	92 m
<b>7.23 Vetyputken vuoto</b>	2 m/s (F)	Elektrolyyseri	27 m	34 m	86 m
<b>7.24 Vetyputken vuoto</b>	5 m/s (D)	Elektrolyyseri	< 10 m	11 m	28 m

## Tulipalon lämpösäteilyvaikutukset

Siinä missä stabiili sää ja alhainen tuulennopeus saavat kaasun leviämään kauemmas, syttyessään kaasuvuodon lämpösäteilyvaikutus ulottuu kauemmas kovemmalla tuulella, palon liekin kallistumisen vuoksi.

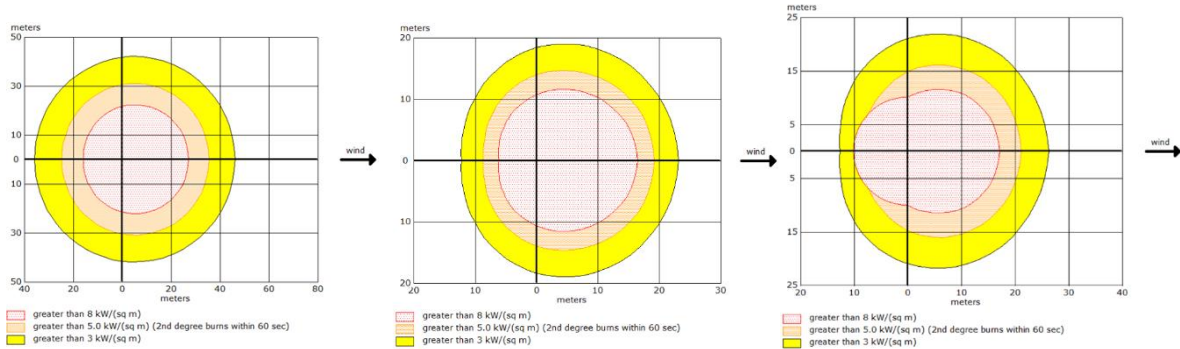
Jos vuotanut nesteytetty biometaani syttyy, se palaa joko suihkupalona tai lammikkopalona. Suihkupalon tapauksessa ja tuulennopeudella 5 m/s muodostuu 8 kW/m<sup>2</sup> lämpösäteilyvaikutuksen 27 m etäisyydellä, 5 kW/m<sup>2</sup> lämpösäteilyvaikutuksen 36 m etäisyydellä ja 3 kW/m<sup>2</sup> lämpösäteilyvaikutuksen 46 m etäisyydellä. Pienemmällä tuulennopeudella ja stabiilimmalla säällä etäisyydet pienenevät hieman.

Tilanteessa, jossa LBG vuotaa ja tippuu maahan, se leviää laajalle alueelle ja muodostaa suuren lammikon. Tällaisen rajoittamattoman lammikkopalon lämpösäteilyvaikutukset ovat liian suuret ja lammikon pinta-alaa on syytä rajata. Tästä syystä vuotava LBG on suositeltavaa ohjata kallistusten ja kanavien avulla vuotoaltaaseen. Vuotoallas pienentää lammikon pinta-alaa ja siten myös haihtumista lammikosta. Pienempi pinta-ala myös rajoittaa paloalueen laajuutta ja lämpösäteilyvaikutuksia merkittävästi.

Kun säiliövuoto rajataan pinta-alaltaan n. 12 m<sup>2</sup> vuotoaltaaseen, vuotoaltaassa olevan kaasun syttyessä muodostuvan lammikkopalon lämpösäteilyintensiteetti ulottuu 5 m/s tuulella 8 kW/m<sup>2</sup> säteilyintensiteetillä 16 metrin etäisyydelle, 5 kW/m<sup>2</sup> säteilyintensiteetillä 19 metriin ja 3 kW/m<sup>2</sup> säteilyintensiteetillä 23 metriin. Stabiilimmalla säällä vastaavat etäisyydet pienenevät hieman.

Biokaasusäiliön vuodossa ja palossa, 5 m/s tuulennopeudella, 8 kW/m<sup>2</sup> säteilyintensiteetillä 17 metrin etäisyydelle, 5 kW/m<sup>2</sup> säteilyintensiteetillä 21 metriin ja 3 kW/m<sup>2</sup> säteilyintensiteetillä 26 metriin. Stabiilimmalla säällä vastaavat etäisyydet pienenevät hieman.

Vetyputken vuodon syttyessä vaikutukset jäävät kaikkien lämpösäteilyintensiiteettien osalta alle 10 metriin.



Kuva 9. Kaasuvuodon ja tulipalon lämpösäteilyvaikutukset 5 m/s tuulella. Vasemmalla LBG-säiliön suihkupalo, keskellä 12 m<sup>2</sup> vuotoallaspalo, ja oikealla biokaasuvuoron palo.

Taulukko 7. Vuotaneen kaasun syttymisestä ja tulipalosta aiheutuvat lämpösäteilyvaikutukset.

Lämpösäteilyvaikutukset			Lämpösäteilyvaikutukset		
Skenaario	Sääolosuhde	Vuoto	8 kW/m <sup>2</sup>	5 kW/m <sup>2</sup>	3 kW/m <sup>2</sup>
<b>7.2 LBG-säiliön suihkupalo</b>	2 m/s (F)	DN65	24 m	33 m	44 m
<b>7.3 LBG-säiliön suihkupalo</b>	5 m/S (D)	DN65	27 m	36 m	46 m
<b>7.9 Rajattu LBG-lammikkopalo</b>	2 m/s (F)	12 m <sup>2</sup> vuotoallas	13 m	17 m	22 m
<b>7.10 Rajattu LBG-lammikkopalo</b>	5 m/S (D)	12 m <sup>2</sup> vuotoallas	16 m	19 m	23 m
<b>7.17 Biokaasusäiliön vuoto ja palo</b>	2 m/s (F)	DN150	13 m	18 m	24 m
<b>7.18 Biokaasusäiliön vuoto ja palo</b>	5 m/S (D)	DN150	17 m	21 m	26 m
<b>7.25 Vetyputken suihkupalo</b>	2 m/s (F)	Elektrolyyseri	< 10 m	< 10 m	< 10 m
<b>7.26 Vetyputken suihkupalo</b>	5 m/S (D)	Elektrolyyseri	< 10 m	< 10 m	< 10 m

### Syttymän/räjähdyksen painevaikutukset

Kaasupilviräjähdyksen paineaallon mallinnus on tehty Tukes-ohjeen mukaisesti, jossa syttyminen tapahtuu minuutin kuluttua vuodon alkamisesta.

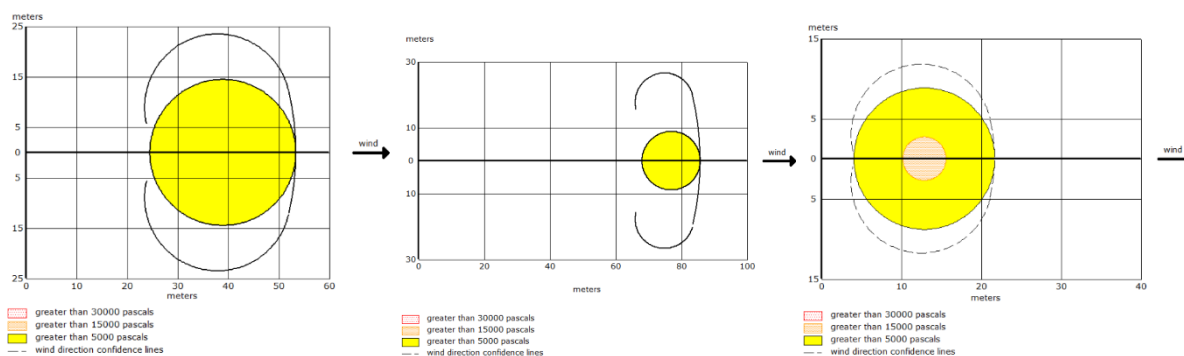
Metaanin suhteellisen hidas palamisnopeus ei syttyessään muodosta kovin suurta ylipainetta. LBG-säiliövuodon tapauksessa ja kaasun syttyessä muodostuva 5 kPa:n ylipaineaallon halkaisija on tuulennopeudella 2 m/s noin 29 m ja se ulottuu kauimmillaan 53 metrin etäisyydelle vuotopaikasta tuulen alapuolella. Tuulisemmalla säällä sekä halkaisija (23 m) ja maksimietäisyys (39 m) pienenevät.



Vuotoaltaasta haihtuvan nesteytetyn biometaanin syttyessä painevaikutukset rajautuvat pienemmän kaasumäärän takia 5 kPa ylipaineelle 13 metrin halkaisijan alueelle maksimissaan 21 metrin päähän tuulen alapuolella. 5 m/s tuulella alueen koko ja maksimietäisyys on lähes sama.

Biokaasuvaraston vuodossa ei myöskään esiinny 5 kPa:n painevaikutusaluetta suurempaa ylipainetta, mutta se voi stabiililla säällä ulottua 86 metrin päähän tuulen alapuolella. Vaikutusalueen halkaisija on noin 19 metriä.

Vety palaa huomattavasti metaania nopeammin, ja se aiheuttaa merkittävästi korkeamman ylipaineen. Stabiililla säällä vetyräjähdys saa aikaan 15 kPa:n ylipaineen halkaisijaltaan noin 5 metrin alueella, joka ulottuu 16 metrin päähän tuulen alapuolella. 5 kPa:n ylipainevaikutusten halkaisija on 17 metriä ja se ulottuu 22 metrin päähän.



Kuva 10. Ylipainevaikutukset eri vuototapauksissa. Vasemmalla LBG-varaston vuoto, keskellä biokaasuvaraston vuoto ja oikealla vetyvuoto.

Taulukko 8. Painevaikutukset kaasuvuodon syttyessä minuutin kuluttua vuodon alkamisesta.

Painevaikutukset			Painevaikutus tuulen alapuolella		
Skenaario	Sääolosuhde	Vuoto	30 kPa	15 kPa	5 kPa
7.5 LBG-säiliövuoto suihkuna	2 m/s (F)	DN65	-	-	53 m
7.6 LBG-säiliövuoto suihkuna	5 m/s (D)	DN65	-	-	39 m
7.13 Rajattu LBG-lammikkopalo	2 m/s (F)	12 m <sup>2</sup> vuotoallas	-	-	21 m
7.14 Rajattu LBG-lammikkopalo	5 m/s (D)	12 m <sup>2</sup> vuotoallas	-	-	20 m
7.19 Biokaasuvuoto	2 m/s (F)	DN150	-	-	86 m
7.20 Biokaasuvuoto	5 m/s (D)	DN150	-	-	81 m
7.27 Vetyputken vuoto	2 m/s (F)	Elektrolyyseri	-	16 m	22 m
7.28 Vetyputken vuoto	5 m/s (D)	Elektrolyyseri	-	-	-

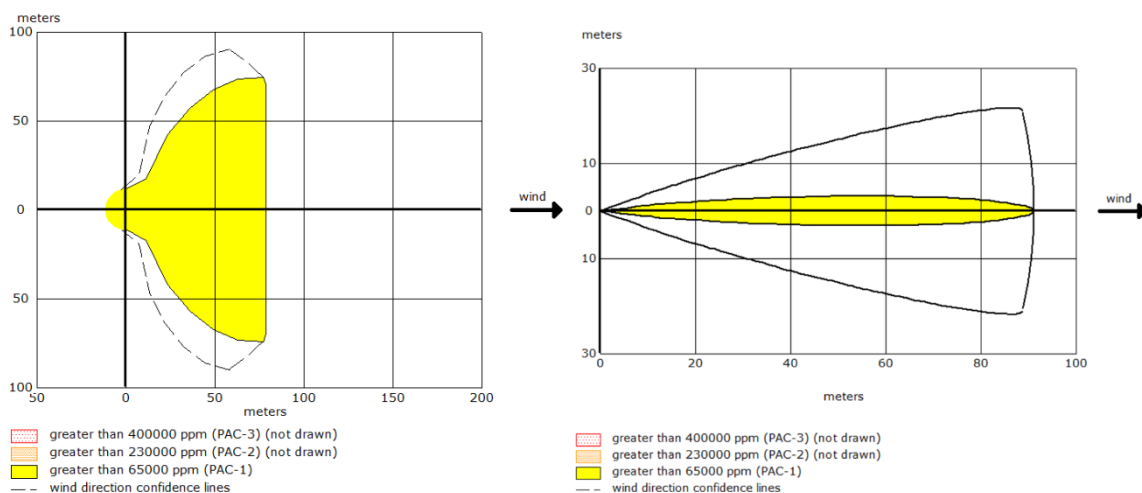


## Vuodon terveystvaikutukset

Vuototapausten terveystvaikutusten arviointiin käytettiin akuutin altistumisen PAC/TEEL-arvoja. Näistä 3-luokka voi aiheuttaa hengenvaarallista terveysthaittaa tai kuoleman. 2-luokan alueella voi aiheutua pysyvää tai muutoin vakavaa terveysthaittaa ja 1-luokka haittavaikutuksia, jotka lakkaavat altistumisen jälkeen. Kaasun voimakkaan sekoittumisen ja epävarmuuksien vuoksi ohjelmisto piirsi ainoastaan PAC-1 alueet.

Stabiililla säällä terveystvaikutukset ulottuvat laajemmalle kaasun vähäisemmän sekoittumisen vuoksi. Sekä nesteytetyn biokaasun säiliövuodossa että biokaasuvaraston vuodossa PAC-3 alue ulottuu noin 36 metriä tuulen alapuolelle, PAC-2 noin 48 metriin ja PAC-3 enimmillään 91 metriin. Vaikutusalue noudattelee syttymiskelpoisen kaasuseoksen leviämistä.

Vedyllä terveystvaikutukset rajautuvat alle kymmenen metrin etäisyydelle, pois lukien PAC-1 alue 15 metrin etäisyydelle.



Kuva 11. Nesteytetyn biokaasusäiliön vuodon (vasen) ja biokaasuvaraston vuodon (oikea) PAC-1 terveystvaikutusten leviäminen stabiililla säällä (tuuli 2 m/s)

Taulukko 9. Vuotoskenaarioiden terveystvaikutusten (PAC/TEEL-arvot) etäisyydet vuotokohdasta.

Terveystvaikutukset			Terveystvaikutukset		
Skenaario	Sääolosuhde	Vuoto	PAC-3	PAC-2	PAC-1
7.7 LBG-säiliövuoto suihkuna	2 m/s (F)	DN65	34 m	45 m	79 m
7.8 LBG-säiliövuoto suihkuna	5 m/S (D)	DN65	18 m	23 m	48 m
7.21 Biokaasuvuoto	2 m/s (F)	DN150	36 m	48 m	91 m
7.22 Biokaasuvuoto	5 m/S (D)	DN150	< 10 m	11 m	21 m
7.29 Vetyputken vuoto	2 m/s (F)	Elektrolyyseri	< 10 m	< 10 m	15 m
7.30 Vetyputken vuoto	5 m/S (D)	Elektrolyyseri	< 10 m	< 10 m	< 10 m

## 6 Viitteet

SFS-EN 1473 Nesteytetyn maakaasun laitteistot ja asennukset. Maalla olevien laitteistojen suunnittelu.

Onnettomuuden vaaraa aiheuttavat aineet: Metaani, Työterveyslaitos, <https://www.ttl.fi/ova/metaani.html>

Onnettomuuden vaaraa aiheuttavat aineet: Vety, Työterveyslaitos, <https://ova.ttl.fi/vety>

TUKES, Tuotantolaitosten sijoittaminen, Helsinki 2015

ISO 16903:2015 Petroleum and natural gas industries. Characteristics of LNG, influencing the design and material selection