





# Vuoden 2011 OVA-ohjeiden vaaraetäisyydet

Kirjoittajat: Risto Lautkaski

Luottamuksellisuus: julkinen

Raportin nimi Vuoden 2011 OVA-ohjeiden vaaraetäisyydet	
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot Työterveyslaitos, Juha Tuovila, Topeliuksenkatu 41 a A, 00250 HELSINKI	Asiakkaan viite sähköpostiviesti 19.12.2011
Projektin nimi OVA-2011 vaaraetäisyydet	Projektin numero/lyhytnimi 78053
Raportin laatija(t) Risto Lautkaski	Sivujen/liitesivujen lukumäärä 10
Avainsanat hazard range, pool evaporation, gas dispersion, pool fire	Raportin numero VTT-CR-09165-11
Tiivistelmä <p>Vaaraetäisyydet laskettiin klooritrimetyylisilaanille ja metaanille. Klooritrimetyylisilaani on erittäin helposti haihtuva neste. Suuren vuodon oletettiin muodostavan maanpinnalle halkaisijaltaan 20 m:n lammikon. Päästö laskettiin lammikon tasapainolämpötilassa. Päästön oletettiin leviävän passiivisesti.</p> <p>Nesteytetyn maakaasun oletettiin vuotavan maanpinnalle kuljetussäiliön pohjassa olevasta 50 mm:n aukosta. Lammikon kiehuminen sekä ilmaa raskaamman päästön leviäminen mallinnettiin ALOHA-ohjelmalla. Samalla ohjelmalla laskettiin myös turvalliset evakuointietäisyydet tuulen ylä- ja alapuolella siinä tapauksessa, että lammikko syttyy palamaan.</p> <p>Eristettävän ja varoitettavan alueen pituudet laskettiin kemikaalien PAC-arvoja käyttäen. Tulokset saadut etäisyydet muutettiin sanallisiksi ohjeiksi OVA-ohjeiden Käyttäjän oppaassa esitettyjen periaatteiden nojalla.</p> <p>Koska propeenin ominaisuudet ja kuljetussäiliöt ovat suunnilleen samat kuin propaanin, nestekaasujen OVA-ohjeen kohtien 4.1 ja 4.2 tekstiä vaaraetäisyyksineen voidaan käyttää tällä kemikaalilla.</p>	
Luottamuksellisuus	julkinen
Espoo 21.12.2011	
 Risto Lautkaski erikoistutkija	
 Timo Vanttola teknologiapäällikkö	
VTT:n yhteystiedot PL 1000, 02044 VTT	
Jakelu (asiakkaat ja VTT) Työterveyslaitos, Juha Tuovila, 1 alkuperäinen ja 1 kopio VTT, arkisto, 1 alkuperäinen, Risto Lautkaski, 1 kopio	
<i>VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.</i>	

## Sisällysluettelo

1	Johdanto.....	<u>3</u>
2	Uudet kemikaalit.....	<u>3</u>
3	Haihtuminen lammikosta .....	<u>3</u>
4	Lammikon tasapainolämpötila .....	<u>4</u>
5	Päästön leviäminen .....	<u>5</u>
6	Haitalliset pitoisuudet.....	<u>6</u>
7	Nesteytetyn maakaasun höyrystyminen ja leviäminen .....	<u>7</u>
8	Vaaraetäisyydet.....	<u>9</u>
	Lähdeviitteet .....	<u>10</u>

## 1 Johdanto

Vuosina 1992 ja 1994 julkaistujen OVA-ohjeiden vaaraetäisyydet laskettiin tutkimuksen (Lautkaski & Pipatti 1992) yhteydessä. Vuosina 1999, 2003, 2007, 2009 ja 2010 valmistuneiden OVA-ohjeiden vaaraetäisyydet laskettiin erillisissä tutkimuksissa (Lautkaski 1999, 2003, 2008, 2009, 2010). Tähän mennessä vaaraetäisyyksiä on laskettu paineenalaisina ja jäähdyttämällä nesteytettyille kaasuille, haihtuville nesteille sekä yhdelle räjähdysvaaralliselle kemikaalille.

Perustapaukseksi (suuri vuoto) valittiin paineenalaisena nesteytettyjen kaasujen tapauksessa nesteventtiilin katkeaminen, jäähdyttämällä nesteytettyjen kaasujen tapauksessa vuoto, joka muodostaa maanpinnalle halkaisijaltaan 10 m:n lammikon, sekä haihtuvien nesteiden tapauksessa 12,5 m<sup>3</sup>:n vuoto, joka muodostaa maanpinnalle halkaisijaltaan 20 m:n lammikon. Vuodon oletettiin sattuvan pilvisenä kesäpäivänä, jolloin ilman lämpötila on 20 °C ja tuulen nopeus 5 m/s. Ympäristön oletettiin olevan aukeaa maastoa.

Vaaraetäisyydet laskettiin vuosien 1992–2003 ohjeissa Työterveyslaitoksen (Vesa Riihimäki) valitsemia kemikaalin eristys- ja varoitusrajoja hyväksikäyttäen. Vuoden 2007 ohjeissa nämä rajat valittiin kemikaalien ERPG-arvojen perusteella. Vuosien 2009 ja 2010 ohjeiden rajojen valinnassa käytettiin kemikaalien PAC-arvoja, jotka olivat joko AEGL-, ERPG- tai TEEL-arvoja. Vaaraetäisyydeksi määriteltiin etäisyys, jolla kemikaalin pitoisuus (10 minuutin keskiarvo) maanpinnan tasolla on yhtä suuri kuin eristys- tai varoitusraja. Saadut etäisyydet muutettiin sanallisiksi ohjeiksi OVA-ohjeiden Käyttäjän oppaassa esitettyjen periaatteiden nojalla.

## 2 Uudet kemikaalit

Tässä tutkimuksessa vaaraetäisyydet lasketaan aikaisempia ohjeita laadittaessa käytetyllä menetelmällä klooritrimetyylisilaanille, joka on erittäin helposti haihtuva neste. Jäähdyttämällä nesteytettylle metaanille vaaraetäisyydet lasketaan maanpinnalla kiehuvan lammikon syttymis- ja terveystvaaran sekä palavan lammikon liekkien lämpösäteilyn vaikutusten perusteella. Paineenalaisena nesteytettylle propeenille vaaraetäisyyksiä ei lasketa, vaan ohje laaditaan nestekaasujen ohjeen pohjalla.

## 3 Haihtuminen lammikosta

Lammikosta haihtuvan höyryn tilavuusvirta  $V'$  [m<sup>3</sup>/s] saadaan kaavasta (CPR 1992)

$$V' = k A \frac{p_v T_a}{p_a T_p} \quad (1)$$

missä

$k$  on aineensiirtokerroin, m/s

$A$  on lammikon ala, m<sup>2</sup>

$p_v$  on kemikaalin höyrynpaine lammikon lämpötilassa, Pa

$p_a$  on ilmanpaine, Pa

$T_a$  on ilman lämpötila, K

$T_p$  on lammikon lämpötila, K.

Edellisissä tutkimuksissa käytettiin Mackayn ja Matsugun (1973) johtamaa ai-neensiirtokertoimen lauseketta

$$k = C' D^{-1/9} u^{7/9} Sc^{-2/3} \quad (2)$$

missä

$C'$  on kokeellinen kerroin,  $4,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{3/9} \text{ s}^{-2/9}$

$D$  on lammikon halkaisija, m

$u$  on tuulen nopeus, m/s

$Sc$  on kemikaalin Schmidtin luku,  $Sc = v_a/D_m$

$v_a$  on ilman kinemaattinen viskositeetti,  $1,53 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  (20 °C)

$D_m$  on kemikaalin molekylaarinen diffuusiokerroin ilmassa,  $\text{m}^2/\text{s}$ .

Kemikaalin molekylaarinen diffuusiokerroin ilmassa  $D_m$  arvioidaan Fullerin me-netelmällä (Smith 2001)

$$D_m = \frac{1,013 \cdot 10^{-2} T^{7/4}}{p_a M_{am}^{1/2} \left[ \left( \sum_a v_i \right)^{1/3} + \left( \sum_m v_i \right)^{1/3} \right]^2} \quad (3)$$

missä  $M_{am}$  [g/mol] määritellään kaavalla

$$\frac{1}{M_{am}} = \frac{1}{M_a} + \frac{1}{M_m} \quad (4)$$

missä  $M_a$  on ilman keskimääräinen moolimassa 28,96 g/mol ja  $M_m$  kemikaalin moolimassa [g/mol]. Suureet  $v_i$  ovat kokeellisesti määritettyjä molekyylin "atomi-en diffuusiotilavuuksia". Ensimmäisenä on ilman  $v_i$ -suureiden summa, jonka arvo on 19,7. Toisena on kemikaalin  $v_i$ -suureiden summa, joka klooritrimetyylisilaanilla on 110,0. Diffuusiokertoimen  $D_m$  arvoksi lämpötilassa 20 °C saadaan  $7,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  ja Schmidtin luvun  $Sc$  arvoksi 1,98.

Klooritrimetyylisilaanin höyrynpaineelle on johdettu sovite (Knovel 2008)

$$\log p_v = 4,07544 - \frac{1181}{T - 38} \quad (5)$$

Lämpötilassa 20 °C sovite (5) antaa höyrynpaineeksi 25,6 kPa.

## 4 Lammikon tasapainolämpötila

Lammikon lämpötilalle  $T_p$  käytetään tasapainoarvoa, joka lasketaan Kawamuran ja Mackayn (1987) menetelmällä. Menetelmässä arvioidaan kaikki lammikkoon tulevat ja siitä poistuvat lämpövirrat. Tasapainolämpötilassa lammikkoon tuleva kokonaislämpövirta on yhtä suuri kuin lammikosta poistuva kokonaislämpövirta. Maanpinnan lämpötila on oletettu samaksi kuin ilman lämpötila  $T_a$ .

$$q_{so} + q_{lw} + (U_l + U_g)(T_a - T_p) = \frac{kM_m P_v h_{lv}}{RT_p} + \varepsilon \sigma T_p^4 \quad (6)$$

missä

$q_{so}$  on auringonsäteilystä lammikkoon absorboituva tehotiheys,  $\text{W}/\text{m}^2$

$q_{lw}$  on ympäristöstä lammikkoon absorboituvan pitkäaaltoisen lämpösäteilyn tehotiheys,  $\text{W}/\text{m}^2$

$U_l$  on ilman ja lammikon rajapinnan lämmönsiirtokerroin,  $\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$

- $U_g$  on maan ja lammikon rajapinnan lämmönsiirtokerroin,  $W m^{-2} K^{-1}$   
 $h_{lv}$  on kemikaalin höyrystymislämpö,  $J/kg$   
 $R$  on yleinen kaasuvakio,  $8,314 J mol^{-1} K^{-1}$   
 $\varepsilon$  on lammikon pinnan emissiokerroin, 0,97  
 $\sigma$  on Stefanin-Boltzmannin vakio,  $5,67 \cdot 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$ .

Pilvisenä kesäpäivänä Suomessa lammikkoon absorboituvaksi tehotiheydeksi  $q_{so} + q_{lw}$  arvioitiin  $555 W/m^2$ . Lämmönsiirtokertoimen  $U_1$  arvoksi lämpötilassa  $20 ^\circ C$  saatiin  $18,2 W m^{-2} K^{-1}$  (Lautkaski & Pipatti 1992). Lämmönsiirtokerroin  $U_g$  saadaan kaavasta

$$\frac{1}{U_g} = \frac{1}{h_g} + \frac{1}{h_l} \quad (7)$$

missä

- $h_g$  on maan lämmönläpäisykerroin,  $W m^{-2} K^{-1}$   
 $h_l$  on nesteen lämmönläpäisykerroin,  $W m^{-2} K^{-1}$ .

Maan lämmönläpäisykerroin  $h_g$  riippuu jonkin verran maan lämpöteknisistä ominaisuuksista. Sille käytettiin arvoa  $65 W m^{-2} K^{-1}$ . Nesteen lämmönläpäisykerroin  $h_l$  riippuu nesteen lämmönjohtavuuden  $\lambda_l [W m^{-1} K^{-1}]$  ja kiehumislämpötilan  $T_b [K]$  ohella lammikon syvyydestä  $d_p [m]$

$$h_l = \frac{2\lambda_l}{\phi d_p} \quad (8)$$

Kawamura ja Mackay (1987) ehdottavat kertoimelle  $\phi$  kaavaa

$$\frac{1}{\phi} = 1 + \exp[-0,06(T_b - 343K)] \quad (9)$$

Kun kemikaalin kiehumislämpötila on korkeampi kuin noin  $110 ^\circ C$ , lammikon tasapainolämpötila on suunnilleen sama kuin ympäristön lämpötila. Tällaisilla kemikaaleilla voidaan yleensä olettaa, että lammikko on ympäristön lämpötilassa. Mitä alempi kiehumislämpötila on, sitä alempi on myös tasapainolämpötila.

Klooritrimetyylisilaanin lämmönjohtavuus  $\lambda_l$  lämpötilassa  $0 ^\circ C$  on  $0,136 W m^{-1} K^{-1}$  (Yaws 2010) ja kiehumislämpötila  $T_b$   $333 K$ . Kertoimen  $\phi$  arvoksi saadaan  $0,354$  ja lämmönläpäisykerroimen  $h_l$  arvoksi lämpötilassa  $0 ^\circ C$   $19,2 W m^{-2} K^{-1}$ . Lämmönsiirtokertoimen  $U_g$  arvoksi saadaan  $14,8 W m^{-2} K^{-1}$ . Klooritrimetyylisilaanin höyrystymislämpö  $h_{lv}$  lämpötilassa  $0 ^\circ C$  on  $287,1 kJ/kg$  (Yaws 2010). Klooritrimetyylisilaanin moolimassa  $M_m$  on  $0,1086 kg/mol$ . Sijoittamalla nämä arvot yhtälöön (6) ja iteroimalla lammikon tasapainolämpötilaksi saadaan  $-2 ^\circ C$ . Tässä lämpötilassa klooritrimetyylisilaanin höyrynpaine on  $9,3 kPa$ .

## 5 Päästön leviäminen

Lammikosta haihtuva höyry leviää passiivisesti osana tuulen virtausta. Asetetaan koordinaatiston origo lammikon keskipisteeseen ja x-akseli osoittamaan myötätuuleen. Kaasun pitoisuus x-akselilla lasketaan tavanomaisella passiivisen leviämisen mallilla (CPR 1992)

$$C(x,0,0) = \frac{V'}{\pi \sigma_y (x + x_y) \sigma_z(x) u} \quad (10)$$

missä

$\sigma_y(x)$  on vaakasuunnan leviämisp parametri, m  
 $x_v$  on näennäislähteen etäisyys, m  
 $\sigma_z(x)$  on pystysuunnan leviämisp parametri, m  
 $u$  on tuulen nopeus, m/s.

Valitulla säätilanteella (pilvinen sää,  $u = 5$  m/s) ilmakehän tasapainotila on neutraali. Parametrit  $\sigma_y$  ja  $\sigma_z$  lasketaan maanpinnan rosoisuusparametrin  $z_0$  arvoa 0,3 m ja tarkastelu-aikaa 10 min vastaavista sovitusekseistä, jotka ovat voimassa kun  $x \geq 100$  m (CPR 1992)

$$\sigma_y(x) = 0,128x^{0,905}; \quad \sigma_z(x) = 0,276x^{0,732} \quad (11)$$

Näennäislähteen etäisyys  $x_v$  saadaan ehdosta, että pistemäisestä näennäislähteestä lähtevän kaasuvanan tulee lammikon kohdalla olla suunnilleen 20 m leveä. Tässä tapauksessa

$$x_v = \left( \frac{20}{4,3 \times 0,128} \right)^{\frac{1}{0,905}} = 53 \text{ m} \quad (12)$$

Kun parametrien  $\sigma_y$  ja  $\sigma_z$  lausekkeet (11) sekä  $u = 5$  m/s ja  $x_x = 53$  m sijoitetaan kaavaan (10), saadaan yhtälö pitoisuutta  $C$  vastaavalle etäisyydelle  $x$

$$(x + 53 \text{ m})^{0,905} x^{0,732} = 1,80 \frac{V'}{C} \quad (13)$$

Sijoitetaan aineensiirtokertoimen  $k$  kaava (2) kaavaan (1) ja tulos yhtälöön (13)

$$(x + 53 \text{ m})^{0,905} x^{0,732} = \frac{6,81 P_v T_a}{Sc^{2/3} P_a T_p C} \quad (14)$$

Kun etäisyys  $x$  on pienempi kuin 100 m, parametrit  $\sigma_y$  ja  $\sigma_z$  interpoloidaan suoraan viivaisesti nollan ja 100 m:n etäisyyttä vastaavien arvojen välillä

$$\sigma_y = 0,0826x; \quad \sigma_z = 0,0803x \quad (15)$$

Näennäislähteen etäisyys  $x_v$  on nyt 56 m ja yhtälön (14) sijasta etäisyys  $x$  ratkaistaan yhtälöstä

$$(x + 56 \text{ m})x = \frac{46,9 P_v T_a}{Sc^{2/3} P_a T_p C} \quad (16)$$

## 6 Haitalliset pitoisuudet

Vaaraetäisyydet laskettiin vuosien 1992–2003 ohjeissa Työterveyslaitoksen (Vesa Riihimäki) valitsemien kemikaalin eristys- ja varoitusrajojen perusteella. Lähtökohtana olivat tällöin kemikaalien terveysvaikutukset ja työhygieeniset raja-arvot. Työhygieenisten raja-arvojen käyttö vuotojen vaaraetäisyyksien arviointiin on ongelmallista ennen muuta siksi, että niiden sisältämä varmuuskerroin johtaa vaaraetäisyyksien yliarviointiin. Vuoden 1999 ohjeita laadittaessa voitiin käyttää hyväksi myös ERPG (Emergency Response Planning Guidelines) -arvoja.

Vuoden 2007 ohjeissa eristys- ja varoitusrajat valittiin kemikaalien ERPG-arvojen perusteella. ERPG-arvot määrittää American Industrial Hygiene Associationin (AIHA) työryhmä nimenomaan vaaraetäisyyksien arviointia varten. ERPG-arvot on valittu oletetun 60 minuutin altistuksen perusteella. Viimeisimmässä, vuoden 2010 luettelossa näitä arvoja on 144 kemikaalille.

USA:n ympäristönsuojeluvirasto Environmental Protection Agency (EPA) määrittää puolestaan Acute Exposure Guideline Levels (AEGL) -arvoja. Määrittelyltään nämä vastaavat läheisesti ERPG-arvoja ja olennaisin ero on siinä, että AEGL-arvot on määritelty usealle altistusajalle: 10 min, 30 min, 1 h, 4 h ja 8 h. Uusimassa, lokakuun 2010 luettelossa on lopulliset AEGL-arvot 66, väliaikaiset AEGL-arvot 164 sekä ehdotetut AEGL-arvot 12 kemikaalille. Lisäksi AEGL-arvot ovat valmisteilla 46 kemikaalille.

Koska ERPG- ja AEGL-arvojen valmistelu on hidasta, USA:n energiaministeriön Department of Energy (DOE) alainen Subcommittee on Consequence Assessment and Protective Actions (SCAPA) on määrittellyt Temporary Emergency Exposure Limit (TEEL) -arvot yli 3000 kemikaalille. TEEL-arvot on määritelty 15 minuutin altistusajan pitoisuuskeskiarvoina.

Yläkäsitteenä on nykyään Protective Action Criteria (PAC), jotka siis käsittävät ERPG-, AEGL- ja TEEL-arvot. Näiden arvojen valintakriteeri on (SCAPA 2010):

1. Ensisijaisesti on käytetty AEGL-arvoja.
2. Jos kemikaalilla ei ole AEGL-arvoja, on käytetty ERPG-arvoja.
3. Jos kemikaalilla ei ole AEGL- eikä ERPG-arvoja, on käytetty TEEL-arvoja.

Klooritrimetyylisilaanin eristysrajaksi valitaan 10 minuutin AEGL3-arvo ja varoitusrajaksi 10 minuutin AEGL2-arvo. Vastaavasti metaanin varoitusrajaksi valitaan TEEL2-arvo 5000 ppm = 0,5 %. Sen sijaan metaanin TEEL3-arvo 200000 ppm = 20 % on jopa ylempää syttymisrajaa 17 % korkeampi.

Nesteytetyn maakaasun vuodosta ilmaan päässeeseen metaanin ensisijainen vaara aiheutuu kuitenkin kaasuvan syttymisestä. Päästökokeiden perusteella on arvioitu, että syttymisvaara ulottuu etäisyydelle, jolla leviämislaskun tuloksena saatava pitoisuuden aikakeskiarvo on 60 % alemmasta syttymisrajasta 4,4 % eli 2,64 % = 26400 ppm (Evans & Puttock 1986). Tällä etäisyydellä tuulen pyörteistä aiheutuvan pitoisuusvaihtelun yläraja on hieman alemmaa syttymisrajaa korkeampi ja vanan syttyminen on ajoittain mahdollista. Myös ALOHA-ohjelma laskee syttymisvaaraetäisyyden tästä oletuksesta (ALOHA 2007).

Taulukossa 1 on vertailtu eristys- ja varoitusrajoja työhygieenisiin raja-arvoihin sekä PAC-arvoihin. PAC-arvon alkuperä on ilmaistu kirjaimin A = AEGL ja T = TEEL.

*Taulukko 1. Eristys- ja varoitusrajojen vertailu raja-arvoihin, ppm*

kemikaali	PAC1	PAC2	PAC3	varoita	eristä
klooritrimetyylisilaani	1,8 <sup>A</sup>	100 <sup>A</sup>	620 <sup>A</sup>	100	620
metaani	3000 <sup>T</sup>	5000 <sup>T</sup>	200000 <sup>T</sup>	5000	26400

## 7 Nesteytetyn maakaasun höyrystyminen ja leviäminen

Nesteytetyn maakaasun vuoto höyrystyy kiehuessaan maanpinnalle muodostuvasa lammikossa. Vuodon jatkuessa kiehuminen lakkaa lammikon keskellä, mutta jatkuu reunalla, jos lammikko pääsee vapaasti laajenemaan. Hyvin kylmästä lammikosta haihtuva höyry muodostaa ilmaa raskaamman päästön.



Vastaavaa vuototilannetta tarkasteltiin aikaisemmin hapen ja typen vaaraetäisyyksiä laskettaessa. Ensisijaisesti ajateltiin varastosäiliön vuotoa. Lammikon halkaisijaksi valittiin 10 m ja oletettiin, että lammikon muodostumiseen kuluva aika on lyhyt tarkasteluaikaan verrattuna (Lautkaski 2003). Höyrystymisnopeus laskettiin kaavalla (CPR 1992)

$$m'(t) = \frac{\lambda_g A (T_g - T_b)}{h_{lv} \sqrt{\pi \alpha t}} \quad (17)$$

missä  $\lambda_g$  [ $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ] on maan lämmönjohtavuus,  $A$  [ $\text{m}^2$ ] on lammikon ala,  $T_g$  [K] on maan alkulämpötila,  $T_b$  [K] on kemikaalin kiehumislämpötila,  $\alpha$  [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] on maan terminen diffuusiokerroin  $\alpha = \lambda_g/(\rho_g c_g)$ , missä  $\rho_g$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] on maan tiheys ja  $c_g$  [ $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ] maan ominaislämpökapasiteetti.

Nesteytetyn maakaasun tapauksessa kiinnostavin tapaus on vuoto säiliöauton säiliöstä joko aukon tai tyhjennysventtiilin kautta. Nestettä virtaa ulos nestepinnan ja vuotokohdan hydrostaattisen paine-eron vaikutuksesta. Vuodon massavirran tiheys  $G$  [ $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ] saadaan kaavasta

$$G = C_d \rho_l \sqrt{2gh} \quad (18)$$

missä  $C_d$  on virtauskanavan kuristuskerroin,  $\rho_l$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] on nesteen tiheys,  $g$  on putoamiskiihtyvyyden arvo  $9,81 \text{ m/s}^2$  ja  $h$  [m] nestepinnan ja vuotokohdan korkeusero. Oletetaan säiliön halkaisijaksi 2 m ja täyttöasteeksi 90 %. Säiliön pohjassa sijaitsevan vuotoaukon halkaisijaksi oletetaan 50 mm ja kuristuskertoimen  $C_d$  arvoksi 0,61. Vuodon massavirraksi saadaan 2,9 kg/s.

ALOHA-ohjelman käyttäjä voi olettaa, että nestelammikko pääsee vapaasti laajenemaan tai vaihtoehtoisesti määritellä lammikon suurimman koon. Käyttäjä voi valita neljästä lämpötekniisiltä ominaisuuksiltaan erilaisesta maaperästä. Ohjelma mallintaa lammikon laajenemisen ja höyrystymisen sekä antaa lammikon koon seurantajakson päättyessä (ALOHA 2007). Lammikko jaetaan renkaisiin, joilla aika  $t$  lasketaan hetkestä, jona neste on kastellut renkaan. Kaavan (17) höyrystymisnopeus on kerrottu kokeellisella kertoimella 3, joka on johdettu nesteytetyllä maakaasulla tehtyjen kokeiden tuloksista (Reynolds 1992).

Päästön mallintamista varten ajasta riippuva päästönopeus  $m'(t)$  korvataan porraskäyrällä, joka koostuu enintään viidestä askelmasta. Leviämislasku tehdään raskaan kaasun leviämismallilla DEGADIS, joka käyttää keskimääräisen päästönopeuden suurinta arvoa (ALOHA 2007). Lasku tehtiin pilvisellä säällä ja tuulen nopeudella 5 m/s. Maaperä oletettiin joko betoniksi tai kuivaksi hiekkamaaksi ja maan alkulämpötilaksi otettiin 15 °C. Kaavan (17) maan lämpötekniisistä ominaisuuksista riippuva termi  $\lambda_g/\alpha^{1/2}$  on betonilla noin 2,5-kertainen kuivaan hiekkamaahan verrattuna (Reynolds 1992).

Tulokseksi saatu päästö ensimmäisten 9 minuutin aikana oli betonilla 1,6 kg/s ja kuivalla hiekkamaalla 1,5 kg/s. Ero oli näin pieni, koska kuivalla hiekkamaalla lammikon loppuhalkaisija (9,6 m) oli suurempi kuin betonilla (7,2 m).

## 8 Vaaraetäisyydet

Valittuja varoitus- ja eristysrajoja vastaavia vaaraetäisyyksiä laskettaessa tarvittavat välitulokset ja etäisyydet ovat taulukossa 2.

Taulukko 2. Suuren vuodon vaaraetäisyydet

kemikaali	Sc	T <sub>p</sub> °C	p <sub>v</sub> kPa	m' kg/s	V' m <sup>3</sup> /s	varoita m	eristä m
klooritrimetyylisilaani	1,98	-2	9,6	1,36	0,30	130	45
metaani	—	-161	101,3	1,6	1,07	120	45

Lasketaan vielä palavan maakaasulammikon lämpösäteilyn vaaraetäisyydet ALOHA-ohjelmalla. Palavan lammikon koko määräytyy vuodon massavirrasta ja lammikon palamisnopeudesta. ALOHA arvioi, että vuodon massavirtaa 1,6 kg/s vastaa palavan lammikon halkaisija 4 m. Tuulen nopeudella 5 m/s liekit kallistuvat ja siirtyvät myötätuuleen. Turvallinen evakuointietäisyys vastaa lämpösäteilyn tehosiheyden arvoa 1,5 kW/m<sup>2</sup>. ALOHA antaa turvalliseksi evakuointietäisyydeksi tuulen alapuolella 40 m ja tuulen yläpuolella 30 m. Nämä etäisyydet ovat jonkin verran pienempiä kuin päästön suurin syttymisetäisyys 45 m.

Taulukon 2 etäisyydet muutetaan toimenpideohjeiksi OVA-ohjeiden Käyttäjän oppaassa olevia periaatteita noudattaen.

### KLOORITRIMETYYLISILAANI [TOKEVA T8c, VA3(150 m)]

pieni vuoto (noin 100 l) Välitön eristys 25 m kaikkiin suuntiin.

suuri vuoto (noin 10 m<sup>3</sup>) Välitön eristys 50 m kaikkiin suuntiin sekä 150 m tuulen alapuolella.

### METAANI [TOKEVA T3b, VA3(150 m)]

pieni vuoto (noin 0,2 kg/s) Välitön eristys 25 m kaikkiin suuntiin.

suuri vuoto (noin 2 kg/s) Välitön eristys 50 m kaikkiin suuntiin sekä 150 m tuulen alapuolella.

Propeenin ominaisuudet (höyrinpaine, syttymisrajat) ja kuljetussäiliöiden tyypit ovat suunnilleen samat kuin propaanin. Nestekaasujen OVA-ohjeen kohtien 4.1 ja 4.2 tekstiä vaaraetäisyyksineen voi käyttää, kun vain butaania koskevat kohdat jätetään pois.

## Lähdeviitteet

ALOHA 2007. ALOHA<sup>®</sup> user's manual. Washington D.C.: U.S. Environmental Protection Agency. 195 s.

<http://www.epa.gov/osweroe1/docs/cameo/ALOHAManual.pdf>

CPR 1992. Methods for the calculation of physical effects. Second edition. Voorburg: The Directorate-General of Labour, Committee for the Prevention of Disasters. 390 s. (CPR 14E.) ISSN 0921-9633.

Evans, A. & Puttock, J. S. 1986. Experiments on the ignition of dense flammable gas clouds. Teoksessa: 5th International Symposium "Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries". Cannes, 12–16 Sept. 1986. Paris: Société de Chimie Industrielle. Volume I. S. 35-1–35-15.

Kawamura, P. I. & Mackay, D. 1987. The evaporation of volatile liquids. Journal of Hazardous Materials, vol. 15, s. 343–364. ISSN 0304-3894.

Knovel 2008. Knovel's critical tables. Second edition.

Lautkaski, R. & Pipatti, R. 1992. Vaarallisia kemikaaleja käsittelevien prosessilaitosten suojaetäisyydet. Jatkotutkimuksen loppuraportti. Osa I. Kemikaalien vaara- ja suojaetäisyydet. Espoo: VTT ydinvoimatekniikan laboratorio. (Tutkimusselostus YDI 44/92.) 97 s. + liitteitä 35 s.

Lautkaski, R. 1999. Vuoden 1999 OVA-ohjeiden kemikaalien vaaraetäisyydet. Espoo: VTT Energia. (Tutkimusselostus ENE6/34/98.) 12 s.

Lautkaski, R. 2003. Vuoden 2003 OVA-ohjeiden vaaraetäisyydet. Espoo: VTT Prosessit. (Tutkimusselostus PRO4/7803/03.) 17 s.

Lautkaski, R. 2008. Vuoden 2007 OVA-ohjeiden vaaraetäisyydet. Espoo: VTT. (Tutkimusraportti VTT-R-05459-08.) 11 s.

Lautkaski, R. 2009. Vuoden 2009 OVA-ohjeiden vaaraetäisyydet. Espoo: VTT. (Tutkimusraportti VTT-R-03793-09.) 10 s.

Lautkaski, R. 2010. Vuoden 2010 OVA-ohjeiden vaaraetäisyydet. Espoo: VTT. (Tutkimusraportti VTT-R-10237-10.) 9 s.

Mackay, D. & Matsugu, R. S. 1973. Evaporation rate of hydrocarbon spills on water and land. Canadian Journal of Chemical Engineering, vol. 51, August, s. 434–439. ISSN 0008-4034.

Reynolds, R. M. 1992. ALOHA<sup>™</sup> (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) 5.0. Theoretical description. Draft. Seattle, WA: National Oceanic and Atmospheric Administration. (NOAA Technical Memorandum NOS ORCA-65).

<http://www.deq.state.ok.us/LPDnew/saratitleiii/AlohaTrainingManuals/ALOHA-Theoretical-Description.pdf>

Smith, R. L. 2001. Predicting evaporation rates and times for spills of chemical mixtures. Annals of Occupational Hygiene, vol. 45, no. 6, s. 437–445.

SCAPA 2010. Protective action criteria for chemicals - Including AEGs, ERPGs, & TEELs. <http://orise.orau.gov/emi/scapa/teels.htm>

Yaws 2010. Yaws' thermophysical properties of chemicals and hydrocarbons (electronic edition).