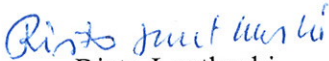
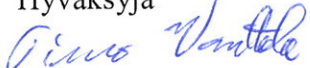
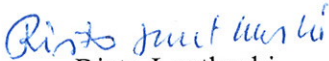
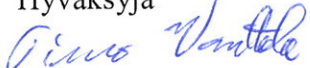
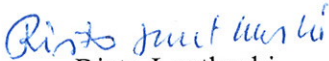
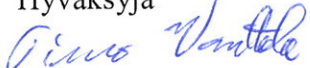




Ammoniakin, hapen ja AN:n vaaraetäisyydet

Kirjoittajat: Risto Lautkaski

Luottamuksellisuus: julkinen

| | | | |
|---|---|---|--|
| Raportin nimi Ammoniakin, hapen ja AN:n vaaraetäisyydet | | | |
| Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot Turvatekniikan keskus, Leena Ahonen | Asiakkaan viite 37567/022/2009 | | |
| Projektin nimi Ammoniakkiselvitys | Projektin numero/lyhytnimi 41723 | | |
| Raportin laatija(t) Risto Lautkaski | Sivujen/liitesivujen lukumäärä 57 | | |
| Avainsanat anhydrous ammonia, refrigeration, liquid oxygen storage | Raportin numero VTT-R-02830-10 | | |
| Tiivistelmä <p>Tutkimuksessa on kerätty tietoa ammoniakkikylmälaitosten, nestehappisäiliöiden sekä ammoniumnitraatin varastosuojien sijoittelussa huomioonotettavista tekijöistä. Ammoniakin osalta tarkastellaan pieniä, lähellä asutusta olevia kylmälaitoksia, kuten esimerkiksi jäähalleja. Nestehapen osalta tarkastellaan sairaaloiden varastosäiliöitä.</p> <p>Kuvauksia ulkomailla ammoniakkikylmälaitoksissa sekä nestehappivarastoilla sattuneista vahingoista ja onnettomuuksista on etsitty ARIA-tietokannasta sekä kirjallisuudesta.</p> <p>Ranskassa ja Hollannissa noudatettavat ammoniakkikylmälaitosten suojaetäisyydet ympäristön kohteisiin on selvitetty. Lisäksi on laskettu vaaraetäisyydet suomalaisten ammoniakkikylmälaitosten kahdelle tyypilliselle vuodelle.</p> <p>Euroopan teollisuuskaasuyhdistys EIGA on julkaissut suosituksen nestehappivaraston turvallisuusselvityksen sisällöstä. Nestehapen varastosäiliöiden tyhjennyslinjan ja säiliöauton purkausletkun nestevuotojen sekä höyrystimen jälkeisen putkilinjan kaasuvuodon vaaraetäisyydet on laskettu.</p> <p>Ammoniumnitraattivaraston tyyppionnettomuuden shokkiaallon tiettyjä rintamapaineen arvoja vastaavat etäisyydet on laskettu KTM:n päätöksen (172/1984) ainemäärillä. Päätöksessä annettujen rakennusten suojaetäisyydet vastaavat suunnilleen rintamapaineen arvoa 6 kPa ja kulkuväylien suojaetäisyydet arvoa 9 kPa.</p> | | | |
| Luottamuksellisuus | julkinen | | |
| Espoo 7.4.2010 | <table border="0"> <tr> <td style="text-align: center;"> Laatija  Risto Lautkaski erikoistutkija </td> <td style="text-align: center;"> Hyväksyjä  Timo Vanttola teknologiapäällikkö </td> </tr> </table> | Laatija  Risto Lautkaski erikoistutkija | Hyväksyjä  Timo Vanttola teknologiapäällikkö |
| Laatija  Risto Lautkaski erikoistutkija | Hyväksyjä  Timo Vanttola teknologiapäällikkö | | |
| VTT:n yhteystiedot PL 1000, 02044 VTT | | | |
| Jakelu (asiakkaat ja VTT) TUKES, Leena Ahonen, 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..... | 3 |
| 2 | Ammoniakkikylmälaitokset | 3 |
| 2.1 | Onnettomuuskuvauksia | 3 |
| 2.1.1 | Räjähdykset | 4 |
| 2.1.2 | Elintarviketeollisuuden ammoniakkivuodot | 5 |
| 2.1.3 | Tekojääraatojen ammoniakkivuodot | 10 |
| 2.1.4 | Ammoniakkivuoto tulipalon seurauksena..... | 12 |
| 2.2 | Ranskan kylmälaitosten turvallisuusselvitykset..... | 13 |
| 2.2.1 | Vaaraetäisyydet ja suojavyöhykkeet | 14 |
| 2.2.2 | Kylmälaitoksen vaaraetäisyyksien laskeminen | 15 |
| 2.2.3 | Kylmälaitosesimerkki | 18 |
| 2.3 | Hollannin kylmälaitosten suojaetäisyydet..... | 19 |
| 2.4 | Kylmälaitoksen vuotojen vaaraetäisyydet | 24 |
| 3 | Nestehapen varastosäiliöt | 28 |
| 3.1 | Onnettomuuskuvauksia | 28 |
| 3.1.1 | Räjähdykset | 28 |
| 3.1.2 | Vuodot | 28 |
| 3.2 | Nestehappisäiliöiden turvallisuusselvitykset | 31 |
| 3.3 | Nestehappisäiliön vaaraetäisyydet..... | 36 |
| 3.3.1 | Seoksen lämpötila..... | 36 |
| 3.3.2 | Pisaroituva suihku | 37 |
| 3.3.3 | Varastosäiliön tyhjennyslinja | 38 |
| 3.3.4 | Säiliöauton purkausletku..... | 42 |
| 3.3.5 | Happikaasun vuoto | 43 |
| 4 | Ammoniumnitraatti..... | 45 |
| 5 | Yhteenveto ja johtopäätökset | 48 |
| 5.1 | Ammoniakkikylmälaitokset..... | 48 |
| 5.2 | Nestehappisäiliöt..... | 52 |
| 5.3 | Ammoniumnitraatti | 55 |
| | Lähdeviitteet | 55 |

1 Johdanto

Tässä tutkimuksessa on kerätty tietoa ammoniakkikylmälaitosten, nestehappisäiliöiden sekä ammoniumnitraatin varastosuojien sijoittelussa huomioonotettavista tekijöistä. Ammoniakin osalta tarkastellaan pieniä, lähellä asutusta olevia kylmälaitoksia, kuten esimerkiksi jäähalleja. Nestehapen osalta tarkastellaan sairaaloiden varastosäiliöitä. Tutkimuksen tarkoituksena on tuottaa tausta-aineistoa määräysten päivitystä varten.

Kappaleessa 2.1 on kuvauksia ulkomailla ammoniakkikylmälaitoksissa sattuneista vahingoista ja onnettomuuksista. Kappaleessa 2.2 on esitetty Ranskan ammoniakkikylmälaitosten suojavyöhykkeiden määritelmät ja maankäytön rajoitukset. Suojavyöhykkeet perustuvat tiettyjen ammoniakkivuotojen vaaraetäisyyksiin, joiden laskentamenetelmät kuvataan. Kappaleessa 2.3 esitetään Hollannin ammoniakkikylmälaitosten suojaetäisyydet, jotka perustuvat yksilöriskin arvoon $10^{-6}/a$. Kappaleessa 2.4 lasketaan vaaraetäisyydet suomalaisten ammoniakkikylmälaitosten kahdelle tyypilliselle vuodelle.

Kappaleessa 3.1 on kuvauksia ulkomailla nestehappivarastoilla sattuneista vahingoista ja onnettomuuksista. Kappaleessa 3.2 on esitetty Euroopan teollisuuskaasuyhdistys EIGAn suositus nestehappivaraston turvallisuusselvityksen sisällöstä. Kappaleessa 3.3 lasketaan sairaaloiden nestehappisäiliöiden neste- ja kaasuvuotojen vaaraetäisyydet.

Kappaleessa 4 lasketaan ammoniumnitraattivaraston tyyppionnettomuuden (safety case) shokkiaallon tiettyjä rintamapaineen arvoja vastaavat etäisyydet KTM:n päätöksen (172/1984) ainemäärillä.

Kappaleessa 5 tehdään yhteenveto tutkimuksen tuloksista.

2 Ammoniakkikylmälaitokset

2.1 Onnettomuuskuvaus

Ammoniakkikylmälaitoksilla sattuneista onnettomuuksista haettiin tietoa vuonna 1999 tutkimuksen "Ammoniakkia sisältävien kylmälaitosten turvallisuus" yhteydessä. Haku tehtiin englantilaisesta MHIDAS-tietokannasta, jossa tuolloin oli yli 7000 tietuetta kemikaalionnettomuuksista. Muutama onnettomuuskuvaus löytyi myös haettaessa kylmälaitoksiin liittyviä kirjallisuusviitteitä HSELINE-tietokannasta. Löydetyt kuvaukset jakaantuivat seuraavasti (Lautkaski 1999):

- a) 3 ammoniakkiräjähdyttä.
- b) 8 ammoniakkivuotoa, joissa oli henkilövahinkoja, päästö aiheutti terveyshaittaa yrityksen ulkopuolella tai ihmisiä evakuoitiin.
- c) 8 vuotoa, joissa ei ollut henkilövahinkoja eikä päästö aiheuttanut terveyshaittaa yrityksen ulkopuolella, mahdollisesti työntekijöitä altistui kaasulle tai heidät evakuoitiin.

d) 6 tulipaloa.

Saadun aineiston analysoinnin jälkeen VTT:lle saatiin Ranskan ympäristöministeriön tutkimus ammoniakkikylmälaitoksilla sattuneista onnettomuuksista (Claret 1995), joka perustui 135:een kylmälaitoksilla vuosina 1958–94 sattuneeseen onnettomuuteen. Vertailuaineistona oli 221 muissa ammoniakkijärjestelmissä sattunutta onnettomuutta. Kaikki onnettomuudet ovat Ranskan ympäristöministeriön ARIA-tietokannassa. Onnettomuusaineisto on analysoitu raportissa (Claret 1995), jossa on myös käsitelty kiinnostavimpia Ranskassa vuosina 1980–94 sattuneita onnettomuuksia.

Ulkomaisessa onnettomuusaineistossa vuosilta 1958–92 (44 onnettomuuskuvausta) oli 4 ammoniakkiräjähdyistä ja 5 suurta vuotoa.

MHIDAS suljettiin vuoden 2008 lopussa ulkopuolisilta, sen sijaan ARIA on avattu ulkopuolisten vapaasti käytettäväksi. Tässä tutkimuksessa luokiteltiin ARIAn vuosina 1995–2009 (elintarviketehtaiden tai tekojääraitojen) ammoniakkikylmälaitoksissa sattuneet onnettomuudet. Onnettomuudet luokiteltiin seuraavasti (vuoden 1999 tutkimuksen luokittelua on hieman täsmennetty):

- a) 5 räjähdystä, joissa ammoniakki oli osallisena tai jotka aiheuttivat ammoniakkivuodon.
- b) 22 ammoniakkivuotoa, joissa oli henkilövahinkoja, päästö aiheutti terveyshaittaa tai ihmisiä evakuoitiin yrityksen ulkopuolella. Kaikki tekojääraitojen onnettomuudet on kuitenkin otettu mukaan.
- c) 98 vuotoa, joissa ei ollut henkilövahinkoja eikä päästö aiheuttanut terveyshaittaa yrityksen ulkopuolella, mahdollisesti työntekijöitä altistui kaasulle tai heidät evakuoitiin. Käytöstä poistettujen kylmälaitosten purkamisen yhteydessä sattuneet vuodot on jätetty pois.
- d) 10 tulipaloa, joihin liittyi ammoniakkivuoto. Tulipalot, jotka eivät aiheuttaneet ammoniakkivuotoa, on jätetty pois.

2.1.1 Räjähdykset

Vain ne kylmälaitoksilla sattuneet räjähdysonnettomuudet kuvataan, joissa ammoniakkipäästö aiheutti vaaraa laitoksen ulkopuolella.

Los Angeles, CA, USA 1980 Meijerissä sattui yöllä räjähdys ja ammoniakkia levisi ympäristöön. Räjähdyksessä loukkaantui 12 henkeä ja 10 vietiin sairaalaan ammoniakkin hengittämisen aiheutuneiden oireiden takia (MHIDAS, 71).

Hyderabad, Pakistan 1989 Jäätelötehtaan kylmälaitoksessa tapahtui räjähdys, jota seurasi pitkäaikainen ammoniakkivuoto. 1500–1600 henkeä, mm. joukko viereisen koulun oppilaita, sai ammoniakista oireita (ARIA, 775).

Homer, AL, USA 1998 Kalasäilyketehtaalla tapahtui räjähdys ja tulipalo, jossa ammoniakkiputkia murtui. Ammoniakkipilvi levisi viereiselle matkailualueelle. Noin 1500 naapurua evakuoitiin (ARIA, 13426).

Davie, FL, USA 2000 Jäätelötehtaassa tapahtui yöllä ammoniakkiräjähdykset. Tehtaan edustajan mukaan jäähdytysjärjestelmän paine oli noussut ja varoventtiilit

olivat avautuneet. Vuotanut kaasu oli räjähtänyt. Rakennuksessa oli seitsemän työntekijää, joista kaksi vakavasti loukkaantunutta kuljetettiin sairaalaan ja loput hoidettiin paikan päällä. Muut työntekijät sekä ympäristön asukkaat evakuoitiin (ARIA, 18561).

North Charleston, SC, USA 2000 Jäätelötehtaassa tapahtui räjähdys, jota seurasi ammoniakkipäästö. Viereistä asuntovaunualuetta evakuoitiin poliisi sekä yksi alueen asukkaista otettiin sairaalahoitoon ammoniakkialtistuksen takia (ARIA, 17677).

Lancaster, PA, USA 2000 Ammoniakin ja öljyn seos räjähti pakastamossa. Räjähdys heitti rakennuksen seinän osan ja rakennusjätettä kadun toiselle puolelle. Kompressorin luona ollut työntekijä sai vaikeat palovammat. Muut 32 työntekijää evakuoitiin. Vastapäätä olleet talon asukas, joka näki kaasupilven tunkeutuvan sisään, pyörtyi eikä ehtinyt tehdä hätäilmoitusta. Hänet kuljetettiin sairaalaan. Ilmakompressorin laippavuoto aiheutti ammoniakkijärjestelmän varoventtiilin avautumisen ja ammoniakkipäästön. Työntekijät saivat palonalun sammumaan ja vuodon tukittua muutamassa minuutissa (ARIA, 18281).

Sukkur, Pakistan 2001 Ammoniakkiputki räjähti ruokaöljytehtaassa. Räjähdystä seurannut tulipalo tuhosi tehtaan palokunnan ponnisteluista huolimatta. Kylmätiloissa työskennelleet työntekijät menettivät tajuntansa ja hautautuivat rakennusjätteen alle. Neljä työntekijää kuoli ja 12 loukkaantui vakavasti (ARIA, 20684).

Montevideo, Uruguay 2004 Montevideon satamassa olleella eteläkorealaisella jäähdytysaluksella sattui räjähdys. Kolmen läheisen kalastusaluksen miehistö sekä satamatyöntekijöitä altistui ammoniakille. 74 henkeä kuljetettiin sairaalaan. Aluksessa oli 55 m pitkä jäähdytyshuone (ARIA, 27072).

Mouqtadiya, Irak 2006 Jäätelötehtaassa tapahtunut räjähdys vahingoitti ammoniakkiäiliötä. Ammoniakkia levisi ympäristöön ja 135 kaasua hengittänyttä asukasta kuljetettiin sairaalaan. Osa heistä jäi sairaalahoitoon. Räjähdys saattoi olla joko onnettomuus tai sabotaasi (ARIA, 31570).

2.1.2 Elintarviketeollisuuden ammoniakkivuodot

Vain ne kylmälaitoksilla sattuneet ammoniakkivuodot kuvataan, jotka aiheuttivat tai olisivat saattaneet aiheuttaa vaaraa laitoksen ulkopuolella. Onnettomuuskuvauksista ei käy ilmi, kuinka lähellä kylmälaitosta oli asuinrakennuksia yms. kohteita, joissa oli vaaraan joutuvia sivullisia. Niinpä se, että päästö ei aiheuttanut terveyshaittaa yrityksen ulkopuolella, ei välttämättä merkitse, ettei se olisi voinut aiheuttaa haittaa, jos vaaraan joutuvia sivullisia olisi ollut lähempänä tai jos tuulen suunta olisi ollut toinen. Siksi myös osa edellä ryhmään c) luokitelluista onnettomuuskuvauksista on otettu mukaan. Valintakriteerinä on tällöin ollut päästön suuruus.

Hull, UK 1971 Kalatehtaan ammoniakkiputki murtui. 500 työntekijää poistui rakennuksesta. 12 työntekijää vietiin sairaalaan tutkittaviksi (MHIDAS, 351).

Söul, Etelä-Korea 1975 Kalatehtaan kolmannessa kerroksessa olleen konehuoneen iso ammoniakkiäiliö repesi. 4 työntekijää kuoli välittömästi myrkytykseen ja 1

kuoli hypättyään ikkunasta. 85 työntekijää vietiin sairaalaan, useat heistä olivat kriittisessä tilassa. Lisäksi kolme palomiestä sai myrkytyksen (MHIDAS, 8).

York, UK 1977 Einestehtaan jäähdytysjärjestelmän putki murtui ja 3000 kg neste-ammoniakkia vuoti. Yksi lapsi kuoli heti ja 18 henkeä vietiin sairaalaan (MHIDAS, 49).

Toronto, Kanada 1982 Teurastamon varaajasäiliön ja kompressorien välisessä putkessa ollut venttiili murtui ja nesteammoniakkia vuoti konehuoneeseen. Järjestelmässä oli 5000 kg ammoniakkia. Vuotoa tutkimaan mennyt tekniikko kuoli, kaksi asentajaa vietiin sairaalaan (josta he pääsivät kotiin) ja kaksi palomiestä sai lievän myrkytyksen. 500–600 työntekijää poistui rakennuksesta. Asukkaat valittivat kaasun hajusta vielä 1,5 km:n päässä, mutta pitoisuudeksi mitattiin vain 2 ppm (MHIDAS, 33).

Vernon, CA, USA 1984 Lihapakkaamon 1,2 m³:n varaajasäiliö repesi. Säiliön pääty lensi 15 m ja puhkasi tehtaan katon. Kattoon syntyneestä aukosta ja katkenneista putkista pääsi ammoniakkia tehdashalliin. Työntekijöitä ja ohikulkijoita loukkaantui yhteensä 42, heistä 3 vakavasti. Jäähdytysjärjestelmä ja revennyt säiliö olivat 40–50 vuotta vanhoja (MHIDAS, 3624).

Burbank, CA, USA 1984 Jäätelötehtaan katolla sijainnut 1,9 m³:n varaajasäiliö repesi. Kaasu levisi asuinalueelle ja 9 ohikulkijaa jouduttiin viemään sairaalaan. Poliisi eristi alueen ja evakuoiti kahden korttelin asukkaat. Vuoto eristettiin nopeasti (MHIDAS, 787).

San Antonio, TX, USA 1985 Jäätelötehtaan kylmälaitteiston varaajasäiliö repesi. 23 henkeä loukkaantui ja 20 työntekijää evakuoitiin (ARIA, 5287).

Gloucester, UK 1985 Jäätelötehtaassa oli ammoniakkivuoto ja kaasu levisi läheiselle jalkapallokentälle. Peli jouduttiin keskeyttämään, kun yskiviä pelaajia ja katsojia kaatui maahan. Kukaan ei kuitenkaan saanut vammoja ja peliä jatkettiin 15 minuutin kuluttua (MHIDAS, 1172).

Tullos, UK 1987 Pumpun painejohdon varoventtiilin laippa murtui kylmävaraston konehuoneessa ja nestettä vuoti 1200 kg. Nestettä vuoti myös maanalaisiin kanaviin. Kaasu levisi moottoritien poikki 200 m:n etäisyydellä olleeseen asuinlähiöön. Tekniikko sulki vuodon. Kaasu levisi koko varastorakennukseen, joka tuuletettiin savutuulettimilla. Ulkona kaasua sidottiin sumusuihkuilla (MHIDAS, 3036).

Bhopal, Intia 1987 Jäätelötehtaan viallisesta venttiilistä vuoti ammoniakkia puolen yön jälkeen. Noin 200 000 asukasta pakeni kodeistaan (vuonna 1984 noin 2000 asukasta kuoli metyyli-diisosyanaattivuodon seurauksena). Poliisin kaiutinautot ilmoittivat, että kaasu on vaaratonta. Siitä huolimatta useita ihmisiä loukkaantui joukkopaon aikana (MHIDAS, 2853).

Melbourne, Australia 1987 Ammoniakkia vuoti pakastamosta. Sairaankuljettajat hoitivat kolmea hengitysvaikeuksista kärsinyttä henkilöä. 20–30 asuntoa evakuoitiin kahdeksi tunniksi. Palokunnan kemikaalisukeltajat saivat vuodon tukittua tunnin kuluttua (MHIDAS, 3111).

Wellston, OH, USA 1989 Pizzapakastamosta vuotanut ammoniakki aiheutti oireita 50 henkilölle, joista 27 otettiin sairaalahoitoon. Vuodon takia viranomaiset evakuoivat koko 7500 asukkaan kaupungin (MHIDAS, 3963).

Grimsby, UK 1989 Pakastevaraston jäähdytyspiirin paineellinen putki (NS 25) murtui. 400 kg ammoniakkaa pääsi ilmaan. 23 henkeä otettiin sairaalaan ja 400 evakuoitiin. Vuodon syynä oli putken tukkeutuminen (ARIA, 143).

Toronto, Kanada 1989 Suuri ammoniakkivuoto lihajalostetehtaan pakkasvarastossa. 1 kuoli ja 11 sai myrkytyksen. Tehtaan 1200 työntekijää evakuoitiin (ARIA, 1014).

Croydon, UK 1990 Jäätelötehtaan työntekijä ei saanut nesteputken venttiiliä suljettua ja 200 litraa nestemäistä ammoniakkaa valui lattialle. Läheinen peruskoulun ala-aste evakuoitiin, kun sinne levisi kaasua. Runsaat 300 lasta siirrettiin läheiseen puistoon. 15 oppilasta ja yksi opettaja vietiin sairaalaan, josta he pääsivät illalla kotiin. Palokunnan kemikaalisukeltajat sulki venttiilin ja huuhtelivat vuotoa vedellä. Lapset palasivat takaisin kouluun (MHIDAS, 4062).

Wilhemsburg, Saksa 1991 Kylmälaitos oli pysäytetty valvomosta ja kompressori käynnistettiin uudelleen konehuoneesta. 1200 kg ammoniakkaa vuoti ja 6 henkilöä sai myrkytysoireita. Palokunta käytti vesiverhoja rajoittamaan kaasun leviämistä ja helpottamaan vuodon sulkemista (ARIA, 5294).

Anderlecht, Belgia 1992 Jäätelötehtaan kylmälaitoksessa sattunut ammoniakkivuoto aiheutti oireita naapureille. Ammoniakin haju havaittiin 100 m:n päässä. Palokunnalta kului tunti kompressorin öljynerottimessa olleen vuotokohdan löytämiseen ja venttiilin sulkemiseen. 1 palomies ja 5 työntekijää saivat syöpymävammoja ja heidät otettiin sairaalahoitoon (ARIA, 3954).

Newark, UK 1992 Kakkupakastamossa sattui yöllä ammoniakkivuoto. Yövuoron 45 työntekijästä kymmenen vietiin hengitysvaikeuksien takia sairaalaan, josta heidät päästettiin kotiin. Vuodon arvellaan johtuneen jäähdytysjärjestelmän paineen noususta. Palokunnan kemikaalisukeltajat sulki vuodon (MHIDAS, 5661).

Tregunc, Ranska 1993 Ammoniakkivuoto pakastetehtaan kylmälaitoksesta aiheutti myrkytyksen 34 henkilölle, jotka vietiin kolmeen sairaalaan. 32 heistä pääsi tarkastuksen jälkeen kotiin, mutta 2 otettiin sairaalahoitoon (ARIA, 4793).

Peyrolles-en-Provence, Ranska 1994 Lihajalostetehtaan putkikäytävässä tapahtui kylmälaitoksen asennustöiden yhteydessä kaksi ammoniakkivuotoa. 11 henkeä, joista 2 palomiestä, vietiin sairaalaan myrkytysoireiden takia. Tehtaan 250 työntekijää evakuoitiin (ARIA, 5104).

Lamballe, Ranska 1994 Teurastamon kylmälaitoksen hoitaja teki korjaustöitä. Hän tyhjensi ensin varaajasäiliön avaamalla moottoriventtiilin ohjaaman venttiilin sarjan. Moottoriventtiilin vika johti kylmälaitoksen hoitajan tietämättä ammoniakkivuotoon, jonka seurauksena 19 työntekijää sai myrkytysoireita. Heistä 8 otettiin sairaalaan ja muita hoidettiin työpaikalla. Heti kun kylmälaitoksen hoitaja sai tiedon onnettomuudesta, hän sulki vuodon tekemällä hätäpysäytyksen. 200 työntekijää evakuoitiin 30 minuuttia kestäneen tuuletuksen ajaksi. Kylmälaitoksen

kunnossapito työaikana kiellettiin, evakuointisuunnitelmaa ja hälytysjärjestelmää ruvettiin kehittämään (ARIA, 4117).

Little Trethew, UK 1994 Putken tiivistyslaipan hitsi murtui ranskanperunatehtaan pakastamossa. Aukosta vuosi 500 kg ammoniakkia, joka levisi tehdashalliin. Kaikki työntekijät pääsivät pelastautumaan ulos, mutta kaksi miestä sai oireita kaasun hengittämisestä. Miehet vietiin sairaalaan, mistä heidät myöhemmin kotiutettiin. Palokunta tuuletti 3000 m²:n tehdashallin (MHIDAS, 6985).

Wigan, UK 1994 Broilerpakastamosta purkautui ammoniakkia ilmaan sienenmuotoisena pilvenä. 54 hengitysvaikeuksista ja silmien ärsytyksestä kärsivää henkilöä vietiin sairaalaan kymmenellä ambulanssilla. Heidän joukossaan oli kaksi poliisia ja 13 viereisen tehtaan työntekijää. Myöhemmin kaikki pääsivät kotiin. Sairaankuljettajat antoivat happea yhteensä 59:lle työntekijöille ja paikalliselle asukkaalle, joita kaikkia ei kuljetettu sairaalaan.

Asuntoja sekä päiväkoti evakuoitiin ja alue eristettiin. Asukkaita kehoitettiin sulkemaan ikkunat. Palokunta satoi päästöä sumusuihkuilla. Kemikaalisukeltajat tukkivat vuodon puutapilla. Pakastamon toiminta oli ollut keskeytyksissä usean viikon ajan omistajanvaihdoksen takia (MHIDAS, 7088).

Cavaillon, Ranska 1995 Pakastevaraston kylmälaitoksessa oli ammoniakkivuoto. Läheisen oppikoulun tuhatkunta oppilasta ja 600 asukasta evakuoitiin. 9 henkeä, joista yksi palomies, otettiin sairaalahoitoon. 7 lievän myrkytyksen saanutta henkilöä sai hoitoa paikalla (ARIA, 6414).

Cherbourg, Ranska 1995 Teurastamon kylmävarastossa havaittiin heikko ammoniakin haju. Höyrystimen kuumakaasuputken vastaventtiilin laipan havaittiin vuotavan. Varasto tyhjennettiin, höyrystin eristettiin ja tyhjennettiin. Seuraavana päivänä vuotava venttiili irrotettiin. Sillä välin, kun työpajalla työstettiin uutta liitosta, järjestelmästä poistettuun öljyyn liuennutta ammoniakkia vapautui ja se levisi viereiseen myymälään. 15 työntekijää evakuoitiin ja 9 heistä vietiin sairaalaan. Yksi työntekijä otettiin sairaalahoitoon (ARIA, 7329).

Hampuri, Saksa 1995 Pakastevaraston kylmälaitoksen säätöventtiilin vika aiheutti lämpimän nesteen takaisinvirtauksen välipainesäiliöön ja sieltä edelleen lauhduttimen kiertoön. Paineen nousu lauhduttimen kierrossa avasi varoventtiilit, joiden kautta purkautui 500 kg ammoniakkia. Poliisi eristi alueen. Säätö- ja varoventtiilit vaihdettiin. Lauhduttimeen asennettiin uimurin ohjaama kytkin. Asiantuntijan tehtäväksi asetettiin riskien tunnistaminen ja eliminointi (ARIA, 12029).

Arles, Ranska 1995 Vihannes- ja hedelmätukun kylmälaitoksen hoitaja piti vapaa-päivää. Hän antoi kuitenkin yhdelle työntekijälle asennusohjeita puhelimitse. Työntekijä avasi väärän venttiilin eikä osannut sulkea sitä ennen kuin ryntäsi turvaan. Vuoto kesti tunnin ja 40 minuuttia ja tänä aikana vuoti 400 kg ammoniakkia. Navakka tuuli rajoitti vuodon vaara-alueita. Palokunta sulki vuodon. Kolme työntekijää sai lievän myrkytyksen ja heidät otettiin sairaalaan, josta heidät päästettiin myöhemmin kotiin (ARIA, 7680).

München, Saksa 1996 Panimon kylmälaitoksen pumpun murtumasta vuoti 400–700 kg ammoniakkia. Liikenne ohjattiin kiertotietä ja läheinen metroasema suljet-

tiin. Väestöä varoitettiin radioilla ja kaiutinautoilla. Yksi palomies ja kaksi työntekijää otettiin sairaalahoitoon (ARIA, 11400).

Saint-Gilles-Croix-de-Vie, Ranska 1996 Pakastevaraston työntekijä avasi öljynpoistoventtiilin, josta purkautui 25 kg ammoniakkia, kun putken tukos lähti äkkiä liikkeelle. Kaksi työntekijää ja yksi palomies saivat myrkytyksen. Kaksi heistä vietiin sairaalaan. Ilmanvaihdon mukana ulkoilmaan päässyt ammoniakki aiheutti haittaa ympäristössä. Viereiset yritykset, laivojen miehistöt ja ohikulkijat evakuoitiin. Tyhjennysventtiileihin asennetaan vastapainot, jotka sulkevat ne automaattisesti ja venttiilien alle sijoitetaan keräilyaltaat (ARIA, 8400).

Weierstadt, Saksa 1996 Ammoniakkivuoto leipomon kylmälaitoksessa. Poliisi ja palokunta evakuoivat ympäristön. Neljä työntekijää otettiin sairaalaan tarkkailtaviksi (ARIA, 11133).

Havana, Kuuba 1996 Ammoniakkivuoto kalastussataman varaston kylmälaitoksessa. 435 myrkytyksen saanutta henkilöä otettiin sairaalahoitoon (ARIA, 8888).

Marcillé-Raoul, Ranska 1996 Meijerin kylmähuoneessa oli ammoniakkivuoto. Meijerin ympäristö eristettiin. Peruskoulu sekä useita asuntoja evakuoitiin. Ambulanssilääkäri tutki viisi henkilöä (ARIA, 9052).

Cuiseaux, Ranska 1997 Teurastamon kylmälaitos oli otettu käyttöön kuukautta aikaisemmin. Paluulinjan moottoriventtiilistä vuoti 2200 kg nesteammoniakkia (järjestelmässä oli 8500 kg). Palokunta evakuoivat työntekijät, kehotti asukkaita pysymään sisällä 500 m:n säteellä ja rajoitti kaasun leviämistä vesiverholla. Vuoto saatiin suljettua 2 tunnin kuluttua, minkä jälkeen rakennusta tuuletettiin 30 tunnin ajan. Ammoniakin haju havaittiin kilometrin päässä. Yksi asentaja otettiin sairaalahoitoon. Vuodon syynä oli viallinen liitos, jossa oli uuden tyyppinen tiiviste (ei asbestia) ja joka oli huonosti kiristetty (ARIA, 10165).

Fulda, Saksa 1997 Trukin törmäys irrotti pakastevaraston putkiston varoventtiilin. Viereisen yrityksen 10 työntekijää sai myrkytysoireita ja 4 heistä vietiin sairaalaan. Palokunta rajoitti kaasun leviämistä vesiverholla ja poliisi varoitti naapureita (ARIA, 14170).

USA 1998 Ammoniakkivuoto tehtaan kylmälaitoksessa surmasi yhden työntekijän ja aiheutti myrkytyksen kolmelle muulle. Naapuritehtaan 250 työntekijää evakuoitiin (ARIA, 14643).

Caldwell, ID, USA 2000 Ammoniakkia vuoti meijerin jäähdytysjärjestelmän venttiilistä. Nesteammoniakki aiheutti vaikeat syövytysvammat työntekijälle, joka yritti sulkea venttiiliä. Kemikaalisukeltajat sulkiivat venttiilin. Meijerin 24 työntekijää evakuoitiin. Tuuli kuljetti päästön pois päin asutuksesta (ARIA, 18176).

Lahore, Pakistan 2000 Ammoniakkivuoto syttyi pakastevarastossa. Palokunta saapui nopeasti paikalle. Ammoniakkipilvi aiheutti paniikkia ja oireita kymmenille ihmisille, joista 24 vietiin sairaalaan. Viranomaiset evakuoivat asukkaita. Palo sammutettiin ja vuoto tukittiin. Yksi työntekijä kuoli sairaalassa syövytysvammoinhinsa (ARIA, 18177).

Morro Bay, CA, USA 2001 Kalatuotetehtaassa raskaat rakenteet romahtivat vanhan jäähdytysyksikön päälle. Yksiköstä purkautui 1,1 m³ ammoniakkia. Kaksi koulua suljettiin ja 1500 henkilöä (asukkaita, koululaisia, työläisiä ja matkailijoita) evakuoitiin (ARIA, 21744).

Arlington, VA, USA, 2002 Sunnuntaina ammoniakkia vuoti lihajalostetehtaan 11 m³:n säiliöstä. Liikenne katkaistiin läheisillä moottoriteillä. Ympäristön 1500 asukasta evakuoitiin usean tunnin ajaksi. Kolme asukasta otettiin sairaalaan tarkkailtaviksi vähäisten hengitysvaivojen takia. Kemikaalisukeltajat tukkivat vuodon. Ilkivaltaa pidettiin mahdollisena vuodon syynä (ARIA, 22970).

Christchurch, Uusi Seelanti 2002 Varoventtiili avautui leipomon jäähdytysjärjestelmään muodostuneen ylipaineen seurauksena. Tyynen sään takia ammoniakkia imeytyi ilmanvaihdon mukana viereiseen elintarvikevarastoon. Varaston työntekijöistä 10 otettiin sairaalahoitoon ja 15 sai hoitoa paikan päällä. Kaikki työntekijät evakuoitiin ja liikenne katkaistiin läheisillä teillä (ARIA, 22947).

Savigneux, Ranska 2002 Viikonlopuksi suljetun meijerin jäähdytysjärjestelmään tuli vuoto. Järjestelmän vastuuhenkilö sai ilmoituksen etävalvontajärjestelmän kautta ja hälytti palokunnan. Palokunta oli kohteessa 10 minuutin kuluttua. Samaan aikaan ohiajanut moottoripyöräilijä hengitti kaasua ja ajoi suoraan sairaalaan. Palokunta eristi ympäristön ja katkaisi liikenteen tiellä. Vuotokohta oli jäävesialtaan jäähdytyskierukassa, mutta sen tukkimistavan löytämiseksi oli käytävä pitkät neuvottelut palokunnan ja kylmätekniikkojen kesken. Palokunta sai vuodon tukittua kolmen tunnin kuluttua. Ammoniakkipäästökseen arvioitiin 700 kg. Viranomaisena vaati vuodon syystä asiantuntijalausannon, jonka mukaan syynä oli matalapainesäiliön varoventtiilin vika (ARIA, 23035).

Vitre, Ranska 2006 Jäätelötehtaan kylmälaitoksessa korkeapainepiiriin varoventtiili avautui ja 600–800 l ammoniakkia purkautui sen kautta. Konehuoneen kaasunilmaisesta käynnisti laitoksen hätäpysäytyksen. Palokunta rajoitti päästön leviämistä kahdella levysuihkulla. Ammoniakin pitoisuudeksi 200 m:n etäisyydellä mitattiin 39 ppm. Tehtaan sekä naapuriyritysten työntekijät evakuoitiin 50 m:n etäisyydellä tuulen alapuolella. Poliisi kehotti asukkaita 200 m:n säteellä (joita oli 150 henkeä) pysyttelemään sisällä. Vuodon syyksi todettiin varoventtiilin liian pieneksi säädetty avautumispaine (ARIA, 31239).

Saverne, Ranska 2008 Panimon kylmälaitoksen 600 kg:sta vuoti kompressorihuoneessa kaasumaisena 10–20 kg. Panimon ympäristö eristettiin ja kahden naapuriyrityksen 100 työntekijää evakuoitiin. Vuoto lakkasi vajaan tunnin kuluttua, kun eristysventtiilit suljettiin (ARIA, 35005).

2.1.3 Tekojäätöjen ammoniakkivuodot

Useimmat ARIA-tietokannan tekojäätöjen ammoniakkivuotojen kuvauksista on otettu mukaan, vaikka jotkut niistä jäivät seurauksiltaan vähäisiksi. Pienet vuodot, jotka eivät aiheuttaneet vaaraa, sekä putkiston purku- tai korjaustöiden yhteydessä syntyneet vuodot on jätetty pois. On huomattava, että tietokannan kuvauksissa ei ole täsmennetty, milloin tekojäätö on ollut jäähallissa ja milloin ulkona. Muusta tekstistä tai Internetin avulla tekojäätöjen sijoituspaikat saattoi kuitenkin päätellä.

Frankfurt am Main, Saksa 1994 Kun jäähallin kylmälaitoksen ruuvikompressori käynnistettiin, konehuoneeseen purkautui öljyn ja ammoniakkin seosta. Kaasunilmaisoin hälytytti palokunnan. Kylmälaitos ja konehuoneen ilmanvaihto pysähtyivät. Kompressorin eristysventtiilit suljettiin. Jäähalli evakuoitiin, mutta siitä huolimatta ammoniakkin haju vaivasi 800 ihmistä (ARIA, 18591).

Durham, NC, USA 1996 Yliopiston jäähallin kylmälaitoksen ammoniakki vuoto aiheutti oireita usealle ihmiselle ja 700 henkeä evakuoitiin naapurustosta (ARIA 7648).

Frankfurt am Main, Saksa 1996 Jäähallissa oli ammoniakki vuoto. Naapurit havaitsivat hajun ja hälyttivät palokunnan. Liikenne metrolinjalla keskeytettiin ja 40 lasta evakuoitiin. Valkoista höyryä purkautui kylmälaitoksen 34 varoventtiilin kokoojaputken päästä. Viallinen varoventtiili suljettiin ja päästö lakkasi 15 minuutin kuluttua (ARIA, 14671).

Neu-Ulm, Saksa 1996 Jäähallin kylmälaitoksesta vuoti 200–500 kg ammoniakkaa. Palokunta pysäytti laitoksen ja satoi päästöä vesiverholla. Poliisit ja kaupungin työntekijät evakuoivat hallin käyttäjät, eristävät hallin ja varoittivat ympäristön asukkaita. 51 kaasua hengittänyttä henkilöä kuljetettiin sairaalaan ja 8 heistä otettiin sairaalahoitoon. Vuodon syynä oli kompressorin tiivisteen osittainen irtoaminen (ARIA, 14675).

Regensburg, Saksa 1997 Jäähallin korjaustöihin osallistunut työntekijä katkaisi ammoniakkiputken betonia piikatessaan. Aukosta purkautui 1500 kg ammoniakkaa. Kaksi henkeä laitoksessa ja neljä sen ulkopuolella hengitti kaasua. Palokunta satoi päästöä sumusuihkuilla. Vuoto saatiin lakkaamaan vasta 12 tunnin kuluttua (ARIA, 14696).

Bergamo, Italia 1997 Jäähallin kylmälaitoksessa oli ammoniakki vuoto. Viereisen päiväkodin henkilökunta havaitsi hajun ja hälytytti palokunnan. Päiväkotia evakuoitiin. Neljä lasta ja neljä hoitajaa vietiin sairaalaan (ARIA 12074).

Reims, Ranska 1998 Urheilukeskuksessa oli uima- ja jäähalli. Jäähallin kylmälaitoksessa oli ammoniakki vuoto. Halli evakuoitiin. 15 henkilöä vietiin sairaalaan tarkkailtaviksi. Vuoto sattui, kun nestepintaa alennettiin jäähdykesäiliössä (ARIA, 11332).

Grenoble, Ranska 1999 Kunnossapitotöiden yhteydessä jäähallin jäähdytysputkiston silmukan hitsisaumaan tuli vuoto. Kylmälaitoksessa oli 3600 kg ammoniakkaa. Hitsaaja haistoi kaasun hajun ja sitten kaasunilmaisoin hälytytti. Palokunta ja poliisi hälytettiin kello 9.30. Tuulen alapuolella eristettiin 100 m:n pituinen vaara-alue. Vuoto saatiin tukittua kello 13. Viidessä tunnissa silmukan sisältö, 100 l nesteammoniakkaa, oli vuotanut ulos. Ammoniakkin pitoisuudeksi jäähallissa mitattiin 140 ppm (ARIA, 15966).

Dresden, Saksa 2000 Jäähdytysjärjestelmän varoventtiili avautui kilpailuisteluradan konehuoneessa. Ammoniakkaa purkautui ulkoilmaan 5 min:n ajan. Ammoniakkin haju häiritsevi paikalle olleita 230 henkilöä. Varoventtiilin avautumispaine oli säädetty liian alhaiseksi. (ARIA, 24754).

Sierre, Sveitsi 2003 Lähes 40 vuotta vanhaa jäähallia peruskorjattiin. Ammoniakkivuoto havaittiin kello 7.30. Palokunta totesi, että ammoniakkin hajua noin 100 m:n päässä hallista oli "sietämätön" ja eristi jäähallin ympäristön 800 m:n säteellä. Noin 200 henkilöä, joista nelisenkymmentä oli läheisen koulun oppilaita, evakuoitiin 150–200 m:n säteellä. Rautatieliikenne katkaistiin ja poliisi kehotti asukkaita sulkemaan ikkunat ja pysäyttämään ilmanvaihtolaitteet. Vuotoaukko tukittiin puukiilalla ja halli tuuletettiin. Eristys lopetettiin puolenpäivän aikaan. Korjausmies oli tietämättään porannut aukon jäähdytysputkeen. Hän ja kolme muuta henkilöä vietiin sairaalaan tarkkailtaviksi. Jälkeenpäin arvioitiin ammoniakkin pitoisuudeksi ulkona 8–10 ppm (ARIA, 26068).

Dijon, Ranska 2008 Jäähallin konehuoneessa havaittiin kompressorivuoto. Ammoniakki aiheutti lievän myrkytyksen 12-vuotiaalle lapselle sekä työntekijälle. Palokunta evakuoitiin hallin. Mittauksissa ei todettu ammoniakkia, vaikka hajua tuntui. Teknikko tukki vuodon, minkä jälkeen palokunta tuuletti hallin (ARIA 35359).

2.1.4 Ammoniakkivuoto tulipalon seurauksena

Vain ne kylmälaitosten tulipaloista aiheutuneet ammoniakkivuodot kuvataan, jotka aiheuttivat tai olisivat saattaneet aiheuttaa vaaraa laitoksen ulkopuolella.

Portage la Prairie, Kanada 1980 Tulipalo kylmävarastossa aiheutti jäähdytysjärjestelmän vuodon. Ammoniakkia vuoti 900 kg. Suurin osa vuotaneesta ammoniakista paloi tulipalossa. 4000 asukasta evakuoitiin (MHIDAS, 2263).

DeFuniak Springs, FL, USA 1984 Asentaja aikoi irrottaa siipikarjateurastamon ammoniakkiputken venttiilin leikkuupolttimella. Hän ei kuitenkaan ollut eristänyt venttiiliä oikein ja se repesi paineesta. Putkesta vuoti ammoniakkia jäähdytyshuoneeseen ja kun se oli muodostanut syttyvän seoksen, seos paloi humahtaen. Liekit löivät noin 50 m:n päähän. Tämä toistui 16–17 kertaa. Palokunta sai leikkuupolttimen sammumaan tunnin ja ammoniakkivuodon suljettua 5 tunnin kuluttua. Asentaja ja yksi palomies loukkaantuivat. Lähellä asuneet mies ja vauva vietiin sairaalaan myrkytysosastoon (MHIDAS, 857).

Lampaul-Guimilau, Ranska 1987 Lihajalostetehtaassa syttyi tulipalo. Tulipalo vahingoitti kylmälaitosta, josta vuoti 4000 kg ammoniakkia. Yksi henkilö sai myrkytyksen (ARIA, 5226).

Acre, Israel 1995 Jäätelötehtaassa syttyi tulipalo. Palokunta jäähdytti tehtaan katon olleita ammoniakkisäiliöitä, jotta ne eivät repeäisi. Jäähdytysjärjestelmässä oli yhteensä 20 000 kg ammoniakkia. Osa kaupungin asukkaista evakuoitiin varmuuden vuoksi (MHIDAS, 7555).

Le Havre, Ranska 1997 Tuhopolttaja syytti tulipalon 30 000 m²:n kaksikerroksisessa varistorakennuksessa. Rakennuksessa oli tyhjä kylmävarastohuone, jonka kylmälaitoksessa oli 5000 kg ammoniakkia. Kylmälaitoksen lauhduttimet räjähtivät vapauttaen 2000 kg ammoniakkikaasua. Palokunnan kemikaaliyksikkö mittasi savun ammoniakkipitoisuudeksi varaston luona 4 ppm. Kauempana (300 m ja 1200 m) suoritetuissa mittauksissa ammoniakkia ei havaittu. Kylmälaitos tyhjenettiin ammoniakista (ARIA, 11547).

Saint-Herblain, Ranska 1998 Jäätelötehtaassa leikattiin metallilevyjä leikkauspolttimella. Alla ollut polystyreenieriste syttyi palamaan. Puolet 12 000 m²:n varastosta tuhoutui 16 tuntia kestäneessä tulipalossa. Koska kylmälaitoksessa oli 18 000 kg ammoniakkia, palokunta evakuoï ympäristön 500 m:n säteellä (1500 henkeä, joista 350 työntekijää). Liikenne kahdella tiellä katkaistiin. Vesiverhoilla sidottiin ammoniakkia, jota kuitenkin pääsi ilmaan vain pieniä määriä (ARIA, 12994).

Saint-André-le-Puy, Ranska 1998 Lihajalostetehtaan konehuoneessa syttyi yöllä tulipalo. Konehuoneen alla oli kolme kylmälaitoksen säiliötä, joissa oli yhteensä 6 m³ ammoniakkia. Kuumuus vahingoitti putkia synnyttäen kaksi pientä ammoniakki- vuotoa. Palokunta eristi tehtaan ja evakuoï neljä asuinrakennusta. Palokunta sammutti palon ja kemikaalisukeltajat tukkivat vuodot (ARIA, 14320).

Fredericksburg, VA, USA 1999 Lihajalostetehtaassa syttynyt tulipalo aiheutti ammoniakki- vuodon. Tuhansia ympäristön asukkaita evakuoitiin (ARIA, 16566).

Servon-sur-Vilaine, Ranska 2000 Leipomossa syttynyt tulipalo tuhosi 1200 kuor- malavallista leivonnaisia ja rikkoutuneen höyrystimen kautta vuoti 500–2000 kg ammoniakkia. Kolmen ammoniakkiputken eristeet tuhoutuivat. Palo ei levinnyt viereisiin kylmähuoneisiin eikä jäähdytyskonehuoneeseen. Palo syttyi leipomon ulkoseinällä olleen mainoskilven sähköviasta (ARIA, 19165).

Hamilton, Uusi Seelanti 2002 Pakastetehtaassa syttynyt tulipalo aiheutti am- moniakki- vuodon. Palokunta selvitti päästön leviämissuunnan ja evakuoï 210 henkeä 70 asunnosta (ARIA, 22957).

Vitre, Ranska 2004 Jäätelötehtaan kylmälaitoksen 250 m²:n konehuoneessa yksi kahdeksasta kompressorista syttyi palamaan. Konehuoneessa oli myös 11 m³ am- moniakkia ja 400 l voiteluöljyä. Tulipalon kuumuus aiheutti vuodon putkesta, jos- sa oli 100 l nesteammoniakkia. Laitoksen teknikit eristivät vuotokohdan sulke- malla kaksi eristysventtiiliä. Tehtaan ympäristö eristettiin. Palokunnan kemikaali- torjuntayksikkö mittasi eristysalueen rajalla ammoniakkipitoisuudeksi 168 ppm. Päästön leviämistä rajoitettiin vesiverholla. Palo saatiin sammumaan neljän tunnin kuluttua. Rakennus tuuletettiin ja eristys poistettiin kuuden tunnin kuluttua (ARIA, 28643).

USA, 2007 Elintarviketehtaassa syttyi tulipalo. Palokunta evakuoï 75 työntekijää ja eristi tehtaan ympäristön. Puolet kylmälaitoksen ammoniakista eli 7250 kg pa- loi tulipalossa (ARIA, 32813).

2.2 Ranskan kylmälaitosten turvallisuus selvitykset

Ranskan ammoniakkitäyttöisiä kylmälaitoksia koskevat määräykset riippuvat jäähdykkeen kokonaismäärästä:

- jos jäähdykettä on alle 150 kg, mitään muodollisuuksia ei ole
- jos jäähdykettä on 150–1500 kg, laitos on ilmoitusvelvollinen ja sitä koskee vuoden 1998 asetus
- jos jäähdykettä on 1500–50 000 kg, laitosta varten on haettava lupa toimi- valtaiselta viranomaiselta ja sitä koskee vuoden 1997 asetus.

Vuoden 1998 asetuksen (Arrêté du 23/02/98) nojalla ammoniakkitäyttöinen kylmälaitos, jossa jäädykettä on 150–1500 kg, on sijoitettava vähintään 50 m:n etäisyydelle toisen rajasta. Vuoden 1997 asetuksessa (Arrêté du 16/07/97), joka koskee luvanvaraisia laitoksia, ei ole annettu mitään metrimääräisiä suojaetäisyyksiä. Sen sijaan laitoksesta on tehtävä turvallisuusselvitys.

2.2.1 Vaaraetäisyydet ja suojavaoöhykkeet

Turvallisuusselvityksessä on esitettävä onnettomuusskenaarioiden vaara-alueet. Näihin kuuluvat (AFF 1999):

- ympäristön ihmisiin kohdistuvien toksisten, termisten ja mekaanisten vaikutusten etäisyydet ennen vaaralähteisiin kohdistettuja rajoitustoimia sekä niiden jälkeen
- suoja-alueet, joilla maankäyttöä rajoitetaan
- alueet, joille on laadittu pelastussuunnitelmat ja joiden väestölle on tiedotettava onnettomuusriskeistä.

Yleensä määritellään kaksi prosessiyksiköstä tai varastosäiliöstä mitattua vaaraetäisyyttä, nimittäin:

- etäisyys Z_1 : suurin etäisyys, jolla laitoksessa sattuva onnettomuus voi aiheuttaa ympäristön asukkaan kuoleman
- etäisyys Z_2 : suurin etäisyys, jolla laitoksessa sattuva onnettomuus voi aiheuttaa ympäristön asukkaalle pysyvän terveyshaitan.

Jokaiselle vahingolle tai onnettomuudelle lasketaan etäisyydet Z_1 ja Z_2 ja niitä yhdistelemällä voidaan piirtää suojavaoöhykkeiden rajat. Sen jälkeen kun etäisyydet Z_1 ja Z_2 on määriteltä, yrityksen ja viranomaisen tulee yhdessä niiden perusteella määrittellä ympäristön maankäytölle asetettavat rajoitukset. Rajoitukset voivat koskea

- asuinrakennuksia tai kokoontumistiloja
- teollisuuslaitoksia
- liikenneväyliä.

Ranskan lainsäädännössä kokoontumistilat (établissement recevant du public = yleisöä vastaanottavat tilat) tarkoittavat julkisia tai yksityisiä tiloja, joissa työntekijöiden ohella käy vieraita tai tilojen käyttäjiä. Tämä koskee hyvin monentyyppisiä rakennuksia, kuten elokuvateattereita, teattereita, suurmyymälöitä, kirjastoja, oppilaitoksia, hotelleja, ravintoloja ja hoitolaitoksia, sekä myös tilapäistiloja, kuten sirkustelttoja ja ylipainehalleja. Tällaisten tilojen haltijoiden on ryhdyttävä toimenpiteisiin, joilla (Wikipédia)

- ehkäistään tulipaloja
- varoitetaan tiloissa olevien ihmisiä vaaratilanteista
- helpotetaan ihmisten poistumista
- hälytetään palokunta
- helpotetaan pelastustoimintaa.

Tällöin voidaan määritellä kaksi suojavyöhykettä: sisempi Z_{PR} ja ulompi Z_{PE} . Vyöhykkeiden asuinrakennukset voidaan luokitella sen perusteella, kuinka lähellä laitosta ne ovat, sekä sen perusteella, kuinka nopeasti ne voidaan evakuoida. Siten voidaan laatia näitä vyöhykkeitä koskeva rakennusten "hyväksyttävyyssasteikko".

Sisemmällä suojavyöhykkeellä Z_{PR} voidaan sallia

- rakennusten rajoitettu laajentaminen, joka ei lisää asuntojen lukumäärää, sekä muutostyöt, jotka eivät laajenna eivätkä muuta rakennusten käyttötarkoitusta
- laitokset, joiden koko on rajoitettu ja joiden toiminta liittyy suoraan onnettomuusvaarallisen laitoksen toimintaan
- tiet ja rautatiet, jotka palvelevat teollisuuslaitosta.

Ulommalla suojavyöhykkeellä Z_{PE} voidaan sallia

- asuinrakennusten rakentaminen kaavamääräysten mukaan
- urheilukenttien rakentaminen ilman kokoontumistiloja
- tiet, joiden liikennemäärä on alle 2000 ajoneuvoa vuorokaudessa, ja rautatiet, joilla on vähän matkustajaliikennettä.

Näiden suojavyöhykkeiden lisäksi ympäristöministeriö ei vaadi muita maankäytön rajoituksia.

2.2.2 Kylmlaitoksen vaaraetäisyyksien laskeminen

Ranskan määräysten mukaan turvallisuus selvityksessä on laskettava vaaraetäisyydet seuraaville onnettomuusskenaarioille:

- a) Blevé: nesteytetyn kaasun säiliön repeämisen mekaaniset, termiset ja toksiset vaikutukset
- b) Kaasupilviräjähdys.
- c) Myrkyllisen kaasun säiliön välitön tyhjeneminen.
- d) Lämpimältä suurimman nesteputkilinjan katkeaminen tai sellaisen putkilinjan katkeaminen, joka johtaa suurimpaan vuodon massavirtaan.

Ammoniakkitäyttöisen kylmlaitoksen tapaukselle käsikirja (AFF 1999) antaa seuraavat ohjeet:

- a) Ammoniakilla säiliön repeäminen ei aiheuta termisiä vaikutuksia. Vaikka bleven muodostama ammoniakkihöyry-pisarapilvi palaisi, lämpösäteilyn vaikutusetäisyydet olisivat merkityksettömän pieniä. Kaasutilassa olevan höyryn laajeneminen synnyttää shokkiaallon, mutta nesteen höyrystyminen ei. Mekaanisten vaikutusten vaaraetäisyydet ovat vähäisiä verrattuina ammoniakkipäästön toksisten vaikutusten vaaraetäisyyksiin.
- b) Lukuiset laboratorio- ja kenttäkokeet ovat osoittaneet, että ammoniakkipäästön syyttäminen ulkona on vaikeaa. Yhtään tapausta ei tunneta, jossa onnettomuudessa ulkoilmaan päässyt ammoniakki olisi syttynyt, vaikka monissa tapauksissa se on kohdannut liekkejä. Kaasupilviräjähdystä ei siis tarvitse tarkastella mahdollisena onnettomuusskenaariona.

- c) Kylmälaitoksella suurin päästövaara aiheutuu ulkona olevasta korkeapainesäiliöstä ja siihen liitetystä putkistosta sekä lauhduttimesta, koska niissä neste on korkeimmassa paineessa. Ammoniakin määrästä riippuen tästä skenaariorista voivat aiheutua suurimmat vaaraetäisyydet. Laitteiden todelliset ominaisuudet tulisi ottaa huomioon, koska on vaikea kuvitella, miten säiliö voisi hetkessä "kadota".
- d) Lämpimiltään suurin nesteputkilinja on yleensä matalapainepumpun ja höyrystimien välissä. Sen paine on yleensä melko pieni (enintään 4 bar höyrystimen painetta korkeampi) ja se kulkee erittäin usein rakennuksen sisällä (tiettyjä putkijaksoja lukuun ottamatta). Yleensä korkeapainesäiliön ja lauhduttimen välisen putkilinjan katkeaminen aiheuttaa suuremmat vaaraetäisyydet silloin, kun tämä putki kulkee ulkona.

Kylmälaitoksen riskien tunnistamiseen suositellaan vika- ja vaikutusanalyysiä.

Käsikirja (AFF 1999) antaa kaavat päästön massavirran laskemista varten seuraavissa vuototilanteissa:

- kompressorin jälkeinen putki katkeaa
- kaasuputki katkeaa (alikriittinen/kriittinen virtaus)
- lämpimän nesteen putki katkeaa (nestevirtaus/kaksifaasivirtaus), pisaroiden haihtuminen otetaan huomioon kertomalla adiabaattisesti höyrystyvä osuus kahdella
- lammikon haihtuminen.

Kokonaispäästön laskeminen:

- Päästön havaitsemiseen ja eristysventtiilien sulkeutumiseen kuluva aika otetaan aina huomioon.
- Kun katkennut putki on yhteydessä säiliön pohjaan, säiliö yleensä tyhjenee ellei eristysventtiili sulje vuotoa jo aikaisemmin.
- Kun katkennut putki on yhteydessä säiliön yläosaan, nesteen jäähtyminen ammoniakkin kiehumislämpötilaan lopettaa päästön ellei eristysventtiili sulje vuotoa jo aikaisemmin.
- Kun katkennut putki on yhteydessä säiliön kylkeen nestepinnan alapuolella, aluksi purkautuu nestettä ja tämän jälkeen höyryä. Nesteen jäähtyminen ammoniakkin kiehumislämpötilaan lopettaa päästön ellei eristysventtiili sulje vuotoa jo aikaisemmin.

Käsikirja (AFF 1999) suosittelee, että ammoniakkipäästöjen vaaraetäisyydet lasketaan passiivisen leviämisen mallilla tämän mallin yksinkertaisuuden ja tyydyttävän tarkkuuden vuoksi. Passiivisen leviämisen mallia ei kuitenkaan pidä käyttää alle 50 m:n etäisyyksillä. Kehittyneempiä menetelmiä tulisi tarvittaessa käyttää esiin mahdollisesti tulevien ongelmakohtien selvittämiseen.

Päästön kestosta t_f [s], tarkasteluetaisyydestä x [m] ja tuulen nopeudesta u [m/s] riippuen käytetään joko hetkellisen päästön tai jatkuvan päästön mallia:

- jos päästön kesto t_f on pienempi kuin x/u , käytetään hetkellisen päästön mallia

- jos päästön kesto t_f on suurempi kuin $4x/u$, käytetään jatkuvan päästön mallia
- jos $x/u < t_f < 4x/u$, tulos lasketaan interpoloimalla suoraviivaisesti näillä kahdella mallilla saatujen etäisyyksien logaritmien välillä.

Pitoisuudet lasketaan ainoastaan maanpinnalla, suoraan tuulen alapuolella päästölähteestä. Ammoniakin sitoutuminen leviämisen aikana eri pintoihin jätetään huomiotta. Hetkellisen päästön tapauksessa pitoisuus C [kg/m^3] saadaan kaavasta

$$C = \frac{m}{\pi(2\pi)^{1/2} \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{h^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (1)$$

missä

- m on päästön massa, kg
- σ_y on sivusuunnan leviämisparametri, m
- σ_z on pystysuunnan leviämisparametri, m
- h on päästökorkeus, m.

Jatkuvan päästön tapauksessa pitoisuus C saadaan kaavasta

$$C = \frac{m'}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \exp\left(-\frac{h^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (2)$$

missä

- m' on päästön massavirta, kg/s
- u on tuulen nopeus, m/s.

Käsikirja (AFF 1999) antaa leviämisparametreille σ_y ja σ_z sovituseksoitukset, jotka vastaavat leviämistä tasaisessa ja aukeassa maastossa, jonka rosoisuusparametri z_0 on 0,01 m.

Päästölähteen korkeus maanpinnasta otetaan huomioon seuraavasti:

- jos päästölähteen korkeus on alle 2,5 m, päästön oletetaan tapahtuvan maanpinnalta ($h = 0$) ja maanpinnan rosoisuuden tuulta jarruttava vaikutus otetaan huomioon siten, että tuulen nopeudelle u käytetään sen arvoa 1 m:n korkeudella
- jos päästö tapahtuu konehuoneen poistopiippujen kautta, päästökorkeudeksi h oletetaan piippujen korkeus maanpinnasta ja tuulen nopeudelle u käytetään sen arvoa 10 m:n korkeudella
- jos tuulen yläpuolella päästölähteestä on riittävän iso este, jota päästö ja tuulen virtaus eivät pääse kiertämään, päästökorkeudeksi h oletetaan esteen korkeus ja tuulen nopeudelle u käytetään sen arvoa 10 m:n korkeudella.

Tuulen nopeus $u(z)$ [m/s] korkeudella z [m] maanpinnasta arvioidaan kaavalla

$$u(z) = \frac{u^*}{0,41} \ln \frac{z}{z_0} \quad (3)$$

missä u^* on tuulen nopeudesta u riippuva ns. kitkanopeus. Kaavasta (3) seuraa, että kitkanopeuden u^* (ja siis tuulen nopeuden u) arvosta riippumatta tuulen nopeus 1 m:n korkeudella on 2/3 nopeudesta 10 m:n korkeudella.

Oleellinen osa menetelmää on, että vaaraetäisyyksiä laskettaessa otetaan huomioon päästön kesto, joka kylmälaitoksen tapauksessa saattaa olla vain muutamia

sekunteja. Tällöin ammoniakkin pitoisuuden ohjearvot, jotka koskevat joko 30 minuutin (IDLH) tai 60 minuutin (ERPG) altistusta, antaisivat tarpeettoman suuria vaaraetäisyyksiä. Näiden sijasta käytetään altistusta (exposure), joka ammoniakilla on muotoa C^2t , missä C on pitoisuus ja t altistusaika. Altistusta käytetään hengityksannoksen sijasta, koska se ei riipu ihmisen altistusaikana hengittämän ilman määrästä.

Ammoniakilla vaaraetäisyys Z_1 vastaa altistusta C^2t , joka aiheuttaa kuoleman 1 %:lle altistuneesta väestöstä. Altistusajalla 30 min vastaava ammoniakkin pitoisuus LC_{01} on 6200 ppm (4330 mg/m³). Vaaraetäisyys Z_2 vastaa altistusta, joka voi aiheuttaa pysyvän terveystaitan. Altistusajalla 30 min vastaava ammoniakkin pitoisuus on 500 ppm (348 mg/m³).

Hetkellisellä päästöllä altistusajaksi t oletetaan kaasupilven ohikulku-aika $2,5\sigma_y/u$. Jatkuvalle päästöllä altistusajaksi t oletetaan päästön kesto t_f .

Leviämislaskut tehdään seuraavilla säätilanteilla:

- keskimääräiset olosuhteet: tuulen nopeus 5 m/s, neutraali tilanne, stabiiliusluokka D
- epäsuotuisat olosuhteet: tuulen nopeus 3 m/s, stabiili tilanne, stabiiliusluokka F.

2.2.3 Kylmälaitosesimerkki

Esimerkkinä menetelmän soveltamisesta (AFF 1999) käyttää kuvan 1 kylmälaitosta, jolla on seuraavat ominaisuudet:

- jäädytysteho 500 kW lämpötilojen (ammoniakkin höyrynpaineiden) -10 °C (2,9 bar) ja $+30\text{ °C}$ (11,7 bar) välillä
- ammoniakkin massa 2500 kg, josta lauhduttimessa 500 kg, höyrystimessä 500 kg ja matalapainesäiliössä 1500 kg
- kompressorin tuotto 750 m³/h
- kompressorin imu- ja painelinjojen halkaisijat 150 mm ja 115 mm
- korkea- ja matalapainenestelinjojen halkaisijat 60 mm ja 100 mm
- lauhduttimen alla on 30 m²:n suoja-allas
- konehuoneen tilavuus on 500 m³ ja standardin mukainen hätätuuletuksen ilmanvaihtokerroin on 13,2/h.

Oletetut vuototilanteet ovat:

1. Kompressorin painelinja (115 mm) katkeaa, kompressorin pysähtyy 10 s:n kuluttua, kaasupäästö kompressorista 5 kg/s 10 s:n ajan, kaasupäästö lauhduttimesta 14 kg/s 8 s:n ajan.
2. Lauhduttimen pintamittarin ylempi yhde (4,5 mm) katkeaa. Kaksifaasivirtaus, jatkuva päästö 0,028 kg/s, haihtuminen suoja-altaasta 0,032 kg/s, yhteensä 0,06 kg/s 60 min:n ajan. Tämän jälkeen palokunta tukkii vuodon.
3. Korkeapainenestelinja (60 mm, pituus 30 m) katkeaa lauhduttimen läheltä. Lauhduttimen 500 kg ja linjan 50 kg nestettä vuotavat ulos, kompressorin käy

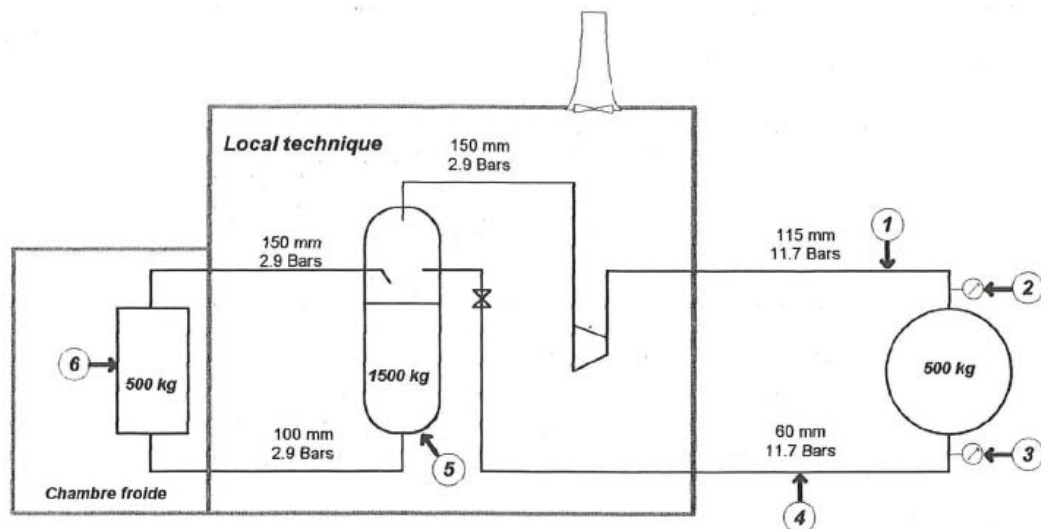
10 s:n ja matalapainesäiliöstä purkautuu höyryä 60 s:n ajan. Nestevirtaus lauhduttimesta 8 s:n ajan. Kokonaispäästö 27 kg/s 10 s:n ajan.

4. Korkeapainenestelinja (60 mm, pituus 30 m) katkeaa etäämpänä lauhduttimesta. Lauhduttimen 500 kg ja linjan 50 kg nestettä vuotavat ulos, kompressorikäy 10 s:n ja matalapainesäiliöstä purkautuu höyryä 60 s:n ajan. Kaksifaasivirtaus lauhduttimesta 36 s:n ajan. Kokonaispäästö 5,6 kg/s 40 s:n ajan.
5. Matalapainesäiliön repeäminen. Konehuone täyttyy kylläisen ammoniakkihöyryn, ammoniakkipisaroiden ja ilman seoksella. Loppu neste jää keräilyaltaaseen, josta sen haihtuminen on merkityksetöntä. Päästö poistopiipun kautta 0,85 kg/s 273 s:n ajan.
6. Höyrystimen tulolinja katkeaa kylmähuoneessa. Koska huoneen voi olettaa olevan suhteellisen tiivis, päästö ulkoilmaan jää merkityksettömän pieneksi.

Esimerkkitapauksessa saadaan taulukossa 1 esitetyt vaaraetäisyydet.

Taulukko 1. Esimerkkikylmälaitoksen vaaraetäisyydet, m

| Vuototilanne | D5, Z ₁ | D5, Z ₂ | F3, Z ₁ | F3, Z ₂ |
|--------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 1. Kompressorin painelinja | 60 | 200 | 70 | 200 |
| 2. Pintamittarin yhde | < 50 | 50 | < 50 | 90 |
| 3. Nestelinja, nestevuoto | 90 | 300 | 120 | 490 |
| 4. Nestelinja, kaksifaasivuoto | < 50 | 280 | 110 | 440 |
| 5. Matalapainesäiliö | < 50 | 120 | < 50 | 260 |



Kuva 1. Esimerkkikylmälaitos. Höyrystin vasemmalla kylmähuoneessa, matalapainesäiliö ja kompressor keskellä konehuoneessa ja lauhdutin oikealla ulkona. Oletetut vuotokohdat on numeroitu (AFF 1999).

2.3 Hollannin kylmälaitosten suojaetäisyydet

Hollannin virallinen maankäyttöpöytäkirja suuronnettomuusvaarallisten laitosten ympäristössä perustuu yksilöriskin ja yhteisöriskin hyväksyttäviin arvoihin. Nämä käsitteet määritellään seuraavasti (Bottelberghs 2000):

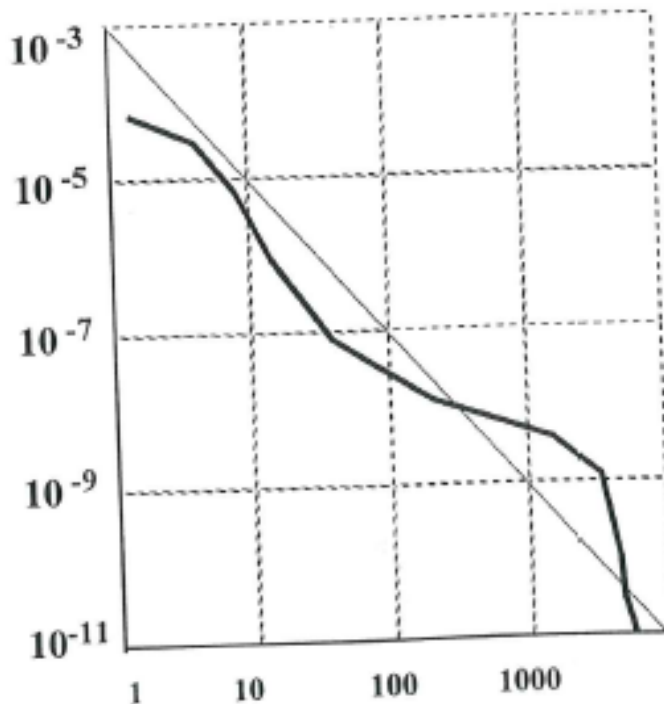
- **Yksilöriski.** Todennäköisyys vuotta kohden, että onnettomuusvaarallisen laitoksen lähellä jatkuvasti oleskeleva (kuviteltu) henkilö kuolee laitoksessa sattuvan onnettomuuden seurauksena.

- **Yhteisöriski.** Todennäköisyys vuotta kohden, että laitoksessa sattuva onnettomuus aiheuttaa vähintään N kuolonuhria.

Yksilöriski esitetään laitoksen ympäristön kartalle piirrettyjen yksilöriskin tasa-arvokäyrien avulla. Yksilöriski luonnehtii laitoksen turvallisuustasoa. Ympäristön mahdollisten asukkaiden lukumäärä ja sijainti eivät vaikuta sen arvoon. Näin määritellylle yksilöriskille käytetään Hollannissa nimeä paikkakohtainen riski (location specific risk).

Yhteisöriski esitetään käyrän muodossa koordinaatistossa, jonka vaaka-akselilla on onnettomuuden uhrien lukumäärä N ja pystyakselilla onnettomuuden todennäköisyys vuotta kohden F. Yhteisöriskiä laskettaessa otetaan huomioon alueella olevien ihmisten keskimääräinen lukumäärä (päivä/yö) ja todellinen sijainti. Jos laitoksen ympäristössä alueella, jolle mahdollisten onnettomuuksien vaikutukset ulottuvat, ei ole ihmisiä, yhteisöriski on nolla, vaikka (paikkakohtainen) yksilöriski tällä alueella voi olla suurikin.

Hollannissa on määritelty hyväksyttävän yhteisöriskin ohjearvo seuraavasti: $N \geq 10$, $F = 10^{-5}/a$; $N \geq 100$, $F = 10^{-7}/a$; $N \geq 1000$, $F = 10^{-9}/a$. Kun N:n ja F:n arvot esitetään logaritmiasteikolla, näitä pisteitä yhdistää suora (kuva 2).



Kuva 2. Esimerkki yhteisöriskistä sekä hyväksyttävän yhteisöriskin ohjearvo esitettyinä FN-koordinaatistossa (Bottelberghs 2000).

Suojeltavat ympäristön kohteet jaetaan seuraavasti:

Haavoittuvat kohteet:

- asuinrakennukset
- sairaalat ja muut hoitolaitokset
- koulut ja muut oppilaitokset
- strategiset kohteet

Vähemmän haavoittuvat kohteet:

- myymälät ja tavaratalot
- hotellit ja ravintolat
- liike- ja teollisuusrakennukset
- toimistorakennukset
- vapaa-ajan laitokset.

Aikaisemmin vähemmän haavoittuvien kohteiden suojaetäisyys vastasi yksilöriskin arvoa $10^{-5}/a$ ja haavoittuvien kohteiden suojaetäisyys arvoa $10^{-6}/a$. Vuoden 2010 alusta molempien kohdetyyppien suojaetäisyys vastaa arvoa $10^{-6}/a$.

Hollannissa suoritetaan kahden tyyppisiä riskianalyysyjä (Bottelberghs 2000):

1. Luonteeltaan ja kemikaalimääriltään samankaltaisille laitoksille tehdyt yleiset riskianalyysit. Tulokset esitetään suojaetäisyystaulukkoina, jotka perustuvat toisaalta arvioituihin ja toisaalta hyväksyttäviin riskeihin.
2. Luonteeltaan yksilöllisten tai kemikaalimääriltään suurten laitosten tapauskohtaiset riskianalyysit. Tulokset esitetään yksilöriskin tasa-arvokäyrien ja yhteisöriskin FN-käyrien muodossa.

Jäähdytys-, kylmä- ja lämpöpumppulaitoksilla, joiden ammoniakkimäärä on vähintään 1500 kg ja enintään 10 000 kg, käytetään suojaetäisyystaulukoita. Jos ammoniakin määrä ylittää 10 000 kg, laitokselle on tehtävä riskianalyysi.

Ennen vuotta 2007 käytetty suojaetäisyystaulukko perustui tyyppilaitoksesta tehtyyn riskianalyysiin. Analyysissa oletettiin, että nesteen massavirta putkistossa oli pienempi kuin 2 kg/s. Koska massavirran määrittäminen on käytännössä hankalaa, taulukkoa uudistettaessa päätettiin massavirran sijasta käyttää höyrystimelle johtavan putkilinjan nimellishalkaisijaa. Vaikka uusilla kylmälaitoksilla tämä putkihalkaisija on enintään NS 50 ja massavirta enintään 2 kg/s, vanhemmilla laitoksilla se on usein suurempi. Riskianalyysi tehtiin myös laitoksesta, jossa nimellishalkaisija oli NS 80 ja massavirta 3,25 kg/s. Jos nimellishalkaisija on tätäkin suurempi, laitoksesta on tehtävä riskianalyysi (VROM 2007).

Taulukkojen suojaetäisyydet haavoittuviin ja vähemmän haavoittuviin kohteisiin vastaavat yksilöriskin arvoa $10^{-6}/a$. Etäisyydet mitataan nesteputkilinjasta silloin, kun putkilinja on yhteydessä ulkoilmaan ja johtaa höyrystimeen tai höyrystimiin. Jos tällaista putkilinjaa ei ole, etäisyydet mitataan konehuoneen seinästä. Jos putkilinja kulkee rakennuksen katolla kaasutiiviissä kotelossa, jota vuodon sattuessa voidaan tuulettaa, niin että ammoniakkipäästö sekoitetaan ilmaan, etäisyydet mitataan konehuoneen seinästä.

Laitokset jaetaan kolmeen luokkaan pumppusäiliön tai höyrystimen lämpötilan perusteella:

- alle -25 °C
- yli -25 °C mutta alle -5 °C
- yli -5 °C .

Jäähdykeputkistot tulee varustaa sellaisella laitteiden ja komponenttien lukituksella, että nestelinjan katketessa pumppu välittömästi pysähtyy ja nestevirtaus lakkaa.

Laitokset jaetaan ammoniakkin kokonaismäärän, johon lasketaan mukaan enintään 400 kg:n pumppusäiliössä oleva neste, mukaan neljään kokoluokkaan:

- 1500–3500 kg
- 3500–6000 kg
- 6000–8000 kg
- 8000–10 000 kg.

Toteutuksensa perusteella laitokset jaetaan kolmeen tyyppiin:

1. Kaikki ammoniakkiputkistot, mahdollisesti lauhdutinta ja sen putkilinjoja lukuun ottamatta, ovat joko konehuoneessa tai tuotantotiloissa. Lauhdutin ja sen putkilinjat voivat olla ulkona.
2. Kuten tyyppi 1, mutta höyrystin tai höyrystimien putkilinjat ovat yhteydessä ulkoilmaan.
3. Kuten tyyppi 2, mutta varaaja tai pumppusäiliö on ulkona.

Näin saadut suojaetäisyydet on esitetty taulukoissa 2–4. Jos riskianalyysin mukaan yksilöriskin arvo laitoksen ulkopuolella jää pienemmäksi kuin $10^{-6}/a$, suojaetäisyyttä ei ole annettu eikä sitä sovelleta. Suojaetäisyydet koskivat uusia laitoksia 1.7.2007 ja koskevat olemassa olevia 1.1.2010 alkaen (VROM 2007)

Taulukko 2. Suojaetäisyys, kun jäähdytyslämpötila on alle $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, m

| ammoniakkia | tyyppi | koneh. ≤ NS 50 | koneh. ≤ NS 80 | putki ≤ NS 50 | putki ≤ NS 80 |
|----------------|--------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|
| 1500–3500 kg | 3 | 35 | 35 | — | — |
| 3500–6000 kg | 2 | 30 | 40 | 25 | 40 |
| 3500–6000 kg | 3 | 65 | 65 | 25 | 40 |
| 6000–8000 kg | 2 | 30 | 45 | 30 | 40 |
| 6000–8000 kg | 3 | 75 | 75 | 30 | 40 |
| 8000–10 000 kg | 2 | 30 | 45 | 30 | 45 |
| 8000–10 000 kg | 3 | 85 | 85 | 30 | 45 |

Taulukko 3. Suojaetäisyys, kun jäähdytyslämpötila on $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$... $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, m

| ammoniakkia | tyyppi | koneh. ≤ NS 50 | koneh. ≤ NS 80 | putki ≤ NS 50 | putki ≤ NS 80 |
|----------------|--------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|
| 1500–3500 kg | 3 | 45 | 45 | — | — |
| 3500–6000 kg | 1 | — | 50 | — | — |
| 3500–6000 kg | 2 | 60 | 75 | 55 | 70 |
| 3500–6000 kg | 3 | 75 | 90 | 55 | 70 |
| 6000–8000 kg | 1 | — | 50 | — | — |
| 6000–8000 kg | 2 | 65 | 85 | 60 | 80 |
| 6000–8000 kg | 3 | 85 | 100 | 60 | 80 |
| 8000–10 000 kg | 1 | — | 50 | — | — |
| 8000–10 000 kg | 2 | 70 | 85 | 65 | 85 |
| 8000–10 000 kg | 3 | 95 | 105 | 65 | 85 |

Taulukko 4. Suojaetäisyys, kun jäähdytyslämpötila on yli $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, m

| ammoniakkia | tyyppi | koneh. $\leq \text{NS } 50$ | koneh. $\leq \text{NS } 80$ | putki $\leq \text{NS } 50$ | putki $\leq \text{NS } 80$ |
|----------------|--------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 1500–3500 kg | 3 | 45 | 45 | — | — |
| 3500–6000 kg | 1 | — | 60 | — | — |
| 3500–6000 kg | 2 | 70 | 85 | 55 | 75 |
| 3500–6000 kg | 3 | 85 | 95 | 55 | 75 |
| 6000–8000 kg | 1 | — | 65 | — | — |
| 6000–8000 kg | 2 | 80 | 95 | 60 | 85 |
| 6000–8000 kg | 3 | 90 | 105 | 60 | 85 |
| 8000–10 000 kg | 1 | 50 | 65 | — | — |
| 8000–10 000 kg | 2 | 85 | 105 | 65 | 90 |
| 8000–10 000 kg | 3 | 95 | 110 | 65 | 90 |

Jos samassa konehuoneessa on useampia kuin yksi jäähdytys- tai kylmälaitos, konehuoneen seinästä mitattua suojaetäisyyttä määritettäessä menetellään seuraavasti:

- Taulukoiden 2–4 perusteella valitaan laitoksista se, jonka suojaetäisyys on suurin. Tämä on laitos A ja sen ammoniakkimäärää merkitään a:lla.
- Jäljelle jääneistä laitoksista valitaan se, jonka suojaetäisyys on suurin. Tämä on laitos B ja sen ammoniakkimäärää merkitään b:llä.
- Jos $a \leq 8000\text{ kg}$ ja $b \leq 3500\text{ kg}$, taulukoista 2–4 otetaan laitosta A vastaavan, mutta lähinnä suurempaan kokoluokkaan kuuluvan laitoksen suojaetäisyys.
- Jos $a > 8000\text{ kg}$ ja $b \leq 3500\text{ kg}$, laitoksen A suojaetäisyyteen lisätään 10 m.
- Jos $a \leq 6000\text{ kg}$ ja $b > 3500\text{ kg}$, taulukoista 2–4 otetaan laitosta A vastaavan, mutta kahta suurempaan kokoluokkaan kuuluvan laitoksen suojaetäisyys.
- Jos $a > 6000\text{ kg}$ ja $b > 3500\text{ kg}$, laitoksen A suojaetäisyyteen lisätään 20 m

Yhteisöriskiä laskettaessa tarvitaan suurin vaaraetäisyys eli etäisyys, jolla laitoksessa sattuva onnettomuus (tässä tapauksessa ammoniakkipäästö) aiheuttaa kuoleman 1%:lle altistuneista. Nämä etäisyydet riippuvat jäähdytyslämpötilasta, ammoniakkin määrästä, laitoksen tyyppistä sekä höyrystimelle johtavan putkilinjan nimellishalkaisijasta ja ne on esitetty taulukossa 5. Jos laitokselle on taulukossa 5 annettu suurin vaaraetäisyys, yhteisöriski on laskettava käyttäen väestöjakaumaa alueella, jonka sisärajana on yksilöriskin $10^{-5}/\text{a}$ tasa-arvokäyrä ja ulkorajana suurin vaaraetäisyys (VROM 2007).

Verrataan Ranskassa käytettyä ammoniakkialtistuksen kriteeriä Hollannissa käytettyyn. Kvantitatiivisia riskianalyyskejä varten on kehitetty ns. probit-funktiota käyttävä menetelmä. Probit-funktio Pr on kumulatiivinen normaalijakauma, jonka hajonta on 1 ja keskiarvo 5. Siten probit-funktion arvo 5 vastaa 50 %:n kuolleisuutta ja arvo 2,67 1 %:n kuolleisuutta. Probit-funktio on muotoa

$$\text{Pr} = a + b \ln(C^n t) \quad (4)$$

missä pitoisuuden C yksikkönä on mg/m^3 ja altistusajan t yksikkönä min.

Probit-funktion vakiot on saatu ekstrapoloimalla eläinkokeista saatuja LC_{50} -arvoja (pitoisuus, jolla 50 % koe-eläimistä kuolee) ihmiseen. Eläinkokeiden eri altistus-

ajoilla saadut tulokset on muunnettu korjauskertoimien avulla vastaamaan 30 min:n altistusaikaa. Kertoimelle b käytetään arvoa $2/n$. Tämän jälkeen parametrin a arvo valitaan siten, että ihmisen 30 minuutin LC_{50} -arvoa vastaa $Pr = 5$ eli 50 %:n kuolleisuus.

Taulukko 5. Onnettomuuksien suurin vaaraetäisyys, m

| lämpötila | ammoniakkia | tyyppi | putki ≤ NS 50 | putki ≤ NS 80 |
|---------------|----------------|--------|------------------|------------------|
| alle -25 °C | 8000–10 000 kg | 3 | 310 | 310 |
| -25 ... -5 °C | 3500–6000 kg | 3 | 260 | 260 |
| | 6000–8000 kg | 3 | 280 | 280 |
| | 8000–10 000 kg | 2 | — | 120 |
| | 8000–10 000 kg | 3 | 300 | 300 |
| yli -5 °C | 3500–6000 kg | 3 | 360 | 360 |
| | 6000–8000 kg | 1 | — | 170 |
| | 6000–8000 kg | 2 | — | 170 |
| | 6000–8000 kg | 3 | 400 | 400 |
| | 8000–10 000 kg | 1 | 200 | 200 |
| | 8000–10 000 kg | 2 | 200 | 200 |
| | 8000–10 000 kg | 3 | 400 | 400 |

Ammoniakin LC_{50} -arvoksi ihmisellä saatiin 6164 mg/m^3 ja eksponentin n arvoksi noin 2,0, jolloin vastaava probit-funktio on (PGS 1)

$$Pr = -15,6 + \ln(C^2 t) \quad (5)$$

Kun kaavaan (5) sijoitetaan Ranskan kriteeriä vastaavat arvot $C = 4330 \text{ mg/m}^3$ ja $t = 30 \text{ min}$, saadaan $Pr = 4,55$, joka vastaa 33 %:n kuolleisuutta. Kuolleisuuden arvo 1 % altistusajalla 30 min puolestaan vastaa pitoisuutta $LC_{01} = 1695 \text{ mg/m}^3$. Hollannin altistuskriteeriä käyttämällä saataisiin siis huomattavasti suurempia vaaraetäisyyksiä kuin Ranskan kriteerillä, jos lähtökohtana olisivat samat vuodot.

Taulukoiden 2–5 suoja- ja vaaraetäisyydet eivät koske kappaleen 2.2.3 esimerkkilaitosta, koska tässä laitoksessa höyrystimelle johtavan putkilinjan halkaisija on NS 100. Hollannin määräysten mukaan tällaisen laitoksen suojaetäisyydet määritetään riskianalyysin perusteella.

2.4 Kylmlaitoksen vuotojen vaaraetäisyydet

Lasketaan kylmlaitoksen ammoniakkivuotojen vaaraetäisyydet kahden tyyppisille vuodoille:

1. Varoventtiilin NS 20 – NS 25 puhallus purkuputken kautta ulkoilmaan. Puhallusteho $3000 \text{ kg/h} = 50 \text{ kg/min} = 0,83 \text{ kg/s}$. Purkuputken pää on 1–2 m tasakaton ja 4–5 m maanpinnan yläpuolella. Kompressorin suojuukset eivät jostain syystä pysäytä kompressoria. Puhallus kestää enintään 10 min.
2. Kuumakaasulinjan vuoto. Kompressorin tuotto $500 \text{ kg/h} = 8,3 \text{ kg/min} = 0,14 \text{ kg/s}$ purkautuu konehuoneeseen. Kaasunilmaisoin käynnistää konehuoneen hätätuuletuksen, joka on standardin SFS-EN 378 mukainen. Kompressorin suojuukset eivät jostain syystä pysäytä kompressoria. Vuoto kestää enintään 10 min. Hätätuuletus ja päästö ulkoilmaan kestävät kuitenkin kauemmin.

Laskut tehdään seuraavilla säätilanteilla:

- D2 pilvinen sää, tuulen nopeus 2 m/s, neutraali tilanne, stabiiliusluokka D
- D5 pilvinen sää, tuulen nopeus 5 m/s, neutraali tilanne, stabiiliusluokka D
- E3 selkeä yö, tuulen nopeus 3 m/s, stabiili tilanne, stabiiliusluokka E
- F2 selkeä yö, tuulen nopeus 2 m/s, stabiili tilanne, stabiiliusluokka F.

Vaaraetäisyyksillä tarkoitetaan seuraavassa etäisyyksiä, joilla ammoniakkin pitoisuus ulkona maanpinnalla saavuttaa IDLH-, ERPG- tai AEGL-arvot.

IDLH-arvon (Immediately Dangerous to Life and Health Concentration) tavoitteena on määritellä suurin pitoisuus, josta työntekijä voi turvallisesti poistua, jos hengityksensuojain lakkaa toimimasta.

Turvallinen poistuminen tarkoittaa sitä, että kemikaali ei saa aiheuttaa hengenvaaraa eikä vaaraa saada pysyviä vammoja. Kemikaali ei myöskään saa aiheuttaa vakavaa silmien tai hengitysteiden ärsytystä eikä muitakaan oireita (esim. ajan- ja paikantajun hämärtyminen tai liikkeen hallinnan häiriintyminen), jotka vaikeuttavat poistumista.

IDLH-arvot on valittu siten, että 30 minuutin oleskelu tässä pitoisuudessa voi aiheuttaa edellä mainittuja terveysvaikutuksia. Ammoniakin IDLH-arvo on 300 ppm = 210 mg/m³ (OVA 2009).

ERPG-arvoja (Emergency Response Planning Guidelines) valittaessa väestön altistusajaksi on valittu yksi tunti. ERPG-arvot on määritelty seuraavasti (OVA 2009):

- ERPG1 Suurin pitoisuus, jossa lähes jokainen ihminen voi oleskella tunnin ajan saaden enintään vähäistä ja ohimenevää terveyshaittaa tai tuntien selvän ja epämiellyttävän hajun.
- ERPG2 Suurin pitoisuus, jossa lähes jokainen ihminen voi oleskella tunnin ajan saamatta välittömästi tai myöhemmin pysyvää tai muuten vakavaa terveyshaittaa tai oireita, jotka vähentävät kykyä suojautua altistukselta.
- ERPG3 Suurin pitoisuus, jossa lähes jokainen ihminen voi oleskella tunnin ajan joutumatta välittömästi tai myöhemmin hengenvaaraan.

Päästön kestoksi oletetaan seuraavassa 10 minuuttia. Tämä on myös altistusaika ja selvästi lyhyempi kuin IDLH- ja ERPG-arvoja määriteltäessä oletettu altistusaika. Ammoniakkialtistuksen vaikutukset saattavat siten olla lievempiä kuin mitä edellä on kuvattu.

Tämä ongelma on todettu myös USA:ssa, jossa ympäristönsuojeluvirasto Environmental Protection Agency (EPA) määrittää Acute Exposure Guideline Levels (AEGL) -arvoja. Määrittelyltään nämä vastaavat läheisesti ERPG-arvoja ja olennaisin ero on siinä, että AEGL-arvot on määritelty usealle altistusaikalle: 10 min, 30 min, 1 h, 4 h ja 8 h. Toinen ero on siinä, että AEGL-arvot koskevat koko väestöä ts. ERPG-arvoja määriteltäessä pois rajatut, verenkierto- ja hengityselinten sairauksista kärsivät ja siten kemikaali-altistukselle herkemmät, yksilöt on otettu huomioon.

Uusimmassa, lokakuun 2009 luettelossa on lopulliset AEGL-arvot 50, väliaikaiset AEGL-arvot 195 sekä ehdotetut AEGL-arvot 26 kemikaalille. Lisäksi AEGL-arvot ovat valmisteilla 45 kemikaalille (EPA 2009).

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 määritellyt 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 suositeltu käytötapa on (SCAPA 2009):

1. Ensisijaisesti käytetään AEGL-arvoja (joko väliaikaisia tai lopullisia).
2. Jos kemikaalilla ei ole AEGL-arvoja, käytetään ERPG-arvoja.
3. Jos kemikaalilla ei ole AEGL- eikä ERPG-arvoja, käytetään TEEL-arvoja.

Ammoniakin raja-arvoja on vertailtu taulukossa 6 (Anon. 2008).

Taulukko 6. Ammoniakin raja-arvoja

| | altistus | PAC3 | PAC2 | PAC1 |
|------|----------|------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| ERPG | 60 min | 750 ppm 530 mg/m ³ | 150 ppm 107 mg/m ³ | 25 ppm 18 mg/m ³ |
| AEGL | 60 min | 1100 ppm 780 mg/m ³ | 160 ppm 113 mg/m ³ | 30 ppm 21 mg/m ³ |
| AEGL | 30 min | 1600 ppm 1130 mg/m ³ | 220 ppm 156 mg/m ³ | 30 ppm 21 mg/m ³ |
| AEGL | 10 min | 2700 ppm 1910 mg/m ³ | 220 ppm 156 mg/m ³ | 30 ppm 21 mg/m ³ |

AEGL3-arvon määrittelyn lähtökohtana ovat hiirillä tehdyt kokeet. Koetulosten tilastollisen käsittelyn avulla pitoisuudeksi LC₀₁, joka 60 minuutin altistuksella tapaa 1 % koe-eläimistä, on päätelty noin 3300 ppm. Tämä on jaettu varmuuskerroimella 3, jolloin on saatu AEGL3 60 minuutin altistuksella. Lyhempien altistus-aikojen AEGL3-arvot on saatu käyttämällä hyväksi aikariippuvuutta C²t (Anon. 2008). AEGL3-arvo 30 minuutin altistuksella 1600 ppm on hieman pienempi kuin kaavalla (5) laskettu Hollannin LC₀₁ = 2400 ppm ja huomattavasti pienempi kuin Ranskassa käytettävä LC₀₁ = 6200 ppm.

Ammoniakin pitoisuus C lasketaan jatkuvan päästön kaavalla (2). Leviämisparametreille σ_y ja σ_z käytetään sovitulausekkeitä, jotka vastaavat leviämistä esikaukialueella tai metsäisessä maastossa, jonka rosoisuusparametri z_0 on 1 m (CPR 1992). Kaava (2) antaa pitoisuuden keskiarvon tarkasteluajan yli. Käytetään tarkasteluaikana päästön oletettua kestoa 10 min.

Tätä lyhempi tarkasteluaika voidaan ottaa huomioon pienentämällä parametria σ_y korjauskertoimella. Tämä kasvattaa pitoisuutta C ja tiettyä pitoisuuden arvoa vastaavaa vaaraetäisyyttä. Toisaalta päästön keston lyheneminen lyhentää altistus-aikaa ja lieventää altistuksen terveysvaikutuksia. Koska altistusajan vaikutusta tiet-

tyjen terveysvaikutusten ilmenemiseen ei tunneta riittävästi, päästön oletettua kestoa 10 min ei tässä raportissa vaihdella.

Päästökorkeudeksi h oletetaan molemmilla vuodoilla 5 m. Kaavalla (2) lasketut vaaraetäisyydet on esitetty taulukossa 7.

Laskujen yksinkertaistamiseksi ei ole otettu huomioon seuraavia tekijöitä:

- ammoniakkin laimeneminen purkuputken yläpuolelle muodostuvassa turbulentsisessa suihkussa (pienentää vaaraetäisyyksiä)
- passiivisen leviämisen näennäislähteen kohoaminen ammoniakkipuhalluksen liikemäärän vaikutuksesta (pienentää vaaraetäisyyksiä)
- päästön sekoittuminen rakennuksen taakse muodostuvassa pyörrealueessa (suurentaa vaaraetäisyyksiä lähellä ja pienentää niitä kauempana)
- kuumun puristetun ammoniakkipuhalluksen jäähtyminen paineen laskiessa putkiston paineesta ilmanpaineeseen (ei vaikuta kovin paljon vaaraetäisyyksiin)
- päästön sekoittuminen konehuoneen ilmaan, seoksen pitoisuuden ja lämpötilan aikariippuvuus (pidentää päästön kestoa ja siten pienentää vaaraetäisyyksiä)
- hätätuuletuksen kautta poistuvan ammoniakkin massavirran aikariippuvuus (ei vaikuta kovin paljon vaaraetäisyyksiin)
- ammoniakkin sitoutuminen leviämisen aikana eri pintoihin (pienentää vaaraetäisyyksiä).

Taulukko 7. Kylmälaitoksen ammoniakkipuotojen vaaraetäisyydet, m

| | AEGL3, 10 min, 2700 ppm | ERPG3, 60 min, 750 ppm | IDLH, 30 min, 300 ppm | AEGL2, 10 min, 220 ppm | ERPG2, 60 min, 150 ppm |
|---------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| varoventtiili | | | | | |
| D, 2 m/s | 85 | 200 | 350 | 425 | 540 |
| D, 5 m/s | 35 | 100 | 200 | 240 | 300 |
| E, 3 m/s | 90 | 230 | 430 | 530 | 670 |
| F, 2 m/s | 210 | 580 | 1100 | 1350 | 1750 |
| konehuone | | | | | |
| D, 2 m/s | — | 60 | 110 | 135 | 170 |
| D, 5 m/s | — | — | 60 | 75 | 100 |
| E, 3 m/s | — | — | 120 | 160 | 200 |
| F, 2 m/s | — | 120 | 300 | 380 | 500 |

Tässä tapauksessa altistusajan 10 min huomioon ottaminen pienentää PAC3-tason vaaraetäisyyksiä noin 60 % ja PAC2-tason vaaraetäisyyksiä noin 20 %.

3 Nestehapen varastosäiliöt

3.1 Onnettomuuskuvauksia

Kuvauksia nestehappionnettomuuksista haettiin ARIA-tietokannasta, viitetietokannoista sekä poimittiin Euroopan teollisuuskaasuyhdistyksen julkaisusta (EIGA 2004).

3.1.1 Räjähdykset

USA Säiliöautoa täytettiin ilmakaasutehtaalla. Liittimestä vuoti nestehapetta asfalttipäällysteelle. Kun kuljettajalta putosi vasara maahan, tapahtui voimakas räjähdys, joka rikkoi viereisten rakennusten ikkunoita. Asfaltti oli hävinnyt 50 cm × 50 cm kokoiselta alueelta ja 10 cm:n syvyydeltä (Kampmier 1995).

Saksa 1990 Ilmakaasutehtaalla säiliövaunua täytettiin nestehapella. Koska säiliövaunu oli etäällä happiputkistosta, täytössä käytettiin kahta yhteen liitettyä täyttöletkua. Täytön aloittamisen jälkeen havaittiin, että letkujen liitoksesta tippui nestehapetta. Nestehappi valui kiskouraa pitkin kohtaan, jossa kiskot oli liitetty toisiinsa sidelevyillä. Kiskot huurtuivat noin 3 m:n matkalla ja niiden lyheneminen katkaisi sidelevyjen kiinnityspultit.

Tällöin tapahtui räjähdys, joka heitti päällysteen kiviä sekä kiskoliitoksen osia yli 100 m:n etäisyydelle. Räjähdys ei aiheuttanut henkilövahinkoja. Tutkinta osoitti, että vaikka päällyste kiskojen vieressä oli suhteellisen puhdas, sidelevyjen kiinnityspultit oli rasvattu hiilivetyperusteisella voiteluöljyllä. Voiteluöljyn ja nestehapen seos syttyi todennäköisesti pulttien katketessa syntyneestä kipinästä (EIGA 2004).

3.1.2 Vuodot

USA 1970-luku Ison nestetyypisäiliön ainoa varoventtiili oli jäänyt ja säiliön paine nousi niin korkeaksi, että seinämä repei irti pohjasta. Irronnut seinämän osa katkaisi viereisen nestehappisäiliön 150 mm:n tyhjennyslinjan. Varastoalue sekä viereinen rakennustyömaa evakuoitiin, mutta neljä työntekijää palasi työmaalleen ennen kuin kaikki nestehappi oli haihtunut. Heidän autonsa syttyi palamaan ja kaikki neljä kuolivat (EIGA 2004).

Australia 1970-luku Säiliöauto oli täyttämässä tutkimusaluksen kannella sijaitsevaa nestehappisäiliötä, kun täyttöletku alkoi vuotaa. Nestehapetta valui aluksen kannelle ja sieltä ruumaan. Alus syttyi nopeasti palamaan ja upposi. Onnettomuus ei aiheuttanut henkilövahinkoja (EIGA 2004).

Englanti, 1977 Kaasupullojen täyttölaitoksen pumpun imuletku irrotettiin pumpun korjausta varten. Tämän jälkeen nestehappisäiliön ja letkun avoimen pään välillä oli enää yksi sulkuventtiili. Tämän venttiilin käyttökierre petti, minkä seurauksena venttiili avautui täysin. Noin 11 000 kg nestehapetta purkautui venttiilin kautta muodostaen ison sumupilven. Junaliikenne viereisellä radalla keskeytettiin ja yrityksen alue tyhjennettiin. Vuodosta ei aiheutunut henkilövahinkoja (EIGA 2004).

1980-luku Happisäiliöauto lähti ajamaan, vaikka sen letkut olivat kiinni varastosäiliön täyttöyhteissä. Varastosäiliö tyhjentyi vaurioituneen täyttöputkistonsa kautta.

Höyrystyvästä nestehapesta muodostunut sumupilvi kuitenkin haihtui aiheuttamatta henkilövahinkoja (EIGA 2004).

Grande-Synthe, Ranska 1985 Ilmakaasutehtaan nestehappisäiliön jäähdyttämisen aikana säiliön varoventtiilit jäätyivät umpeen. Säiliön paine nousi niin korkeaksi, että sisempi säiliö murtui. Suuri määrä nestehapetta vuoti sisemmän ja ulomman säiliön välitilaan, jossa sitä höyrystyi nopeasti. Tällöin ulomman säiliön paine nousi niin korkeaksi, että myös se murtui. Nestehapetta valui suoja-altaaseen, mutta sen haihtuminen ei aiheuttanut mitään seurauksia ympäristössä (ARIA 5926).

Australia, 1985 Varastosäiliötä täyttämään tullut säiliöauto oli pysäköity jyrkkään rinteeseen. Kuljettaja nosti säiliöauton säiliön painetta lämmönsiirtimen avulla. Säiliöauton vinon asennon takia säiliön varoventtiili oli nestepinnan alapuolella. Tämän takia varoventtiili alkoi purkaa nestehapetta, joka valui rinnettä alas ja sisään pienen konepajan liukuovista. Sisällä oli kaksi työntekijää hitsaamassa. Molemmat kuolivat palovammoihinsa, kun heidän vaatteessa syttyivät (EIGA 2004).

USA 1988 Ilmakaasutehtaan varastosäiliön 76 mm:n luistiventtiilin kannen hiiliteräksiset kiinnityspultit olivat ruostuneet meri-ilmastossa. Pultit katkesivat ja venttiilin kara sekä kiila irtosivat venttiilin rungosta. Säiliö tyhjjeni venttiilin kautta 12–13 tunnissa. Vuoto aiheutti huomattavat aineelliset vahingot, mutta ei henkilövahinkoja. Maanalainen, 1,2 m:n syvyydellä soramaassa kulkenut sammutusvesijohto jäättyi ja halkesi (EIGA 2004).

USA 1989 Säiliöautojen täyttölaitoksen kolmitieventtiili käännettiin väärään asentoon ja nestehapetta valui venttiilistä maahan. Täyttöventtiili suljettiin, mutta nestehappilammikko valui tielle. Urakoitsijan auto ajoi lammikkoon ja sen moottori pysähtyi. Kun kuljettaja yritti käynnistää moottoria, auto syttyi palamaan. Auto tuhoutui, mutta onnettomuudesta ei aiheutunut henkilövahinkoja (EIGA 2004).

Kolumbia 1989 Terroristin ampuma raketti puhkaisi nestehapen varastosäiliön ulompaan ja sisempään säiliöön noin 6 cm × 7 cm kokoisen aukon. Noin 14 m³ nestehapetta vuoti pääasiassa säiliöiden välitilaan. Ulompi säiliö jäättyi, mutta jää suli noin 14 tunnissa. Ulomman säiliön todettiin olevan (raketin tekemää aukkoa lukuun ottamatta) ehjän. Viereiseen nestetyypisäiliöön osui viisi kiväärin luotia, mutta ne eivät puhkaisseet sisempää säiliötä. Terroriteko ei aiheuttanut henkilövahinkoja (EIGA 2004).

Englanti 1990 Säiliökonttiin oli juuri täytetty 20 000 kg nestehapetta, kun täyttöletku irtosi. Kontti tyhjjeni, mutta päästöistä ei aiheutunut aineellisia eikä henkilövahinkoja (EIGA 2004).

Ranska 1992 Nestehappisäiliö, jonka tilavuus oli 160 litraa, oli sijoitettu kuormalavalle ja liitetty varastosäiliöön letkulla. Kuormalava oli kiinni trukin haarukassa. Seuraavana päivänä toinen trukinkuljettaja peruutti trukkia, jolloin kuormalava seurasi mukana. Täyttöletkun veto kohdistui varastosäiliön venttiiliin ja kupari-putkeen. Putki katkesi ja 22 m³ nestehapetta valui sen kautta maahan muodostaen ison sumupilven. Vaikka sähkövirta katkaistiin välittömästi alueelta, nesteytysykkö vahingoittui (EIGA 2004).

Filippiinit 1993 Rakennuksessa olevaa nestehappisäiliötä täytettiin säiliöautosta. Varastosäiliön tyhjennysventtiilin juotettu liitos repesi ja 13 000 kg nestehapetta valui rakennukseen. Rakennuksessa oli useita ovi- ja ikkuna-aukkoja ja niiden kautta purkautui kylmää happikaasua. Happipilvi valui seinien rajoittamia katuja pitkin alueelle, jossa oli ruoan myyntikojuja ja avotulia. Jotkut ihmiset tupakoivat ja yksi paikalla ollut kuvaili, kuinka hänen jalkansa kipinöivät, kun hän meni autoonsa. Yhden henkilön vaatteet syttyivät, mutta paikalla olleet auttoivat häntä sammuttamaan ne viereisessä kanavassa. Toinen henkilö sai palovammoja jalkoihinsa. Yksi virastorakennus ja yksi auto paloivat (EIGA 2004).

Kanada 1996 Ilmakaasutehtaalla nestehapetta, joka ei täyttänyt tuotteen laatuvaatimuksia, puhallettiin ns. kylmän soihdun kautta ilmaan. Happivana kuitenkin laskeutui maanpinnalle ja happipitoista ilmaa tunkeutui tehtaan ohjaamoon. Kun työntekijä meni sisälle rakennukseen, hänen housunlahkeensa syttyivät välittömästi palamaan. Palon sammuttaminen osoittautui lähes mahdottomaksi, vaikka hänen työtoverinsa tyhjensivät useita alkusammuttimia. Työntekijän palovammat olivat pääasiassa vyötärön alapuolella (EIGA 2004).

Chalons-en-Champagne, Ranska 1999 Sairaalan 12 m³:n nestehappisäiliötä täytettiin säiliöautosta. Säiliön ilmahöyrystimen ympärille muodostunut jääkimpale putosi tyhjennysventtiilin päälle katkaisten sen. Palokunnan vaarallisten aineiden yksikkö eristi säiliön ympäristön ja 80 henkilöä evakuoitiin kahdesta rakennuksesta. Teknikko tukki vuodon, tyhjensi osittain säiliön ja vaihtoi siihen uuden venttiilin. Varastosäiliön ja höyrystimen välinen putkijohto, venttiilit ja varolaitteet suojattiin. Vuodon jälkeen annettiin ohje, jonka mukaan höyrystimen ympärille kertyvä jää on säännöllisin väliajoin poistettava (ARIA 14783).

Saint-Chamond, Ranska 2001 Takomon alueella urakoitsija korjasi rakennuksen seinää. Kun urakoitsijan nostolavaa siirrettiin, se törmäsi 6 m³:n nestehappisäiliön höyrystimeen katkaisten nestehappiputken. Purkautuva paineenalainen (10 bar) nestehappi täytti suoja-altaan. Muodostui iso valkoinen sumupilvi.

Säiliön ympäristö eristettiin nopeasti ja takomosta sekä naapuriyrityksistä evakuoitiin 300 työntekijää. Kaikki nestehappi oli haihtunut altaasta 30 minuutin kuluttua vuodon sulkemisen jälkeen ja alueen eristys voitiin lopettaa tunnin kuluttua vuodon alkamisesta. Toimivaltainen viranomaisvaati takomoyritystä tarkistamaan ja toimeenpanemaan urakoitsijoiden työskentelyohjeet (ARIA 21238).

Birmingham, AL, USA 2003 Sairaalan nestehappisäiliön ja putkikyhteen välinen juotossauma repesi yhtäkkiä ruostumattoman teräksen ja messingin välisen galvaanisen korroosion sekä lämpölaajenemisen aiheuttaman vaurion yhteisvaikutuksesta. Säiliön sisältö, noin 30 m³ nestehapetta, purkautui muodostuneesta aukosta nopeasti ulos. Tyhjenneen säiliön vieressä oli pienempi varasäiliö ja automatiikka avasi tämän säiliön venttiilin. Koska varasäiliön kuntoa ei pystytty arvioimaan runsaan jään ja sumun muodostuksen (kuva 3) takia, säiliöiden ja sairaalan happiputkiston välinen eristysventtiili suljettiin. Sairaala ilmoitti poliisille ja palokunnalle vaaratilanteesta (Schumacher ym. 2004).

Saint-Yorre, Ranska 2004 Lasivillatehtaan 3 m³:n nestehappisäiliössä havaittiin pieni vuoto. Säiliön ympäristö eristettiin. Vuotoa rajoitettiin kylmätulpalla. Kaasu-yhtiön teknikko tukki vuodon ja alueen eristys voitiin lopettaa (ARIA 26664).



Kuva 3. Sairaalan nestehappisäiliön tyhjennettyä muodostunut sumupilvi. Ilman lämpötila oli 13 °C ja suhteellinen kosteus lähes 100 % (Schumacher ym. 2004).

Beaumont, Ranska 2005 Sairaalan 1,2 m³:n nestehappisäiliö oli tarkoitus korvata uudella 3 m³:n säiliöllä. Säiliön asennus oli päättynyt 23.6. ja se oli tarkoitus liittää sairaalan happiputkistoon 26.6. Ilman korkean lämpötilan ja ylitäytön seurauksena säiliön valvontajärjestelmä hälytti korkeasta nestepinnasta ja varoventtiilit avautuivat noin kello 15. Naapuri näki muodostuneen valkoisen sumupilven ja sairaalan henkilökunta hälytti palokunnan.

Hälytys korkeasta pinnasta meni kaasuyhtiön valvomoon. Kaasuyhtiön teknikon paikalle saapumista odottaessa palokunta eristi ympäristön ja eliminoi mahdolliset syttymislähteet. Purkautuva nestehappi jäädettiin varoventtiiliin. Palokunta oli paikalla kello 21 asti, kunnes varoventtiili oli sulatettu. Vahingon seurauksena kaasuyhtiö antoi uuden ohjeen, jonka mukaan uuden säiliön vaihtaminen ja liittäminen on tehtävä saman päivän aikana (ARIA 31493).

Sens, Ranska 2006 Sairaalan 3,3 m³:n nestehappisäiliön tyhjennysputken tuli suuri vuoto. Säiliön ympäristö eristettiin. Happijärjestelmän vastuuhenkilö huolehti siitä, että toimintaohjeita noudatettiin säiliön pohjaventtiiliä suljettaessa. Happea toimitettiin sairaalan osastoille varasäiliöstä ja happipulloista (ARIA 31292).

3.2 Nestehappisäiliöiden turvallisuusselvitykset

Euroopan teollisuuskaasuyhdistys EIGA on julkaissut suosituksen (EIGA 2004) nestehapen varastosäiliöistä viranomaisille tehtävien turvallisuusselvitysten sisällöksi. Edellä kappaleeseen 3.1 koottujen onnettomuuskuvausten tarkoituksena on havainnollistaa suuren nestehappivuodon seurauksia. Niitä ei suositella otettaviksi sellaisenaan turvallisuusselvitykseen, vaan niiden osalta pitäisi viitata raporttiin (EIGA 2004).

Raportti (EIGA 2004) korostaa, että kaikki nestehappivuotojen aiheuttamat kuolemantapaukset ovat sattuneet sisätiloissa, joiden happipitoisuus on noussut vaarallisen korkeaksi.

Ulkopuolisiin kohdistuva vaara aiheutuu ennen kaikkea siitä, että hapen kyllästämät vaatteet syttyvät helposti, palavat kiivaasti ja palo niissä leviää nopeasti. Vaara on vähäinen hapen pitoisuudella 25 %, merkittävä pitoisuudella 40 % ja suurin pitoisuudella 50 %.

Turvallisuusselvityksessä tulisi piirtää hapen pitoisuuksia 25 % ja 40 % vastaavat tasa-arvokäyrät mahdollisten vuotokohtien ympärille. Pitoisuutta 25 % vastaavan tasa-arvokäyrän ulkopuolella voidaan katsoa, että hapen vuoto ei aiheuta vaaraa. Vastaavasti pitoisuutta 40 % vastaavan tasa-arvokäyrän sisäpuolella vuodosta aiheutuu suuri vaara. Vaara tasa-arvokäyrien väliin jäävällä alueella tulisi arvioida paikallisten olosuhteiden perusteella.

EIGAn alainen International Harmonisation Committee julkaisi vuonna 2006 kannanoton (EIGA 2006), jonka tarkoituksena oli yhdenmukaistaa ilman normaalia poikkeavan happipitoisuuden aiheuttamaa tukehtumis- tai palovaaraa kuvaavat pitoisuuden ohjearvot. Eri maissa ja eri julkaisuissa nämä ohjearvot sekä niiden sanalliset tulkinnat olivat hieman erilaisia. Tämän arveltiin aiheuttavan ongelmia uusia turvallisuusohjeita laadittaessa, jos pitoisuuden ohjearvoa tai sen tulkintaa samalla muutetaan tai tulkintaa ei tarpeeksi selkeästi esitetä.

Kohonneen happipitoisuuden tapauksessa ohjearvot ja niiden tulkinnat ovat (EIGA 2006):

- Korkein turvallinen ilman happipitoisuus suljetussa tilassa on 23,5 %. Jos tilan happipitoisuutta seurataan jatkuvasti tai happipitoisuus mitataan aina ennen tilaan menoa, tilaan ei saa mennä ennen kuin sen happipitoisuus on tuuletuksella alennettu lähelle 21 %.
- Jos happivuoto, hapen puhallus tai muu hallitsematon päästö nostaa ulkoilman happipitoisuutta, alueelle, jossa hapen pitoisuus on enintään 25 %, voi turvallisesti mennä. Jos hapen pitoisuus alueella on ajoittain korkeampi kuin 25 %, tällaiselle alueelle voidaan turvallisesti mennä, kun tiettyjä turvallisuusohjeita noudatetaan. Esimerkiksi tupakointi on kielletty tai tulitöihin vaaditaan työlupa alueella, jossa hapen puhallukset ovat mahdollisia.
- Ennustettujen happipäästöjen leviämiseen perustuvien vaaraetäisyyksien laskemista varten voidaan olettaa, että ilman happipitoisuus, joka on vähintään 35 %, voi aiheuttaa kuolemantapauksen.

Nämä pitoisuudet perustuvat taulukossa 8 esitettyyn vaatteiden syttymiseen ja kuolemaan johtavien palovammojen todennäköisyyksien arvioon. Taulukkoa 8 laadittaessa on oletettu, että 30 % väestöstä tupakoi ja käyttää 5 % työ- sekä 10 % vapaa-ajastaan tupakointiin (7,5 min/savuke). Lisäksi on otettu huomioon muut ihmisten lähellä olevat syttymislähteet: lasten tulitikkuleikit sekä kipinöivät työkalut ja laitteet. Siten oletetaan, että 40 %:lla väestöstä on lähellään jokin ajoittain toimiva syttymislähde.

Taulukko 8. Kuolemaan johtavien palovammojen todennäköisyys

| | | | | |
|---|--------------|---------------|---------------|---------------|
| happipitoisuus | 25 % | 30 % | 35 % | 40 % |
| vaatteiden syttymisaika | 20 s | 10 s | 7,5 s | 5 s |
| suhteellinen palamisnopeus | 1 | 1,25 | 1,75 | 3 |
| palava savuke vaatteiden syttymisen tn., kun savuke palaa | 3,5 % 5 % | 3,5 % 30 % | 3,5 % 50 % | 3,5 % 90 % |
| palovammojen tn., kun vaatteet syttyvät | 10 % | 16 % | 29 % | 90 % |
| palovammojen tn. | 0,018 % | 0,17 % | 0,51 % | 2,8 % |

Vaatteiden syttymisaika ja syttymisen todennäköisyys palavasta savukkeesta perustuvat uusilla kuivilla puuvillahaalareilla tehtyihin kokeisiin. Vakavan tai kuolemaan johtavan palovamman todennäköisyys perustuu kankaan palamisnopeuteen ja ihmisen reaktioaikaan (BCGA 2004, EIGA 2006).

Valittu ilman vaarallinen happipitoisuus 35 % vastaa siis todennäköisyyttä 0,5 % saada kuolemaan johtavat palovammat.

Muut hapen vaaratekijät ovat (EIGA 2004):

- Painelaitteiden sisällä oleva puristettu happi voi sytyttää metallin palamaan. Syttyminen riippuu metallista ja hapen paineesta. Painelaitteen – prosessiputkiston tai kompressorin – syttyminen aiheuttaa vaaraa happipäästön, sulan metallin roiskeiden ja shokkiaallon takia.
- Nestehapen joutuminen kosketukseen palavien materiaalien (esimerkiksi hiilivetyjen) kanssa voi aiheuttaa räjähdysten.
- Nestehapesta haihtuva kylmä höyry voi aiheuttaa vaaraa ihmisen iholle, silmille ja hengityselimille, jos sen lämpötila on alempi kuin -40 °C .
- Painelaitteiden katastrofaalisen murtumisen aiheuttama shokkiaalto ja heitteet voivat aiheuttaa vaurioita ja vammoja.
- Nestehappilammikosta haihtuva kylmä höyry voi jäähdyttää ilman lämpötilan alle kastepisteen, jolloin muodostuu ympäröivää ilmaa raskaampi sumupilvi. Sumupilvi voi aiheuttaa vaaraa liikenteelle, jos happisäiliö on tien lähellä. Hapen pitoisuus näkyvän pilven ulkopuolella on yleensä pienempi kuin 25 % eikä siis aiheuta vaaraa.
- Nestehappivuoto ei aiheuta haittaa ympäristölle. Nestehappi jäädyttää maan ja muodostaa jäätä. Nestehapen kanssa kosketukseen joutuvat putket voivat tukkeutua ja murtua hauraasti.
- Suurin mahdollinen nestehapen päästö aiheutuu varastosäiliön katastrofaalisesta murtumisesta. Useat tekijät voivat aiheuttaa säiliön murtumisen. Kaikki nämä tekijät on esitettävä turvallisuusanalyysissä ts., ovatko ne mahdollisia varastosäiliön sijoituspaikalla vai eivät.

Nestehappisäiliön katastrofaalisen murtuman mahdollisten syiden tarkastelua varten annetaan seuraavat ohjeet:

- Ulkoinen isku. Varastosäiliön sijainti lähimmän lentokentän ja lentoreittien suhteen tulisi esittää. Mahdollinen ilmavoimien tukikohta ja ylilennot tulisi mainita. Todennäköisyys, että maahan putoava lentokone osuu varastosäili-

öön, voidaan arvioida. Mahdollisen räjähdyskäsittelyn heitteiden osumista varastosäiliöön tulisi käsitellä. Jos lähellä on palavia aineita, räjähdysaineita tai isoja painelaitteita, on ehkä tarpeen laskemalla arvioida, voivatko niistä muodostuvat heitteet lentää varastosäiliön luo. On huomautettava, että ulompi säiliö ja välitilan eristys suojaavat sisempää säiliötä vaurioitumasta (katso Kolumbian terrori-iskun kuvausta edellä).

- Luonnonilmiöt. Maanjäristyksen tai maanvyörymän mahdollisuutta tulisi käsitellä. Jos säiliö on mahdollisen tulvan alueella, tulvan vaikutuksia tulisi käsitellä. Säiliön mitoitustuulikuormaa tulisi verrata alueella esiintyneisiin suurimpiin tuulen nopeuksiin.
- Ilkivalta. Kohteen turvajärjestelyt tulisi kuvailla.
- Suunnittelu- tai valmistusvirhe. Tarvittavat suunnittelu- ja testausasiakirjat on esitettävä. Nestehappi on erittäin puhdasta eikä aiheuta korroosiota. Vuodon syntyminen säiliön käyttöänsä aikana on erittäin epätodennäköistä. Välitilan huuhtelukaasun koostumusta valvotaan mahdollisten sisäsäiliön vuotojen havaitsemiseksi. Vuonna 1997 tehdyn tutkimuksen mukaan Euroopassa oli käytetty nesteytettyjen ilmakeinujen varastosäiliöitä 724 000 säiliövuoden ajan ilman yhtään suunnittelu- tai valmistusvirheestä aiheutunutta katastrofaalista murtumaa.
- Ylipaineistuminen. Suositellaan, että varastosäiliön ylipaineistumisen mahdollisuus arvioidaan vikapuun avulla. Vikapuun osoittaa ylipaineistumisen erittäin epätodennäköiseksi, jos eri tapahtumien todennäköisyydet arvioidaan. Mikäli mahdollista, komponenttien arvioituja vikataajuuksia pitäisi perustella laitoksen tai vastaavien laitosten kunnossapidon tilastojen avulla.
- Vaarojen tunnistamisen perusteella laaditaan luettelo nestehappivuodon muista mahdollisista syistä, esimerkiksi: täyttöletkun poikkiajo, täyttöletkun katkeaminen tai vuoto, putkimurtuma (ulkoinen isku, putken liikkuminen, venttiilien väliin jääneen nesteen lämpölaajeneminen), happiputken palo, säiliöauton ylitäyttö, varastosäiliön alipaine, nestepurkaus ylitäytetyn varastosäiliön varoventtiilistä, tulipalo, räjähdys.

Kun onnettomuuteen johtavat tapahtumat on tunnistettu, jokaisen tapahtuman seuraukset on laskettava. Nestevuodot ovat yleensä seurauksiltaan vakavampia, mutta myös kaasuvuotoja tulisi tarkastella. Seuraustarkastelu käsittää seuraavat vaiheet:

- vuodon massavirta
- nestelammikon höyrystymisnopeus
- raskaan kaasun leviäminen.

Vuodon massavirta riippuu vuotoaukon koosta ja sijainnista. Riippuen vuotoaukon sijainnista nestepinnan suhteen vuoto voi olla kaasu-, neste- tai kaksifaasi-vuoto. Jos varastosäiliö on sijoitettu suoja-altaaseen, on arvioitava, putoaako nestesuihku tähän altaaseen vai sen ulkopuolelle. Suositellaan, että vuodon massavirran riippuvuus ajasta esitetään käyrän muodossa. Vuodon kesto tulisi myös arvioida.

Nestelammikon höyrystymisnopeuteen vaikuttaa, onko lammikko suoja-altaan vallien rajoittama vai pääseekö se vapaasti laajenemaan. Kummassakin tapaukses-

sa alustan lämpötekniset ominaisuudet määräävät höyrystymisnopeuden alkuvaiheessa.

Kun vuotanut neste valuu suoja-altaaseen, on arvioitava, riittääkö altaan tilavuus pitämään nesteen altaassa. Tätä varten on arvioitava altaaseen vuotava ja siitä höyrystyvä massavirta ajan funktiona. Näistä voidaan laskea nestekerroksen paksuus ajan funktiona. Jos nestekerros on ohut, höyrystymisnopeus määräytyy nesteen kalvokiehunnan lämmönsiirtokertoimesta sekä alustan lämpöteknisistä ominaisuuksista. Jos nestekerros on paksu, auringon lämpösäteily ja tuuli ovat määrittäviä tekijöitä.

Jos nestelammikko pääsee vapaasti laajenemaan, lammikon ala kasvaa jatkuvasti, kunnes vuoto lakkaa. Lammikon arvioitu suurin koko tulisi piirtää laitoksen kartalle. Jos maanpinta viettää, lammikon muoto poikkeaa ympyrästä ja vaaraetäisyys kasvaa. Jos suoja-altaan tilavuus ei riitä pitämään vuotanutta nestettä altaassa, nestelammikko pääsee vapaasti laajenemaan altaan ulkopuolella.

Leviämislaskuja varten on lähimmältä sääasemalta hankittava tuulitiedot, jotka voidaan kätevästi esittää tuuliruusun muodossa. Yleensä riittää tehdä leviämislaskut kolmella stabiiliusluokalla: epästabiili B, neutraali D ja stabiili F.

Paikalliset olosuhteet voivat muuttaa tuulen suuntia. Esimerkiksi jyrkkä rinne tai laakso voi synnyttää painovoimaisen virtauksen. Kesällä rannikolla puhaltaa päivisin meri- ja öisin maatuuli. On erittäin tärkeää ottaa nämä tekijät huomioon. Yleensä leviämislaskut tehdään aukealla ja tasaisella maastolla. Joissain tapauksissa on välttämätöntä ottaa huomioon läheiset esteet (rakennukset ja varastosäiliöt), jotka synnyttävät taakseen pyörrealueita tai kanavoivat tuulen virtausta.

Koska happipäästö on ympäröivää ilmaa raskaampi sekä hapen moolimassan että päästön matalan lämpötilan takia, leviämislaskut on tehtävä raskaan kaasun mallilla, joka ottaa huomioon lämmönsiirron toisaalta kaasuvan ja ympäröivän ilman ja toisaalta kaasuvan ja maanpinnan välillä.

Pitoisuuksien 25 % ja 40 % sekä lämpötilan -40 °C tasa-arvokäyrien määrittelemät päästön vaara-alueet voidaan nopeasti laskea ns. laatikkomallilla. Tällainen malli on helppo käyttää ja antaa yleensä konservatiivisia tuloksia. Kolmiulotteisen mallin käyttöä voidaan harkita, jos laatikkomalli antaa liian suuria vaaraetäisyyksiä (esimerkiksi, kun esteiden muodostamien pyörrealueiden vaikutus on merkittävä) tai jos maasto ei ole tasaista (esimerkiksi, kun maanpinta viettää huomattavasti tai esteet kanavoivat tuulen virtausta).

Tulokset tulisi esittää taulukkojen sekä laitoksen karttapohjalle piirrettyjen pitoisuuksien ja lämpötilan tasa-arvokäyrien avulla. Jos vaara-alueelle jää laitoksen kriittisiä kohtia, domino-ilmioiden tarkastelu saattaa olla tarpeen.

Saatavilla on sekä ilmais- että kaupallisia ohjelmia, joilla tällaiset laskut voidaan suorittaa. Useilla kaupallisilla ohjelmilla kaikki edellä kuvatut laskut voidaan suorittaa peräkkäin.

3.3 Nestehappisäiliön vaaraetäisyydet

3.3.1 Seoksen lämpötila

Vaaraetäisyydet lasketaan hapen kokonaispitoisuuksilla (ilmakehän happipitoisuus + päästöstä aiheutuva ylimääräisen hapen pitoisuus). Ylimääräisen hapen pitoisuudet voidaan ilmaista tilavuusosina tai massana seoksen tilavuusyksikköä kohden. Edellinen tapa on kätevämpi, koska pitoisuus ilmaistuna massana tilavuusyksikköä kohden riippuu seoksen lämpötilasta. Merkitään ilman kokonais-happipitoisuutta C_t :llä ja ylimääräisen hapen pitoisuutta C :llä. Tällöin $C_t = 0,21 + 0,79C$ ja tiettyä C_t :n arvoa vastaava ylimääräisen hapen pitoisuus on

$$C = \frac{C_t - 0,21}{0,79} \quad (6)$$

Näitä hapen pitoisuuksia vastaavat kaasupilven lämpötilat on helppo laskea, jos ilman kosteutta ei oteta huomioon. Nestehappilammikosta haihtuvan hapen lämpötila on sama kuin hapen kiehumislämpötila $T_b = -183 \text{ °C} = 90 \text{ K}$. Oletetaan, että C moolia ylimääräistä happea sekoittuu yhteen mooliin kuivaa ilmaa, jonka lämpötila on T_a [K]. Merkitään muodostuneen seoksen lämpötilaa T :llä [K]. Tällöin energian säilymisestä seuraa

$$c_a T_a + c_g C T_b = (c_a + c_g C) T \quad (7)$$

missä c_g on hapen ja c_a ilman molaarinen ominaislämpökapasiteetti vakio paineessa. Ratkaistaan yhtälöstä (11) seoksen lämpötila T ja käytetään hyväksi sitä, että $c_g/c_a = 1,01$

$$T = \frac{T_a + 1,01 C T_b}{1 + 1,01 C} \quad (8)$$

Kaavalla (6) lasketut ylimääräisen hapen pitoisuudet C sekä kaavalla (8) lasketut seoksen lämpötilat on esitetty taulukossa 9 ilman lämpötilan T_a arvoilla 0 °C , 10 °C ja 20 °C .

Taulukko 9. Ylimääräisen hapen pitoisuudet ja seoksen lämpötilat

| seoksen happipitoisuus | 25 % | 30 % | 35 % | 40 % |
|------------------------------|--------|---------|---------|---------|
| ylim. hapen pitoisuus | 5,06 % | 11,39 % | 17,72 % | 24,05 % |
| T, kun $T_a = 0 \text{ °C}$ | -9 °C | -19 °C | -28 °C | -36 °C |
| T, kun $T_a = 10 \text{ °C}$ | -1 °C | -10 °C | -19 °C | -28 °C |
| T, kun $T_a = 20 \text{ °C}$ | +10 °C | +1 °C | -11 °C | -20 °C |

Taulukon 9 lämpötiloista käy ilmi, että ohjeessa (EIGA 2004) mainittu iholle, silmille ja hengityselimille vaarallinen lämpötila -40 °C esiintyy vain vuodon läheisyydessä, jossa vaatteiden syytymisvaara on suuri.

Taulukon 9 lämpötilat antavat myös tietoa siitä, mikä on hapen pitoisuus näkyvän pilven reunalla. Kastepisteessä vesihöyryn osapaine on yhtä suuri kuin veden kyläläisen höyryn paine. Esimerkiksi, jos ilman lämpötila on 20 °C , kyläläisen höyryn paine on $2,34 \text{ kPa}$. Jos ilman suhteellinen kosteus on 55% ja lammikosta haihtuvaa kylmää happea sekoittuu ilmaan niin paljon, että kokonaishappipitoisuus on 25% , vesihöyryn osapaine on $1,23 \text{ kPa}$ ja vastaava kastepiste on 10 °C . Tässä tapauksessa siis hapen pitoisuus näkyvän pilven reunalla olisi 25% . Tarkemmassa laskussa pitää ottaa huomioon tiivistyvän vesihöyryn luovuttama lämpö.

3.3.2 Pisaroituva suihku

Osa vuotavasta nestehapesta höyrystyy välittömästi (adiabaattisesti) paineen las-
kiessa ilmanpaineeseen. Höyrystyvä osuus x saadaan kaavasta

$$x = \frac{h_r - h_l}{h_v - h_l} \quad (9)$$

missä h_r on nesteen entalpia säiliön lämpötilassa [J/kg], h_l on nesteen ja h_v on höy-
ryn entalpia kiehumislämpötilassa [J/kg]. Jäljelle jäävä osa jäähtyy hapen kiehu-
mislämpötilaan -183 °C.

Jos nestehapen suihku pääsee purkautumaan niin, että se ei törmää maanpintaan
tai muihin esteisiin, muodostuvat höyrykuplat hajottavat nesteen sumupisaroinksi.
Tällaista pisaroituvaa suihkua on tutkittu mm. USA:ssa RELEASE-tutkimus-
ohjelman yhteydessä.

Ohjelman ensi vaiheessa vuonna 1989 päästökokeita tehtiin trikloorifluorime-
taanilla (CFC-11) ja vedellä sekä toisessa vaiheessa vuonna 1991 kloorilla, me-
tyyliamiinilla ja sykloheksaanilla. Näissä kokeissa vaakasuora päästöputki oli 1,2
m keräilyaltaan yläpuolella. Putkihalkaisija oli yleensä 6,35 mm; vain muutamissa
vedellä tehdyissä kokeissa halkaisija oli tätä pienempi (3,2 mm) tai suurempi
(12,7 mm). Säiliön kaasutilassa oli typpeä, jotta putkeen ei muodostuisi kaksi-
faasivirtausta.

Kaikilla kokeissa käytetyillä aineilla nestesuihku muuttui sumusuihkuksi tietyllä
nesteen yllilämmön (liquid superheat) $T_r - T_b$ arvolla. Taulukossa 10 on esitetty
tämän lämpötilan (jet shattering superheat) arvot, mitatut pisaroituneen suihkun
lämpötilat sekä altaaseen pudonneen nesteen lämpötilat (Johnson 1991).

Taulukko 10. RELEASE-tutkimusohjelmassa mitattuja lämpötiloja, °C

| aine | kiehumis- lämpötila | sumusuihku $T_r - T_b$ | suihkun lämpötila | nesteen lämpötila |
|---------------|------------------------|---------------------------|----------------------|----------------------|
| kloori | -36,6 | 27 | -68 | — |
| metyyliamiini | -8,9 | 17 | -46 ± 1 | — |
| CFC-11 | 22,3 | 22 | -1 | -14 ± 6 |
| sykloheksaani | 77,0 | 19 | 12 ± 2 | — |
| vesi | 98,8 | 28–39 | 32 | 30 ± 4 |

Nyrén ja Winter (1986) tekivät Ruotsissa kokeita nestemäisellä rikkidioksidilla.
Nesteen annettiin purkautua $2,6 \text{ m}^3$:n säiliöstä noin 1,2 m:n korkeudella maanpin-
nasta olevan, vaakasuoran, 2 m pitkän putken kautta, jonka sisähalkaisija oli 36
mm. Nesteen lämpötila oli $17\text{--}20$ °C ja yllilämpö oli siis $27\text{--}30$ K. Säiliössä oli jäl-
jellä sen tyhjentämiseen käytettyä paineilmaa ja aurinko oli lämmittänyt säiliön
kaasutilan vaippaa. Neste purkautui putkesta sumusuihkuna (kuva 4) eikä maahan
pudonnut lainkaan nestettä.

RELEASE-ohjelman alkuperäisistä ja korjailuista koetuloksista voidaan johtaa
yksinkertainen korrelaatio: ilmassa haihtuneiden pisaroiden osuus oli noin kaksi
kertaa välittömästi höyrystynyt osuus massavirrasta (Lautkaski 2008). Toisaalta
on muistettava, että useita haihtuvien pisaroiden osuuteen vaikuttavia parametreja
(vuotoaukon halkaisija, typen paine, päästön korkeus ja suunta maanpintaan sekä
tuulen suuntaan nähden) muunneltiin kokeiden yhteydessä vähän tai ei lainkaan,

joten näiden parametrien vaikutusta ilmassa haihtuvien pisaroiden osuuteen ei tiedetä.



Kuva 4. Rikkidioksidin purkausputken päähän muodostui sumusuihku (Nyrén & Winter 1986).

3.3.3 Varastosäiliön tyhjennyslinja

Sairaaloissa nestehappi varastoidaan tavallisesti 3 tai 6 m³:n tyhjöeristetyssä säiliössä. Yliopistosairaaloissa on suurempia, jopa 32,5 m³:n varastosäiliöitä. Varastosäiliö on pysty lieriö, jonka halkaisija on yleensä 1,6 m, yliopistosairaaloilla jopa 2,5 m. Nestehappi tuodaan ilmakaasutehtaalta säiliöautolla suunnilleen hapen kiehumislämpötilassa –183 °C. Täytön jälkeen nestehapen lämpötila nousee hitaasti lämpövuotojen vaikutuksesta ja laskee jälleen, kun varastosäiliö täytetään seuraavan kerran. Nesteen lämpötila säiliössä vaihtelee välillä –155...–152 °C, joka vastaa hapen höyrynpainetta 9–11 bar.

Oletetaan, että nestehappisäiliön tyhjennyslinja (NS 25 tai NS 50) katkeaa säiliön ja ensimmäisen sulkuventtiilin välistä. Katkenneeseen putkeen muodostuu kaksifaasivirtaus, jonka massavirran tiheys G [kg m⁻² s⁻¹] arvioidaan Fausken ja Epsteinin (1988) esittämällä kaavalla

$$G = \frac{h_{lv}}{\frac{1}{\rho_v} - \frac{1}{\rho_l}} \left(\frac{1}{c_p T_r} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

missä h_{lv} on aineen höyrystymislämpö [J/kg], ρ_v kylläisen höyryn tiheys [kg/m³], c_p nesteen ominaislämpökapasiteetti vakioaineessa [J kg⁻¹ K⁻¹] ja T_r nesteen lämpötila säiliössä [K]. Kaavaa (10) sovellettaessa kaikkien suureiden arvot otetaan lämpötilassa T_r , jolle nyt käytetään arvoa –153 °C. Kun kaavaan (10) sijoitetaan $h_{lv} = 173\,400$ J/kg, $\rho_l = 972,9$ kg/m³, $\rho_v = 39,65$ kg/m³, $c_p = 1929,5$ J kg⁻¹ K⁻¹ ja $T_r = 120,15$ K, saadaan massavirran tiheydelle G arvo 14 900 kg m⁻² s⁻¹.

Vuodon massavirta m' saadaan kertomalla massavirran tiheys G vuotoaukon alalla $4,91 \cdot 10^{-4}$ m² (NS 25) tai $1,96 \cdot 10^{-3}$ m² (NS 50). Massavirraksi m' saadaan 7,3 kg/s = 0,45 m³/min (NS 25) tai 29,2 kg/s = 1,8 m³/min (NS 50). Täysi 3, 6 tai 32,5 m³:n säiliö tyhjenee siis 7, 13 tai 17 minuutissa. Todellisuudessa säiliössä olevan nesteen lämpötila laskee tyhjenemisen aikana jonkin verran, koska nestettä höyrystyy säiliön laajenevaan kaasutilaan. Tyhjenemisen aikana vuodon massavirta pienenee ja tämän takia säiliön tyhjenemisaika pitenee hieman.

Sairaaloiden happisäiliöillä nesteen yllilämpö $T_r - T_b$ on noin 30 K ja kuvan 4 kaltaisen sumusuihkun muodostuminen on todennäköistä. Kun kaavaan (9) sijoitetaan $h_r = -79,61$ kJ/kg, $h_l = -133,43$ kJ/kg ja $h_v = 79,66$ kJ/kg, saadaan $x = 0,25$. Toisin sanoen 25 % nestehapen massavirrasta höyrystyy välittömästi. Koska em. yksinkertaisen korrelaation mukaan kaikkiaan haihtuisi $3 \times 25 \% = 75 \%$, niin sopivissa olosuhteissa maanpinnalle muodostuisi vain pieni nestelammikko.

Kokonaan pisaroituvan ja haihtuvan suihkun leviäminen voidaan laskea ALOHA-seurausanalyysiohjelmistoon (ALOHA 2007) sisältyvällä raskaan kaasun leviämismallilla DEGADIS (Spicer & Havens 1986). ALOHA ottaa huomioon säiliössä olevan nesteen jäähtymisen säiliön tyhjenemisen aikana. Vuodon massavirta m' pienenee vähän tänä aikana. ALOHA laskee 6 m^3 :n happisäiliön tyhjenemisajaksi 15 min ja $32,5 \text{ m}^3$:n happisäiliön tyhjenemisajaksi 20 min.

ALOHALLA ei voi mallintaa tilannetta, jossa osa päästöstä haihtuu pisaroituvassa suihkussa ja loput lammikosta. ALOHA asettaa tässä tapauksessa päästönopeuden yhtä suureksi kuin vuodon massavirta. Tämä oletus on konservatiivinen eli kasvattaa hieman vaaraetäisyyksiä.

ALOHA jakaa päästön keston viiteen jaksoon siten, että jokaisen jakson aikana haihtuu viidesosa tunnin kokonaispäästöstä. Jos säiliö tyhjenee ja lammikko haihtuu alle tunnissa, jokaisen jakson aikana haihtuu viidesosa säiliön sisällöstä. Kun päästökaasu on ympäröivää ilmaa raskaampi, vaaraetäisyys lasketaan kestoltaan lyhyimmän jakson keskimääräisellä päästönopeudella (Reynolds 1992).

Kun säiliön tyhjennysyhteen sijainti otetaan huomioon, on todennäköistä, että nestesuihku törmää maanpintaan tai muuhun esteeseen. Tällöin pääosa nesteestä muodostaa lammikon maanpinnalle. Pienempien 3 ja 6 m^3 säiliöiden alla on betonilaatta, jonka mitat ovat $6,8 \times 3,8$ m. Laatta on tasainen eikä sillä ole reunoja.

Nestehappi kiehuu, kun se joutuu kosketukseen alustan kanssa. Höyrystymisnopeus $m'(\tau)$ [kg/s] määräytyy lämmönjohtumisesta alustassa (CPR 1992)

$$m'(\tau) = \frac{\chi \lambda_s A_p (T_s - T_b)}{h_{lv} \sqrt{\pi \alpha_s \tau}} \quad (11)$$

missä

- χ on kokeellinen kerroin, joka ottaa huomioon alustan rosoisuuden
- λ_s on alustan lämmönjohtavuus, $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$
- A_p on lammikon ala, m^2
- T_s on alustan alkulämpötila, K
- T_b on kemikaalin kiehumislämpötila, K
- h_{lv} on kemikaalin höyrystymislämpö, J/kg
- α_s on alustan termien diffuusiokerroin, m^2/s , $\alpha_s = \lambda_s / (\rho_s c_s)$, missä ρ_s on alustan tiheys [kg/m^3] ja c_s on alustan ominaislämpökapasiteetti [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]
- τ on aika, jonka neste on ollut kosketuksissa alustaan, s.

Lammikko laajenee valumalla. Tällöin aika τ , jonka neste on ollut kosketuksessa alustaan, on eripituinen lammikon eri osissa. Jos maanpinta on tasainen, lammikko laajenee jatkuvasti ja lammikon kiehuminen jatkuu sen reunalla, missä alusta on vielä lämmin. Tällöin voidaan olettaa, että aika τ on sama lammikon keskipis-

tettä ympäröivillä renkailla. Lisäksi on arvioitava lammikon säteen kasvu ajan funktiona.

Jos suoja-altaan valli tai maanpinnan epätasaisuudet pysäyttävät lammikon laajenemisen, kiehuminen vähitellen lakkaa. Tämän jälkeen haihtuminen jatkuu siksi, että tuulen virtaus estää kylläisen höyryn kerroksen muodostumisen lammikon yläpuolelle. Lammikko jäähtyy, kunnes höyrystymisen sitoma lämpövirta ja ympäristöstä lammikkoon siirtyvä lämpövirta ovat yhtä suuret.

Laajenevan lammikon haihtuminen voidaan helpoimmin laskea lammikkomallilla, jollainen sisältyy ALOHA-ohjelmistoon (ALOHA 2007). ALOHAn lammikkomallilla voidaan olettaa, että maanpinta on tasainen. Tällöin lammikko laajenee valumalla joka suuntaan, kunnes sen keskisyvyys on 5 mm.

Lammikon syvyydelle eri alustoilla suositellaan käytettäväksi seuraavia arvoja:

- tasainen hiekkamaa, betoni, kiveys, teollisuusalue: 5 mm
- tavallinen hiekkamaa, sora, ratapiha: 10 mm
- epätasainen hiekkamaa, ruohikko, pelto: 20 mm
- erittäin epätasainen ja kuoppainen hiekkamaa: 25 mm.

Toisaalta nesteytetyn maakaasun jatkuvan vuodon sileälle betonialustalle todettiin kokeessa muodostavan lammikon, jonka keskisyvyys oli noin 10 mm (CPR 1997).

Jos maanpinta on sellainen, että lammikon keskisyvyys on suurempi kuin 5 mm, tai jos pinnanmuodot rajoittavat lammikon laajenemista, ALOHAn oletus lammikon laajenemisesta, kunnes sen keskisyvyys on 5 mm, yliarvioi lammikon kokoa, päästöä ja vaaraetäisyyksiä. Tällaisessa tilanteessa ALOHalle määritellään lammikon suurin halkaisija tai suurin pinta-ala.

ALOHA yhdistää kaavan (11) alustan lämpötekniset ominaisuudet yhdeksi parametriksi S

$$S = \frac{\chi \lambda_s}{\sqrt{\pi \alpha_s}} \quad (12)$$

ALOHA käyttää kertoimelle χ arvoa 3, joka on päätelty Japanissa tehtyjen kokeiden tuloksista. Näissä kokeissa nesteytettyä maakaasua kaadettiin maanpinnalle. Parametrin S arvo betonilla on $2414 \text{ W s}^{1/2} \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ (Reynolds 1992).

ALOHalla voidaan haihtuminen lammikosta laskea vain siinä tapauksessa, että vuotava neste on kiehumislämpötilassaan tai sitä alemmassa lämpötilassa. Tämän vuoksi paineellinen varastosäiliö on korvattava paineettomalla, josta neste vuotaa maahan nestepatsaan hydrostaattisen paineen vaikutuksesta. Vuodon massavirta m' [kg/s] on siten

$$m' = C_d A \rho_l \sqrt{2gz} \quad (13)$$

missä C_d on virtauskanavan kuristuskerroin, A [m²] vuotoaukon pinta-ala, ρ_l on nestehapen tiheys 1140 kg/m³, g on putoamiskiihtyvyys 9,81 m/s² ja z nestepinnan ja vuotoaukon korkeusero [m].

Jos korkeuseron muutosta aikavälillä Δt merkitään Δz :lla, niin (BCGA 2004)

$$m' \Delta t = -A_r \rho_l \Delta z \quad (14)$$

missä A_r [m²] on säiliön poikkipinta-ala. Sijoittamalla kaava (13) kaavaan (14) saadaan korkeuserolle z differentiaaliyhtälö

$$\frac{dz}{dt} = -\frac{C_d A \sqrt{2g}}{A_r} z^{1/2} \quad (15)$$

joka ratkeaa erottamalla muuttujat. Alkuehdolla $z = H$, kun $t = 0$, ratkaisu on

$$t = \sqrt{\frac{2}{g}} \frac{A_r}{C_d A} (H^{1/2} - z^{1/2}) \quad (16)$$

Koska sekä massavirta m' että aika t ovat verrannolliset tekijään $z^{1/2}$, massavirta pienenee suoraan verrannollisena aikaan t

$$m' = C_d A \rho_l \sqrt{2gH} - \frac{(C_d A)^2}{A_r} \rho_l g t \quad (17)$$

Säiliön tyhjenemisaika t_r [s] saadaan sijoittamalla kaavaan (17) $m' = 0$ ja ratkaisemalla t

$$t_r = \sqrt{\frac{2H}{g}} \frac{A_r}{C_d A} \quad (18)$$

Vuodon keskimääräinen massavirta m_{av} aikavälillä $(0, t_{av})$ saadaan integroimalla kaava (17) tämän aikavälin yli ja jakamalla tulos ajalla t_{av}

$$m_{av} = C_d A \rho_l \sqrt{2gH} - \frac{(C_d A)^2}{2A_r} \rho_l g t_{av} \quad (19)$$

Kaavan (19) avulla voidaan valita sopivat arvot suureille A ja H niin, että ohjelman ALOHA laskema keskimääräinen päästönopeus aikavälillä $(0, t_{av})$, jona ensimmäinen viidesosa säiliön sisällöstä haihtuu, on hieman pienempi kuin vuodon keskimääräinen massavirta samana aikavälinä. Lisäksi on otettava huomioon, että ALOHA käyttää kuristuskertoimelle C_d arvoa 0,61.

Tässä tapauksessa valittiin paineettoman 6 m³:n säiliön halkaisijaksi 1 m, jota vastaava pinnankorkeus H on 7,64 m. Vuotoaukon halkaisijaksi valittiin 35 mm. Vuodon massavirraksi m' saadaan kaavasta (17)

$$m' = 8,21 \text{ kg/s} - \frac{t}{205 \text{ s}} \quad (20)$$

ja säiliön tyhjenemisajaksi 28 min.

Ohjelma ALOHA laskee ajalle t_{av} arvon 200 s ja keskimääräiselle päästönopeudelle arvon 6,87 kg/s. Kaavasta (19) saadaan $m_{av} = 7,72$ kg/s. Hetkellä 200 s lammikossa olisi $(7,72 - 6,87) \times 200 = 170$ kg = 0,149 m³. Jos lammikon syvydeksi oletetaan 10 mm, vastaava lammikon halkaisija on 4,35 m. Ohjelma ALOHA antaa lammikon suurimmaksi halkaisijaksi 7,2 m, joka saavutetaan säiliön tyhjenemisen jälkeen, kun lammikon syvyys on pienentynyt arvoon 5 mm. Tästä voidaan päätellä, että lammikko ei ulotu betonilaatan ulkopuolelle sinä aikana, jolloin ensimmäinen viidesosa päästöstä tapahtuu ja keskimääräinen päästönopeus on suurin.

Paineettoman 32,5 m³:n säiliön halkaisijaksi valittiin 1,5 m, jota vastaava pinnankorkeus H on 17,5 m. Vuotoaukon halkaisijaksi valittiin 55 mm. Vuodon massavirraksi m' saadaan kaavasta (17)

$$m' = 30,7 \text{ kg/s} - \frac{t}{75 \text{ s}} \quad (21)$$

ja säiliön tyhjenemisajaksi 38 min.

Ohjelma ALOHA laskee ajalle t_{av} arvon 265 s ja keskimääräiselle päästönopeudelle arvon 26,2 kg/s. Kaavasta (19) saadaan $m_{av} = 28,9$ kg/s. Hetkellä 265 s lammikossa olisi $(28,9 - 26,2) \times 265 = 715$ kg = 0,627 m³. Jos lammikon syvydeksi oletetaan 10 mm, vastaava lammikon halkaisija on 8,9 m. Ohjelma ALOHA antaa lammikon suurimmaksi halkaisijaksi 15 m, joka saavutetaan säiliön tyhjenemisen jälkeen, kun lammikon syvyys on pienentynyt arvoon 5 mm.

ALOHalla lasketut 6 m³:n nestehappisäiliön tyhjenemisen vaaraetäisyydet on esitetty taulukossa 11 ja 30,5 m³:n säiliön taulukossa 12.

Taulukko 11. Nestehappisäiliön (6 m³) tyhjenemisen vaaraetäisyydet, m

| pitoisuus | 35 % | 30 % | 25 % |
|--------------------|------|------|------|
| pisaroituva suihku | | | |
| D, 2 m/s | 46 | 57 | 80 |
| D, 5 m/s | 21 | 27 | 43 |
| E, 3 m/s | 35 | 46 | 65 |
| F, 2 m/s | 75 | 90 | 130 |
| lammikko | | | |
| D, 2 m/s | 31 | 41 | 65 |
| D, 5 m/s | 21 | 26 | 43 |
| E, 3 m/s | 29 | 38 | 59 |
| F, 2 m/s | 47 | 61 | 100 |

Taulukko 12. Nestehappisäiliön (32,5 m³) tyhjenemisen vaaraetäisyydet, m

| pitoisuus | 35 % | 30 % | 25 % |
|--------------------|------|------|------|
| pisaroituva suihku | | | |
| D, 2 m/s | 105 | 130 | 185 |
| D, 5 m/s | 43 | 56 | 90 |
| E, 3 m/s | 80 | 100 | 150 |
| F, 2 m/s | 155 | 195 | 290 |
| lammikko | | | |
| D, 2 m/s | 65 | 85 | 135 |
| D, 5 m/s | 42 | 53 | 85 |
| E, 3 m/s | 55 | 75 | 120 |
| F, 2 m/s | 95 | 130 | 215 |

3.3.4 Säiliöauton purkausletku

Tarkastellaan toisena vuototilanteena varastosäiliön täytön yhteydessä sattuvaa onnettomuutta, jossa purkausletku katkeaa tai irtoaa. Oletetaan, että kuljettaja saa kylmiä roiskeita päälleen eikä pysty pysäyttämään pumppua. Pumpun tuotoksi oletetaan 0,45 m³/min = 8,6 kg/s. Vuodon kestoksi oletetaan 3 min. Auton pysäköintipaikalla on betonilaatta, jonka mitat ovat tyypillisesti 4,4 × 4,4 m.

Tämä tilanne korvattiin vuodolla paineettomasta 6 m³:n säiliöstä, jonka halkaisija on 1 m ja pinnankorkeus H on 7,64 m. Vuotoaukon halkaisijaksi valittiin 37 mm. Vuodon massavirraksi m' saadaan kaavasta (17)

$$m' = 9,21 \text{ kg/s} - \frac{t}{161,5 \text{ s}} \quad (22)$$

ja säiliön tyhjenemisajaksi 25 min.

Ohjelma ALOHA saa ajalle t_{av} arvon 180 s ja keskimääräiselle päästönopeudelle arvon 7,62 kg/s. Kaavasta (19) saadaan $m_{av} = 8,65$ kg/s. Hetkellä 180 s lammikossa olisi $(8,65 - 7,62) \times 180 = 185$ kg = $0,162$ m³. Jos lammikon syvyydeksi oletetaan 10 mm, vastaava lammikon halkaisija on 4,55 m. Ohjelma ALOHA antaa lammikon suurimmaksi halkaisijaksi 7,4 m, joka saavutetaan säiliön tyhjenemisen jälkeen, kun lammikon syvyys on pienentynyt arvoon 5 mm. Tästä voidaan päätellä, että lammikko ei ulotu betonilaatan ulkopuolelle sinä aikana, jolloin ensimmäinen viidesosa päästöstä tapahtuu ja keskimääräinen päästönopeus on suurin.

ALOHalla lasketut purkausletkun katkeamisen vaaraetäisyydet on esitetty taulukossa 13.

Taulukko 13. Purkausletkun katkeamisen vaaraetäisyydet, m

| pitoisuus | 35 % | 30 % | 25 % |
|-----------|------|------|------|
| D, 2 m/s | 33 | 44 | 69 |
| D, 5 m/s | 22 | 28 | 45 |
| E, 3 m/s | 30 | 40 | 63 |
| F, 2 m/s | 50 | 65 | 105 |

3.3.5 Happikaasun vuoto

Sairaalan happiputkistoon syötettävä happi höyrystetään höyrystimellä, jonka teho on 100 Nm³/h = 39,6 g/s (3 tai 6 m³) tai 400 Nm³/h = 158 g/s (32,5 m³). Höyrystimen jälkeen happi on säiliön paineessa ja kulkee putkessa, jonka halkaisija on 25 mm (3 tai 6 m³) tai 50 mm (32,5 m³). Oletetaan, että tällaiseen putkeen tulee vuoto niin, että koko kaasumaisen hapen virtaus purkautuu ulkoilmaan. Vuotoaukoon muodostuu kriittinen virtaus ja virtauksen massavirran tiheys vuotoaukossa G [kg m⁻² s⁻¹] on (CPR 1992)

$$G = C_d \left[p_r \rho_r \gamma \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} \right]^{1/2} \quad (23)$$

missä p_r on säiliön paine [Pa], ρ_r on kaasun tiheys säiliössä [kg/m³] ja γ on kaasun ominaislämpöjen suhde, hapella $\gamma = 1,4$.

Oletetaan kaasumaisen hapen lämpötilaksi putkessa 20 °C ja (absoluuttiseksi) paineeksi p_r 1 MPa. Ideaalikaasun tilanyhtälöstä saadaan hapen tiheydeksi $\rho_r = 13,13$ kg/m³. Kun nämä paineen ja tiheyden arvot sijoitetaan kaavaan (23), massavirran tiheydelle G saadaan arvo $3116C_d$ kg m⁻² s⁻¹. Pienin vuotoaukon tehollinen ala $C_d A$, jonka kautta höyrystimen massavirta 39,6 g/s voi purkautua, on siten $0,0396/3116 = 1,27 \cdot 10^{-5}$ m². Höyrystimen teholla 400 Nm³/h vastaava ala on nelinkertainen eli $5,08 \cdot 10^{-5}$ m². Jos kuristuskertoimelle C_d käytetään arvoa 0,61, vastaavat vuotoaukon halkaisijat ovat 5,15 mm ja 10,3 mm.

Vuotoaukon ulkopuolella muodostuu turbulenttinen kaasusuihku. Kaasun laimeeminen tällaisessa suihkussa voidaan arvioida yksinkertaisella mallilla, jos

- kaasu vuotaa pyöreästä tai lähes neliömäisestä aukosta,
- esteet eivät rajoita ilman sekoittumista suihkuun
- kaasun ja ilman mahdollista tiheyseroa ei tarvitse ottaa huomioon

— tuulen vaikutusta ei tarvitse ottaa huomioon.

Malli perustuu siihen havaintoon, että suihkun massavirta kasvaa suoraan verrannollisena kartiomaisen suihkun kuvitellusta lähtöpisteestä mitattuun etäisyyteen x [m] (CPR 1992)

$$\frac{m'}{m_0'} = \frac{0,32}{\sqrt{C_d \rho_0'}} \frac{x}{d} \quad (24)$$

missä ρ_0' on kaasun tiheyden ja ilman tiheyden suhde $\rho_0' = \rho_0/\rho_a$. Suihkun ydin, jossa on laimenematonta kaasua, ulottuu etäisyydelle $25 C_d^{1/2} d$. Tätä kauempana kaasun pitoisuus $C(x,y)$ ja suihkun nopeus $u(x,y)$ ovat normaalijakautuneita

$$C(x, y) = C(x,0) \exp \left[-a \left(\frac{y}{x} \right)^2 \right] \quad (25)$$

ja

$$u(x, y) = u(x,0) \exp \left[-b \left(\frac{y}{x} \right)^2 \right] \quad (26)$$

Kertoimille a ja b on kokeista johdetut sovitteet

$$a = 50,5 + 48,2\rho' - 9,95\rho'^2 \quad ; \quad b = 23 + 41\rho' \quad (27)$$

missä ρ' on kaasun ja ilman moolimassojen suhde. Kaasun pitoisuus suihkun akselilla on

$$C(x,0) = \frac{1 + \frac{b}{a}}{\frac{0,32\rho'}{\sqrt{C_d \rho_0'}} \frac{x}{d} + 1 - \rho'} \rho' \quad (28)$$

ja nopeus suihkun akselilla

$$u(x,0) = \frac{a C_d}{4} \left(\frac{d}{x} \right)^2 \frac{\rho_0'}{\rho'} \left(\frac{0,32\rho'}{\sqrt{C_d \rho_0'}} \frac{x}{d} + 1 - \rho' \right) u_0 \quad (29)$$

missä u_0 [m/s] on kaasun virtausnopeus aukossa

$$u_0 = \frac{G}{C_d \rho_0} \quad (30)$$

missä ρ_0 [kg/m³] on kaasun tiheys vuotoaukossa

$$\rho_0 = \rho_r \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{1}{\gamma - 1}} \quad (31)$$

Kaava (31) antaa hapen tiheydelle vuotoaukossa ρ_0 arvon 8,32 kg/m³. Kaava (30) antaa hapen virtausnopeudelle vuotoaukossa u_0 arvon 374 m/s.

Hapella $\rho_0' = 6,90$, $\rho' = 1,105$, $a = 91,6$ ja $b = 68,3$. Kun nämä parametrien arvot sekä kuristuskertoimen arvo $C_d = 0,61$ sijoitetaan kaavoihin (28) ja (29), saadaan lausekkeet pitoisuudelle

$$C(x,0) = \frac{11,2}{\frac{x}{d} - 5,81} \quad (32)$$

ja nopeudelle

$$u(x,0) = \left[15,05 \frac{d}{x} - 8,735 \left(\frac{d}{x} \right)^2 \right] u_0 = 5627 \frac{d}{x} - 3267 \left(\frac{d}{x} \right)^2 \quad (33)$$

Käytetään vuotoaukon halkaisijalle d edellä arvioitua arvoa 5,15 mm. Suihkun laimenematon ydin ulottuu etäisyydelle $25(0,61)^{1/2}5,15 \text{ mm} = 0,10 \text{ m}$. Jos suihku ei törmää esteeseen, sen voidaan katsoa päättyvän etäisyydellä, jolla virtausnopeus keskiakselilla $u(x,0)$ on samaa luokkaa kuin tuulen nopeus. Kaavan (32) mukaan nopeus $u(x,0)$ on 5 m/s etäisyydellä $x/d = 1125$ ja 2 m/s etäisyydellä $x/d = 2800$. Toisin sanoen, kun tarkastellaan näitä pienempiä etäisyyksiä, tuulen vaikutusta turbulenttiseen suihkuun ei tarvitse ottaa huomioon. Kaasumaisen hapen vuodon vaaraetäisyydet on esitetty taulukossa 14.

Taulukko 14. Purkausletkun katkeamisen vaaraetäisyydet

| pitoisuus | 35 % | 30 % | 25 % |
|-----------------------|--------|--------|-------|
| x/d | 69 | 104 | 227 |
| $d = 5,15 \text{ mm}$ | 0,35 m | 0,55 m | 1,2 m |
| $d = 10,3 \text{ mm}$ | 0,7 m | 1,1 m | 2,4 m |

On tietenkin mahdollista, että vuotoaukon halkaisija on suurempi kuin tässä arvioidut minimihalkaisijat 5,15 mm ja 10,3 mm. Tällöin vaaraetäisyyksien arviointia varten tarvitaan tietoa siitä, miten höyrystin käyttäytyy tällaisella vuodolla. Isompi aukko alentaisi höyrystimen painetta, minkä seurauksena nestepinta nousisi ja aukosta saattaisi jopa vuotaa nestehapetta. Luultavasti tämä on kuitenkin estetty lukituksilla ja säädöillä.

4 Ammoniumnitraatti

Ammoniumnitraattiräjähdyksen voimakkuuteen vaikuttavat muuttujat ovat:

- detonaatiota varten herkistynyt osuus
- se osa herkistyneestä osuudesta, joka detonoit (hyötysuhde)
- herkistyneen ammoniumnitraatin TNT-ekvivalentti.

Tätä tarkastelutapaa käytetään, koska muiden räjähdysaineiden kuin TNT:n räjähdysominaisuuksista on niukasti luotettavaa tietoa (Dyno Nobel 2006).

Ammoniumnitraattivarastolta Englannissa vaaditussa turvallisuusselvityksessä tulee tarkastella tyyppionnettomuutta (safety case), jossa hyötysuhteeksi oletetaan 25 % ja TNT-ekvivalentiksi 0,55 kg TNT (FMA 1989).

Tämä TNT-ekvivalentin arvo on kuitenkin ristiriidassa muiden lähteiden kanssa. Ammoniumnitraatin detonaatioenergiaa ei tunneta ja sen korvikkeena käytetään yleensä palamislämpöä, koska palamisen aikana tapahtuvat kemialliset reaktiot ovat samoja kuin räjähdyksessä. TNT-ekvivalentin arvo 0,55 kg TNT on laskettu ammoniumnitraatin ylemmästä palamislämmöstä 2,6 MJ/kg, jolloin palamistuotteenä muodostunut vesi on oletettu nesteeksi. Vesihöyryn lauhtuminen ei kuitenkaan voi vaikuttaa shokkiaallon muodostumiseen, joten on käytettävä alemmaa palamislämmön arvoa 1,58 MJ/kg, jota vastaava TNT-ekvivalentin arvo on 0,35 kg TNT (Dyno Nobel 2006).

KTM:n ammoniumnitraattipäätöksen (172/1984) 17 §:ssä on määritelty varasto-
suojan suojaetäisyydet

- rakennuksista ja ulkokokoontumisalueista, joissa muutoin kuin tilapäisesti
oleskelee tai työskentelee henkilöitä, sekä yli 1 000 m³:n palavan nesteen
varastosta ja yli 75 m³:n palavan kaasun varastosta.
- yleisestä kulkuväylästä ja yli 100 m³:n palavan nesteen varastosta sekä yli 5
m³:n palavan kaasun varastosta (2/3 edellisistä etäisyyksistä).

Etäisyydet riippuvat ammoniumnitraatin massasta m [kg] ja ne on esitetty taulu-
kossa 15.

Taulukko 15. Ammoniumnitraattivarastosuojan suojaetäisyydet

| määrä, kg | rakennuksista, m | kulkuväylästä, m |
|----------------|------------------|------------------|
| 1000–5000 | 100 | 67 |
| 5000–10 000 | 150 | 100 |
| 10 000–15 000 | 200 | 133 |
| 15 000–30 000 | 250 | 167 |
| 30 000–50 000 | 300 | 200 |
| 50 000–100 000 | 350 | 233 |
| > 100 000 | 400 | 267 |

Lasketaan shokkiaallon rintamapaineen huippuarvoja 5, 6, 7,5, 10 ja 15 kPa vas-
taavat etäisyydet r [m], kun ammoniumnitraatin massa m saa taulukon 15 vaihte-
luväljen raja-arvot. Ammoniumnitraatin TNT-ekvivalentiksi oletetaan 1,58 MJ/kg
ja räjähdyskuopan hyötysuhteeksi 25 %.

Kinneyn ja Grahamin (1985) kirjassa rintamapaineen huippuarvo P_s skaalatun
etäisyyden Z funktiona on esitetty taulukon muodossa sekä sovitussuhteina.
TNT:n detonaatioenergialle on käytetty arvoa 4,61 MJ/kg. Rintamapaineen huip-
puarvon P_s sovitussuhteeksi on (missä p_a on ilmanpaine)

$$\frac{P_s}{p_a} = \frac{797 \left[1 + \left(\frac{Z}{4,5} \right)^2 \right]}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0,048} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0,32} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{1,35} \right)^2}} \quad (34)$$

Räjähdyskuopan oletetaan tapahtuvan maanpinnalla, mutta räjähdyskuopan kaivami-
seen sekä heitteiden liike-energiaksi menevää osuutta (10–15 %) ei oteta huomi-
oon, koska se oletettavasti sisältyy räjähdyskuopan hyötysuhteen arvoon. Tällöin
skaalattu etäisyys Z [m kg^{-1/3}] on

$$Z = \frac{r}{(2W)^{1/3}} \quad (35)$$

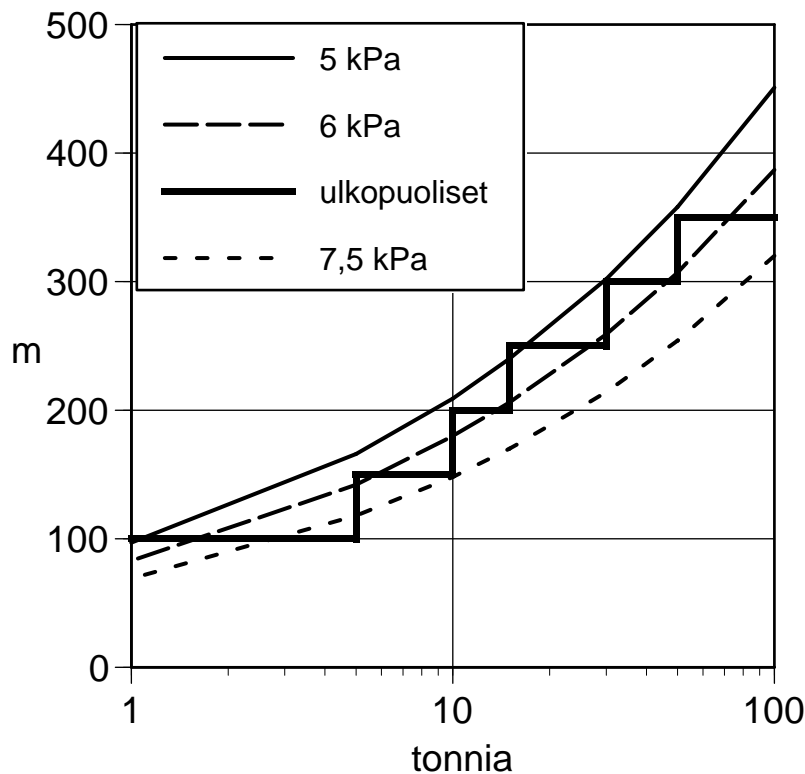
missä W on TNT:n massa [kg].

Kaavasta (34) iteroimalla saadut Z :n arvot ja valittuja P_s :n arvoja vastaavat etäi-
syydet on esitetty taulukossa 16.

Taulukko 16. Valittuja rintamapaineen arvoja vastaavat etäisyydet, m

| | W, kg | 15 kPa | 10 kPa | 7,5 kPa | 6 kPa | 5 kPa |
|-------------------------|-------|--------|--------|---------|-------|-------|
| Z, m kg ^{-1/3} | | 7,5 | 9,7 | 12,4 | 15 | 17,5 |
| 1000 kg | 85 | 42 | 54 | 69 | 83 | 97 |
| 5000 kg | 430 | 71 | 92 | 120 | 140 | 165 |
| 10 000 kg | 855 | 90 | 115 | 150 | 180 | 210 |
| 15 000 kg | 1285 | 105 | 135 | 170 | 205 | 240 |
| 30 000 kg | 2570 | 130 | 170 | 215 | 260 | 300 |
| 50 000 kg | 4285 | 155 | 200 | 255 | 305 | 360 |
| 100 000 kg | 8570 | 195 | 250 | 320 | 385 | 450 |

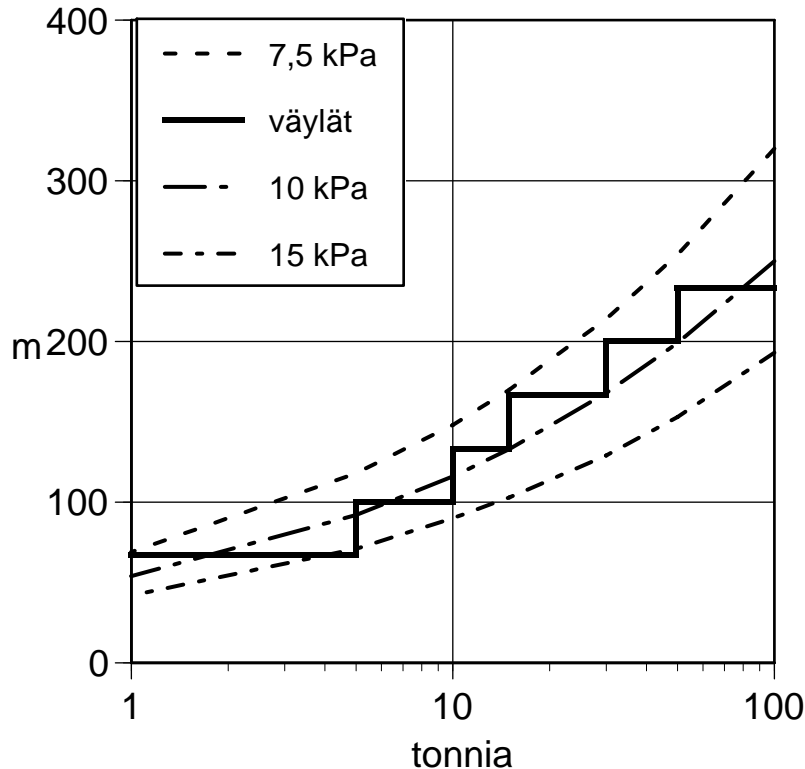
Kuvassa 5 rakennusten suojaetäisyyksiä on verrattu taulukon 16 etäisyyksiin. Vastaavasti kuvassa 6 kulkuväylien suojaetäisyyksiä on verrattu taulukon 16 etäisyyksiin.



Kuva 5. Rakennusten suojaetäisyydet ja tiettyjä huippupaineen arvoja vastaavat etäisyydet.

Kuvasta 5 päätellään, että rakennusten suojaetäisyys vastaa suunnilleen rintamapaineen arvoa 6 kPa. Kuvasta 6 päätellään, että kulkuväylien suojaetäisyys vastaa suunnilleen rintamapaineen arvoa 9 kPa.

Rintamapaine on kuitenkin näitä arvoja korkeampi, kun $2000 \text{ kg} < m < 5000 \text{ kg}$. Jos suojaetäisyyksien halutaan perustuvan samoihin rintamapaineen arvoihin kaikilla ammoniumnitraatin massan m arvoilla, taulukon 15 porrastusta voisi tihentää esimerkiksi määrittelemällä suojaetäisyydeksi 125 m, kun $2000 \text{ kg} < m < 5000 \text{ kg}$.



Kuva 6. Kulkuväylien suojaetäisyydet ja tiettyjä huippupaineen arvoja vastaavat etäisyydet.

5 Yhteenveto ja johtopäätökset

5.1 Ammoniakkikylmälaitokset

Ammoniakkikylmälaitoksilla sattuneista onnettomuuksista haettiin tietoa vuonna 1999 tutkimuksen "Ammoniakkia sisältävien kylmälaitosten turvallisuus" yhteydessä. MHIDAS- ja HSELINE-tietokannoista löytyi 25 onnettomuutta, jotka jakaantuivat seuraavasti:

- 3 ammoniakkiräjähdyttä.
- 8 ammoniakkivuotoa, joissa oli henkilövahinkoja, päästö aiheutti terveyshaittaa yrityksen ulkopuolella tai ihmisiä evakuoitiin.
- 8 vuotoa, joissa ei ollut henkilövahinkoja eikä päästö aiheuttanut terveyshaittaa yrityksen ulkopuolella, mahdollisesti työntekijöitä altistui kaasulle tai heidät evakuoitiin.
- 6 tulipaloa.

Tässä tutkimuksessa luokiteltiin ARIA-tietokannan elintarviketehtaiden tai tekojäärajojen ammoniakkikylmälaitoksissa vuosina 1995–2009 sattuneet 135 onnettomuutta seuraavasti:

- 5 räjähdystä, joissa ammoniakki oli osallisena tai jotka aiheuttivat ammoniakkivuodon.

- b) 22 ammoniakkivuotoa, joissa oli henkilövahinkoja, päästö aiheutti terveyshaittaa tai ihmisiä evakuoitiin yrityksen ulkopuolella. Kaikki tekojääraitojen onnettomuudet on kuitenkin otettu mukaan.
- c) 98 vuotoa, joissa ei ollut henkilövahinkoja eikä päästö aiheuttanut terveyshaittaa yrityksen ulkopuolella, mahdollisesti työntekijöitä altistui kaasulle tai heidät evakuoitiin. Käytöstä poistettujen kylmälaitosten purkamisen yhteydessä sattuneet vuodot on jätetty pois.
- d) 10 tulipaloa, joihin liittyi ammoniakkivuoto. Tulipalot, jotka eivät aiheuttaneet ammoniakkivuotoa, on jätetty pois.

Tämän tutkimuksen kannalta onnettomuuskuvausten kiinnostavin tieto on, mitä terveysvaikutuksia eri syistä johtuneet ammoniakkipäästöt ovat aiheuttaneet ympäristön ihmisille. Tämän vuoksi vuoto-onnettomuudet, joissa ammoniakille altistui vain yrityksen työntekijöitä, jätettiin pois. Toisaalta kuvauksista ei käy ilmi, kuinka lähellä kylmälaitosta oli asuinrakennuksia yms. kohteita, joissa oli vaaraan joutuvia sivullisia. Niinpä se, että päästö ei aiheuttanut terveyshaittaa yrityksen ulkopuolella, ei välttämättä merkitse, ettei se olisi voinut aiheuttaa haittaa, jos vaaraan joutuvia sivullisia olisi ollut lähempänä tai jos tuulen suunta olisi ollut toinen. Siksi myös onnettomuuksia, jotka eivät aiheuttaneet vaaraa sivullisille, on otettu mukaan, jos päästö on ollut suurehko.

Mukaan otetuista onnettomuuskuvauksista voidaan todeta, että elintarviketeollisuuden onnettomuuspäästöt ovat aiheuttaneet vaaraa ympäristössä olleille ihmisille. Kuvauksista ei kuitenkaan käy ilmi, kuinka kauas päästölähteestä vaara ulottui. Vaara-alueen kokoa voidaan siksi arvioida vain epäsuorasti myrkytysoireita saaneiden ja sairaalaan kuljetettujen ihmisten lukumäärän perusteella.

Kuten yleensäkin vaarallisten aineiden onnettomuuksissa, kehitysmaissa sattuneet onnettomuudet ovat aiheuttaneet suurimmat henkilövahingot: 1500–1600 henkeä sai oireita (Pakistan), 74 kuljetettiin sairaalaan (Uruguay), 135 kuljetettiin sairaalaan (Irak), 435 otettiin sairaalahoitoon (Kuuba). Tähän on useitakin syitä:

- kehitysmaiden kaupunkien ja taajamien suuri asukastiheys
- alhainen koulutustaso ja siitä johtuva tietämättömyys kemikaalien vaaroista
- riittämätön varautuminen onnettomuuksiin
- lämpimästä ilmastosta johtuva rakennusten huono tiiveys
- uutistoimistojen valintakriteerit: mitä enemmän uhreja, sitä kiinnostavampi uutinen.

Teollisuusmaissa sattuneiden onnettomuuksien henkilövahingot ovat olleet pienemmät: 18 kuljetettiin sairaalaan (York), 9 kuljetettiin sairaalaan (Burbank), 27 otettiin sairaalahoitoon (Wellston), 23 otettiin sairaalahoitoon (Grimsby), 54 kuljetettiin sairaalaan (Wigan), 9 kuljetettiin sairaalaan (Cavaillon). Kerätystä aineistosta ei voi päätellä, kuinka kaukana päästölähteestä sairaalaan kuljetetut tai sairaalahoitoon otetut henkilöt olivat.

Toisaalta teollisuusmaissa ammoniakkin vaarat tiedostetaan hyvin, minkä takia ympäristön asukkaat evakuoidaan usein varmuuden vuoksi. Kahden Ranskassa

sattuneen vuodon kuvauksissa on mainittu, kuinka kauas päästölähteestä vaara-alueen arvioitiin ulottuvan:

- Palokunta kehotti asukkaita pysymään sisällä 500 m:n säteellä (Cuiseaux).
- Tehtaan sekä naapuriyritysten työntekijät evakuoitiin 50 m:n etäisyydellä tuulen alapuolella. Poliisi kehotti asukkaita 200 m:n säteellä pysyttelemään sisällä (Vitre).

USA:ssa vaara-alueen väestö evakuoidaan kaikenlaisissa onnettomuuksissa sen sijaan, että heitä kehoitettaisiin suojautumaan sisätiloihin. Evakuoituja saattaa siksi olla paljon: 1500 (Homer), 7500 (Wellston), 1500 (Morro Bay), 1500 (Arlington). USA:n onnettomuuksissa evakuoitujen määrä ei siten anna kuvaa onnettomuuden todellisesta vaara-alueesta.

Tekojääratioja on vain teollisuusmaissa. Kaikki kerätyn aineiston onnettomuudet ovat sattuneet keskikokoisissa tai suurissa kaupungeissa. Päästöjen henkilövahingot ovat kuitenkin jääneet varsin pieniksi: 51 kuljetettiin sairaalaan ja 8 heistä otettiin sairaalahoitoon (Neu-Ulm), 8 kuljetettiin sairaalaan (Bergamo), 15 kuljetettiin sairaalaan (Reims). Yleensä jäähalli evakuoitiin.

Grenoblen onnettomuudessa eristettiin 100 m:n pituinen alue tuulen alapuolella. Sierren onnettomuudessa palokunta eristi jäähallin ympäristön 800 m:n säteellä. Noin 200 henkilöä, joista nelisenkymmentä oli läheisen koulun oppilaita, evakuoitiin 150–200 m:n säteellä. Jälkeenpäin todettiin kuitenkin, että vaara oli ollut vähäinen. Durhamin onnettomuudessa evakuoitiin naapurustosta 700 henkeä, mikä on USA:n turvallisuusajattelun mukaista, mutta tuskin vastasi todellisen vaara-alueen kokoa.

Tulipalojen yhteydessä sattuneet ammoniakkivuodot on käsitelty erikseen, koska tulipalo voi vaikuttaa päästön vaaraetäisyyteen. Vuotava ammoniakki saattaa osaksi palaa, mikä ei tosin sinänsä vähennä päästön vaarallisuutta, koska palokaa-suissa on myrkyllisiä typen oksideja. Vuotanut ammoniakki ja sen palamistuotteet sekoittuvat kuitenkin savukaasuihin ja nousevat niiden mukana ylös. Päästö ei tällöin aiheuta vaaraa maanpinnan läheisyydessä.

Yleensä tulipaloissa on riittävästi aikaa evakuoida tuulen alapuolella olevia asukkaita varmuuden vuoksi ja useissa tapauksissa näin myös meneteltiin: 4000 asukasta (Portage la Prairie), 1500 henkeä, joista 350 työntekijöitä (Saint-Herblain), "tuhansia" (Fredericksburg), 210 henkeä (Hamilton).

Tulipalo saattaa aiheuttaa kylmälaitoksen säiliöiden repeämisen, jolloin vapautuva nesteammoniakki voi muodostaa ilmaa raskaamman ja maanpinnan läheisyydessä leviävän kaasupilven. Tällaiseen päästöön varauduttiin Acren tulipalossa evakuoimalla osa kaupungin asukkaista. Toisaalta Le Havren palossa lauhduttimet "räjähtivät" vapauttaen 2000 kg, mutta pitoisuusmittauksissa ei havaittu ammoniakkia.

Aineistossa mainitaan vain yksi yrityksen ulkopuolisen henkilön kuolemantapaus ammoniakkipäästön seurauksena. Yorkin onnettomuudessa yksi lapsi kuoli välittömästi. Kaikki muut onnettomuuksissa kuolleet olivat yrityksen työntekijöitä:

- 4 työntekijää kuoli (Pakistan 2001).

- 4 työntekijää kuoli välittömästi myrkytykseen ja 1 kuoli hypättyään ikkunasta. 85 työntekijää vietiin sairaalaan, useat heistä olivat kriittisessä tilassa. (Etelä-Korea)
- Vuotoa tutkimaan mennyt tekniikko kuoli (Toronto 1982).
- 1 kuoli (Toronto 1989)
- 1 työntekijä kuoli sairaalassa syövytysvammoihinsa (Pakistan 2000).

Ilmeisesti useimmat onnettomuuksissa kuolleet työntekijät ovat altistuneet sisätiloihin muodostuneille korkeille ammoniakkipitoisuuksille. Työntekijöiden kuolemantapausten perusteella ei voi päätellä mitään ulos muodostuneen vaara-alueen koosta.

Ranskan määräysten mukaan suuronnettomuusvaaralliselle laitokselle on laskettava tyyppionnettomuuksien vaaraetäisyydet Z_1 (suurin etäisyys, jolla laitoksessa sattuva onnettomuus voi aiheuttaa ympäristön asukkaan kuoleman) ja Z_2 (suurin etäisyys, jolla laitoksessa sattuva onnettomuus voi aiheuttaa ympäristön asukkaalle pysyvän terveyshaitan). Jokaiselle vahingolle tai onnettomuudelle lasketaan etäisyydet Z_1 ja Z_2 ja niitä yhdistelemällä piirretään suojavyöhykkeiden rajat. Tällöin voidaan määritellä kaksi suojavyöhykettä: sisempi ja ulompi. Yrityksen ja viranomaisen tulee yhdessä määritellä ympäristön maankäytölle asetettavat rajoitukset.

Ammoniakitäyttöisen kylmälaitoksen tapauksessa on tarkasteltava seuraavia tyyppionnettomuuksia:

- Myrkyllisen kaasun säiliön välitön tyhjeneminen. Ulkona oleva korkeapainesäiliö ja siihen liitetty putkisto sekä lauhduttimet, koska niissä neste on korkeimmassa paineessa.
- Lämpimitaltaan suurimman nesteputkilinjan katkeaminen tai sellaisen putkilinjan katkeaminen, joka johtaa suurimpaan vuodon massavirtaan. Lämpimitaltaan suurin nesteputkilinja on yleensä matalapainepumpun ja höyrystimien välissä. Sen paine on melko pieni. Korkeapainesäiliön ja lauhduttimen välisen putkilinjan katkeaminen aiheuttaa suuremmat vaaraetäisyydet silloin, kun tämä putki kulkee ulkona.

Kokonaispäästöä laskettaessa otetaan huomioon päästön havaitsemiseen ja eristysventtiilien sulkeutumiseen kuluva aika sekä nesteen jäähtyminen säiliössä ammoniakkin kiehumislämpötilaan. Päästölähteen korkeus maanpinnasta sekä päästön kesto otetaan huomioon vaaraetäisyyttä pienentävinä tekijöinä.

Hollannin maankäyttöpolitiikka suuronnettomuusvaarallisten laitosten ympäristössä perustuu yksilöriskin ja yhteisöriskin hyväksyttäviin arvoihin. Kylmälaitoksilla, joiden ammoniakkimäärä on enintään 10 000 kg ja höyrystimille johtavan putkilinjan nimellishalkaisija enintään NS 80, sovelletaan tyyppilaitoksille tehtyjen riskianalyyysien perusteella laadittuja suojaetäisyystaulukoita. Taulukoiden suojaetäisyydet riippuvat laitoksen toteutuksesta eli siitä, mitkä laitoksen osat ovat ulkona tai yhteydessä ulkoilmaan. Jos kaikki ammoniakkiputkistot, mahdollisesti lauhdutinta ja sen putkilinjoja lukuun ottamatta, ovat joko konehuoneessa tai tuotantotiloissa, suojaetäisyyksiä ei yleensä vaadita.

Suhteellisten pienten (enintään noin 100 m) suojaetäisyyksien ohella tietyille kylmälaitoksilla on määritelty suurin vaaraetäisyys eli etäisyys, jolla laitoksessa sattuva onnettomuus voi aiheuttaa kuoleman. Jos suurin vaaraetäisyys on annettu, laitoksen yhteisöriski on laskettava käyttäen väestöjakaumaa alueella, jonka sisärajanä on yksilöriskin $10^{-5}/a$ tasa-arvokäyrä ja ulkorajana suurin vaaraetäisyys.

Tässä tutkimuksessa laskettiin vaaraetäisyydet Suomessa tyypillisten kylmälaitosten kahden tyyppisille vuodoille:

1. Varoventtiilin puhallus purkuputken kautta ulkoilmaan. Puhallusteho 3000 kg/h = 0,83 kg/s.
2. Kuumakaasulinjan vuoto. Kompressorin tuotto 500 kg/h = 0,14 kg/s purkautuu konehuoneeseen.

Vaaraetäisyyksillä tarkoitettiin etäisyyksiä, joilla ammoniakkin pitoisuus ulkona maanpinnalla saavuttaa IDLH-, ERPG- tai AEGL-arvot. Päästökorkeudeksi oletettiin 5 m ja päästön kestoksi 10 minuuttia. Tämä on selvästi lyhyempi kuin IDLH- ja ERPG-arvoja määriteltäessä oletettu altistus aika. Käyttämällä ERPG-arvojen sijasta 10 minuutin altistusajalle määritellyjä AEGL-arvoja PAC3-tason vaaraetäisyydet pienenevät noin 60 % ja PAC2-tason vaaraetäisyydet noin 20 %.

5.2 Nestehappisäiliöt

Kuvauksia nestehappionnettomuuksista haettiin ARIA-tietokannasta ja viitetietokannoista sekä poimittiin EIGAn julkaisusta. Tämän tutkimuksen kannalta onnettomuuskuvausten kiinnostavin tieto on, kuinka kaukana päästölähteestä nestehappivuodot ovat aiheuttaneet vaatteiden syttymisen. Yhtä onnettomuutta lukuun ottamatta aineiston kaikki tapaukset, joissa henkilön vaatteet ovat syttyneet, ovat sattuneet sisätiloissa:

- Säiliöauton varoventtiili alkoi purkaa nestehapetta, joka valui rinnettä alas ja sisään pienen konepajan liukuovista. Kaksi työntekijää kuoli palovammihinsa, kun heidän vaatteissa syttyivät (Australia).
- Happipilvi valui seinien rajoittamia katuja pitkin alueelle, jossa oli ruoan myyntikojuja ja avotulia. Jotkut ihmiset tupakoivat. Yhden henkilön vaatteet syttyivät, mutta paikalla olleet auttoivat häntä sammuttamaan ne viereisessä kanavassa. Toinen henkilö sai palovammoja jalkoihinsa (Filippiinit).
- Nestehapetta puhallettiin ns. kylmän soihdun kautta ilmaan. Happivana laskeutui maanpinnalle ja happipitoista ilmaa tunkeutui tehtaan ohjaamoon. Kun työntekijä meni sisälle rakennukseen, hänen housunlahkeensa syttyivät välittömästi palamaan (Kanada).

Näissä kuvauksissa kiinnittää huomiota se, että happipilven ja ympäröivän ilman tiheysero vaikutti päästön leviämiseen niin, että vaarallinen happipitoisuus muodostui sellaiseen huonetilaan tai paikkaan, jossa oli ihmisiä. Suuri tiheysero johtui korkeasta hapen pitoisuudesta sekä siitä, että pilvi oli muodostunut nestehapen vuodosta.

Ilman kohonnut happipitoisuus on myös sytyttänyt tulipaloja:

- Nestehappisäiliön 150 mm:n tyhjennyslinja katkesi. Varastoalue sekä viereinen rakennustyömaa evakuoitiin, mutta neljä työntekijää palasi työmaal-

leen ennen kuin kaikki nestehappi oli haihtunut. Heidän autonsa syttyi palamaan ja kaikki neljä kuolivat (USA 1970-luku).

- Auto ajoi nestehappilammikkoon ja sen moottori pysähtyi. Kun kuljettaja yritti käynnistää moottoria, auto syttyi palamaan (USA 1989).
- Yksi virastorakennus ja yksi auto paloivat (Filippiinit).

Henkilövahinkojen vähäisyys johtuu osaltaan siitä, että teollisuusmaissa nestehapen vaaratekijät tunnetaan ja onnettomuuksiin on varauduttu. Niinpä aineistossa on useita kuvauksia nestehapen vuodoista, joissa vaara-alue eristettiin ja vahingot ehkäistiin. Ilman kosteuden tiivistyminen päästön kylmyyden takia on myös helpottanut vaara-alueen koon ja sijainnin arviointia:

- Noin 11 000 kg nestehappia purkautui avatun venttiilin kautta muodostaen ison sumupilven. Junaliikenne viereisellä radalla keskeytettiin ja yrityksen alue tyhjennettiin (Englanti 1977).
- Varastosäiliö tyhjentyi vaurioituneen täyttöputkistonsa kautta. Höyrystyvästä nestehapesta muodostunut sumupilvi kuitenkin haihtui aiheuttamatta henkilövahinkoja (1980-luku).
- Putki katkesi ja 22 m³ nestehappia valui sen kautta maahan muodostaen ison sumupilven. Vaikka sähkövirta katkaistiin välittömästi alueelta, nesteytysyksikkö vahingoittui (Ranska 1992).
- Nostolava törmäsi 6 m³:n nestehappisäiliön höyrystimeen katkaisten nestehappiputken. Nestehappi täytti suoja-altaan. Muodostui iso valkoinen sumupilvi. Säiliön ympäristö eristettiin nopeasti ja takomosta sekä naapurirytyksistä evakuoitiin 300 työntekijää (Saint-Chamond, Ranska 2001).
- Ylitäytön seurauksena säiliön varoventtiilit avautuivat. Naapuri näki muodostuneen valkoisen sumupilven ja sairaalan henkilökunta hälyytti palokunnan. Kaasuyhtiön teknikon paikalle saapumista odotettaessa palokunta eristi ympäristön ja eliminoi mahdolliset syttymislähteet (Beaumont, Ranska 2005).

Onnettomuusaineistosta ei käy ilmi, kuinka etäällä päästölähteestä vaatteet syttyivät, kuinka kauas sumupilvi ulottui tai mikä alue eristettiin. Kuitenkin sumupilven koko ja leviäminen näkyvät hyvin Birminghamin onnettomuuden kuvassa (kuva 3). Vuotava nestehappisäiliö sijaitsi sairaalakorttelin nurkassa. Kuva on ilmeisesti otettu vinosti vastakkaisen korttelin rakennuksen ylimmistä kerroksista.

Sumupilven muodosta käy ilmi, että tuuli puhaltaa katukuilussa oikealle päin ja happisäiliöiden viereisen matalan rakennuksen taakse muodostunut pyörrealue sekoittaa pilveä pystysuunnassa. Tuuli puhaltaa poikkikadulla vasemmalle, mutta tässä suunnassa pilvi ei joudu pyörrealueeseen ja pysyy siksi matalana.

Kuvasta 3 voi päätellä, että sumupilven pituus kummallakin kadulla on luokkaa 100 m. Toisaalta on huomattava, että ilman suhteellinen kosteus oli lähes 100 %, toisin sanoen ilman lämpötilan ja kastepisteen ero on pienempi kuin 1 °C. Tämän vuoksi päästön vaara-alue oli selvästi näkyvää pilveä pienempi.

EIGAn vuonna 2006 antaman suosituksen mukaan alle 25 %:n happipitoisuus ei ulkona ole vaarallinen. Päästön vaaraetäisyyksiä arvioitaessa voidaan olettaa, että

yli 35 %:n pitoisuus saattaa aiheuttaa kuoleman vaatteiden syttymisen seurauksena. Vaatteiden syttymistodennäköisyydeksi on tällä pitoisuudella arvioitu 0,5 %.

EIGA on vuonna 2004 julkaissut suosituksen nestehapen varastosäiliöistä viranomaisille tehtävien turvallisuusselvitysten sisällöksi. Turvallisuusselvityksessä tulee tunnistaa varastosäiliön katastrofaalisen murtuman syyt sekä esittää, ovatko ne mahdollisia varastosäiliön sijoituspaikalla. Pitoisuuksien 25 % ja 40 % sekä lämpötilan -40 °C tasa-arvokäyrien määrittelemät päästön vaara-alueet lasketaan seurausanalyysiohjelmilla ja esitetään sekä taulukoiden avulla että karttapohjalla. Lämpötila -40 °C esiintyy vain vuodon läheisyydessä, jossa vaatteiden syttymisvaara on suuri.

Sairaaloissa nestehappi varastoidaan tavallisesti 3 tai 6 m^3 :n tyhjöeristetyssä säiliössä. Yliopistosairaaloissa on suurempia, jopa $32,5\text{ m}^3$:n varastosäiliöitä. Nesteen lämpötila säiliössä vaihtelee välillä $-155\text{...}-152\text{ °C}$, joka vastaa hapen höyrynpainetta 9–11 bar. Paineen alentuessa ilmanpaineeseen noin 25 % nestevuodon massavirrasta höyrystyy välittömästi ja loppu jäähtyy hapen kiehumislämpötilaan -183 °C .

Varastosäiliön oletettiin tyhjenevän, kun pohjayhteen ja höyrystimen välinen putki katkeaa. Toisena nestehapen vuototilanteena tarkasteltiin säiliöauton purkausletkun irtoamista tai katkeamista varastosäiliön täytön yhteydessä. Vaaraetäisyydet laskettiin kolmelle hapen pitoisuudelle: 35, 30 ja 25 %.

Jos pisaroituva suihku ei törmää maanpintaan tai johonkin esteeseen, suurin osa pisaroista haihtuu ja loput muodostavat maanpinnalle lammikon. Päinvastaisessa tapauksessa suurin osa nesteestä jää lammikkoon. Nestehappi kiehuu, kun se joutuu kosketukseen betonialustan kanssa. Samalla lammikko leviää valumalla. Päästön lammikosta ja happivanan leviäminen laskettiin ALOHA-seurausanalyysiohjelmistolla kahdessa rajatapauksessa:

- Pisaroituva suihku haihtuu eikä lammikkoa muodostu.
- Vuodon koko massavirta jää lammikkoon, joka leviää valumalla.

Jälkimmäinen oletus antaa jonkin verran pienemmät vaaraetäisyydet, koska tällöin päästö tapahtuu lammikon pinnalta eikä vuotoaukosta. Todelliset tilanteet ovat näiden rajatapausten välissä.

Lisäksi tarkasteltiin kaasumaisen hapen vuotoa höyrystimen jälkeisestä paineellisesta putkilinjasta. Putkessa oletettiin olevan niin suuri vuotoaukko, että sen kautta purkautuu höyrystimen tehoa vastaava hapen massavirta. Vuotoaukon ulkopuolelle muodostuu turbulenttinen kaasusuihku, jossa happi laimenee. Näillä oletuksilla hapen pitoisuudet 35, 30 ja 25 % saavutettiin suihkussa noin metrin etäisyydellä vuotoaukosta. On tietenkin mahdollista, että vuotoaukon halkaisija on suurempi. Isompi aukko alentaisi höyrystimen painetta, minkä seurauksena nestepinta nousisi ja aukosta saattaisi jopa vuotaa nestehappea. Luultavasti tämä on kuitenkin estetty lukituksilla ja säädöillä.

5.3 Ammoniumnitraatti

Ammoniumnitraattiräjähdyksen voimakkuuteen vaikuttavat muuttujat ovat:

- detonaatiota varten herkistynyt osuus
- se osa herkistyneestä osuudesta, joka detonoi (hyötysuhde)
- herkistyneen ammoniumnitraatin TNT-ekvivalentti.

Tätä tarkastelutapaa käytetään, koska muiden räjähdysaineiden kuin TNT:n räjähdysominaisuuksista on niukasti luotettavaa tietoa. Ammoniumnitraattivarastolta Englannissa vaaditussa turvallisuusselvityksessä tulee tarkastella tyyppionnettomuutta (safety case), jossa hyötysuhteeksi oletetaan 25 %. Ammoniumnitraatin TNT-ekvivalentille käytettiin arvoa 0,35 kg TNT.

Shokkiaallon rintamapaineen huippuarvoja 5, 6, 7,5, 10 ja 15 kPa vastaavat etäisyydet laskettiin, kun ammoniumnitraatin massa m sai KTM:n päätöksessä (172/1984) esiintyvät raja-arvot. Tarkastelu osoitti, että päätöksessä annetut rakennusten suojaetäisyydet vastaavat suunnilleen rintamapaineen arvoa 6 kPa ja kulkuväylien suojaetäisyydet arvoa 9 kPa. Jos suojaetäisyyksien halutaan perustuvan samoihin rintamapaineen arvoihin kaikilla ammoniumnitraatin massan arvoilla, voidaan esimerkiksi määritellä suojaetäisyydeksi 125 m, kun $2000 \text{ kg} < m < 5000 \text{ kg}$.

Lähdeviitteet

AFF 1999. Installations frigorifiques fonctionnant à l'ammoniac. Leur impact sur l'environnement. Guide d'étude des risques technologiques. Deuxième édition revue et augmentée. Paris: Association Française de Froid. 158 s.

ALOHA 2007. User's manual. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency. 192 s. <http://www.epa.gov/emergencies/docs/cameo/ALOHAManual.pdf>

Anon. 2008. Acute exposure guideline levels for selected airborne chemicals: Volume 6. Washington, DC: The National Academic Press. S. 109–113.

ISBN 0-309-11214-1.

http://www.epa.gov/oppt/aegl/pubs/ammonia_final_volume6_2007.pdf

ARIA. Analyse, Recherche et Information sur les Accidents. Lyon: Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industrielles. <http://aria.ecologie.gouv.fr/>

Arrêté du 16/07/97 relatif aux installations de réfrigération employant l'ammoniac comme fluide frigorigène.

http://www.ineris.fr/aida/?q=consult_doc/navigation/2.250.190.28.8.2293/4/2.250.190.28.6.13

Arrêté du 23/02/98 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées pour la protection de l'environnement soumises à déclaration sous la rubrique n° 1136 : Emploi ou stockage de l'ammoniac.

http://www.ineris.fr/aida/?q=consult_doc/navigation/2.250.190.28.8.2259/4/2.250.190.28.6.13

BCGA 2004. A method for estimating the offsite risks from bulk storage of liquefied oxygen (LOX). Wallingford: British Compressed Gases Association. 38 s. (BCGA Technical Report TR1.)

Bottelberghs, P. H. 2000. Risk analysis and safety policy developments in the Netherlands. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 71, no. 1–3, s. 59–84. ISSN 0304-3894.

Claret, J. L. 1995. Retour d'expérience. L'ammoniac et la réfrigération. Paris: Ministère de l'Environnement. 85 s. + liitteitä 41 s. (SEI/BARPI ED0389.)

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.

CPR 1997. Methods for the calculation of physical effects. Third edition. Voorburg: The Directorate-General of Labour, Committee for the Prevention of Disasters. Part 1. S. 3.25–3.26. (CPR 14E.) ISBN 90-12-08497-0.

Dyno Nobel 2006. Moranbah ammonium nitrate project. Hazard and risk assessment. Dyno Nobel Asia Pacific Limited. S. 84–92.

http://www.dip.qld.gov.au/docs/library/pdf/nitrate/eis_app7_7hazards_part2.pdf

EIGA 2004. Prevention of major accidents. Guidance on compliance with the Seveso II directive. Brussels: European Industrial Gases Association. 104 s. (ICG Doc 60/04/E) http://www.eiga.org/fileadmin/docs_pubs/PP-14-Aug2006.pdf

EIGA 2006. Definitions of oxygen enrichment/deficiency safety criteria. Brussels: European Industrial Gases Association 5 s. (Position Paper PP-14.)

http://www.eiga.org/fileadmin/docs_pubs/PP-14-Aug2006.pdf

EPA 2009. Compiled AEGL values.

http://www.epa.gov/oppt/aegl/pubs/compiled_aegls_november2009.pdf

Fauske, H. K. & Epstein, M. 1988. Source term considerations in connection with chemical accidents and vapour cloud modelling. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 1, no. 2, s. 75–83. ISSN 0950-4230.

FMA 1989. Industrial guidance on the safety case: 2, ammonium nitrate. Teoksessa: Lees, F. P. & Ang, M. L. (toim.) Safety cases within the control of industrial major hazards (CIMAH) regulations 1984. London: Butterworths. S. 155–174. ISBN 0-408-02718-8.

Johnson, D. W. 1991. Prediction of aerosol formation from the release of pressurized, superheated liquids to the atmosphere. Teoksessa: Proceedings of the International Conference and Workshop on Modeling and Mitigating the Consequences of Accidental Releases of Hazardous Materials. New Orleans, LA. May 20–24, 1991. New York, NY: American Institute of Chemical Engineers. S. 1–19. ISBN 0-8169-0492-8.

Kampmier, C. H. 1995. Evaluation of a mitigation procedure for small liquid oxygen (LOX) spills. S. 10. http://www.usfa.dhs.gov/downloads/pdf/tr_95ck.pdf

Kinney, G. F. & Graham, K. J. 1985. Explosive shocks in air. Second edition. New York: Springer-Verlag. 262 s. ISBN 387-15154-8.

Lautkaski, R. 1999. Ammoniakkikylmälaitoksilla ulkomailla sattuneita onnettomuuksia. Espoo: VTT Energia. AMMO-projekti. Työraportti. 13 s.

Lautkaski, R. 2008. Experimental correlations for the estimation of the rainout of flashing liquid releases – revisited. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, vol. 21, no. 5, s. 506–511. ISSN 0950-4230.

Nyrén K. & Winter, S. 1986. Discharge of condensed sulfur dioxide: A field test study of the source behaviour with different release geometries. Umeå: National Defence Research Institute. 71 s. (FOA Report E40028.)

OVA 2009. Onnettomuuden vaaraa aiheuttavat aineet. Turvallisuusohjeet (OVA-ohjeet). Ammoniakin OVA-ohje. <http://www.ttl.fi/internet/ova/ammoni.html>

PGS 1. Methoden voor het bepalen van mogelijke schade aan mensen en goederen door het vrijkomen van gevaarlijke stoffen. 2005. Den Haag: Adviesraad Gevaarlijke Stoffen. (Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen 1.) <http://content.publicatiereeksgevaarlijkestoffen.nl/documents/>

Reynolds, R. M. 1992. ALOHA™ (Areal Location of Hazardous Atmospheres) 5.0 theoretical description. Seattle, WA: National Oceanic and Atmospheric Administration. 92 s. (NOAA Technical Memorandum NOS ORCA-65.) Draft.

SCAPA 2009. Protective action criteria for chemicals - Including AEGLs, ERPGs, & TEELs. <http://orise.orau.gov/emi/scapa/teels.htm>

Schumacher, S. D., Brockwell, R. C., Andrews, J. J. & Ogles, D. 2004. Bulk liquid oxygen supply failure. Anaesthesiology, vol. 100, s. 186–189. ISSN 0003-3022.

Spicer, T. O. & Havens, J. 1986. Development of a heavier-than-air dispersion model for the U.S. Coast Guard hazard assessment computer system. Teoksessa: S. Hartwig (Toim.) Heavy gas and risk assessment III. Dordrecht: Reidel. S. 73–121. ISBN 90-277-2153-X.

VROM 2007. Wijziging Regeling externe veiligheid inrichtingen. Staatscourant 3 april 2007, nr. 66 / pag. 13. 9 s. <http://www.vrom.nl/docs/20070320-revi1.pdf>

Wikipédia. Établissement recevant du public en droit français http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89tablissement_recevant_du_public_en_droit_fran%C3%A7ais