

Vastaanottaja  
**Tarja Lantto**  
**Terrafame Oy**

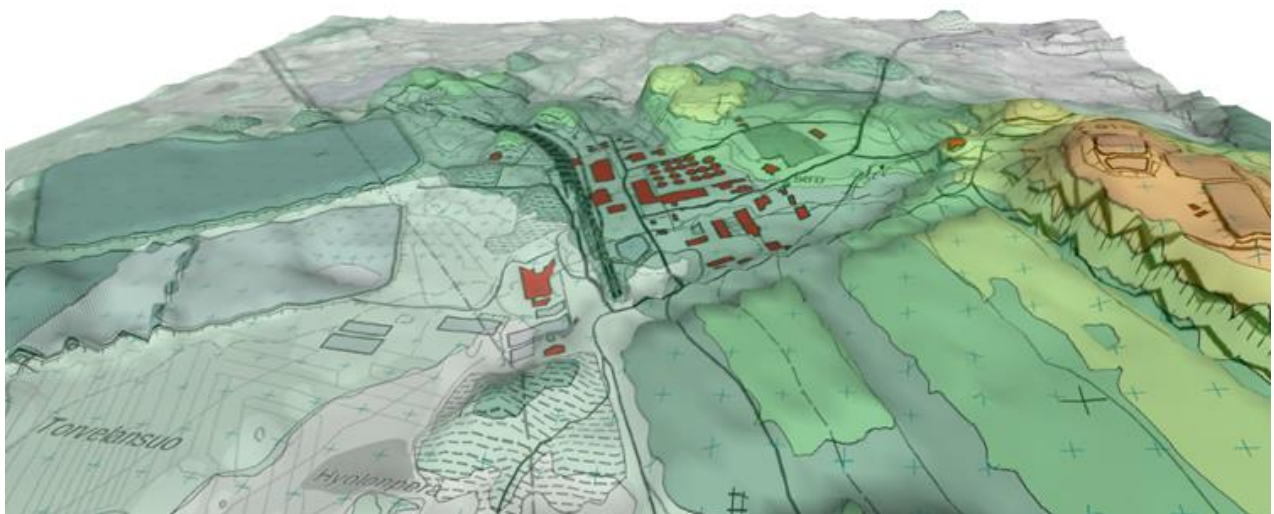
Asiakirjatyyppi  
**Raportti**

Päivämäärä  
**14.9.2018**

Viite  
**1510040483**

# TERRAFAME OY

## AMMONIAKKISÄILIÖN VUODON ONNETTOMUUS- KUVAUS JA LEVIÄMIS- MALLI



Päivämäärä **14.9.2018**  
Laatija **Mikko Hoppo, Anne Kiljunen, Toni Keskitalo**  
Tarkastaja **Toni Keskitalo**  
Kuvaus **Ammoniakkisäiliön vuodon onnettomuuskuvaus ja le-  
viämismalli**  
Versio **1.2**

Viite **1510040483**

## SISÄLTÖ

|           |                                                               |           |
|-----------|---------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1.</b> | <b>JOHDANTO</b>                                               | <b>3</b>  |
| <b>2.</b> | <b>LAITOKSEN TIEDOT</b>                                       | <b>4</b>  |
| <b>3.</b> | <b>AMMONIAKIN OMINAISUUDET</b>                                | <b>5</b>  |
| 3.1       | Yleiset ominaisuudet                                          | 5         |
| 3.2       | Reaktiivisuus                                                 | 5         |
| 3.3       | Palo- ja räjähdysvaara                                        | 5         |
| 3.4       | Toksisuus                                                     | 5         |
| 3.5       | Ympäristövaikutukset                                          | 5         |
| 3.6       | Vaara-alueen arviointi                                        | 5         |
| <b>4.</b> | <b>TERVEYSHAITTOJEN ARVIOINTI</b>                             | <b>6</b>  |
| 4.1       | Ammoniakin hajukynnys                                         | 6         |
| 4.2       | Ilmoitetut haitalliset pitoisuudet                            | 6         |
| 4.2.1     | HTP (2018)                                                    | 6         |
| 4.2.2     | IDLH (1994)                                                   | 6         |
| 4.2.3     | ERPG (2014)                                                   | 6         |
| 4.2.3.1   | EPRG-1, 25ppm                                                 | 6         |
| 4.2.3.2   | EPRG-2, 150 ppm                                               | 7         |
| 4.2.3.3   | EPRG-3, 1500 ppm                                              | 7         |
| 4.2.4     | AEGL                                                          | 7         |
| 4.2.4.1   | AEGL luokitusten kuvaukset                                    | 7         |
| 4.2.5     | Akuutit vaikutukset                                           | 7         |
| <b>5.</b> | <b>ARVIOINTIMENETELMÄT</b>                                    | <b>8</b>  |
| 5.1       | Onnettomuusmalli                                              | 8         |
| 5.2       | Sääaineisto                                                   | 8         |
| 5.3       | Lähtötietoja                                                  | 9         |
| 5.4       | Onnettomuusmallin ympäristötiedot                             | 9         |
| 5.5       | Mallinnetut skenaariot                                        | 9         |
| 5.5.1     | Jatkuva suora päästö ilmaan                                   | 9         |
| 5.5.2     | Ammoniakin leviäminen suoja-altaasta (haihtuminen lammikosta) | 10        |
| 5.5.3     | Ammoniakkivuoto säiliöstä putken kautta                       | 10        |
| <b>6.</b> | <b>TULOKSET</b>                                               | <b>11</b> |
| 6.1       | Suora päästö                                                  | 11        |
| 6.2       | Vuoto suoja-altaaseen                                         | 15        |
| 6.3       | Ammoniakkisäiliön vuoto putken tai venttiilin kautta          | 18        |
| <b>7.</b> | <b>TULOSTEN TARKASTELU</b>                                    | <b>21</b> |
| <b>8.</b> | <b>VIITTEET</b>                                               | <b>22</b> |

## 1. JOHDANTO

Terrafame Oy suunnittelee aloittavansa akuissa hyödynnettävien nikkeli- ja kobolttikemikaalien valmistamisen Terrafamen kaivoksen ja metallitehtaan tehdasalueella. Tähän liittyen tehdään ympäristövaikutusten arviointi, joka on edellytyksenä ympäristöluvan saamiselle.

Tässä erillisselvityksessä arvioidaan ammoniakkivuodon aiheuttamia terveysriskejä ihmisille, ympäristölle ja lähialueen rakennuksille. Työssä on käytetty Tukes oppaan ”Tuotantolaitosten sijoittaminen” (2015) mallinnusta koskevia ohjeita, sekä onnettomuusmallinnukseen soveltuvaa Aloha 5.4.7 (EPA/NOAA) ohjelmistoa. Mallintamalla saatuja arvoja verrataan terveysperusteisiin raja-arvoihin.

## 2. LAITOKSEN TIEDOT

Terrafame on suomalainen monimetalliyhtiö, joka tuottaa nikkeliä, sinkkiä, kobolttia ja kuparia. Kaivos sijaitsee 25–30 km Kajaanista kaakkoon ja 20–25 km Sotkamosta lounaaseen. Terrafamen kaivospiirin pinta-ala on n. 60 km<sup>2</sup>.

Kaivoksen tuotemetalleja sisältävä malmi louhitaan avolouhokselta, minkä jälkeen se murskataan, agglomeroidaan ja kasataan bioliuotuskasoille. Metallit erotetaan malmista kaksivaiheisessa bioliuotusprosessissa hyödyntäen mikrobeja. Noin 10 % bioliuotuksessa kierrätettävästä tuotantoliuoksesta johdetaan metallien talteenottoon, jossa metallit saostetaan vaiheittain metallisulfidituotesakkoina.

Hankkeessa on tarkoitus jatkojalostaa nikkeli-kobolttisulfidisakka akkujen valmistuksen raaka-aineena käytettäviksi puhtaiksi Nikkeli- ja kobolttisulfaattituotteiksi. Akkukemikaaliprosessi sijoittuu Terrafamen kaivoksen tehdasalueelle rakennettaviin tehdasrakennuksiin. Akkukemikaalien valmistusprosessi on yleisesti maailmalla käytössä oleva menetelmä, joka perustuu paineliuotukseen, neste-nesteeuuttoon ja kiteytykseen. Akkukemikaalien valmistuksessa käytetään ammoniakkia ja uuttoliuotinta ja -reagensseja, joita ei ole aiemmin ollut käytössä Terrafamen kaivoksella. Ammoniakkia käytetään liuotus- ja uuttoprosessissa prosessiliuosten pH:n säätämiseen. Ammoniakki tuodaan kaivokselle junakuljetuksina.

Uusien toimintojen osalta on tunnistettu riskejä, joista keskeisin toimintaan liittyvä riski on ammoniakin hallitsematon ja massiivinen vuoto onnettomuuden tai muun poikkeuksellisen tilanteen seurauksena. Ammoniakkivuoto muodostaa terveysriskin erityisesti varastosäiliön läheisyydessä työskenteleville henkilöille. Ammoniakin varastosäiliöt (2 x 1000 t) sisältävät nestemäistä ammoniakkia ja ne tullaan sijoittamaan olemassa olevalle kemikaalien varastopaikalle junaradan varteen (radan länsipuolelle). Ammoniakki siirretään säiliöstä nestemäisenä pumpulla prosessin käyttökohteisiin. Ennen syöttämistä käyttölaitteeseen ammoniakki höyrystetään. Ammoniakin varastosäiliöt, putkisto ja syöttölaitteet tullaan varustamaan vuodonkeruualtailla, kiinteillä kaasunhaistelu- ja palontorjuntalaitteilla.

## 3. AMMONIAKIN OMINAISUUDET

### 3.1 Yleiset ominaisuudet

Ammoniakki ( $\text{NH}_3$ ) on normaaliolosuhteissa väritön, voimakkaasti pistävän hajuinen ja erittäin ärsyttävä, ilmaa kevyempi kaasu. Paineistetun nesteen vapautuessa suurina määrinä, se voi kuitenkin jäähtyessään muodostaa ilmaa raskaamman pilven, joka seuraa maanpinnan muotoja.

Ammoniakkaa voidaan varastoida ja kuljettaa paineenalaisena nesteytettyinä tai jäähdytettyinä alle  $-33\text{ °C}$ :een normaalissa ilmanpaineessa. Ammoniakki on huomattavan myrkyllistä ihmisille ja vesieläimille.

### 3.2 Reaktiivisuus

Ammoniakki reagoi kiivaasti ja lämpöä kehittäen happojen ja hapettimien kanssa. Ammoniakkin liuetessa veteen vapautuu lämpöä. Ammoniakki syövyttää eräitä metalleja, mm. kuparia ja alumiinia.

### 3.3 Palo- ja räjähdysvaara

Suljetussa tilassa on tapahtunut ilma-ammoniakkiseoksen räjähdyksiä (ei Suomessa), vaikka ammoniakki ei ole helposti syttyvää. Yleensä tapauksiin on liittynyt konehuoneen tai muun tilan puutteellinen ilmanvaihto, mikä on mahdollistanut syttyvän seoksen syntymisen. Ammoniakki muodostaa syttyvän kaasuseoksen, kun kaasua on 16–25 tilavuusprosenttia ilmassa. Esimerkiksi kompressorista vuotava öljysumu voi laskea räjähdyspitoisuutta huomattavastikin.

### 3.4 Toksisuus

Ammoniakki on suurissa pitoisuuksissa myrkyllinen yhdiste. Hengitysteiden ärsytys on suoraan verrannollinen ammoniakkipitoisuuteen ilmassa. Nestemäinen ammoniakki aiheuttaa iholla palovamman ja paleltuman. Roiskeet silmään aiheuttavat vakavan silmävaurion, ellei hoitoa anneta välittömästi.

Toistuva altistuminen ammoniakkihöyryille voi aiheuttaa sopeutumista ärsytysvaikutuksille muutaman viikon jälkeen. Toisaalta ero ärsytystä aiheuttavaan pitoisuustasoon on jatkuvassakin altistumisessa pieni. Ammoniakki ei kerry elimistöön.

### 3.5 Ympäristövaikutukset

Ammoniakki on erittäin myrkyllistä vesieläimille. Se luokitellaan ympäristölle vaaralliseksi aineeksi. Ammoniakki ja sen hajoamistuotteet ovat vesistöjä rehevöittäviä ravinteita.

Tuotantoyksikön työntekijöiden ja alueen ympäristön ihmisten kannalta ammoniakkikaasun merkittävin haittaominaisuus on sen myrkyllisyys suurina pitoisuuksina.

### 3.6 Vaara-alueen arviointi

Ammoniakkin OVA-ohjeessa (onnettomuuden vaaraa aiheuttavat aineet -turvallisuusohje) kuvataan ammoniakkin vuotoa ja valumaa. Kun nesteytettyä kaasua vuotaa säiliöstä, osa nesteestä höyrystyy välittömästi ja loppuosa nesteestä jäähtyy kiehumispisteeseen. Nestesuihku hajoaa pisaroiksi, kun nesteen lämpötila säiliössä on  $10\text{--}15\text{ °C}$  korkeampi kuin kiehumispiste ( $-33\text{ °C}$ ). Mitä korkeampi nesteen lämpötila säiliössä on, sitä pienempiä pisaroita muodostuu. Jos suihku ei kohtaa estettä, pienet pisarat höyrystyvät ilman sekoittuessa suihkuun ja isot putoavat maahan. Siten ammoniakkin nestevuoto voi höyrystyä kokonaan. Höyrystyvä kaasu muodostaa tuulen mukana leviämisseunaan kulkeutuvan kaasupilven, joka vuotokohdan läheisyydessä on läpinäkymätöntä valkoista sumua (TTL, OVA-ohje).

## 4. TERVEYSHAITTOJEN ARVIOINTI

Terveyshaittojen arvioinnissa käytetään tunnettuja raja-arvoja (AEGL, HTP, EPRG, IDLH).

### 4.1 Ammoniakin hajukynnys

Ammoniakin ilmoitettu hajukynnys vaihtelee melko paljon eri kirjallisuuslähteiden välillä. TTL:n OVA-ohjeessa ilmoitettu ammoniakin hajukynnys on 5–50 ppm (3,6–36 mg/m<sup>3</sup>). Ammoniakin hajua ei pidetä hyvänä varoitusmerkinä. EPRG arvojen yhteydessä ammoniakin hajukynnykseksi ilmoitetaan 1 ppm, kun taas kirjallisuudessa olfaktometrisesti mitattu pitoisuus on 2,6 ppm (Smeets et al. 2007). Ammoniakin hajukynnyksen on todettu vaihtelevan voimakkaasti riippuen vallitsevista olosuhteista ja yksilöiden välillä.

### 4.2 Ilmoitetut haitalliset pitoisuudet

#### 4.2.1 HTP (2018)

Haitalliseksi tunnettu pitoisuus (HTP) on pienin ilman kemikaalipitoisuus, jonka sosiaali- ja terveysministeriö arvioi voivan aiheuttaa haittaa tai vaaraa työntekijän terveydelle. HTP-arvot on vahvistettu työturvallisuuslaissa.

HTP pitoisuus (2018)

**20 ppm** (14 mg/m<sup>3</sup>) /8 h  
**50 ppm** (36 mg/m<sup>3</sup>) /15 min

Suomen lainsäädännön perusteella turvallisena ammoniakkipitoisuutena voidaan pitää alle 20 ppm:n pitoisuuksia. 50 ppm:n pitoisuudelle altistumisesta ja sen aiheuttamista terveyshaitoista on mainintoja myöhempien pitoisuuksien yhteydessä.

Hengitysteiden ärsytys on suoraan verrannollinen ammoniakkipitoisuuteen ilmassa. Ärsytys ja haittavaikutus alkavat 20–25 ppm:n (14–18 mg/m<sup>3</sup>) pitoisuudessa. Toistuvassa ammoniakkihöyrylle altistumisessa työntekijälle voi kehittyä sopeutumista ärsytysvaikutuksille muutamien viikkojen kuluessa. Näin jatkuva altistuminen jopa 70 ppm:n (50 mg/m<sup>3</sup>) pitoisuudelle ei aina aiheuta selviä oireita (TTL, OVA-arvot).

#### 4.2.2 IDLH (1994)

Välittömästi terveydelle haitallinen pitoisuus (Immediately Dangerous To Life or Health IDLH Values) on NIOSH:n (The National Institute for Occupational Safety and Health) ylläpitämä tietokanta haitallisista pitoisuuksista. Arviot perustuvat historiallisiin arvioihin ja niiden korjauksiin tiedon päivittymisen yhteydessä. Päivitetty IDLH-pitoisuus ammoniakille on 300 ppm. Vuoden 1994 jälkeen 30 min altistumisaikaa ei ole käytetty IDLH:n yhteydessä, vaan ilmoitetussa pitoisuudessa työntekijän tulee välttää oleskelua ilman riittäviä suojavarusteita.

Yli 100 ppm:n (70 mg/m<sup>3</sup>) pitoisuus aiheuttaa silmän sarveiskalvon ärsytystä ja kyynelvuotoa. Välittömästi hengitysteitä ja silmiä voimakkaasti ärsyttävä pitoisuus on 400–700 ppm (280–500 mg/m<sup>3</sup>) (TTL, OVA). Päivittäinen altistuminen noin 100 ppm:n (70 mg/m<sup>3</sup>) pitoisuuksille aiheuttaa hengitysteiden ja silmien ärsytystä.

300 ppm (213 mg/m<sup>3</sup>) pitoisuutta voidaan pitää siis jo selkeästi haitallisena, jonka ylittyessä oireita alkaa muodostua ja niiden vakavuusaste pahenee.

#### 4.2.3 EPRG (2014)

EPRG-arvot (Emergency Response Planning Guideline) arvioivat pitoisuuksia, joissa suurin osa ihmisistä alkaa saada oireita, jos he altistuvat haitallisille ilmaperäisille kemikaaleille yhden tunnin ajan. EPRG-arvot perustuvat "American Industrial Hygiene Association" erillisen komitean tekemään arvioihin, jotka perustuvat niin kokemukseen kuin kokeelliseen tutkimukseen. EPRG ei ota huomioon herkkiä tapauksia, kuten vanhukset, sairaat tai lapset, vaan näiden yksilölliset arvot voivat olla EPRG -arvoja alhaisemmat.

##### 4.2.3.1 EPRG-1, 25ppm

25 ppm (17,5 mg/m<sup>3</sup>) pidetään ylärajana pitoisuudelle, jolle kaikki yksilöt voivat altistua tunnin ajan ilman merkittäviä ja ohimeneviä oireita, ilman selvää hajuhavaintoa. Jos altistumisen pitoisuus

on korkeampi, 25–50 ppm vähintään 10 min ajan, mahdollisia mietoja silmä, nenä, nielu tai hengityselimistön ärsytysoireita voi esiintyä. Kohtalaista nielun ärsytystä ja rintakipua on havaittu 50 ppm pitoisuudelle altistuttaessa tunnin ajan. Alhaisempi 25 ppm pitoisuus voi aiheuttaa oireita, jos altistus jatkuu yli 3 tuntia, aiheuttaen mietoa rintakipua, yskimistä ja pahoinvointia. Ammoniakin hajua pidetään havaittavana EPRG-1-tasolla, mutta haittavaikutuksia näillä pitoisuuksilla ei odoteta syntyvän.

#### 4.2.3.2 EPRG-2, 150 ppm

150 ppm (105 mg/m<sup>3</sup>) pidetään ylärajana pitoisuudelle, jolle yksilö voi altistua tunnin ajan ilman että sille kehittyy palautumattomia tai muita vakavia terveyshaittoja tai oireita, jotka voivat estää suojautumisen altisteelle. 150 ppm:n pitoisuudessa ammoniakin haju on vahva ja se aiheuttaa silmien ja ylähengitysteiden selvää ärsytystä, erityisesti herkissä tai sairaissa yksilöissä. Pitkäkestoisissa altistumistilanteissa, joissa on altistuttu 5 viikon ajan 100 ppm pitoisuudelle, on havaittu vähäistä silmien ärsytystä. Hengitystoiminnoissa ei myöskään voitu havaita muutoksia, kun altistuminen 140 ppm pitoisuudelle kesti 2 tunnin ajan.

#### 4.2.3.3 EPRG-3, 1500 ppm

1500 ppm (1050 mg/m<sup>3</sup>) pidetään ylärajana sille, jolle yksilö voi altistua tunnin ajan ilman että syntyy välitöntä hengenvaaraa. Eläinkokeisiin perustuvien LC01-kokeiden (OECD:n ohjeen mukaan LC01 tarkoittaa 4 h altistuminen, joka aiheuttaa 1 % kuolleisuutta) perusteella 1500 ppm pidetään turvallisena rajana. Rotilla korkein ei-tappava pitoisuus 6210 ppm ja 1 % kuolleisuus 6991 ppm pitoisuudella.

#### 4.2.4 AEGL

AEGL (Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals) on National Research Councilin erillisen komitean ylläpitämä tietokanta. Tietokanta rakentuu arvioihin yksilön harvinaisista altistumistilanteista kemikaaleille. AEGL tietokannassa ilmoitetut pitoisuudet on suunniteltu niin, että ne suojelevat myös vanhuksia, lapsia tai muuten herkkiä yksilöitä.

Kattava katsaus ammoniakin aiheuttamiin toksikologisiin vasteisiin: [https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-11/documents/ammonia\\_final\\_volume6\\_2007.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-11/documents/ammonia_final_volume6_2007.pdf)

##### 4.2.4.1 AEGL luokitusten kuvaukset

AEGL-1: Epämukavuutta, ärsytystä, oireettomia vaikutuksia ilman aistinkokemusta. Vaikutukset eivät tee toimintakyvyttömäksi, vaan ne ovat ohimeneviä ja toimintakyky palautuu ennalleen altistuksen päätyttyä.

AEGL-2: Palautumattomia tai muita vakavia, pitkäkestoisia vaikutuksia, tai alentunutta toimintakykyä paeta paikalta.

AEGL-3: Hengenvaarallisia haittavaikutuksia tai kuolema.

|        |                                                     |
|--------|-----------------------------------------------------|
| AEGL 1 | <b>30 ppm</b> (21 mg/m <sup>3</sup> ) /10 min       |
|        | <b>30 ppm</b> (21 mg/m <sup>3</sup> ) /30 min       |
|        | <b>30 ppm</b> (21 mg/m <sup>3</sup> ) /60min        |
| AEGL 2 | <b>220 ppm</b> (160 mg/m <sup>3</sup> ) /10 min     |
|        | <b>220 ppm</b> (160 mg/m <sup>3</sup> ) /30 min     |
|        | <b>160 ppm</b> (112 mg/m <sup>3</sup> ) /60 min     |
| AEGL 3 | <b>2 700 ppm</b> (1 900 mg/m <sup>3</sup> ) /10 min |
|        | <b>1 600 ppm</b> (1 100 mg/m <sup>3</sup> ) /30 min |
|        | <b>1 100 ppm</b> (769 mg/m <sup>3</sup> ) /60 min   |

#### 4.2.5 Akuutit vaikutukset

Lyhytaikainen altistuminen yli 5 000 ppm:n (3 600 mg/m<sup>3</sup>) pitoisuudelle voi aiheuttaa nopean kuoleman kurkunpään turvotuksen tai keuhkopöhön vuoksi (TTL, OVA). Erittäin suuret kaasupitoisuudet, yli 10 000 ppm (7 000 mg/m<sup>3</sup>), voivat aiheuttaa ihon ärsytystä tai syöpymistä. Yleisesti väestölle on LC<sub>50</sub> pitoisuuden arvioitu olevan 11 500 ppm 30 min ajan altistumiselle (AEGL, Pedersen & Selig 1989). Jo yli 2500 ppm pitoisuuksia yli 30 min ajan pidetään erityisen vaarallisena ihmisille.



## 5. ARVIOINTIMENETELMÄT

### 5.1 Onnettomuusmalli

Onnettomuusmallinnus tehtiin käyttäen ALOHA-ohjelmaa (Areal Locations of Hazardous Atmospheres), joka on NOAA:n (National Oceanic and Atmospheric Administration) ja EPA:n (U.S. Environmental Protection Agency) kehittämä sovellus. Se on suunniteltu pelastustoimen käytettäväksi terveydelle uhaksi olevien olosuhteiden paikallistamiseen kemikaalionnettomuuden aikana.

ALOHAlla mallinnetaan kemikaalivuodon höyrystymisessä syntyneen kemikaalipilven leviämistä; mallin avulla voidaan tunnistaa alueet, joilla altistutaan terveyden kannalta haitallisille pitoisuuksille. Sen lisäksi ohjelmalla voidaan mallintaa tulipalon lämpövaikutuksia, mutta myös höyryn leimahduksen ja palavan kemikaalin aiheuttamia lämpövaikutuksia.

Mallilla voidaan arvioida riskialueita kemikaalionnettomuuden aikana. Malliin syötetään tarkasteltava yhdiste ja sääolosuhteet, mm. tuulen nopeus ja suunta, pinnan karheus (avoin, kaupunki/metsä, vesistö), pilvisyys, lämpötila, stabiiliusluokka, inversio ja ilman kosteus. Valittavia päästötyyppejä ovat lammikko, säiliö, kaasuputki ja suora päästö. Suorassa päästössä annetaan kemikaalin määrä, päästökorkeus ja kesto.

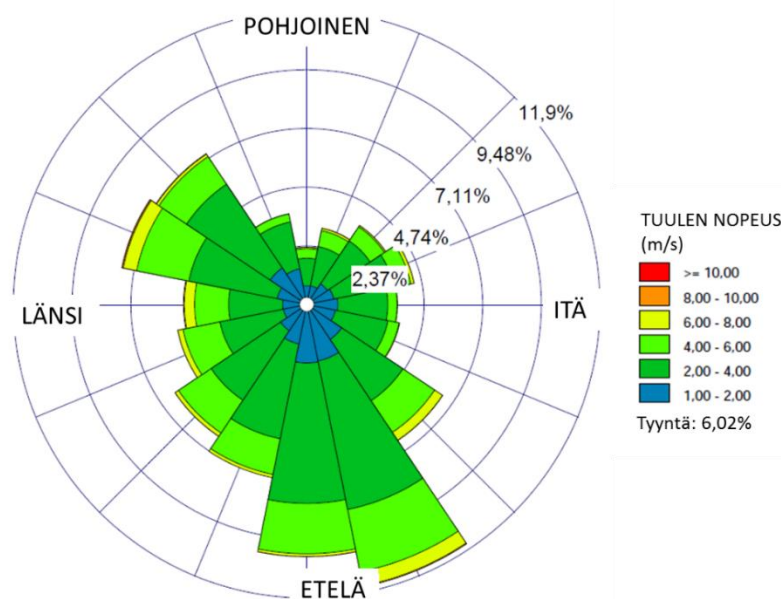
ALOHA-mallinnuksesta saadaan tuloksena karttapohjia, jossa on visualisoituna alueet, joilla kemikaalin pitoisuus ylittää terveydelle haitallisen pitoisuuden tarkasteluajanjaksolla (AEGL-tasot) sekä kuvaajia, joissa esitetään pitoisuus ajan funktiona valitussa tarkastelupisteessä.

ALOHA-mallissa on rajoituksia. ALOHA-malli rajoittaa onnettomuuden keston maksimissaan yhden tunnin pituiseksi, sekä se olettaa maaston olevan tasaista. Se ei myöskään ota huomioon rakennusten aiheuttamia muutoksia virtauksiin. Malli ei myöskään sovellu tyynien olosuhteiden mallintamiseen.

Tässä työssä pitoisuuksien esittämisessä päästöviuhkoina sekä karttapohjilla on käytetty 10 minuutin AEGL-arvoja. Päästöjen leviäminen ympäristöön on esitetty yksikössä ppm, palamisen lämpövaikutukset yksikössä kW/m<sup>2</sup> ja räjähdysten vaikutukset psi (pounds per square inch, 1 psi = 6,89 kPa).

### 5.2 Sääaineisto

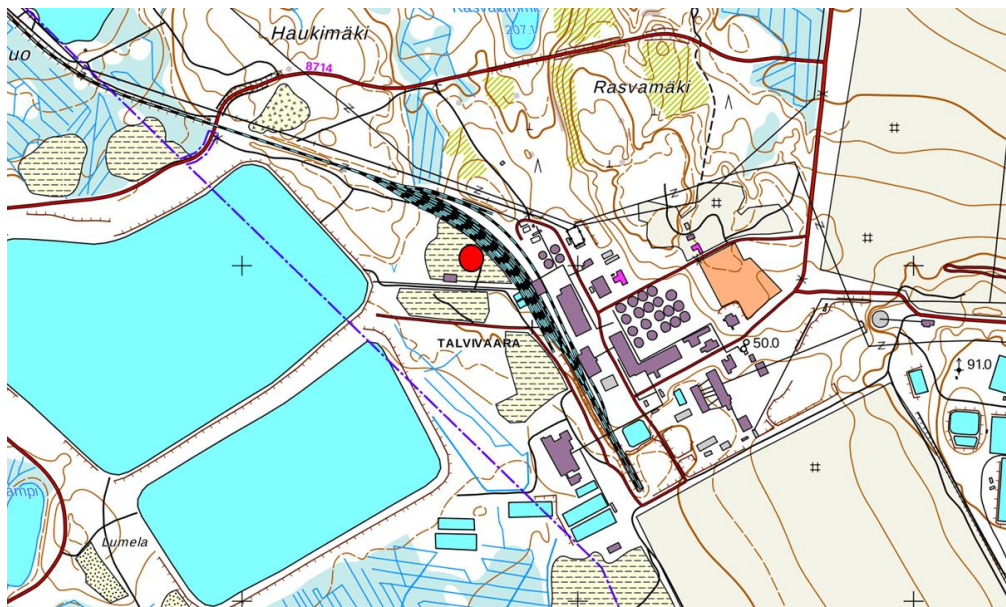
Leviämislaskennoissa käytettiin Sotkamon Kuolaniemen säähavaintoaseman tuntiaineistoa vuosilta 2015–2017. Yläilmakehän osalta käytettiin Jyväskylän Tikkakosken luotausaineistoa vastaavalta ajanjaksolta. Kuvassa 1 on esitetty ajanjaksona vallinneet tuuliolosuhteet.



**Kuva 1. Tuuliruusu Sotkamon Kuolaniemen sääsaman havainnoista vuosilta 2015–2017. Kuva kertoo, mistä suunnasta on tuullut. Keskimääräinen tuulennopeus jaksolla oli 2,7 m/s.**

### 5.3 Lähtötietoja

Ammoniakki on suunniteltu varastoitavaksi kahdessa pallosäiliössä, joiden kummankin tilavuus on 1 kt/säiliö ja säiliön sisähalkaisija 15,54 metriä. Kaasumaisen ammoniakkin paine säiliössä on 1827,1 kPa ja ammoniakkiliuoksen väkevyys 100 %. Suunniteltu ammoniakkisäiliön sijainti Terrafamen kaivosalueella on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Suunniteltu ammoniakkisäiliöiden sijoituspaikka Terrafamen kaivosalueella.

### 5.4 Onnettomuusmallin ympäristötiedot

Onnettomuus mallinnettiin tapahtuvaksi TUKESin ohjeiden mukaisissa olosuhteissa (Taulukko 1). Mallinnusolosuhteina käytettiin tyypillisiä olosuhteita, joissa yhdisteiden hajoaminen ja sekoittuminen ovat suhteellisen vähäisiä.

Taulukko 1. ALOHA-mallinnuksessa käytetyt ympäristöolot.

| Olosuhde           | Käytetty lähtötieto       |
|--------------------|---------------------------|
| Tuulen nopeus      | 3 m/s                     |
| Tuulen suunta      | Länsi                     |
| Mittauskorkeus     | 2 m                       |
| Ympäristötyyppi    | Helppokulkuinen           |
| Pilvisyys          | Puolipilvistä             |
| Lämpötila          | + 18 °C                   |
| Stabiilisuusluokka | D (neutraalit olosuhteet) |
| Ilmankosteus       | 50 %                      |

### 5.5 Mallinnetut skenaariot

Onnettomuusmallinnuksessa otettiin huomioon kolme erilaista lähtötilannetta: 1) ammoniakki haihtuu suoraan ilmaan kaasutilasta 2) ammoniakki haihtuu ilmaan lammikosta ja 3) ammoniakki vuotaa säiliöstä putken kautta. Eri skenaarioissa mainitut vuotonopeudet ja kokonaismäärät sekä vuodon kestot ovat ALOHA-mallin laskelmia.

#### 5.5.1 Jatkuva suora päästö ilmaan

Suorassa jatkuvassa päästössä oletettiin päästön jatkuvan säiliön kaasutilasta tasaisena 60 minuutin ajan, haihtuneen ammoniakkin määrän ollessa 30,4 kg/s ja 1820 kg/min aikana. Kokonaispäästö tunnin aikana on 110 t ammoniakkia ilmaan. Jatkuvan päästön kohdalla terveydelle haitallisen ammoniakkipilven leviämistä verrattiin erikseen 10 min ja 60 min AEGL-arvoihin. TUKESin

ohjeessa verrataan arvoja 10 minuutin kestoiseen vuotoon, ja 10 minuuttia on myös palokunnan vasteaika-arvio torjuntatoimien aloittamiseksi kaivosalueella.

Suoran päästön aiheuttamaa mahdollista leimahdusvaaraa arvioitiin vertaamalla pitoisuuksia LEL-pitoisuuteen. Lisäksi vuodosta syntyneen mahdollisen tulipalon aiheuttaman lämpösäteilyn vaara-alueet esitettiin (yksikkö kW/m<sup>2</sup>).

#### 5.5.2 Ammoniakin leviäminen suoja-altaasta (haihtuminen lammikosta)

Lammikosta tapahtuvan leviämisen mallinnuksessa oletuksena oli, että toinen säiliöstä on vuotanut alla olevaan suoja-altaaseen täyttäen sen. Näin ollen lammikon pinta-ala on 1196 m<sup>2</sup>, maan lämpötila +18 °C ja lammikossa olevan ammoniakin lämpötila aluksi -33,9 °C (ammoniakin kiehumispiste). Tässä mallissa suoja-altaasta haihtuu 56 t ammoniakkia ilmaan tunnin aikana, ja aluksi päästönopeus on 1670 kg/min ja tunnin lopussa noin 600 kg/min.

Ammoniakkisäiliön alle varoaltaaseen vuotaneen ammoniakin aiheuttamia mallinnettuja pitoisuuksia verrattiin 10 minuutin AEGL-pitoisuuksiin. Leimahdusvaaraa määritettiin vertaamalla pitoisuuksia LEL-pitoisuuksiin (alin räjähdysraja). Höyrystyneen ammoniakkipilven räjähdystä ei mallinnettu, koska tässä skenaariossa riittävän korkeaa pitoisuutta ei syntynyt.

Varoaltaaseen vuotaneen ammoniakkilammikon syttyminen mallinnettiin samoihin olosuhteisiin kuin tilanne, jossa altaasta haihtuu sinne vuotanutta ammoniakkia. Lammikkopalossa liekin korkeus on 13 metriä ja palonopeus 974 kg minuutissa. Tunnin aikana palaa 56 t ammoniakkia. Ammoniakkipalon vaikutukset esitetään lämpösäteilyn intensiteeteillä (kW/m<sup>2</sup>).

#### 5.5.3 Ammoniakkivuoto säiliöstä putken kautta

Vuototilanne mallinnettiin tilanteeseen, jossa ammoniakkia vapautuu halkaisijaltaan 40 mm:n suuruisesta vuotokohdasta (vastaa yhdettä D40). Tankissa (halkaisija 15,54 m) on vuotohetkellä 1000 t ammoniakkia, jolloin se on 83 % täynnä. Vuoto kestää vähintään tunnin, maksimivuodon ollessa 108 kg ammoniakkia minuutissa, kokonaisvuodon ollessa 6,4 tonnia tunnissa. Mallissa tapahtuva vuoto tapahtuu kaasun ja aerosolin sekoituksena, kaksifaasisena vuotona.

Vuodon aiheuttaman myrkyllisen ammoniakkipilven leviämisen pitoisuuksia verrattiin 10 minuutin AEGL pitoisuuksiin. Höyrystyneen ammoniakkipilven räjähdysvaaralliset pitoisuudet sekä räjähdysvoiman vaikutusalue mallinnettiin. Räjähdysvoima mallinnettiin hetkeen, jolloin räjähdys tapahtuu minuutti vuodon alkamisen jälkeen. Tällöin 6 400 kg ammoniakkia räjähtää säiliön ulkopuolella.

Ammoniakin palamisen lämpösäteily säiliön vuotaessa putken kautta mallinnettiin lämpösäteilyn intensiteettinä. Tällöin palavan liekin maksimipituus on 13 metriä, palon keston ollessa vähintään tunti. Tunnin aikana palaa maksimissaan 447 kg ammoniakkia minuutissa, tunnin aikana kokonaismäärän ollessa 27 tonnia. Ero ilman palamista tapahtuvaan vuotoon johtuu siitä, että ammoniakki lämpenee ja siirtyy siten helpommin liekkiin.

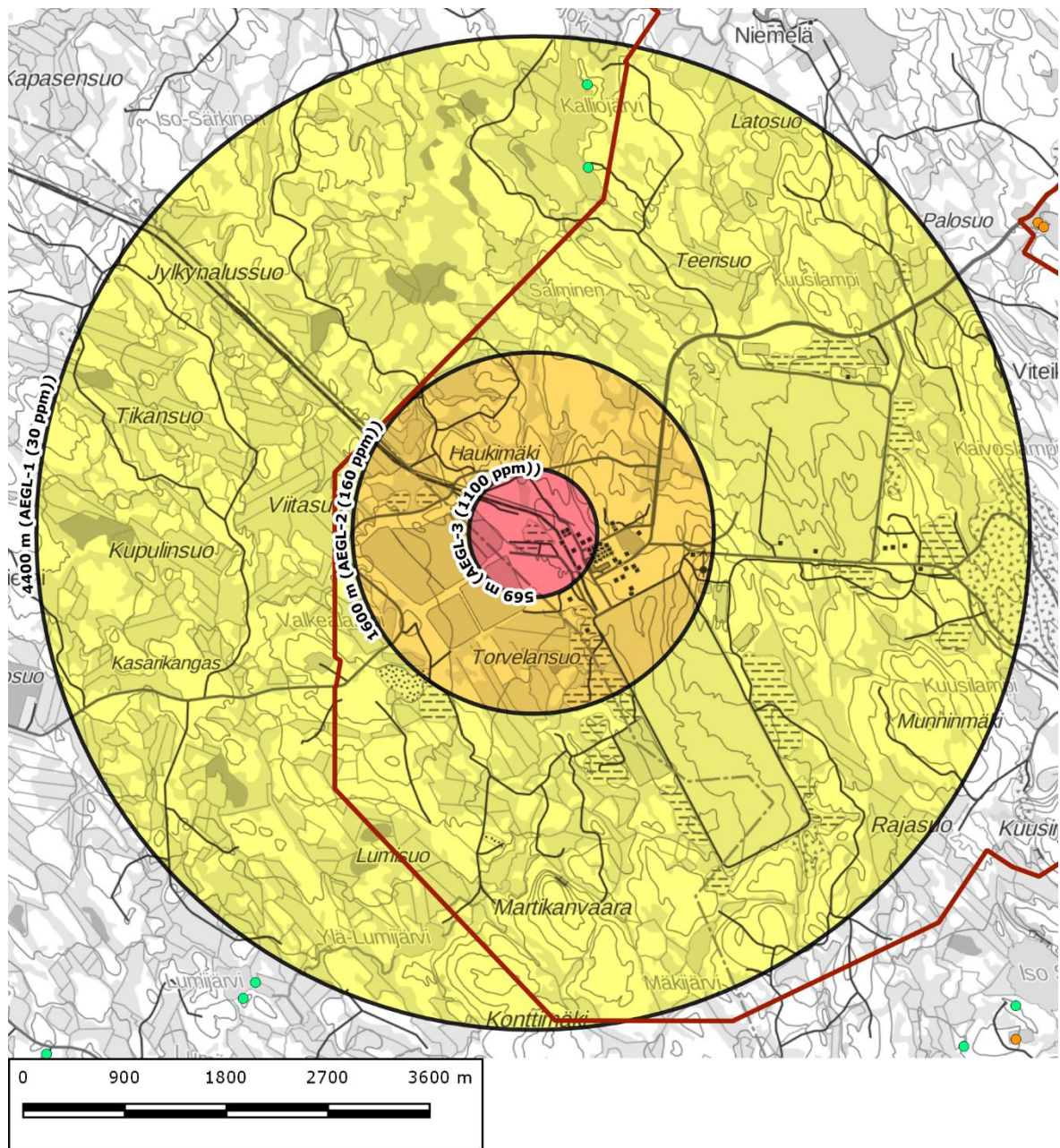


## 6. TULOKSET

Seuraavissa kuvissa on piirretty kartalle vyöhykkeet pisimmille etäisyyksille kussakin skenaariossa. Ne kuvaavat laajinta mahdollista vaikutusaluetta tuulen suunnasta riippuen.

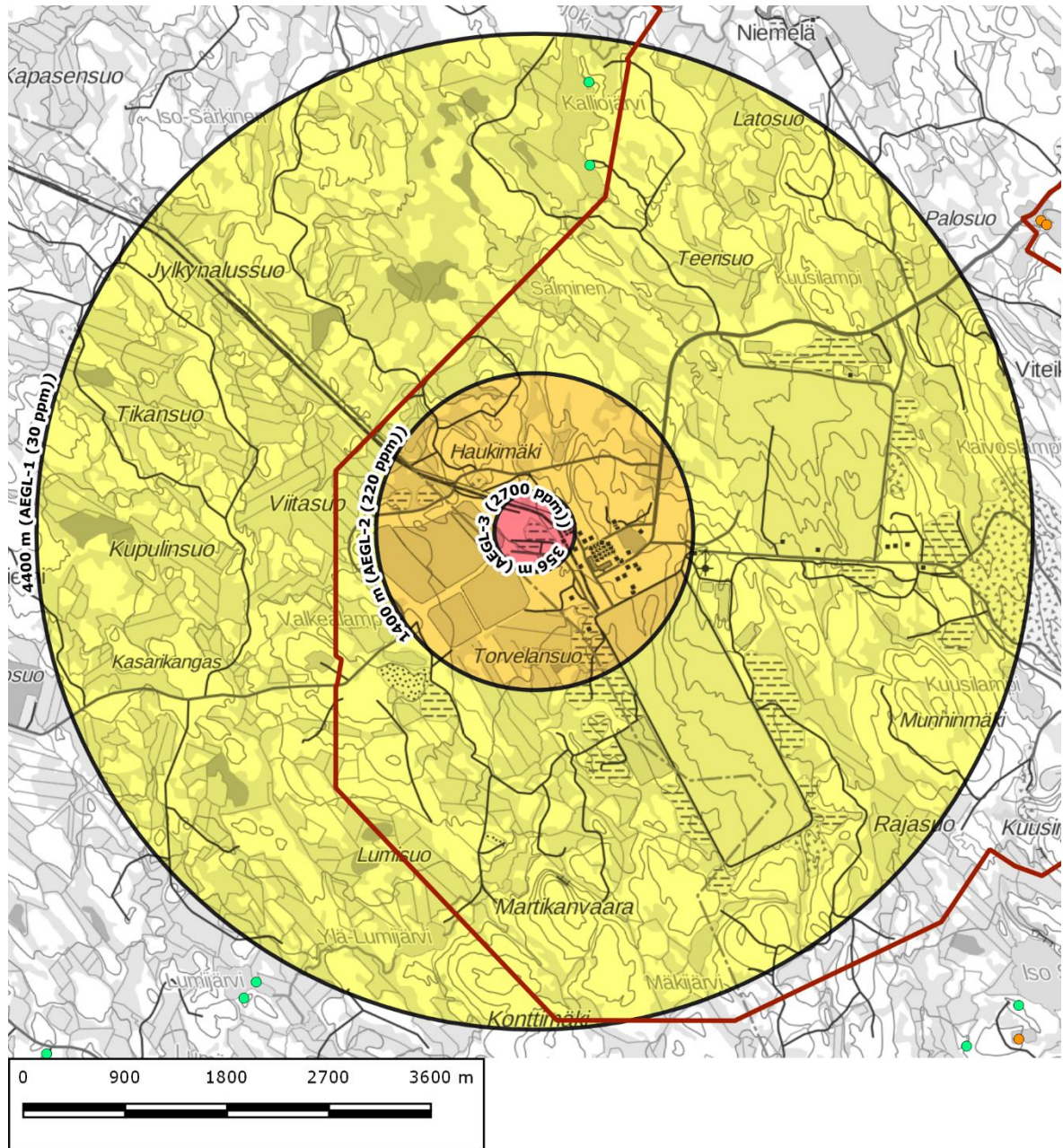
### 6.1 Suora päästö

Terveydelle vaarallisen ammoniakkipilven leviäminen suorana päästönä ympäristöön on esitetty kuvissa 3 ja 4. Päästömäärä on 110 t/h ja päästönopeus 1820 kg/min. Kuvassa 3 pitoisuuksia on verrattu 60 minuutin AEGL-arvoihin ja kuvassa 4 10 minuutin AEGL-arvoihin. 60 minuutin AEGL-rajojen etäisyydet päästölähteestä olivat AEGL-3: 569 m, AEGL-2: 1,6 km ja AEGL-1: 4,4 km. Vastaavasti 10 minuutin AEGL-rajojen etäisyydet olivat AEGL-3: 356 m, AEGL-2: 1,4 km ja AEGL-1: 4,4 km. Ammoniakkipitoisuus 500 metrin etäisyydellä päästölähteestä oli 1410 ppm.



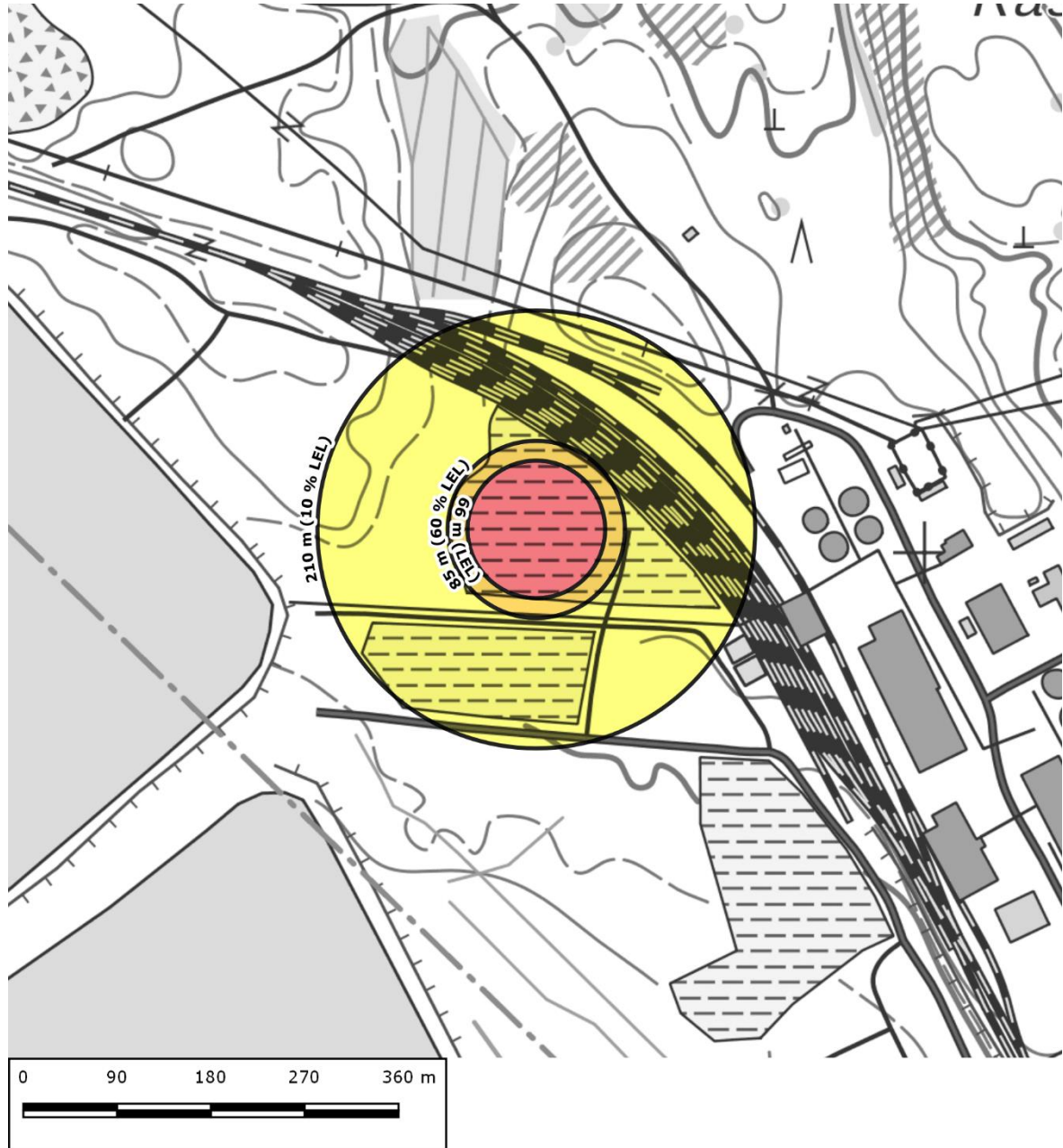
**Kuva 3. Ammoniakkipäästön leviämisyöhykkeet ympäristöön jatkuvana suorana päästönä (60 min AEGL, tuulen nopeus 3 m/s). Päästömäärä 110 t/h, päästönopeus 1820 kg/h. Lähimmät asuinalueet on merkitty kuvaan vihreillä pisteillä.**





**Kuva 4. Ammoniakkipäästön leviämisvyöhykkeet ympäristöön jatkuvana suorana päästönä (10 min AEGL, tuulen nopeus 3 m/s). Päästö määrä 110 t/h, päästönopeus 1820 kg/h.**

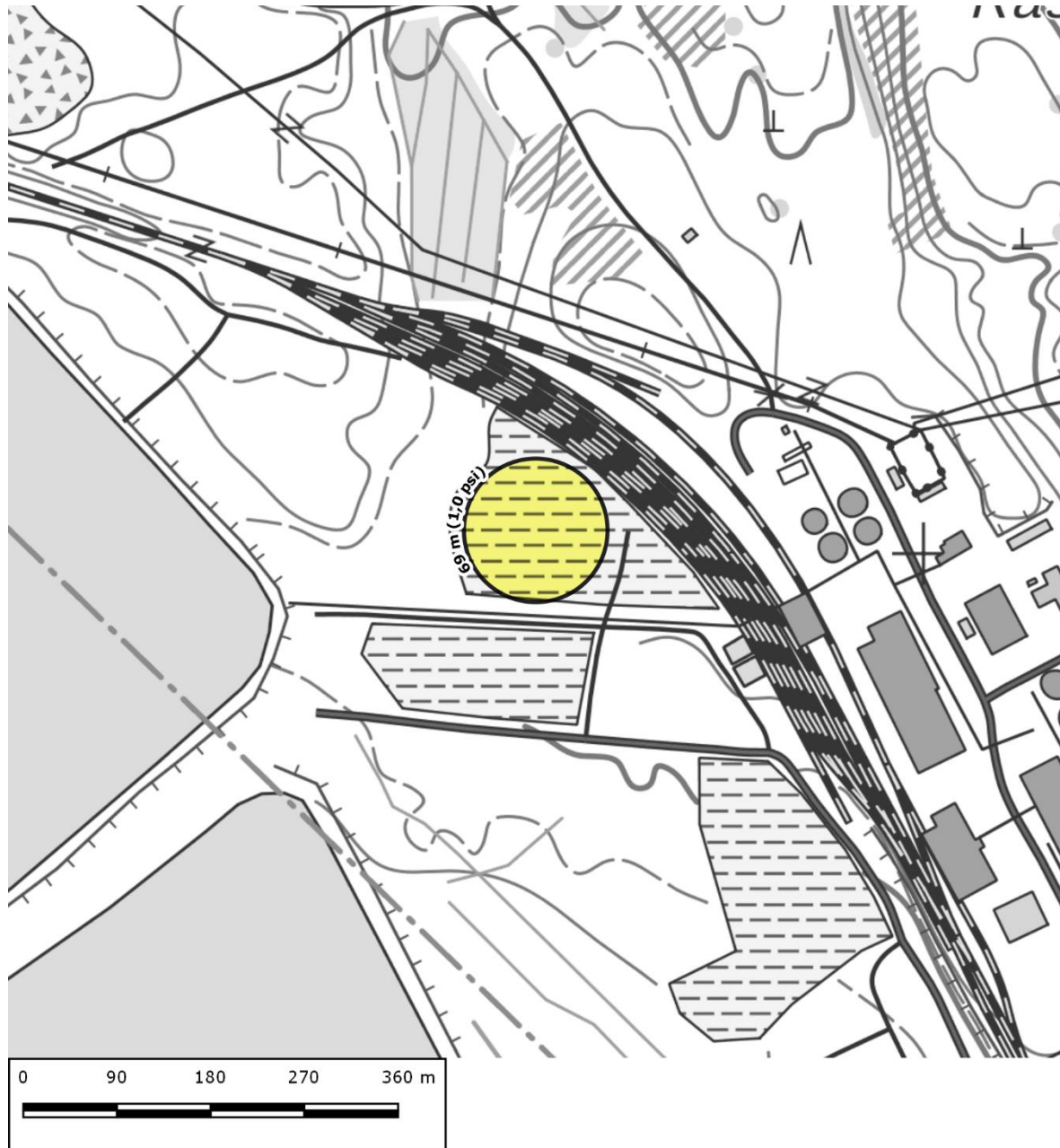
Ammoniakkipilven syttymisherkät alueet päästölähteestä katsottuna on esitetty kuvassa 5. Päästö määrä on 110 t/h ja päästönopeus 1820 kg/min. 100 % LEL-pitoisuus yltää 66 metrin etäisyydelle päästölähteestä. 60 % LEL-pitoisuus, joka voi yhä pitää sisällään tutkimusten mukaan syttymisherkkiä pitoisuuksia kemikaalia, yltää 85 m etäisyydelle päästöstä. 10 % LEL-pitoisuuden alue ulottuu 210 etäisyydelle päästölähteestä.



**Kuva 5. Ammoniakkivuodon syttymisherkät vyöhykkeet, kun päästö on luonteeltaan jatkuva suora päästö (LEL, tuulen nopeus 3m/s). Päästö määrä 110 t/h, päästönopeus 1820 kg/h.**



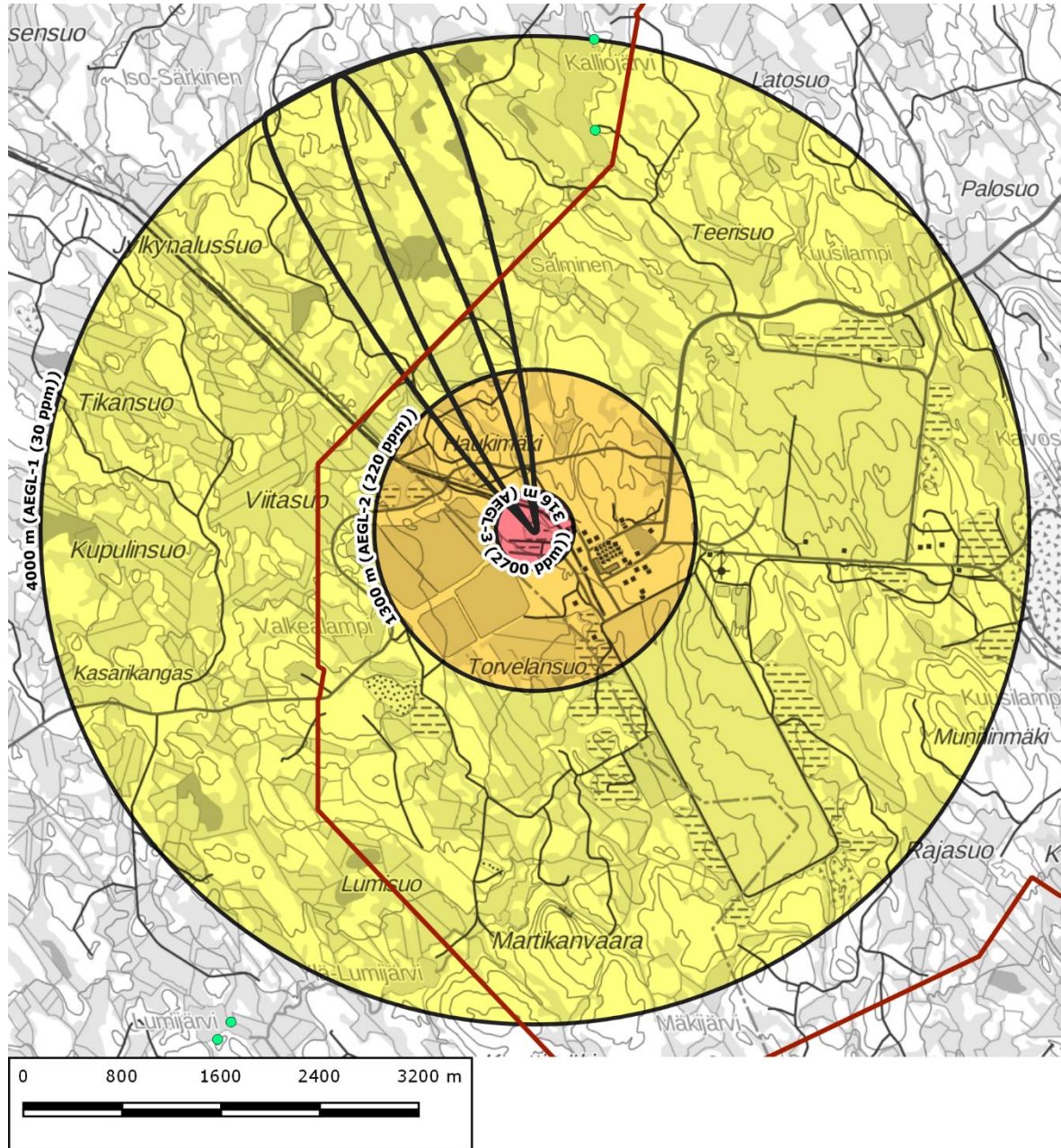
Ammoniakkipilven räjähdyksessä aiheutuvan paineaallon vaikutusalue on esitetty kuvassa 6. Päästö määrä on 110 t/h ja päästönopeus 1820 kg/min. Tilanne on mallinnettu hetkeen, jolloin päästön vapautumisen alkamisesta on kulunut 1 minuutti. Paineaalto ei aiheuta vaurioita rakennuksille (8,0 psi) tai vakavia vammoja ihmisille (3,5 psi). Räjähdyksessä syntyvä paineaalto voi rikkoa lasia 69 metrin etäisyydelle asti.



**Kuva 6. Ammoniakkivuodossa syntyvän kemikaalipilven räjähdysen aiheuttaman paineaallon vaikutusvyöhykkeet, kun päästö on luonteeltaan jatkuva suora päästö (tuulen nopeus 3m/s). Päästö määrä 110 t/h, päästönopeus 1820 kg/h.**

## 6.2 Vuoto suoja-altaaseen

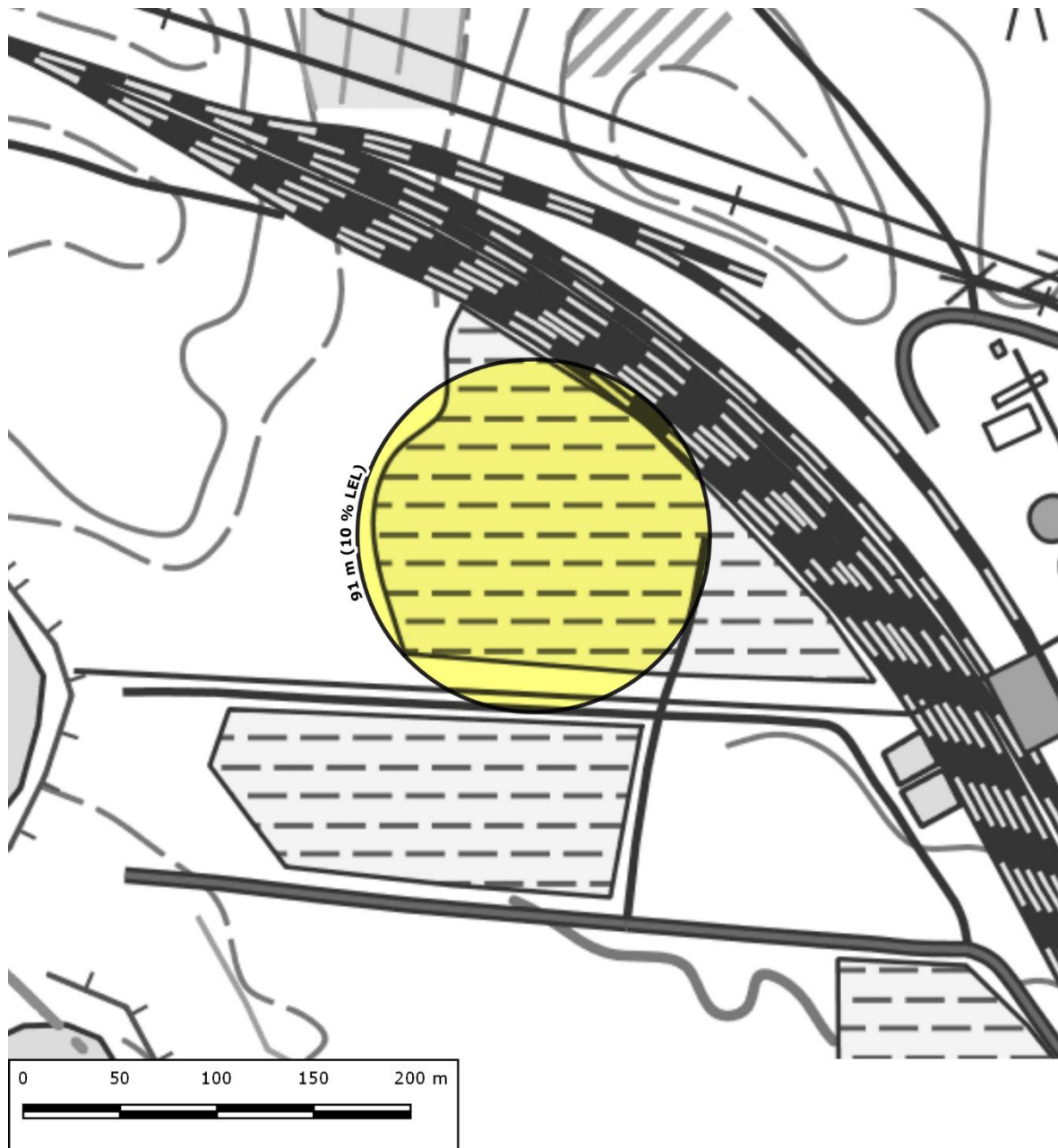
Suoja-altaaseen vuotaneen ammoniakkin haihtumisesta johtuvan, terveydelle vaarallisen pilven mahdollinen leviäminen ympäristöön on esitetty kuvassa 7. Tässä mallissa suoja-altaasta haihtuu 56 t ammoniakkia ilmaan tunnin aikana, ja aluksi päästönopeus on 1670 kg/min ja tunnin lopussa noin 600 kg/min. Kuvassa on verrattu pitoisuuksia 10 minuutin AEGL-arvoihin. 10 minuutin AEGL-rajojen etäisyydet päästölähteestä AEGL-3: 316 m, AEGL-2: 1,3 km ja AEGL-1: 4,0 km. Suurin ammoniakkipitoisuus 500 metrin etäisyydellä päästölähteestä on 1210 ppm ja 1000 metrin etäisyydellä 345 ppm.



**Kuva 7. Suoja-altaaseen vuotaneen ammoniakkin leviämisyvyhykkeet ympäristössä (10min AEGL, tuulen nopeus 3m/s). Kuvassa näkyvät myös päästön kulkeutuminen yleisimmällä tuulen suunnalla (eteläkaakosta) sekä tuulen suunnan tavanomainen pyörteily. Päästö määrä 56 t/h, päästönopeus tunnin alussa 1670 kg/min.**

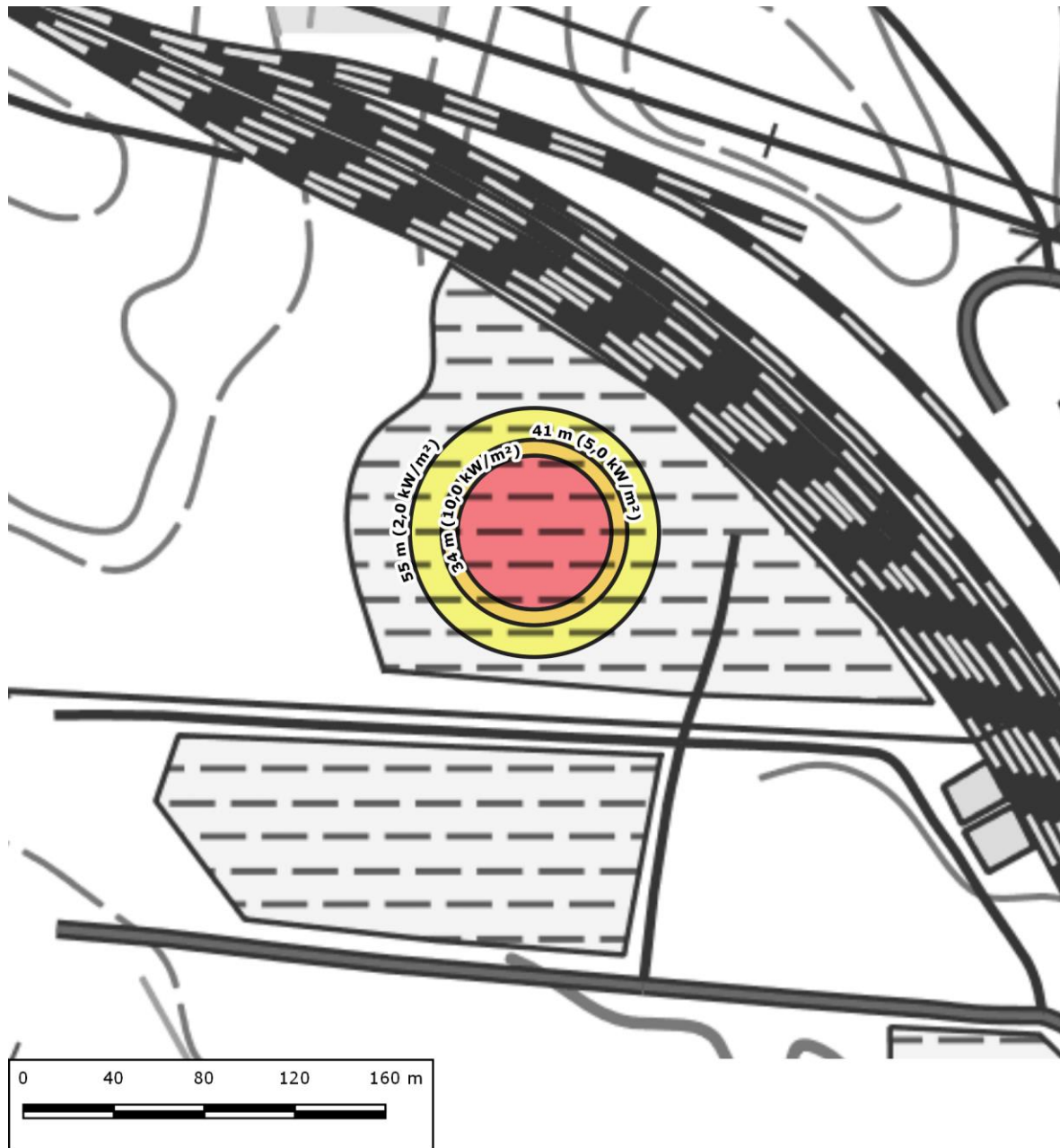


Suoja-altaaseen vuotaneen höyrystyneen ammoniakkin syttymisherkeit alueet on esitetty kuvassa 8. Tässä mallissa suoja-altaasta haihtuu 56 t ammoniakkia ilmaan tunnin aikana, ja aluksi päästönopeus on 1670 kg/min ja tunnin lopussa noin 600 kg/min. 100 % LEL-pitoisuus yltää 28 metrin etäisyydelle päästölähteestä. 60 % LEL-pitoisuus, joka voi yhä pitää sisällään tutkimusten mukaan syttymisherkkiä pitoisuuksia kemikaalia, yltää 36 m etäisyydelle päästöstä. 10 % LEL-pitoisuus on 91 metrin etäisyydellä päästölähteestä. Alueiden pienuuden takia ja koska päästölähteen lähellä ennuste on epävarmempi, ALOHA ei esitä 100 % LEL ja 60 % LEL -vyöhykkeitä. Koska LEL-pitoisuuden vyöhykkeet jäävät pieniksi, ei räjähdyksessä syntyvän paineaallon kokoa voitu mallintaa.



**Kuva 8. Suoja-altaaseen vuotaneen höyrystyneen ammoniakkin syttymisherkeit alueet (tuulen nopeus 3m/s). Päästö määrä 56 t/h, päästönopeus tunnin alussa 1670 kg/min.**

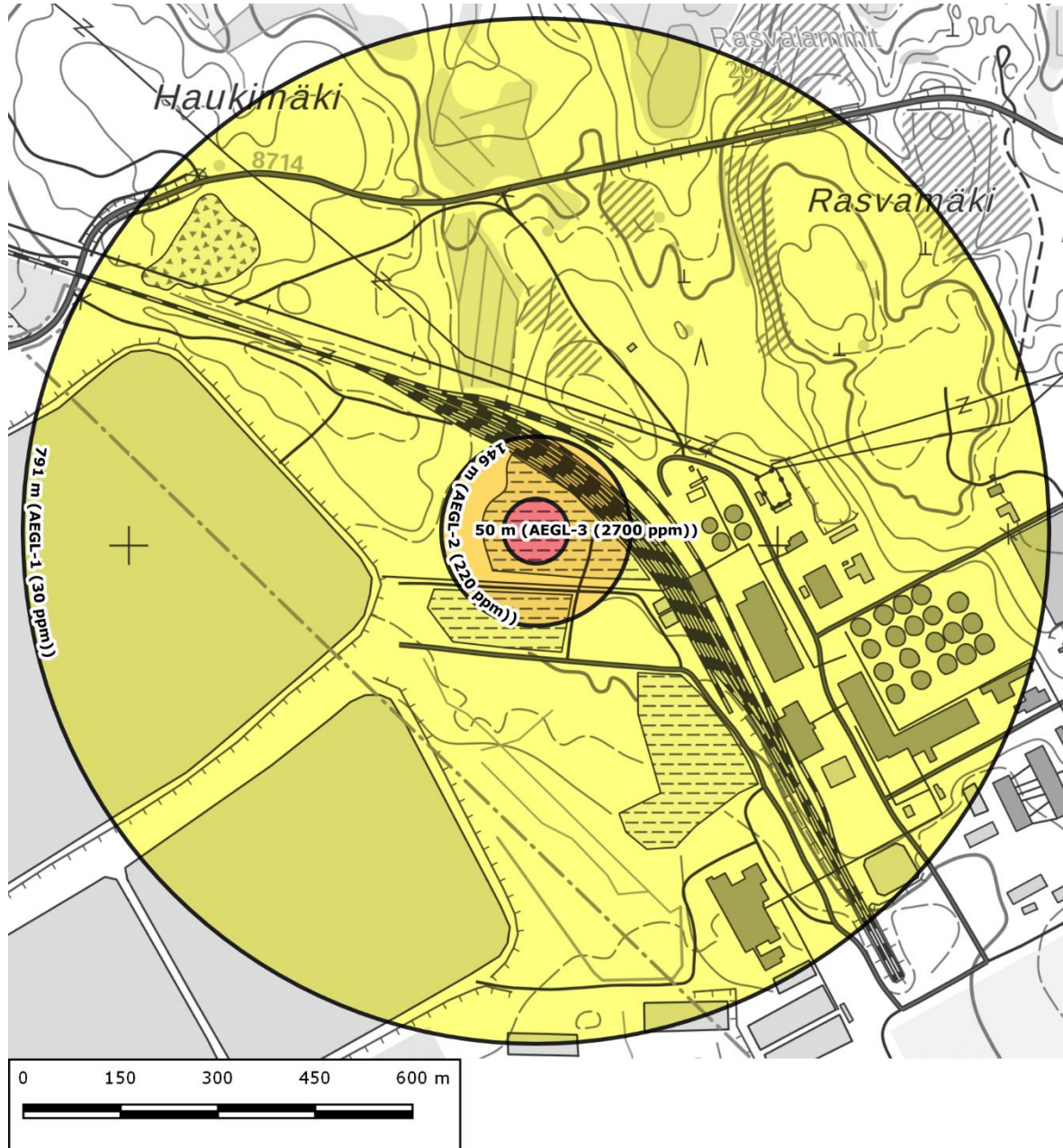
Palamaan syttyneen, suoja-altaaseen vuotaneen ammoniakkin vaikutusalue lämpösäteilyn intensiteettinä on esitetty kuvassa 9. Tässä mallissa suoja-altaasta haihtuu 56 t ammoniakkia ilmaan tunnin aikana, ja aluksi päästönopeus on 1670 kg/min ja tunnin lopussa noin 600 kg/min. Mahdollisesti hengenvaarallinen etäisyys ( $10 \text{ kW/m}^2$ ) ulottuu 34 metrin etäisyydelle. Toisen asteen palovammoja ( $5 \text{ kW/m}^2$ ) aiheuttava etäisyys yltää 41 metrin etäisyydelle. Kipua aiheuttava ( $2 \text{ kW/m}^2$ ) etäisyys yltää 55 metrin päähän suoja-altaasta.



**Kuva 9. Palamaan syttyneen suoja-altaaseen valuneen ammoniakkin vaikutusalue lämpösäteilyn voimakkuutena esitettynä (tuulen nopeus 3m/s). Päästö määrä 56 t/h, päästönopeus tunnin alussa 1670 kg/min.**

### 6.3 Ammoniakkisäiliön vuoto putken tai venttiilin kautta

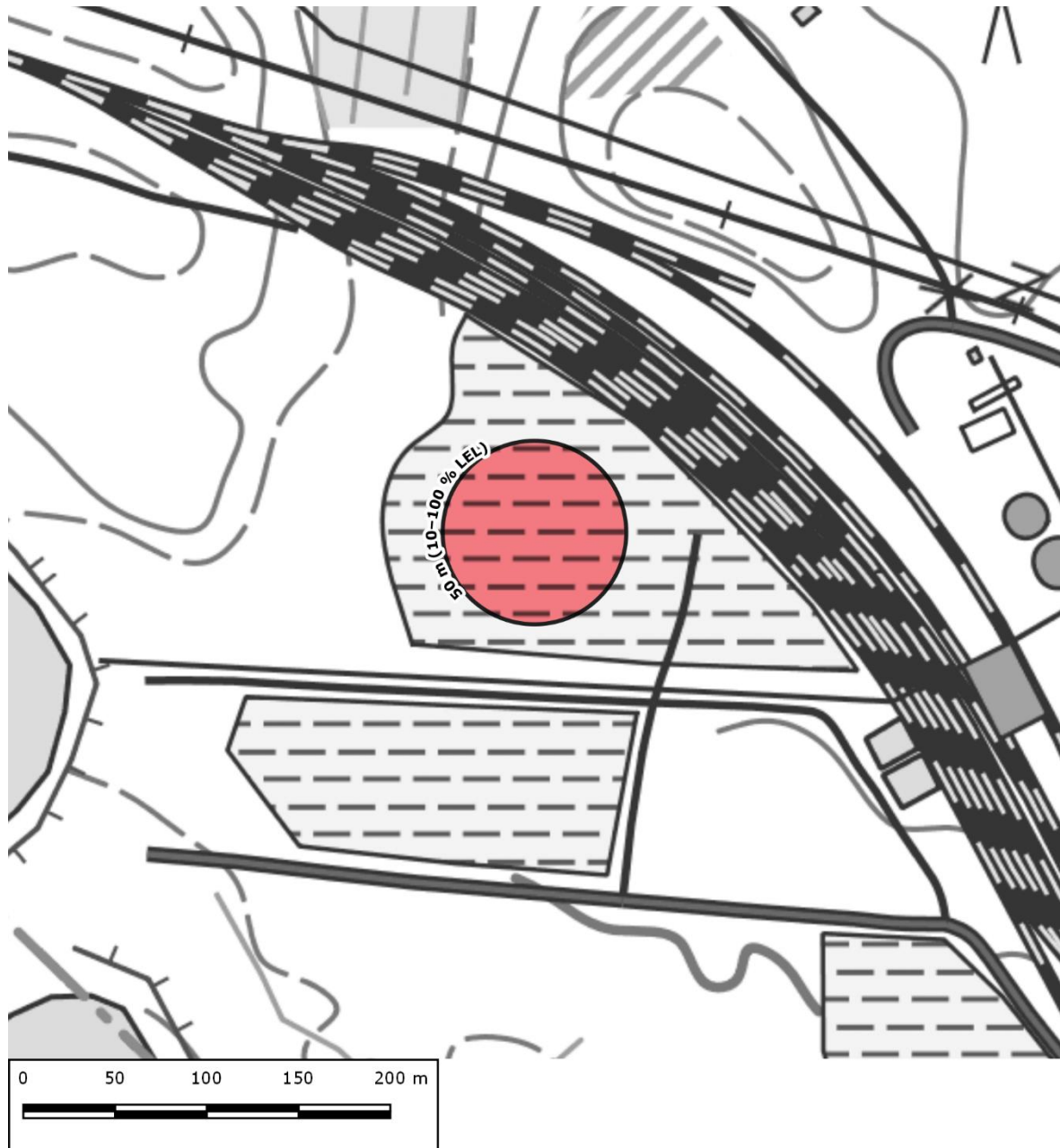
Ammoniakkisäiliön putken vaurioitumisen tai venttiilin hajoamisen yhteydessä tapahtuvan vuodon aiheuttama terveydelle vaarallisen pilven leviäminen ympäristöön on esitetty kuvassa 10. Päästö-määrä on 6,4 t/h ja päästönopeus 108 kg/min. Vuoto tapahtuu 40 mm halkaisijaltaan olevasta vuotokohdasta (lyhyt putki tai venttiili), vuotokohdan ollessa säiliön alaosassa. Kuvassa on verrattu pitoisuuksia 10 minuutin AEGL-arvoihin. 10 minuutin AEGL-rajojen etäisyydet päästölähteestä AEGL-3: 50 m, AEGL-2: 146 m ja AEGL-1: 791 m. Suurin ammoniakkipitoisuus oli 500 metrin etäisyydellä päästölähteestä 59 ppm, 1000 metrin päässä 20 ppm ja 2000 m etäisyydellä 6,5 ppm.



**Kuva 10.** Säiliön vaurioitumisen tai venttiilin hajoamisen johdosta syntyneen vuodon aiheuttamat leviämisyöhykkeet ympäristössä (10min AEGL, tuulen nopeus, 3m/s). Päästö-määrä on 6,4 t/h ja päästönopeus 108 kg/min.



Ammoniakkisäiliön vaurioitumisen tai venttiilin hajoamisen yhteydessä tapahtuvan vuodon aiheuttama syttymisherkät alueet on esitetty kuvassa 11. Päästö määrä on 6,4 t/h ja päästönopeus 108 kg/min. Vuoto tapahtuu 40 mm halkaisijaltaan olevasta vuotokohdasta (lyhyt putki tai venttiili), vuotokohdan ollessa säiliön alaosassa. ALOHAN mukaan kaikki vyöhykkeet (100 %, 60 % ja 10 % LEL) voivat ylittyä 50 metrin etäisyydellä päästölähteestä. Eri vyöhykkeitä ei laskettu tarkemmin, koska päästölähteen lähellä epävarmuus on suurta.

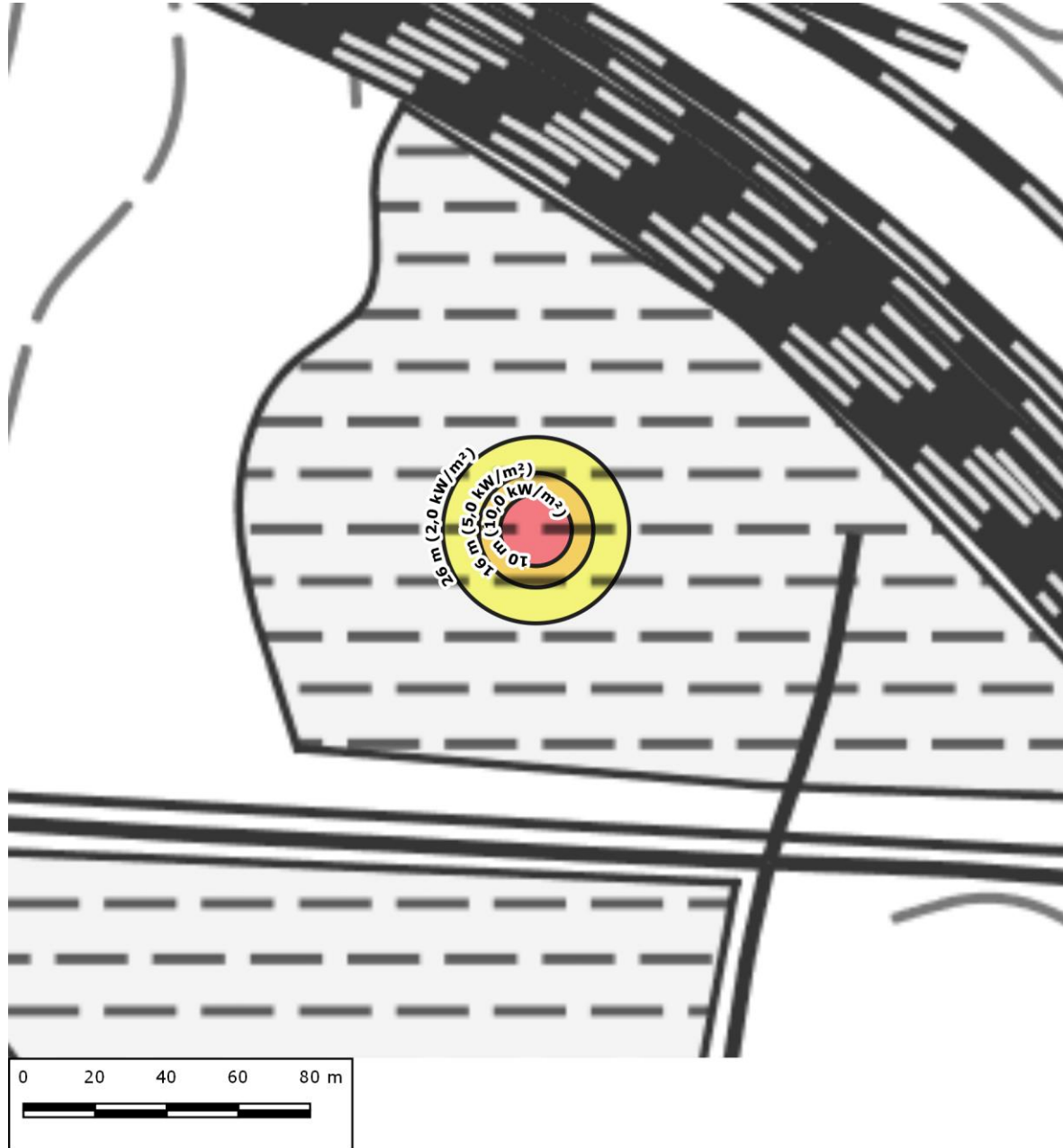


**Kuva 11. Säiliön vaurioitumisen johdosta syntyneen vuodon aiheuttamat ammoniakin syttymisherkät vyöhykkeet (tuulen nopeus 3m/s). Päästö määrä on 6,4 t/h ja päästönopeus 108 kg/min.**

Ammoniakkisäiliön vaurioitumisesta aiheutuneen vuodon muodostaman pilven räjähdyksessä syntyneen paineaallon vaikutusalueita tarkasteltiin mallinnuksessa. Päästö määrä on 6,4 t/h ja päästönopeus 108 kg/min. Vuoto tapahtuu 40 mm halkaisijaltaan olevasta vuotokohdasta (lyhyt putki tai venttiili), vuotokohdan ollessa säiliön alaosassa. Tilanne mallinnettiin hetkeen, jolloin päästön vapautumisen alkamisesta on kulunut 1 minuutti. Tulos on, ettei merkittävää paineaaltoa synny. Tämän vuoksi tilanteesta ei esitetä karttaa.



Palamaan syttyneen vaurioituneen ammoniakkisäiliön vuodon aiheuttaman tulipalon vaikutusalue lämpösäteilyn intensiteettinä on esitetty kuvassa 12. Päästö määrä on 27 t/h ja päästönopeus 447 kg/min. Ero päästö määrässä ilman palamista tapahtuvaan vuotoon johtuu siitä, että ammoniakki lämpenee ja siirtyy siten helpommin liekkiin. Vuoto tapahtuu 40 mm halkaisijaltaan olevasta vuotokohdasta (lyhyt putki tai venttiili), vuotokohdan ollessa säiliön alaosassa. Mahdollisesti hengenvaarallinen etäisyys ( $10 \text{ kW/m}^2$ ) ulottui 16 metrin etäisyydelle. Toisen asteen palovammoja ( $5,0 \text{ kW/m}^2$ ) aiheuttava vyöhyke ylsi 29 metrin etäisyydelle. Kipua aiheuttava ( $2,0 \text{ kW/m}^2$ ) lämpösäteilyn vyöhyke ulottui 49 metrin päähän ammoniakkisäiliöstä.



**Kuva 12. Palamaan syttyneen vaurioituneen ammoniakkisäiliön vuodon vaikutusalue lämpösäteilyn voimakkuutena esitettynä (tuulen nopeus 3m/s). Päästö määrä on 27 t/h ja päästönopeus 447 kg/min.**

## 7. TULOSTEN TARKASTELU

Tässä työssä mallinnettiin ammoniakkin leviämistä ympäristöön onnettomuustilanteessa jatkuvana suorana päästönä, vuotona suoja-altaaseen sekä säiliön rikkoutumisesta johtuvana vuotona. Onnettomuusmallin tulosten perusteella ammoniakki voi pahimmassa tapauksessa aiheuttaa vuototilanteessa huomattavia terveyshaittoja jopa 1600 metrin etäisyydellä säiliön sijoituspaikasta. Vakavien, jopa hengenvaarallisten terveyshaittojen alue (AEGL-3) voisi ulottua jopa 570 metrin etäisyydelle tuulen alapuolelle päin.

Ammoniakkipilven syttymisherkkä pitoisuus voisi ylittyä mahdollisesti jopa 50 metrin etäisyydellä vuodosta. Ammoniakin syttymisestä aiheutuvan tulipalon lämpösäteily voisi aiheuttaa toisen asteen palovammoja tai pahempia vaikutuksia 41 metrin etäisyydellä vuotokohdasta. Mahdollisesti räjähtävän ammoniakkihöyryn painevaikutus voisi rikkoa lasia 69 metrin etäisyydellä.

Jyväskylässä 14.9.2018

**RAMBOLL FINLAND OY**



Toni Keskitalo  
FM, tutkimuspäällikkö



Anne Kiljunen  
FM, ympäristöasiantuntija

## 8. VIITTEET

### **Käytetyt ohjelmistot:**

ALOHA: <https://www.epa.gov/cameo/aloha-software>

### **Käytetyt haittaluokitukset:**

AEGL-arvot 2007, Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals: Volume 6. Committee on Acute Exposure Guideline Levels, Committee on Toxicology, National Research Council. [https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-11/documents/ammonia\\_final\\_volume6\\_2007.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-11/documents/ammonia_final_volume6_2007.pdf)

EPRG-arvo 2014, Emergency response planning guideline – Ammonia. <https://www.aiha.org/get-involved/AIHAGuidelineFoundation/EmergencyResponsePlanningGuidelines/Documents/Final%20Ammonia%20document%20for%202014%20set.pdf>

IDLH-arvot 1994, Immediately Dangerous to Life or Health Concentrations (IDLH), The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). <https://www.cdc.gov/niosh/idlh/7664417.html>

HTP-arvot 2018, Haitallisiksi tunnetut pitoisuudet, Sosiaali- ja terveysministeriön Julkaisuja 8/2018: [http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/160967/STM\\_09\\_2018\\_HTParvot\\_2018\\_web.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/160967/STM_09_2018_HTParvot_2018_web.pdf?sequence=1&isAllowed=y)