



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
KAITSE- JA JULGEOLEKU-UURINGUTE KESKUS

Eksperthinnang

„ Ülerõhu piirväärtuste ning ohualade määramine”

Tõnu Tomberg

Katrin Ilda

Marek Strandberg

Tallinn

2015

Sisukord

Eessõna

Sissejuhatus

1. *Teoreetilised alused ja mõisted*
 - 1.1. *Plahvatusel tekkiv lööklaine*
 - 1.2. *Taandatud kaugus*
 - 1.3. *Trotüülekivalent*
2. *Õhulööklaine kahjustav mõju*
 - 2.1. *Õhulööklaine kahjustav mõju inimestele*
 - 2.2. *Õhulööklaine kahjustav mõju ehitistele*
3. *Eri liiki ehitiste tolereeritavad kahjustused võimaliku avarii puhul*
4. *Õhulööklaine prognoosi võimalused*
5. *Järeldused ja soovitused*
6. *Kasutatud kirjandus*

Lisad

Eessõna

Käesolev töö on tehtud Siseministeeriumi tellimisel Vabariigi Valitsuse 17.02.2011 määruse nr 28 „Nõuded ohtliku ja suurõnnetuse ohuga ettevõtte kohustuslikule dokumentatsioonile ja selle koostamisele ning avalikkusele edastatavale teabele ja õnnetusest teavitamisele“ lisas oleva tabeli (edaspidi nimetatud tabel) kohta¹. Eksperthinnangu koostamisel on lähtutud lähteülesandes püstitatud küsimustest².

Töö lähteülesandes püstitatud põhiküsimuseks on: **kas täna kasutusel olevad parameetrid on adekvaatsed või mitte?**

Sissejuhatus

Käesolev ülerõhu piirväärtuste ning ohualade määramise täpsustuste leidmisele pühendatud töö põhineb peamiselt NATO-s lõhkematerjalide käitlemises kasutataval kogumikul Allied Ammunition Storage and Transportation Principles (AASTP), täpsemad viited kasutatud kirjanduse loetelus), avalikel materjalidel ja Marelle Paas-O’Brocki lõputööl „Õhulööklaine prognoos võimaliku avarii puhul lõhkeaine käitlemisel“ (TTÜ, 2015).

Töös kasutatud arvutusel on dünaamilise ülerõhu väärtuste mõõtühikuna kasutatud peamiselt SI mõõtühikut kPa, mitte süsteemivälist mõõteühikut bar (kui see tekstis eraldi välja toodud ei ole).

Seose asjaoluga, et plahvatusel tekkiva õhulööklaine kahjustavate faktorite arv väärtus on määratav kahe parameetriga – plahvatava aine netomassi ja kaugusega plahvatuse keskmest, on kasutatud maailmapraktikas väga laialdaselt kasutusel olevat, neid kahte suurust ühendavat tinglikku suurust – *taandatud kaugust plahvatuskohast (Scaled Distance)*.

¹ Lisa 1: Tabel

² Lisa 2: Lähteülesanne

1. Teoreetilised alused ja mõisted

1.1. Plahvatusel tekkiv lööklaine

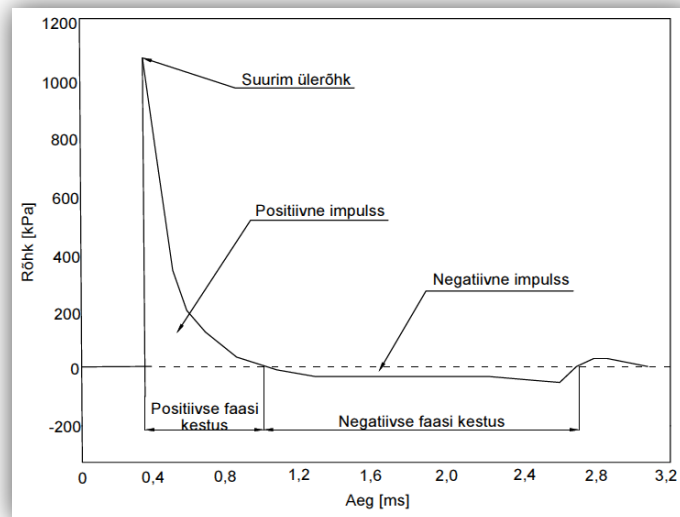
Plahvatava materjali (näiteks lõhkeaine või ammooniumnitraadi NH_4NO_3) detonatsioonil vabaneb väga kiiresti suur hulk soojusenergiat (1,3 - 6,3 MJ/kg) ning tekib hulgaliselt gaasilisi plahvatussaaduseid (0,3 - 1,0 m³/kg). Keemilised reaktsioonid liiguvad plahvatavas aines kiirusega reeglina üle 200 m/s, tavaliselt isegi üle 1000 m/s. Gaasilised plahvatussaadused (reeglina süsinikmonooksiid CO, süsinikdioksiid CO₂, lämmastik N₂, lämmastikuoksiidid N_xO_y ja veeaur H₂O) kuumenevad plahvatusel vabaneva energia mõjul väga kõrgete temperatuurideni (kuni 3000°C) ning avaldavad paisudes ümbritsevale keskkonnale kõrget rõhku (30 – 40 MPa plahvatava materjali vahetus läheduses) [1, 2]. Plahvatavast materjalist väljudes suureneb paisuvate plahvatussaaduste maht nende rõhu atmosfäärirõhuni alanedes ligikaudu 10 000 korda. Plahvatusel moodustub kiiresti paisuvate plahvatusgaaside mõjul ülehelikiirusega liikuv lööklaine.

Lööklaine omadused:

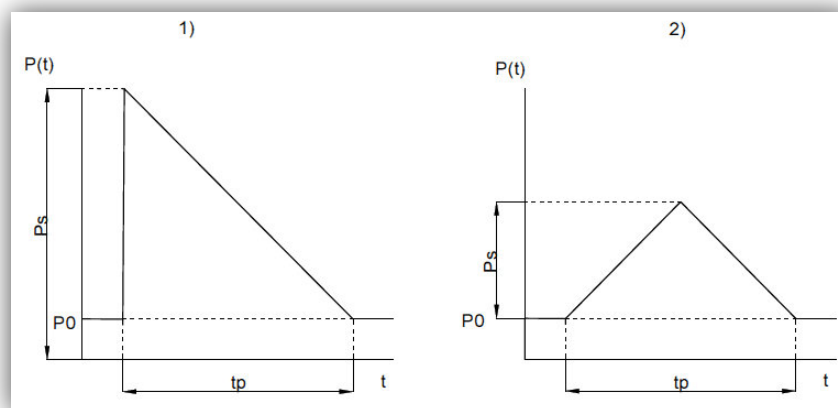
- selle kiirus on alati suurem heli kiirusest antud keskkonnas
- selle kiirus sõltub võnkeamplituudist;
- selle frondil (äärmiselt kitsas hetkelise rõhu tsoonis) suurenevad hüppeliselt keskkonna rõhk, temperatuur ja tihedus, lööklaine rõhufrondi taga alanevad keskkonna temperatuur ja tihedus kiiresti; plahvatusgaaside keskkond liigub lööklaine frondi järel;
- teatud kaugusel plahvatuse koldest lööklaine sumbub ja muutub kas seismiliseks või helilaineks;
- lööklaine võib tekkida ja levida nii gaasilises, vedelas kui tahkes keskkonnas.

Kui õhulööklaine liigub plahvatuspunktist eemale, väheneb selle rõhk kuni võrdsustumiseni atmosfäärirõhuga. Joonisel 1 [1-4] on esitatud õhulööklaine rõhu sõltuvus ajast ning õhulööklaine põhiparameetrid. Õhulööklaine

koosneb kahest faasist: positiivsest faasist³ ja negatiivsest faasist⁴. Positiivse faasi ja atmosfäärirõhu vahe absoluutväärtus on ülerõhk. Ülerõhu joone ja ajatelje vaheline pindala on lööklaine impulss, ajaintervall, kus rõhk on atmosfäärirõhust kõrgem, on lööklaine positiivse faasi kestus [5, 6]. Negatiivse faasi vältel tekib hõrendus ning toimub atmosfääriõhu algele liikumisele vastassuunaline sissetung [7].



Joonis 1. Õhulööklaine põhiparameetrid



Joonis 2. Õhulööklaine lihtsustatud graafikud

P_0 – atmosfäärirõhk, P_s – tipprõhk, t_p – ülerõhu positiivse faasi kestus. Vasakul (1): suure võimsusega (kiire) plahvatuse õhulööklaine. Paremalt (2): väikse võimsusega (aeglase) plahvatuse õhulööklaine.

³ inglise keelne termin *Pressure*

⁴ inglise keelne termin *Suction*

Õhulööklainet võib juhul, kui negatiivne faas on ülerõhu maksimumväärtusest (tipprõhust) oluliselt (mitme suurusjärgu võrra) väiksema väärtusega, kujutada ka mõnevõrra lihtsustatuna (kolmnurgakujulise graafikuga väljendatuna) ning praktilistes arvutustes ei ole sel juhul vajalik negatiivset faasi arvestada. Joonisel 2 [4, 8] on toodud rõhu ja aja sõltuvus lihtsustatud kujul; graafik näitab, milline on rõhu sõltuvus ajast mõnes kindlas punktis.

Peamisteks füüsikalisteks parameetriteks, mis määravad õhulööklaine kahjustava mõju inimestele ja mitmesugustele rajatistele on lööklaine impulss ja tipprõhk. Seejuures ilmnevad kahjustavad mõjud (ületatakse kahjustuste lävi) vaid sellisel juhul, kui tipprõhk ületab mingi kindla piirtaseme [3, 9].

Õhulööklaine ülerõhk ja impulss sõltuvad peamiselt kolmest faktorist:

- plahvatava materjali kogusest (plahvatusel vabaneva energia suuruselt);
- plahvatava materjali plahvatuskiirusest (plahvatuse võimsusest);
- kaugusest plahvatuskohast.

Õhulööklaine ülerõhu ja impulsi väärtused suurenevad plahvatava materjali koguse suurenemisel ja vähenevad koos laine liikumise kiiruse vähenemisega kauguse kasvades plahvatuskohast. Need sõltuvused on väljendatavad eksponentfunktsioonidega [3, 9, 10].

1.2. Taandatud kaugus

Erinevad plahvatava materjali kogused tekitavad samal kaugusel erineva tipprõhu ja impulsi õhulööklaineid. Sama plahvatava materjali koguse plahvatused erinevatel kaugustel tekitavad erineva tipprõhu ja impulsi õhulööklaineid. Selleks, et erinevatel kaugustel toimivate ja erinevate plahvatanud ainete koguste plahvatuste analüüsid oleksid omavahel võrreldavad, on maailmapraktikas üldtunnustatuks kujunenud *taandatud*

kauguse⁵ (d_s) mõiste kasutamine. Taandatud kaugus on tinglik suurus, mis arvestab plahvatava aine massi ning kauguse plahvatuskohast koosmõju. Taandatud kauguse leidmiseks kasutatakse järgmist valemit [3, 9, 11]:

$$d_s = d Q^n \quad (1)$$

kus: d – mõõtekaugus (m) ja Q – plahvatava aine mass (kg)

Astendaja n väärtus sõltub plahvatuskeskkonnast ja plahvatuse mõjukaugusest. Kuna keskkonna (atmosfääriõhu) parameetrite varieerumine avaldab õhulööklaine intensiivsusele vaid marginaalset mõju, jääb määravaks plahvatuse mõjukaugus.

Õhulööklaine prognoosimisel kasutatakse astendajat $-1/3$, sest õhulööklaine pinda võib vaadelda sfäärilise ehk kerapinnana. Samas aga kasutatakse maapõues toimuvate plahvatuste tekitatud seismiliste lainete prognoosil astendajat $-1/2$, sest seismilise laine pinda võib vaadelda tasapinnana [3, 9, 11].

1.3. Trotüülekivalent⁶

Kuna plahvatavate ainete plahvatuste võimsused on erinevad (erinevad on ainete plahvatuskiirused ja plahvatusenergiad), on plahvatuste analüüside võrreldavaks muutmiseks vajalik taandada plahvatavad ained mingile etalonile. Praegu on maailmapraktikas plahvatuste analüüsil praktiliselt ainsaks etaloniks kujunenud trinitrotoluool, $C_7H_5N_3O_6$ (TNT), mille alusel analüüsitakse ja modelleeritakse praktiliselt kõiki (sealhulgas lõhkeainete, termobaarilisi ja tuuma-) plahvatusi.

Käesoleval ajal on erinevate plahvatuste energia ja võimsuse kompleksseks võrdluseks kasutusel trotüülekivalent, mis plahvatavate ainete juures

⁵ inglise keelne termin: *Scaled Distance*

⁶ inglise keelne termin: *Relative Effectiveness Factor (REF)*

näitab, kui suure TNT koguse plahvatus tekitaks mingi plahvatava aine ühe massiühiku plahvatusega võrdse võimsuse [3, 9, 12, 13].

Erinevate plahvatavate ainete trotüülekvalendid on määratud empiirilisel (katsetustele tuginedes). Näiteks lõhketöödel enimkasutatava lõhkeaine ANFO (samuti võib sellega võrdsustada kuiva ammooniumnitraadi) TNT ekvivalent on 0,81, st 1 kg ANFO plahvatusel tekib samasugune võimsus, kui 0,81 kg TNT plahvatusel [3].

Ammooniumnitraadi trotüülekvalendi kohta ühtsete andmete leidmine on suhteliselt komplitseeritud. Nii on AASTP-4-s antud selle väärtuseks piirid 0,4 kuni 0,7. Samas aga *US Army Field Manual 5-250: Explosives and Demolition*, pakub selle väärtuseks üheselt 0,4 [18]. Lisaks sellele on kirjanduses [19] pakutud väärtusi 0,4 kuni 0,6. Õhulööklaine parameetrite prognoosimisel oleks soovitatav kasutada ammooniumnitraadi trotüülekvalendi kõige tõenäolisemat väärtusvahemikku 0,4 kuni 0,6. Samas aga võib trotüülekvalendi mõju suurte ammooniumnitraadi koguste (mõõdetavad tuhandetes tonnides) plahvatuste õhulööklaine parameetrite prognoosil pidada teisejärguliseks võrreldes koguse ja kauguse mõjudega (taandatud kauguse mõjuga) võrreldes (vt 4. ptk toodud arvutusnäidet).

Prognooside tegemisel tuleb silmas pidada ka asjaolu, et ammooniumnitraat (nagu ka paljud teised soolad) hakkab nn *kriitilise õhuniiskuse* saavutamisel absorbeerima õhust niiskust. Ammooniumnitraadi puhul on kriitilise suhtelise õhuniiskuse väärtus 59,4%. Niiskunud ammooniumnitraadi isesüttivuse tõenäosus on pea olematu kuid samas on jätkuvalt tegemist tugeva oksüdeerijaga, mis kokkupuutel muude orgaaniliste ainetega muutub ohtlikuks.

2. Õhulööklaine kahjustav mõju

2.1. Õhulööklaine kahjustav mõju inimestele

Plahvatuse lööklaine kahjustab inimesi otseselt sisemiste vigastuste tekitamisega. Kaudsed kahjustavad mõjud on inimeste õhkupaiskumine ja vastu takistusi paiskumine, kukkuvate esemete alla jäämine ning klaasikildudest põhjustatud haavad. Vigastused olenevad suuresti sellest, kui kiiresti tõuseb rõhk, kui kõrge on suurim ülerõhk ning kui pikk on lööklaine positiivse faasi kestus [3,7,9].

Otseselt ülerõhu poolt tekitatavate vigastuste ulatus sõltub eelkõige plahvatuse impulsist (tipprõhu ja lööklaine positiivse faasi kestuse koosmõjust) - mida suurem on tipprõhu väärtus ja/või lööklaine positiivse faasi kestus, seda tõsisemad on vigastused. Seejuures aga on vigastuste tekkimiseks vajalik teatud tipprõhu lävetasandi ületamine [14].

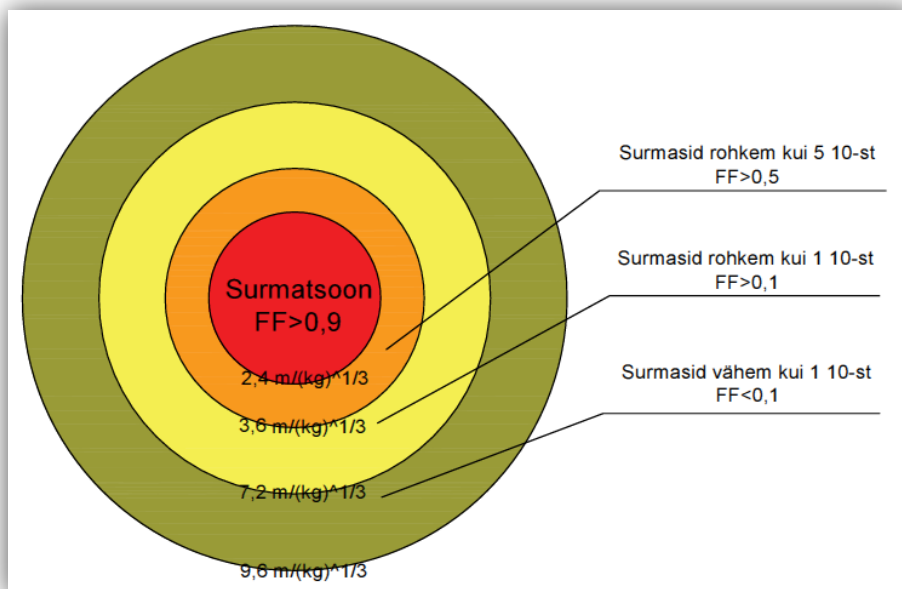
NATO-s kasutatakse plahvatustel tekkivate inimkaotuste prognoosimiseks USA-s välja töötatud taandatud kaugusel põhinevat nn „surmafaktori“ (FF)⁷, meetodit. Selle meetodi puhul määratakse ohualade piirid sõltuvalt taandatud kauguse väärtusest, st mida lähemal on inimene plahvatuskohale (sama plahvatava aine koguse juures) või mida suurem kogus plahvatab (samal kaugusel), seda suurem on tema hukkamise tõenäosus.

„Surmafaktor“ (FF) on selle meetodi puhul kaitsevahenditeta inimese hukkamise tõenäosus mingil taandatud kaugusel plahvatuskohast. Meetodi üheks eeliseks on asjaolu, et samal taandatud kaugusel plahvatuskohast on (trotüülekvalenti arvestades) õhulööklaine kahjustavad parameetrid (tipprõhk ja impulss) ühesugused. Seega on erinevad võimalikud plahvatused paremini võrreldavad ja riskianalüüside tulemused usaldusväärsemad. Meetodi teise eelisena võib välja tuua asjaolu, et see arvestab komplekselt plahvatusel tekkiva õhulööklaine otseseid ja kaudseid mõjusid inimesele, vt tabelleid 1 ja 2 [3,9].

Joonisel 3 ja tabelis 1 on näidatud, et FF sõltub otseselt taandatud

⁷ inglise keelne termin: *Fatality Factor*

kaugusest, st, mida väiksem on taandatud kaugus, seda suurem on ka hukkumise tõenäosus. Nn „Surmatsoonis“ on hukkumise tõenäosus üle 90%. [3,4]



Joonis 3. „Surmafaktori“ (FF) sõtuvus taandatud kaugusest

Tabel 1. „Surmafaktori“ (FF) sõtuvus taandatud kaugusest

Taandatud kaugus ds [$\frac{m}{\sqrt[3]{kg}}$]	FF ehk hukkumise tõenäosus plahvatusel
Alla 2,4	Üle 90%
2,4	ligikaudu 90%
2,4 kuni 3,6	Üle 50%
3,6 kuni 7,2	Üle 10%
7,2 kuni 9,6	Alla 10%
22,2	1%

2.2. Õhulööklaine kahjustav mõju ehitistele

Ehitiste läheduses toimuvad plahvatused on suure impulsi ja tipprõhuga, kuid samas mõjutavad vaid teatud osa ehitisest. Ehitistest kaugemal toimuvad plahvatused mõjuvad ehitisele vähem intensiivselt, kuid mõjutavad

kogu ehitist madalama tipprõhu, kuid kauem kestva impulsiga. Lõpuks on kogu struktuur lööklaine poolt „kaetud“ ning lööklaine peegeldumise, murdumise ning peegeldunud ja murdunud lainete difraktsiooni tõttu tekivad hoones alad, mis on suuremal või vähemal määral kahjustatud. Lööklaine negatiivse faasi kestel võivad hoonet mõjutada ka laialipaiskuvad rusud. Õhulööklaine kahjustuse ehitisele võib jagada kaheks: otsene mõju, sellele järgnevad progresseeruvad kahjustused ja ehitise kokkuvarisemine [7,15,16].

Kui hoone välisseinad peavad üldjuhul lööklaine mõjule vastu, siis lööklaine front läbib aknaid ja uksi, kahjustab põrandaid, vahelagesid ja siseseinu ning tekitab inimestele vigastusi klaasikildude ja kukkuvate esemete poolt. Hooneosad, mis ei ole piisavalt suure tugevusega, mõranevad, purunevad ja nihkuvad lööklaine ülerõhu mõjul. Hoonete sees olevad inimesed ja esemed paiskuvad õhulööklaine liikumise suunas [3,7].

Ehitise vastupanuvõime analüüs dünaamilisele ülerõhule on äärmiselt komplitseeritud. Analüüsi käigus tuleb arvestada ehitise vastupidavust suurele pingele, ehitismaterjalide elastsus- ja plastsusomadusi, ehitise omavõnkesagedust ning ehitise ajast sõltuvaid deformatsioone. Seejuures on plahvatusefektid suures osas määramatud [17]. Ehitise vastupidavuse prognoosimisel tuleb arvestada kahjustuste mõttes kõige ebasoodsamat plahvatava materjali asukohta [16]. Riskianalüüside tegemisel tuleb arvestada, et eeldatavaid hoone kahjustusi ja inimeste vigastusi ei saa ennustada saajaprotsendilise täpsusega. Samas aga on võimalik piisavalt usaldusväärne prognoosimine, arvestades taandatud kaugust (plahvatava materjali koguse ja kauguse koosmõju) ning hoone ehitust [3,16].

Üldiselt sõltub ehitist mõjutava õhukööklaine intensiivsus ning selle jaotus ehitises kahest tegurist:

1. taandatud kaugus (mis materjal plahvatab, selle trotüülekvivalent, plahvatava materjali kogus, plahvatuse asukoht ehitise suhtes;
2. rõhu peegeldumine hoonetelt või maapinnalt.

Võrreldes plahvatuse õhulööklainet teiste hooneid mõjutavate nähtustega (näiteks maavärinad, tormituuled, üleujutused), on plahvatusel mõned erilised omadused. Plahvatus võib olla palju võimsam kui teised nimetatud jõud, kuid lööklaine liikumisel plahvatuspunktist eemale vähenevad selle tipprõhk ja impulss väga kiiresti. See tähendab, et majapoolel, mis asub laengust kaugemal, võivad kahjustused olla oluliselt väiksemad kui plahvatuspoolisel küljel. Lisaks on plahvatuse ja lööklaine kestus väga lühiajaline, mõõdetav millisekundites, mitte sekundites, minutites või veel pikemates ajaühikutes kui teistel eelpool nimetatud nähtustel.

Hoonete puhul on üldiselt nõrgimaks lülleks klaas, mis puruneb tunduvalt madalama rõhu korral kui põrandad, seinad ja talad. Klaasikillud, mis plahvatuse korral paiskuvad suure kiirusega, on väga olulised vigastuste tekitajad ning raskendavad pääste- ja hilisemaid koristustöid. Seega on juhul, kui hoones viibivad plahvatuse hetkel inimesed, hoone kahjustused ja inimeste vigastused omavahel seotud. Tabelis 2 on esitatud õhulööklaine tipprõhu, hoonete kahjustuste ja inimeste vigastuste sõltuvus taandatud kaugusest [3, 4, 9, 10].

Kahjulike mõjude vähendamine, seire.

Plahvatuse kahjustavat mõju aitavad vähendada plahvatusohtlike materjalide ladustamiskohtade ümber rajatud kaitsevallid. Efektiivne kaitsevall tõkestab plahvatuse edasikandumise avariipaiga lähedal asuvatele objektidele (suunates lööklaine ülespoole) ning pakub plahvatusohtliku materjali laole endale kaitset väliste õnnetuste eest. Kõrge kaitsevall, mis asub võimalikule avariipaigale väga lähedal, aitab vähendada tükkide laialipaiskumist [9].

Kütuseterminalides, ladudes ja tööstuses ning raudteesõlmedes, kus on oht, et võib toimuda gaasifaasis orgaanilise aine lekkeid, on soovitatav üles ehitada infrapunakaameratel põhinev seiresüsteem. Gaasilises olekus orgaanilistel ainetel on iseloomulik infrapunakiirguse neelduvus ning seetõttu on võimalik jälgida ja mõõta lekkeid infrapunasensoritega varustatud kaameratega, mis toimivad lainepikkusvahemikus 3-5µm. Infrapunakaamerate süsteem on põhimõtteliselt

integreeritav juba olemasoleva videovalvesüsteemiga ning vajadusel on tulemuste analüüs automatiseeritav nii, et süsteem annab häireolukorrast teada automaatselt. Orgaanilise aine lekete ulatused ning plahvatusohtlike pilvede kulg on optiliselt jälgitav [20, 21].

Tabel 2. Õhulööklaine tipprõhu, hoonete kahjustuste ja inimeste vigastuste sõltuvus taandatud kaugusest

TAANDATUD KAUGUS, $\left[\frac{m}{\sqrt[3]{kg}}\right]$	LÖÖKLAINE TIPPRÕHK, kPa/bar	KAHJUSTUSTE ISELOOM	INIMESTE VIGASTUSED	FF, %
2,4 ja alla	180/1,8	Tavaehitiste täielik hävimine, tugevate raudbetoonehitiste olulised purustused.	Ellujäämise võimalused praktiliselt puuduvad.	90 ja üle
3,6	70/0,7	Tavaehitistel praktiliselt täielik purunemine. Tugevate raudbetoonehitiste (sillad, sadamakaid jms) vigastused.	Tõsised ja surmavad vigastused nii lööklainest kui ehitiste kokkuvarisemisest ja laialipaiskuvatest esemetest, samuti paiskumistest vastu takistusi.	Üle 50
7,2	24/0,24	Tellishoonete keskmised vigastused, kerge kivi- ja puithoonete täielik purunemine. Tavaehitistel remondikulutused üle 50% täielikest asenduskuludest. Võimalik autode ümberpaikumine. Elektriülekande õhuliinide tõsised vigastused.	Tõenäolised püsivad kuulmiselundite kahjustused (trumminaha purunemine). Tõsised ja surmavad vigastused peamiselt ehitiste kokkuvarisemisest ja laialipaiskuvatest esemetest.	Üle 10
8	21/0,21	Ehitistel puitseinte (mitte palkseinad) purunemine, tavaehitiste tõsised kahjustused. Remondi maksumus kuni 30% täielikest asenduskuludest. Autode olulised vigastused. Laevadeluste ja veekindlate vaheseinte kõverdumine.	Tõenäolised ajutised kuulmiselundite kahjustused. Tõsised ja surmavad vigastused peamiselt tekitatud ehitiste kokkuvarisemisest ja laialipaiskuvatest esemetest.	10

9,6	16/0,16	Tavaehitistel oluliste struktuurielementide kahjustused. Remondi maksumus kuni 20% täielikest asenduskuludest. Autodel kere ja katuse metallosade kerged kahjustused, lööklaine poole suunatud aknapinnad võivad puruneda.	Lühiajaline kuulmise kaotus, seejuures on kuulmiselundite püsivad kahjustused äärmiselt ebatõenäolised. Tõenäolised vigastused klaasikildudest ja laialipaiskuvatest esemetest.	Alla 10
14,8	9/0,09	Aknaraamide, uste ja kergete vaheseinte purunemine, kergete kuuride ja barakkide purunemine. Tavaehitiste puhul keskmise ulatusega kahjustused, remondimaksumus kuni 10% täielikest asenduskuludest.	Tõsised vigastused ebatõenäolised. Suure tõenäosusega tekitab vigastusi lendavate klaasikildude ja kukkuvate esemete poolt.	1
22,2	5/0,05	Aknaklaaside täielik purunemine, aknaraamide ja uste vähese ulatusega kahjustused, krohvi ja kergete vaheseinte rikkumine, korstnate vigastused. Kahjustuste remondimaksumus kuni 5% täielikest asenduskuludest.	Kerged vigastused, mis on põhjustatud klaasikildudest ja kukkuvatest esemetest.	Alla 1
33,3	3/0,03	Aknaklaaside täielik purunemine plahvatusepoolsel küljel ning ulatuslik purunemine teisel küljel.	Juhuslikud vigastused klaasikildudes	
44,4	2/0,02	Aknalaaside ulatuslik (üle 50%) purunemine plahvatusepoolsel küljel.	Praktiliselt puuduvad	

3. Eri liiki ehitiste tolereeritavad kahjustused võimaliku avarii puhul

Eri tüüpi objektide tolereeritavad kahjustused (suhteliselt väikese tõenäosusega) võimaliku avarii (plahvatuse) puhul sõltuvad eelkõige ohustatud objekti liigist. Eelkõige tuleb seejuures arvestada inimeste kaitset. Esmatähtis on, kui palju ja milliseid inimesi objektil liigub ning millised on avarii korral võimalused nende evakueerimiseks.

Tolereeritavad purustused tuleks plahvatusohtlike materjalide ladustamisel valida analoogiliselt lõhkematerjalide ladude puhul kasutatavatega. Lõhkematerjalide ladustamisel kehtivad eri tüüpi kaitstavatele (ohustatud) objektidele järgmised õhulööklaine tipprõhu ja taandatud kaugusega seonduvad tolereeritavad purustused:

- **Haigla, vanadekodu, lasteaed** või muu ehitis, milles toimuvad suured kogunemised ning kust on raske ka väike arv inimesi kiiresti välja viia – tolereeritav on aknalaaside ulatuslik (üle 50%) purunemine plahvatusepoolsel küljel, õhulööklaine tipprõhk ei tohi olla suurem kui 2 kPa (0,02 bar) ja taandatud kaugus väiksem kui $d_s = 44,4$;
- **Kool, kasarm või elamurajoon** ehk ehitised, kus toimuvad suured kogunemised, kuid millest on üsna lihtne inimesi evakueerida – tolereeritav on aknaklaaside täielik purunemine plahvatusepoolsel küljel ning ulatuslik purunemine teisel küljel; dünaamiline ülerõhk ei tohi olla suurem kui 3 kPa (0,03 bar) ja taandatud kaugus väiksem kui $d_s = 33,3$;
- **Üksik elumaja, tööstus- või ühiskondlik hoone, üle 100 m³ mahuga vedelkütuse või gaasi hoidla** – tolereeritav on aknaklaaside täielik purunemine, aknaraamide ja uste vähese ulatusega kahjustused, krohvi ja kergete vaheseinte rikkumine ning korstnate vigastused; dünaamiline ülerõhk ei tohi olla suurem kui 5 kPa (0,05 bar) taandatud kaugus väiksem kui $d_s = 22,2$;
- **Üldkasutatav tiheda liiklusega maantee, raudtee või laevatee; sadam, lennuväli, üle 10 m³ mahuga vedelkütuse, gaasi või**

mürkkemikaalide hoidla; survestatud gaasijuhe – tolereeritav on aknaraamide, uste ja kergete vaheseinte purunemine, kergete kuuride ja barakkide purunemine; tavaehitiste puhul keskmise ulatusega kahjustused ning remondimaksumus kuni 10% täielikest asenduskuludest; dünaamiline ülerõhk ei tohi olla suurem kui 9 kPa (0,09 bar) taandatud kaugus väiksem kui $d_s = 14,8$;

- **Hooajaliselt kasutatav elamu, hõreda liiklusega maantee, raudtee või laevatee** – tavaehitistel on tolereeritav oluliste struktuurielementide kahjustused ning remondi maksumus kuni 20% täielikest asenduskuludest; autode kere ja katuse metallosadel kerged kahjustused, lööklaine poole suunatud aknapindade purunemine; lennukitel väljaulatuvate osade ja kere suurte pindade vähese ulatusega kahjustused; kaubalaevade vähesed tekiehitiste ja tundliku elektroonikaaparatuuri kahjustused; dünaamiline ülerõhk ei tohi olla suurem kui 16 kPa (0,16 bar) taandatud kaugus väiksem kui $d_s = 9,6$ [9,10].

4. Õhulööklaine prognoosi võimalused

Õhulööklaine ülerõhu prognoosimine lõhkeainete ja nendega sarnaste ainete detonatsiooni korral on üsna lihtne ja usaldusväärne – seda seoses paljude reaalsete katsetustega, sealhulgas tuumarelvade atmosfääri- ning simulatsioonikatsetustega [3,9,10,11].

NATO-s kasutusel olevas riskistsenaariumite koostamise meetodis arvestatakse otseselt konkreetset plahvatusohtlikku ainet (trotüülekvivalendi kaudu) ja plahvatavat ainekogust ning kaugust plahvatuskohast (taandatud kauguse kaudu). Meetod on empiiriline, koostatud suure hulga otseste katsetuste ning toimunud avariide analüüside põhjal. Selle meetodi kohaselt on plahvatuse õhulööklaine tipprõhk ja impulsid leitavad järgmise empiirilise võrrandiga:

P või IMP

$$=e^{(A+B*\ln(d_s))+C*\ln(d_s)^2+D*\ln(d_s)^3+E*\ln(d_s)^4+F*\ln(d_s)^5+G*\ln(d_s)^6)} \quad (2)$$

Kus P – õhulööklaine tipprõhk (kPa); IMP – Õhulööklaine impulss (Paxs); d_s – taandatud kaugus [$\frac{m}{\sqrt[3]{kg}}$]; A, B, C, D, E, F, G – konstandid, mis olenevad plahvatusohtliku materjalide paiknemisest.

Kirjanduse andmetel võib seda meetodikat pidada piisavalt konservatiivseks (piisava ohutusvaruga) riskianalüüside koostamisel sest lööklaine tipprõhk ja impulss ei ületa 99% juhtudest arvutuslikku. Samuti on meetod usaldusväärne (konstantide usaldusväärsus $\pm 1\%$) [3]. Kindlasti tuleb aga silmas pidada, et antud meetodika annab usaldusväärseid tulemusi lõhkeainete ja nendega sarnaste ainete detonatsiooni korral, mille plahvatusreaktsioonides ei vajata õhuhapnikku.

Näide ülaltoodud meetodika kasutamisest õhulööklaine prognoosil:

ARVUTUSNÄIDE

ülerõhu prognoos ammooniumnitraadi suure koguse plahvatusel

ÜLESANNE:

Sadama reidil asub laev, mille lastiks on 3000 tonni ammooniumnitraati. Prognoosida võimalikul plahvatusel tekkiva õhulööklaine dünaamiline ülerõhk 500 meetri kaugusel laevast, kui avarii puhul detoneerub kogu ammooniumnitraat.

LAHENDUSKÄIK:

Õhulööklaine ülerõhu prognoos:

1. Lähtudes asjaolust, et ammooniumnitraadi trotüüliekvivalent ei ole üheselt määratav, sooritame prognoosarvutused trotüüliekvivalentide 0,4 ja 0,6 juures (kõige tõenäolisem trotüüliekvivalentide vahemik). Seega on võimalik plahvatus ekvivalentne 1200 t kuni 1800 t TNT plahvatuslega (vastavalt trotüüliekvivalentide 0,4 ja 0,6 korral). Trotüüliekvivalent 1,2 kuni 1,8 kilotonni on võrreldav operatiiv-taktikalise tuuma-lõhkepeaga.

2. Kaugusel 500 m on 3000 t on ammooniumnitraadi korral taandatud kaugusteks trotüülevivalentidel 0,4 kuni 0,6 vastavalt 4,71 ja 4,11 ($m/\sqrt[3]{kg}$).
3. Empiiriliste konstantide A, B, C, D, E ja F väärtused taandatud kauguste vahemikus 2,9 kuni 23,8 õhulööklaine ülerõhu määramiseks on järgmised:
A = 7,59380;
B = -3,05230;
C = 0,40977;
D = 0,02610;
E = -0,01267.

VASTUS:

3000 tonni ammooniumnitraadi plahvatusel on 500 meetri kaugusel plahvatuskohast õhulööklaine ülerõhk trotüülevivalendi 0,4 korral 53,63 kPa ja trotüülevivalendi 0,6 puhul 65,12 kPa.

Termobaariliste plahvatuste prognoos

on oluliselt komplitseeritum ning ühene ja usaldusväärne meetoodika nende prognoosiks (välja arvatud empiirilised meetodid termobaariliste relvade mõju arvutusteks) sisuliselt puudub.

Termobaariliste plahvatuste (õhu-tolmu, õhu-auru, või õhu-põlevvedeliku piiskade aerosoolide plahvatused) toimumiseks on vajalik õhuhapniku osalus plahvatusreaktsioonis. Võimaliku avarii puhul gaasi- või vedelkütuse mahutitega on äärmiselt komplitseeritud (praktiliselt võimatu) usaldusväärselt prognoosida põlevvedeliku piiskade, auru või gaasi kontsentratsiooni õhus ning sellest tulenevalt ka plahvatuse trotüülevivalenti ja tekkiva õhulööklaine parameetreid.

Plahvatuse õhulööklaine parameetrite prognoosimisel tuleb arvestada, et erinevate plahvatusohtlike materjalide ning plahvatuse keskkonna muutumisel muutuvad ka plahvatuse (ning selle tekitatud õhulööklaine) parameetrid.

Õhulööklaine prognoosil tuleb arvestada järgmist:

1. konkreetse aine trotüülevivalenti;
2. tõusvad nõlvad põhjustavad rõhu tõusu, langevad nõlvad rõhu vähenemist;

3. järskude nõlvadega kitsas org tekitab kontsentreeritud, suunatud lööklaine, mistõttu ohuala mõõtmeid tuleb vastavas suunas suurendada 2 korda;
4. märkimisväärne taimestik, eriti tihedad metsasalud, kus puud on kõrgemad kui 3,5 m, neelavad plahvatusenergiat ning ohuala mõõtmeid võib vastavas suunas vähendada kuni 2 korda [2,3,9].

5. Järeldused ja soovitused

1. Vabariigi Valitsuse 17. veebruari 2011. a. määruse nr 28 lisas toodud **ülerõhud ei vasta kogu ulatuses tegelikkusele.**
2. Ülerõhu (tipprõhu) arväärtused **oleks soovitatav väljendada SI süsteemi mõõtühikutes (kPa).**
3. Eraldi ohualade väljatoomist inimeste ja ehitiste jaoks ei saa pidada kuigi otstarbekaks, sest kahjustatavates ehitistes viibivad inimesed saavad vigastusi mitte ainult otseselt lööklainest vaid ka klaasikildudest ja/või muudest paiskuvatest või kukkuvatest esemetest. Seega **oleks otstarbekas määratleda võimaliku plahvatuse õhulööklaine ülerõhu puhul ohuala komplekselt nii ehitisi kui inimesi ohustava riskifaktorina.**
4. Ohualade määratlemisel oleks otstarbeks kasutada järgmisi „Surmafaktoriga“ (FF) ning ehitiste võimalikke kahjustuste/purustustega seotud kompleksseid piirmäärasid:
 - **Eriti ohtlik ala** – FF on vahemikus 10-50%, inimeste tõsised ja surmavad vigastused on põhjustatud peamiselt ehitiste kokkuvarisemisest ja laialipaiskuvatest esemetest. Tavaehitistel remondikulutused üle 50% täielikest asenduskuludest. Õhulööklaine tipprõhk üle 24 kPa (0,24 bar);
 - **Väga ohtlik ala** – FF on vahemikus 1-10%, inimeste vigastused on põhjustatud klaasikildudest ja laialipaiskuvatest esemetest. Tavaehitiste remondikulud kuni 20% täielikest asenduskuludest. Õhulööklaine tipprõhk üle 16 kPa (0,16 bar);
 - **Ohtlik ala** – FF on kuni 1%, inimeste vigastused on põhjustatud peamiselt klaasikildudest. Tavaehitiste remondikulutused üle 1% täielikest asenduskuludest. Õhulööklaine tipprõhk üle 5 kPa (0,05 bar).

5. **Ammooniumnitraadi plahvatusega kaasneva õhulööklaine parameetrite prognoosimiseks on soovitatav kasutada NATO väljaannetes AASTP-1 [9] või AASTP-4 [3] kirjeldatud meetodikaid.** Seejuures tuleb ammooniumnitraadi virnade või hoidlate vaheliste ohutuskujade määramisel vältida detonatsiooni ja/või põlengu levikut virnast virna (hoidlast hoidlasse).

6. Kasutatud kirjandus

1. Aruküla, H., Eigo, L., Joosep, E., Reinsalu, E., Puur- ja lõhketööd, Tallinn, Valgus, 1980.
2. Tomberg, T., Lõhketööd, õpik, TTÜ kirjastus, Tallinn, 1998.
3. Manual on Explosives Safety Risk Analysis (AASTP-4), Allied Ammunition Storage and Transport Publication, NATO, 2005.
4. Paas-O'Brock, M ., Õhulööklaine prognoos võimaliku avarii puhul lõhkeaine käitlemisel, bakalaureusetöö, TTÜ, Tallinn, 2015.
5. Larcher, M., Simulation of the Effects of an Air Blast Wave, JRC Technical Notes, PUBSY JRC41337, 2007
(http://www.ewp.rpi.edu/hartford/~cabelb/ENGINEERING_PROJECT/Other/Reference/Simulation%20of%20the%20Effects%20of%20an%20Air%20Blast%20Wave.pdf).
6. Izadifard, R. A., Foroutan, M. , Blastwave Parameters Assessment at Different Altitude Using Numerical Simulation, Turkish Journal of Engineering & Environmental Sciences, vol 34, 2009
(<http://journals.tubitak.gov.tr/engineering/issues/muh-10-34-1/muh-34-1-3-0911-39.pdf>).
7. Ngo, T., Mendis, P., Gupta, A., Ramsay, J., Blast Loading and Blast Effects on Structures – an Overview, EJSE (Electronic Journal of Structural Engineering) Special Issue: Loading on Structures, 2007
(<http://www.ejse.org/Archives/Fulltext/2007/Special/200707.pdf>).
8. Soojuskiirguse ja plahvatuse mõju inimestele ja ehitistele, päästeõpik, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Tallinn, Sisekaitseakadeemia Kirjastus, 2008.

9. Manual of NATO Safety Principles for the Storage of Military Ammunition and Explosives (AASTP-1), Allied Ammunition Storage and Transport Publication, NATO, 2010.
10. Tomberg, T., Lõhkematerjalide käitlemise alused ning lõhkematerjalide hoidmine ja vedu, täienduskoolituse „Lõhketööd“ õppematerjalid, 21.11-24.11.2014, TTÜ.
11. Manual of NATO Safety Principles for the Transportation of Military Ammunition and Explosives (AASTP-2), Allied Ammunition Storage and Transport Publication, NATO, 2005.
12. Manual of NATO Safety Principles for the Hazard Classification of Military Ammunition and Explosives (AASTP-3), Allied Ammunition Storage and Transport Publication, NATO, 2005.
13. Sochet, I., Blast Effects of External Explosions, Eighth International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions, 2010 (<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00629253/document>).
14. Emergency War Surgery, Borden Institute, Walter Reed Army Medical Center, Washington, DC, 2004 (<http://www.green-trust.org/freebooks/Emergency-War-Surgery.pdf>).
15. Bajić, Z., Bogdanov, J., Jeremić, R., Blast Effects Evaluation Using TNT Equivalent, Scientific Technical Review vol LIX, nr 3-4, 2009 (<http://www.vti.mod.gov.rs/ntp/rad2009/34-09/7/7.pdf>).
16. Risk Management Series: Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings, FEMA (Federal Emergency Management Agency), 2003 (<http://www.fema.gov/media-library-data/20130726-1455-20490-6222/fema426.pdf>).
17. Cullis, I. G., Blast Waves and How They Interact With Structures. Journal Of the Royal Army Medical Corps vol 147, 2001.
18. Field Manual 5-250 Explosives and Demolitions, Headquarters, Department of the Army, Washington, DC, 15 June 1992
19. Nygaard, Erik C., Storage of Technical (Porous) Ammonium Nitrate, International Society of Explosives Engineers 2008G Volume 1 - Storage of Technical (Porous) Ammonium Nitrate, Yara International ASA, Porsgrunn, Norway Copyright © 2008
20. Tegstam, J. F., Danjoux R., Gas leak detection in the oil and gas industry using infrared optical imaging, Thermografie-Kolloquium 2007 - Vortrag 03, (<http://www.ndt.net/article/dgzfp-irt-2007/Inhalt/v03.pdf>).
21. http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T820433/T820433_EN.pdf

LISA 1.

Vabariigi Valitsuse 17. veebruari 2011. a määruse nr 28 „Nõuded ohtliku ja suurõnnetuse ohuga ettevõtte kohustuslikule dokumentatsioonile ja selle koostamisele ning avalikkusele edastatavale teabele ja õnnetusest teavitamisele”
lisa

RISKIANALÜÜSI KÄIGUS MÄÄRATAVATE OHUALADE PARAMETRID

Ohuala ¹ liigitus ja definitsioon	Kemikaalide kontsentratsioon ⁵	Ülerõhk (inimesi ohustav tase) bar	Ülerõhk (ehitisi ohustav tase) bar	Lühiajaline (kuni 20 sek) soojuskiirgus kW/m ²		Keskpikk (kuni 100 sek) soojuskiirgus kW/m ²	Pikaajaline (üle 15 min) soojuskiirgus kW/m ²
				Inimesi ohustav tase	Ehitisi ohustav tase		
Eriti ohtlik ala ²	LC50 (30 min)	1,5	0,35	2,5		17	
Väga ohtlik ala ³	AEGL-3 (30 min)	0,8	0,17	10	37	8	15
Ohtlik ala ⁴	IDLH	0,24	0,03	8		4	

¹ Ohuala on ala, mille piires tekib käitises toimunud õnnetuse korral oht inimeste ehle ja tervisele või varale.

² Eriti ohtlik ala – ohuala osa, milles on õnnetuse ohtliku väljundi mõjul inimese hukkumise tõenäosus 50% ning ehitiste kahjustused nende mahust suuremad kui 50%.

³ Väga ohtlik ala – ohuala osa, milles on õnnetuse ohtlikust tähistatakse raadiusega Re.

⁴ Ohtlik ala – ohuala osa, milles on õnnetuse ohtliku väljundi mõjul võimalik inimese hukkumise ning ehitiste kahjustused nende mahust vahemikus 1–49%.

⁵ Väga ohtliku ala välispiiri kaugust ohtlikust objektist tähistatakse raadiusega Rv.

Ohtliku ala – ohuala osa, milles võib õnnetuse ohtlik väljund tekitada inimestele tervisekahjustusi ning hoonetele kergeid kahjustusi.

Ohtliku ala välispiir on üheaegselt ka ohuala välispiiriks. Ohtliku ala välispiiri kaugust ohtlikust objektist tähistatakse raadiusega Ro.

Kemikaali kontsentratsiooni väärtused määratakse kirjanduse ja andmebaaside andmete põhjal eraldi iga konkreetse kemikaali puhul. Enamlevinud kemikaalide vastavad kontsentratsioonide väärtused tuakse välja Päästeameti juhendmaterjalis. Määratakse kolm kontsentratsiooni taset:

– LC50 (30 min) – (*Lethal concentration 50%*) kemikaali kontsentratsioon, mis põhjustab 30minutilise kokkupuute jooksul hinnanguliselt 50% kaitsmata isikute hukkumise;
 – AEGL-3 (30 min) – (*Acute Exposure Guideline Level*) kemikaali minimaalne kontsentratsioon, mis võib põhjustada kaitsmata isiku eluohutikke tervisekahjustusi või hukkumist;
 – IDLH – (*Immediately Dangerous to Life or Health*) suurim kemikaali kontsentratsioon, mis 30 minuti jooksul ei tekita tervele inimesele pöördumatuid tervisekahjustusi ega takista inimese evakueerumist.

Marko Pomerants
Siseminister

LISA 2

Lähteülesanne ülerõhkude piirmäärade ülevaatamiseks

Määruse lisas oleva tabeli (edaspidi tabel) ülevaatamisel antakse vastused järgimistele küsimustele.

1. Üldhinnang

1.1 Tuua välja üldhinnang, kas tabelis toodud ülerõhkude piirmäärad vastavad tegelikkusele (võimalikud vigastused inimestele ja hoonetele), st hinnata, kas hetkel tabelis kasutatavad ülerõhkude piirmäärad on piisavad selleks, et saada adekvaatsed andmed ülerõhu mõjust inimestele ja hoonetele. Kui jah, siis tuleb seda põhjendada. Kui ei, siis tuleb välja pakkuda uued piirmäärad.

1.2 Võrdlevalt tuua välja olemasolev praktika teistest riikidest.

Põhiline küsimus, millele otsitakse vastust on, kas täna kasutusel olevad parameetrid on adekvaatsed või mitte.

2. Uute piirmäärade väljapakkumine

2.1 Kui lähteülesande punktis 1.1 toodud hinnang on negatiivne, st olemasolevad piirmäärad ei ole adekvaatsed, siis tuleb pakkuda välja uued ülerõhkude piirmäärad.

2.2 Tuua välja allikad, mis võeti uute väljapakutud piirmäärade aluseks.

2.3 Nimetada võimalusel ka muid allikaid, mida saab tabeli kasutaja aluseks võtta tema poolt käideldavate kemikaalide plahvatuse ülerõhkude arvutamisel.

Kui eelmises punktis esitatud põhiküsimus on saanud vastuse, et hetkel kehtivad parameetrid ei ole adekvaatsed, siis tuleks välja pakkuda uued parameetrid.

Kõik see tuleks lahti kirjutada arusaadavalt koos vastavate põhjendustega, et seda oleks võimalik kasutada määruse lisa avamisel seletuskirjas.

3. Ammooniumnitraadi plahvatuse piirmäärade arvutamise meetodika (võimalusel)

3.1 Tuua välja meetodika, kuidas arvutada ammooniumnitraadi plahvatusega kaasnevat ülerõhku (plahvatuses osalev AN kogus, samuti AN-le vastav TNT, koefitsiendid, mis vastavad väljatoodud ülerõhkude piirväärtustele). Viidatud meetodika peaks abistama ammooniumnitraadi ladustamisega seotud ohutuse suurendamisele (kui suured virnad, kui kõrged virnad, virnade vahelised kaugused jm).

LISA 3

Lisamaterjalina: T. Tomberg, ülevaade “Lõhkeainete käitlemisel toimunud õnnetused”.
(lisatud eraldi failina).



Lõhkeainete käitlemisel toimunud õnnetused

Lõhketööd
Tallinna Tehnikaülikool
Tallinn 2015



STRATEK
TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOOLI
KAITSE- JA JULGEOLEKUUURINGUTE KESKUS