

LASKEMOONALAO RISKIANALÜÜSI METOODIKA VÄLJATÖÖTAMINE FIKTIIVSE LAO NÄITEL

*Tõnu Tomberg, Raul Järviste, Maarjus Kirs,
Aleks Strazdin, Siim Eensoo*



ÜLEVAADE. Artiklis tutvustatakse 2018. ja 2019. aastal Tallinna Tehnikaülikoolis koostatud lahingumoonaladude tervikliku riskianalüüsi metoodikat. Metoodika koostamise aluseks võeti empiirilised seosed, mis ka piiratud hulga algandmete korral annavad piisava usaldusväärsusega tulemusi. Esimeses etapis koostati matemaatilised mudelid, et modelleerida ja hinnata riske massplahvatusohtliku 1.1-ohuklassi lahingumoonaladustamisel maapealsetes tugeva konstruktsiooniga raudbetoonhoidlates.

Riskide matemaatiliseks modelleerimiseks koostati fiktiivse lahingumoonalao matemaatiline mudel, mis koosnes neljast fiktiivsete parameetritega hoidlast. Hoidlate ehituslikud parameetrid, nendes ladustatava lõhkeaine kogus ning kaugus hoidlate vahel on mudelis hõlpsasti muudetavad. Fiktiivse lao mudeliga modelleeriti hoidlas toimuda võivate avariide füüsikaliste ohutegurite, õhulööklaine, laialipaiskuvate rusude ja kraatri moodustumise võimalikku mõjuulatust ning nende tegurite eeldatavat mõju lao naaberrajatistele.

Võtmesõnad: lahingumoonaladustamine, riskianalüüs, empiirilised seosed, ohutegurid, matemaatiline modelleerimine, fiktiivne laskemoonaladu

Keywords: ammunition storage, risk assessment and analysis, empirical functions, risk factors, mathematical modelling, fictive ammunition storage

1. Sissejuhatus

Kaitseväge lahingumoonaladustamisel tuleb teadvustada ohtlike materjalide käitlemise riske ning töötada välja juhised ohu korral käitumiseks. Seejuures on tähtis ennetada suurõnnetusi ning luua teaduslikel alustel riskihindamis- ja -haldussüsteem. Eestis ei ole seni välja töötatud lõhkematerjalide käitlemise terviklikku riskihindamismetoodikat, seetõttu tuginetakse väikeriigile sobiva metoodika loomisel muu maailma kogemusele.

Ulatuslik avarii lahingumoonaladustamise või muu lõhkematerjali laos tooks kaasa suuri purustusi ning lähikonnas viibijate eri raskusega või koguni surmavaid

vigastusi. Suuremate lahingumoonakoguste ladustamisel läheb tarvis terviklikku riskihindamis- ja -haldusmeetodit. Siinse töö ülesanne on töötada välja Kaitseväe laskemoonaladude praktiline riskianalüüsi meetoodika.

2. Metoodika

Lõhkematerjalide käitlemise riskianalüüsis tuleb tegelikke olukordi ja tingimusi arvestades määrata ohutu lõhkeaine kogus ja kaugus. Seda tuleb teha kõikvõimalike riskide põhjal, seega peab riskianalüüsi meetoodika arvestama tähtsamaid riskitegureid. Need on plahvatuse õhulööklaine, rusude laiali-paiskumine, lõhkematerjalide põlemise termomõju, plahvatuse seismiline mõju ning kraatri moodustumine ja sellest välja paiskuv materjal. Ohutegureid tuleb kirjeldada ja analüüsida teoreetiliste materjalide ning empiiriliste algoritmide ja seoste põhjal. Riskianalüüs peab hindama ohutegurite tähtsust ja suurusjärku ning väljendama nende mõjuulatust, samuti ohtu inimestele ja materiaalsetele väärtustele. Riskianalüüsi koostamisel tuleb esma-joones uurida välja, teha kindlaks ja liigitada riskid, analüüsida neid ning otsustada, kui tähtis on iga tegur eraldi.

Riskihindamisel tuleb aluseks võtta lõhkematerjalis sisalduva lõhkeaine netomass, lõhkematerjali ohuklass ning lubatud riski piir (purustuste või kahjustuste lubatud suurus). Mida suurem on lõhke- või pürotehnilise aine netomass, seda suurem on risk. Riskihindamisel arvestatakse ohuala mõõtmeid (ingl *quantity-distance*). Ohualade tabelid näitavad vähimat ohutut kaugust võimaliku avariipaiga ja mõjutatud punkti vahel. Ohualade suurust on tarvis teada, et hinnata, kas avarii korral oleks mõju inimestele ja varale talutav.

2.1. Meetodi valik

Riskianalüüsi meetoodika väljatöötamisel saab lähtuda kahest uurimisviisist:

- 1) teoreetiline meetod;
- 2) empiiriline ehk kogemuslik meetod.

Esimese meetodi aluseks on teoreetilised füüsikalised seaduspärasused. Selle eelis on võimalus saada piisava hulga usaldusväärset määratud algparameetrite korral ülitäpseid tulemusi. Meetodi puudus on aga see, et kõigi vajalike algandmete või -parameetrite usaldusväärne määramine on tihti keeruline kui mitte võimatu. Liiatigi avaldab nii mõnigi tegur lõpptulemusele üksnes tähtsusetut mõju.

Teise meetodi aluseks on muu maailma kogemuslikud ehk empiirilised seaduspärasused, mille puhul lähtutakse vaid üsna vähestest hõlpsasti määratavatest parameetritest ning saadakse neid parameetreid, empiirilisi seoseid ja konstante kasutades piisava usaldusväärsusega tulemused (hälve $\pm 10\%$). Meetodi puudus on see, et enamik empiirilisi seoseid – eelkõige empiirilised konstandid – on piisavalt usaldusväärsed ainult kindlates määramispiirkondades ning need ei pruugi olla üldistatavad.

Töö autorid otsustasid kasutada laskemoonaladude analüüsil peamiselt empiirilist meetodit. Valiku põhjus oli selle kogemuspõhisus ja otsene seos praktikaga. Teoreetilise meetodi üks puudusi lõhkematerjalide käitlemise riskianalüüsil on mitu äärmiselt raskesti määratavat muutujat, mis võimaldavad saada tõelähedasemaid tulemusi, kuid ei ole tagajärgede prognoosimisel nii tähtsad. Empiirilise meetodiga kaasnev tulemuste suurem hajuvus ei ole seejuures kuigi oluline, sest katsetel või juhtumianalüüsil põhinevad uuringumeetodid on päris laskemoonaladude riskianalüüside koostamisel piisavalt usaldusväärsed.¹

Neid teadmisi arvestades kasutasid autorid uurimisviisina põhjustatud teooria loomist. Põhjustatud uurimisviis (ingl *grounded theory*) on selline kvalitatiivne uurimisviis, mille eesmärk on luua kogutud empiiriliste andmete alusel põhjendatud teooria². Sel viisil luuakse dokumentide, kogemuste ja uurimuste põhjal uus, täiendatud meetod, mis aitab välja töötada Kaitsevæele sobivat riskianalüüsi metoodikat. Materjali kogumisel on oluline uurida eri teooriate ja allikate seost ja selgitada välja prioriteetide hierarhia, st vaadelda eri mõjutegureid vastavalt nende olulisusele ja mõju võimalikule ulatusele³. Kaitsevæele kohandatud riskianalüüsi metoodika väljatöötamisel on võetud aluseks varasemad uuringud ja NATO kehtivad normatiivdokumendid.

¹ Lepik, K.; Strömpl, J. 2018. Põhjustatud teooria. – Sotsiaalse analüüsi meetodite ja metodoloogia õpibaas. Tartu: Tartu Ülikool. [Lepik, Strömpl 2018] <<http://samm.ut.ee/pohjustatud-teooria>> (01.12.2018);

Charmaz, K. 2006. Constructing Grounded Theory: A Practical Guide through Qualitative Analysis. London, Los Angeles, New Delhi, Singapore: SAGE Publications Ltd, p. 137. [Charmaz 2006]

² Lepik, Strömpl 2018.

³ Charmaz 2006, p. 137.

Ohtlikke materjale käideldakse ÜRO ohtlike toodete käitlemise põhimõtete alusel, mille järgi jagunevad sellised tooted üheksasse ohuklassi⁴. Neist esimene käsitleb lõhkematerjale ehk tooteid, mis sisaldavad lõhke- või pürotehnilisi aineid. Sellesse ohuklassi kuulub ka lahingumoon. Esimene ohuklass jaguneb omakorda kuude alamklassi, mida käsitletakse edaspidi ohuklassidena (vt tabel 1). Ohuklass näitab, milline on selle klassi materjali puhul võimalik avariid ja peamine kahjustav tegur. Ohuklasse tähistatakse kahe araabia numbriga, mille vahel on punkt. Esimene number näitab ohu üldist iseloomu (plahvatus), teine täpsustab ohtu.

Tabel 1. Lõhkematerjalide liigitus ohuklassi järgi⁵

Ohuklass	Ohuklassi iseloomustus
1.1	Massplahvatusohtlikud lõhkematerjalid ja lahingumoon, mille eripära on plahvatada kogu massiga. Hetkega plahvatab kogu veoses või hoidlas olev lõhkematerjal. Kahjustavad tegurid on õhulööklaine ja laialipaiskuvad rusud. Peamiselt brisantlõhkeained.
1.2	Lõhkematerjalid ja lahingumoon, mis ohustavad laialipaiskuvate rusudega, kuid massplahvatusohtu ei ole.
1.3	Lõhkematerjalid ja lahingumoon, mille puhul on tuleoht, väike lööklaineoht ja/või väike laialipaiskuvate rusude oht, kuid ei ole massplahvatusohtu.
1.4	Lõhkematerjalid ja lahingumoon, millega ei kaasne suurt ohtu.
1.5	Väga vähetundlikud lõhkematerjalid ja lahingumoon, millel on massplahvatusoht.
1.6	Väga vähetundlikud lõhkematerjalid ja lahingumoon, mis ei ohusta massplahvatusega.

⁴ Tomberg, T. 2014. Lõhkematerjalide käitlemise alused. Täienduskoolitus „Lõhketööd“, 21.11.–24.11.2014 TTÜ mäeinstituudis. [Tomberg 2014]

⁵ UN Recommendations on the Transport of Dangerous Goods 2011. 17th revised edition, Vol. 1. United Nations, p. 49, *passim*.

<https://www.unece.org/trans/danger/publi/unrec/rev20/20files_e.html> (05.06.2019).

2.3. Uuritava objekti piiritlemine

Riskianalüüsi meetodika koostamisel piirati ohutegurite ja -klasside valikut. Piirangud on järgmised:

- 1) maapealne ladustamine, välja jäeti allmaaladustamine;
- 2) ladustamine pinnasega kaetud tugeva ehitusega raudbetoonhoidlas (ingl *earth covered magazine*; ECM), välja jäeti lahtine ja kergehitistes ladustamine jms;
- 3) ladustatavaks materjaliks olid 1.1-ohuklassi (massplahvatusohtlikud) lõhkematerjalid, välja jäeti teised ohuklassid.

Peamisteks ohuteguriteks jäid õhulööklaine, laialipaiskuvad rusud ja kraatrite moodustumine. Teiste tegurite mõju on massplahvatusohtliku lõhkematerjali pealmaaladustamisel tunduvalt väiksem ning sellel on suurem tähtsus teistsugusel viisil või mõne muu ohuklassi materjali ladustamisel.⁶ Näiteks on termomõju äärmiselt oluline 1.3-ohuklassi materjali käitlemise riskianalüüsil (massplahvatusohutu, kuid kõrge temperatuuri või intensiivse soojuskiirgusega põlev materjal). See-eest 1.1-ohuklassi materjali põlemine läheb üsna lühikese aja jooksul üle plahvatuseks. Teine näide on plahvatusseismiline mõju, mis on määrava tähtsusega allmaaladustamisel, kuid mille intensiivsus ja ulatus pealmaaladustamisel on võrreldes õhulööklaine ning rusude laialipaiskumisega vähene.

2.4. Ohutegurid

Lõhkematerjalide käitlemisel on oluline määratleda lõhkematerjaliga seotud võimaliku avarii peamine kahjustav tegur või konstruktsioonist tulenev ohu (riski) täpsustus. Põhiline oht lõhkematerjalide käitlemisel on avarii lõhkematerjalihoidlas. Avarii võib olenevalt lõhkematerjali ohuklassist olla järgmine:

- plahvatus (massplahvatus);
- plahvatamata materjali laialipaiskumine (rusud, killud, plahvatamata jäänud lõhkematerjal);
- kõrge temperatuuri ja suure soojuskiirgusega põleng.

⁶ *Ibid.*; **AASTP-1** = Manual of NATO Safety Principles for the Storage of Military Ammunition and Explosives (AASTP-1) 2010. NATO, Allied Ammunition Storage and Transport Publication, pp. I-3-1–I-3-15. [**AASTP-1**, 2010];

AASTP-4, 2005 = Manual on Explosives Safety Risk Analysis (AASTP-4), Ed. 1, Version 3, 2005. NATO, Allied Ammunition Storage and Transport Publication, pp. I-13–I-14. [**AASTP-4**, 2005]

Suurema või väiksema intensiivsusega plahvatus võib toimuda peaaegu iga ohuklassi lõhkematerjali süttimisel.

Plahvatusega kaasnevate ohtude teadvustamiseks on vaja mõista plahvatuse käiku. Lõhkeaine detonatsioonil⁷ moodustub ülikiirete (kiirus kuni 10 000 m/s) eksotermiliste keemiliste reaktsioonide käigus suur kogus gaase (toatemperatuurini paisumisel olenevalt lõhkeainest 0,3–1,0 m³/kg). Sama reaktsiooni käigus vabaneb ka suur kogus soojusenergiat, näiteks trinitrotolueeni (TNT) puhul umbes 4 MJ/kg. Plahvatusel moodustuvad gaasid kuumenevad vabanenud soojusenergia mõjul väga kõrge temperatuurini, tavaliselt kuni 3000 °C. Temperatuuri tõus põhjustab nende ainete kiire paisumise, mis omakorda tekitab ümbruskonnas väga kõrget rõhku (30–40 MPa). Paisuvad plahvatusgaasid hõlmavad ruumala, mis on peaaegu 10 000 korda suurem lõhkeaine algruumalast. Gaaside kõrge rõhk teeb mehaanilist tööd kas keskkonna kontrollitud (lõhketööd) või kontrollimatul (avariid) purustamisel ning näiteks õhulööklaine või seismilise laine moodustamiseks.⁸

2.4.1. Õhulööklaine

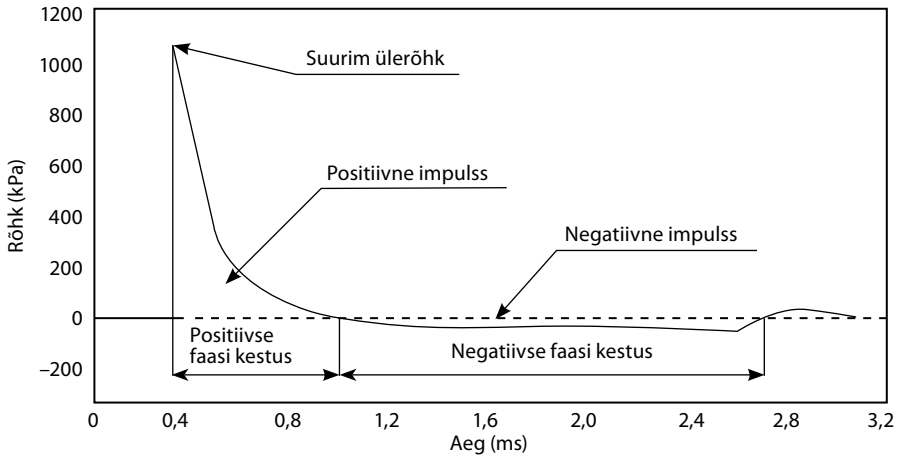
Õhus liikuvate suure survega gaaside lainefront põhjustab keskkonna tiheduse, rõhu ja osakeste kiiruse hüppelise muutuse. Plahvatustsentrast eemaldudes väheneb õhulööklaine rõhk märgatavalt ning võrdsustub lõpuks atmosfäärirõhuga. Joonisel 1 on esitatud õhulööklaine rõhu sõltuvus ajast ning õhulööklaine parameetrid. Õhulööklaine koosneb kahest faasist: positiivne faas (ingl *pressure*) ja negatiivne faas (ingl *suction*). Positiivse faasi ja atmosfäärirõhu vahe absoluutväärtus on ülerõhk. Ülerõhu joone ja ajatelje vaheline pindala on lööklaine impulss. Ajaintervall, millal lööklaine rõhk ületab atmosfäärirõhku, on lööklaine positiivse faasi kestus.⁹

⁷ Detonatsioon – rõhu järsust suurenemisest tingitud ülikiire soojust eraldavate protsesside levik aines, plahvatus (EKSS).

⁸ Tomberg 2014; Aruküla, H., Eigo, L., Joosep, E., Reinsalu, E. 1980. Puur- ja lõhketööd. Tallinn: Valgus, lk 128–138; Ngo, T., Mendis, P., Gupta, A., Ramsay, J. 2007. Blast Loading and Blast Effects on Structures – an Overview. – Electronic Journal of Structural Engineering (EJSE). Special Issue: Loading on Structures, pp. 76. [Ngo, Mendis, Gupta, Ramsay 2007] <https://www.researchgate.net/publication/279897768_Blast_loading_and_blast_effects_on_structures_-_An_overview> (11.06.2019).

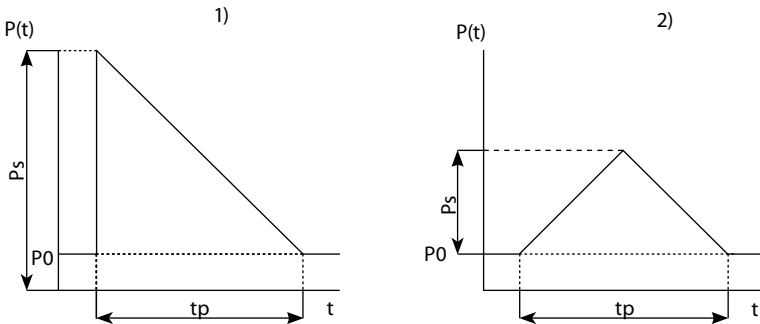
⁹ Plahvatuse ja soojuskiirguse mõju inimestele ja ehitistele: ohutusraamatud 1 ja 2, 2008. Ministerie van Verkeer en Waterstaat. Tallinn: Sisekaitseakadeemia Kirjastus, lk 109. [Plahvatuse ja soojuskiirguse mõju inimestele ja ehitistele 2008];

AASTP-3 = Manual of NATO Safety Principles for the Hazard Classification of Military



Joonis 1. Õhulööklaine parameetrid ja rõhu sõltuvus ajast¹⁰

Joonisel 2 on esitatud rõhu sõltuvus ajast.



Joonis 2. Õhulööklaine rõhu [P] ja kestuse [t] sõltuvus¹¹

P_s – maksimaalne ülerõhk

t_p – ülerõhu positiivse faasi kestus

1) suure võimsusega plahvatuse õhulööklaine

2) väikse võimsusega plahvatuse õhulööklaine

Ammunition and Explosives (AASTP-3) 2009. NATO, Allied Ammunition Storage and Transport Publication, p. 10;

Ngo, Mendis, Gupta, Ramsay 2007, pp. 76–91.

¹⁰ Plahvatuse ja soojuskiirguse mõju inimestele ja ehitistele 2008, lk 108.

¹¹ *Ibid.*, lk 108; Ngo, Mendis, Gupta, Ramsay 2007, pp. 76–77; AASTP-4, 2005, pp. II-16–II-22.

Mõju inimestele ja ehitistele

Inimelu ohustavad plahvatuse dünaamiline ülerõhk, lööklaine ja laialipaiskuvad rusud. Vigastusi põhjustab ka inimeste paiskumine vastu takistusi. Õhulööklaine on kõige ohtlikum hingamisteedele ja -elunditele, peale, kõrvadele (eriti trummikilele), põrnale, maksale ja südamele. Vigastuste ulatus ja raskus oleneb peamiselt sellest, kui kiiresti tõuseb rõhk, kui kõrge on suurim ülerõhk ning kui kaua kestab positiivne faas.¹²

Üks õhulööklaine inimesi kahjustava mõju määramise usaldusväärsemaid meetodeid on nn surmafaktori (ingl *fatality factor*; FF) kasutamine. Meetod arvestab taandatud kaugust inimese asukohast. Taandatud kaugus on tinglik suurus, mis arvestab lõhkelaengu massi ja selle objektist (siinkohal inimesest) paiknemise kauguse koosmõju.¹³ Taandatud kaugus määratakse järgmise valemiga:

$$d_s = d * Q^{-1/3} \text{ (m/kg}^{1/3}\text{)}$$

d – kaugus lõhkeaine laengust plahvatusest mõjutatava objektini (m)

Q – lõhkeaine netomass (kg)

Mida lähemal on inimene plahvatuse hetkel laengule (sama lõhkeaine netomassi korral), seda tõenäolisemalt ta hukkub (vt joonis 3). Joonisel on esitatud inimese hukkumise ehk teisisõnu, surmajuhtumite esinemise tõenäosus sõltuvalt taandatud kaugusest. Nn surmatsoonis on eluohtlike vigastuste tekke tõenäosus enam kui 90%.¹⁴

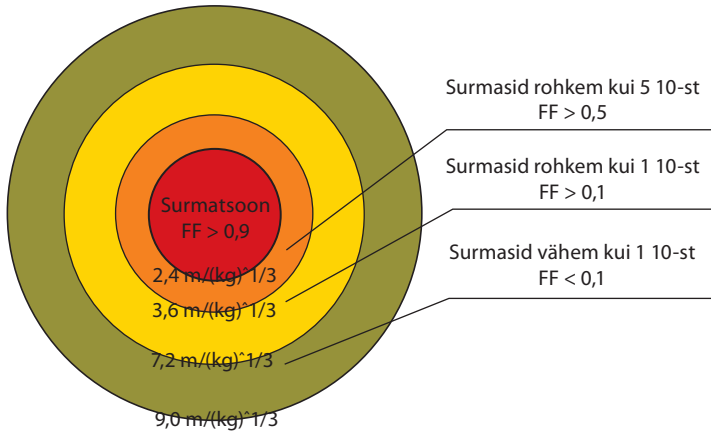
Lööklaine mõju ehitistele on raskem ennustada, sest plahvatuse iseloom võib olla ettearvamatu. Seetõttu ei saa tagajärgi väga täpselt ette näha. Viimase kolme aastakümne jooksul on arendatud mitmesuguseid meetodeid ehitiste analüüsimiseks ja plahvatuskindlaks muutmiseks. Selleks et muuta ehitisi vastupidavamaks, on tarvis mõista plahvatust ja selle mõju ehitistele. Tabelis 2 (vt lk 67) on esitatud ehitiste kahjustuste ja inimvigastuste seos plahvatuse dünaamilise ülerõhuga.¹⁵

¹² Ngo, Mendis, Gupta, Ramsay 2007, pp. 76–77; AASTP-1, 2010, pp. I-3-1–I-3-34.

¹³ AASTP-4, 2005, pp. II-107–II-119.

¹⁴ *Ibid.*

¹⁵ Ngo, Mendis, Gupta, Ramsay 2007, pp. 76–77; AASTP-1, 2010.



Joonis 3. Huku tõenäosus olenevalt taandatud kaugusest. Eri värvi kontsentrised ringid näitavad hukkamise või surmavate kehavigastuste saamise tõenäosust

Ehitist mõjutava õhulööklaine võimsus ja jaotus sõltub järgmistest teguritest:

- lõhkematerjali omadused (lõhkeaine liik, vabanenud energia ja lõhkematerjali kogus);
- plahvatus kaugus ehitisest;
- rõhu peegeldumine hoonetelt või maapinnalt.

Võrreldes teiste hooned dünaamiliselt mõjutavate loodusnähtustega (nt maavärinad, tormituuled) on õhulööklainel mitu eripära. Plahvatus võib olla palju suurem kui teised jõud, kuid lööklaine liikumisel plahvatuspunktist eemale väheneb rõhk väga kiiresti. See tähendab, et ühel pool maja võivad kahjustused olla tunduvalt väiksemad kui plahvatuspoolisel küljel.¹⁶ Plahvatus ja lööklaine kestus on märgatavalt lühem, mikro- või millisekundeid, mitte sekundeid või minuteid.

Plahvatus kahjustusi aitavad vähendada kaitsevallid. Hoonete nõrgim lüli on tavaliselt klaas, mis puruneb palju madalamal rõhul kui põrandad, seinad ja talad. Klaasikillud paiskuvad plahvatus korral laiali suure kiirusega, tekitades samuti vigastusi ning raskendades pääste- ja hilisemaid koristustöid.¹⁷ Kui hoones viibib plahvatus ajal inimesi, on nende vigastused seotud hoone kahjustustega.

¹⁶ **Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings** 2003. Federal Emergency Management Agency (FEMA), p. 3-20. <http://www.fema.gov/media-library-data/20130726-1455-20490-6222/fema426.pdf> (11.02.2015)

¹⁷ *Ibid.*, p. 3-23.

Tabel 2. Ehitiste purustuste ja inimvigastuste seos õhulööklaine ülerõhuga

Plahvatuse dünaamiline ülerõhk (kPa/bar)	Purustused	Vigastused	Hukutõenäosus (%)
180/1,8	Tavaehitiste täielik hävimine, tugevate raudbetoonehitiste märkimisväärsed purustused.	Ellujäämisvõimalus minimaalne.	Üle 90
70/0,7	Tavaehitiste peaaegu täielik purunemine. Remondikulutused üle 90% täielikest asenduskuludest. Tugevate raudbetoonehitiste (sillad, sadamakaid jms) vigastused.	Rasked ja surmavad vigastused, mis kaasnevad nii lööklainega kui ka ehitiste kokkuvarisemise ja laialipaiskuvate esemetega, samuti paiskumisega vastu takistusi.	50–90
24/0,24	Tellishoonete keskmised vigastused, kergete kivi- ja puithoonete täielik purunemine. Tavaehitistel remondikulutused üle 50% täielikest asenduskuludest. Võimalik autode ümberpaiskumine. Elektriülekande õhuliinide suured vigastused.	Võimalikud püsivad kuulmiselundite kahjustused (trummikile purunemine). Rasked ja surmavad vigastused, mis kaasnevad peamiselt ehitiste kokkuvarisemise ja laialipaiskuvate esemetega.	10–50
21/0,21	Ehitistel puitseinte (v.a palkseinad) purunemine, tavaehitiste suured kahjustused. Remondi maksumus kuni 30% täielikest asenduskuludest. Autode märgatavad vigastused.	Võimalikud ajutised kuulmiselundite kahjustused. Rasked ja surmavad vigastused, mis on tekkinud peamiselt ehitiste kokkuvarisemise ja laialipaiskuvate esemete tõttu.	u 10
16/0,16	Tavaehitistel tähtsate struktuuri-elementide kahjustused. Remondi maksumus kuni 20% täielikest asenduskuludest. Autodel kere ja katuse metallosade kerged kahjustused, lööklaine pool asuvad aknapinnad võivad puruneda.	Lühiajaline kuulmiskaotus, kuid kuulmiselundite püsivad kahjustused on vähe tõenäolised. Võimalikud vigastused, mis kaasnevad laialipaiskuvate esemetega.	5–10
9/0,09	Aknaraamide, uste ja kergete vaheseinte purunemine, kergete kuuride ja puitehitiste purunemine. Tavaehitistel keskmise ulatusega kahjustused, remondi maksumus kuni 10% täielikest asenduskuludest.	Raskemad vigastused vähe tõenäolised. Suure tõenäosusega põhjustavad vigastusi lendavad klaaskillud ja kukkuvad esemed.	1–5

2.4.2. Rusude ja kildude laialipaiskumine

Rusude ja kildude laialipaiskumise prognoos on õhulööklaine järel üks olulisemaid aspekte lõhkematerjalide käitlemise riskianalüüsi koostamisel.

Plahvatusel suletud keskkonnas, näiteks laos, tekib kõrge rõhuga plahvatusgaaside purustava toime mõjul palju eri suurusega materjalitükke, mis suure kiirusega plahvatuskeskmest eemale paiskuvad¹⁸.

Rusud ja killud (fragmendid) võib jagada riskianalüüsis kahte rühma:

- esmased fragmendid ehk killud, st lõhkematerjali enese fragmendid (padrunikestad, mürsu- ja miinikillud);
- teisesed fragmendid ehk rusud, st hoone või rajatise struktuuri purunemisel tekkinud eri suurusega tükid¹⁹.

Kuna riskianalüüsi meetodika väljatöötamisel keskenduti 1.1-ohuklassi lõhkematerjalile, jäeti esmaste fragmentide ehk kildude analüüs tagaplaanile. Ohuklassi materjalide ladustamisel tekkiva avarii korral on nende mõju võrreldes rusude mõjuga tähtsusetu.²⁰

Esmaste fragmentide tekke ja nende mõju määramise peamised füüsikalised parameetrid on lõhkeaine detonatsioonienergia ja kesta purunemisel tekkivate kildude suurus.

Teiseste fragmentide ehk rusude teke ja nende mõju on mõnevõrra keerukam. Nende teket ja laialipaiskumist saab kirjeldada kahes astmes:

- plahvatusgaaside mõjul tekkiv kõrge rõhk hoones ning hoone struktuuri purunemine selle tagajärjel;
- rusude moodustumine ja neile peamiselt õhulööklaine, aga ka plahvatusgaaside surve mõjul antav kiirendus²¹.

Määrava tähtsusega on, kui palju on plahvatusgaasidel laohoones paisumisruumi.

¹⁸ **UFC 3-340-02** = Unified Facilities Criteria (UFC) 3-340-02: Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions 2008. US Department of Defense, p. 15. [**UFC 3-340-02**, 2008] <https://www.wbdg.org/FFC/DOD/UFC/ARCHIVES/ufc_3_340_02.pdf> (11.06.2019).

¹⁹ **AASTP-4**, 2005, pp. II-34–II-37.

²⁰ *Ibid.*

²¹ **UFC 3-340-02**, 2008, p. 16.

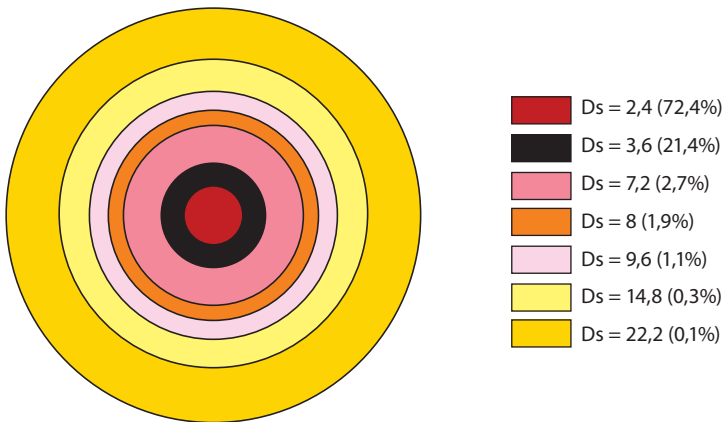
Riskianalüüsis käsitletava ohuteguri, rusude moodustumise ja laiali paiskumise peamised uuritavad parameetrid on järgmised:

- moodustuvate tükkide jaotus mõõtmete ja massi järgi (keskmine ja suurim võimalik väärtus);
- rusude paiskumiskiirus;
- rusude paiskenurk²².

Arvestades seda, et rusud paiskuvad laiali mööda ballistilist trajektoori, saab nende parameetrite määramisel hinnata piisava usaldusväärsusega rusude laialipaiskumise jaotust, paiskekaugust ja ohtlikkust.

Mõju inimestele ja ehitistele

Samal moel õhulööklaine ülerõhu jaotusega ruumis iseloomustavad rusude langemise jaotust maapinnal kontsentrilised ringid, mis põhinevad taandatud kaugusel. Rusude langemise jaotus on esitatud joonisel 4.



Joonis 4. Rusude langemine ruumis. Kontsentrilised ringid näitavad rusude langemise protsendilist jaotust maapinnal

Riskianalüüsi meetodikat koostades jagati laialipaiskuvad rusud tinglikult kaheks: kildudeks ja tükkideks. Tükkideks nimetatakse hoone laialipaiskuvaid struktuuriosi ja kildudeks teravaid ehituskonstruksiooni osi.

²² Weerheijm, J.; Voort, M. M. van der 2002. A Statistical Description of Explosion Produced Debris Dispersion. – International Journal of Impact Engineering, Vol. 59, pp. 30–33.

<https://www.msiac.nato.int/sites/default/files/attachments/vander_voort_ijie_debris_dispersion.pdf> (11.06.2019).

Killud ja tükid ohustavad inimorganismi eri moel. Killud võivad piisava kiirusega liikudes tungida läbi naha, tekitades raskeid haavu. Tõmbid tükid üldjuhul läbi naha ei tungi, kuid võivad piisavalt suure kineetilise energiaga anda ohtlikke lööke, põhjustades raskeid seesmisi vigastusi.²³

Kildude ohtlikkust hinnatakse kiirusväärtusega V_{50} , st kiirusega, mille korral pooled inimest tabanud kildudest tungivad läbi naha. Selline kiirus on piisav raskete vigastuste tekitamiseks. Samuti on ohtlikud ühest sentimeetrist suurema läbimõõduga tõmbid killud, mis võivad tekitada peale pindmiste haavade ulatuslikke lihaskoe rebendeid.

Nagu õhulööklaine puhul, nii saab ka kildude laialipaiskumise jaotust ning raskete või surmavate vigastuste tekke alasid iseloomustada kontsentriliste ringidena. Plahvatuse lähiümbruses on rusude laialipaiskumisest põhjustatud vigastuste ulatus ja tõenäosus märgatavalt suurem kui kaugemal.

Rusude laialipaiskumisel on peamine ehitisi kahjustav füüsikaline mõjur kineetiline energia, mis on võrdelises sõltuvuses tüki massist ja ruutvõrdelises sõltuvuses selle liikumiskiirusest. Seega tekitavad ehitistele ulatuslikumaid kahjustusi suuremad ja kiiremini liiguvad tükid.²⁴

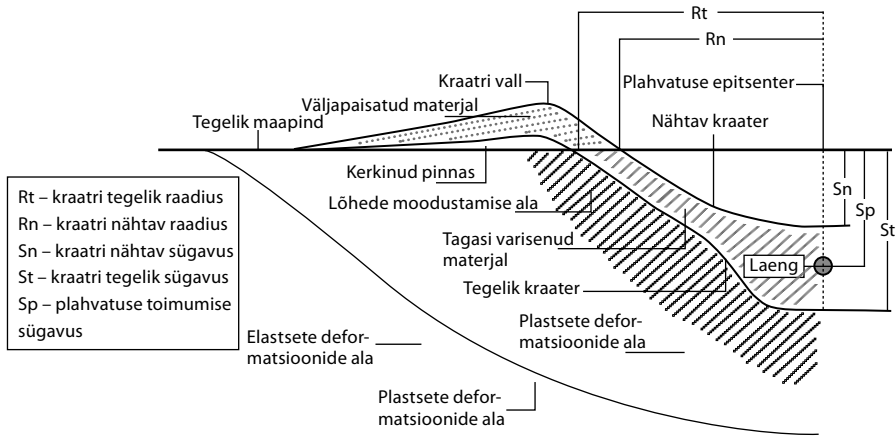
2.4.3. Kraater ja sellest välja paiskuv materjal

Kraater on lõhkeaine plahvatuse tagajärjel pinnasesse tekkinud süvend. Kraatri mõõtmed ja sealt välja paiskuvate pinnasetükkide paiskekaugus on tunduvalt väiksemad kui näiteks hoidla rusude laialipaiske ulatus või löök-laine purustava mõju piir. Seega on 1.1-ohuklassi lõhkematerjali ladustamisel kraatrist laiali paiskuvate materjalitükkide tekitatavad kahjustused või vigastused palju väiksemad. Siiski tuleb arvestada, et plahvatus maapealses hoidlas tekitab paratamatult peale pinnase väljapaiskumise muutusi ka hoidla aluspinnases²⁵. Tähtis on seegi, et teatud tingimustes võib kraatri moodustumine kutsuda esile detonatsiooni leviku hoidlast hoidlasse. Kraatri mõõtmed olenevad peamiselt plahvatava lõhkeaine liigist ja kogusest ning pinnase ja kivimite omadustest, massiivi ehitusest ning plahvatuse kõrgusest või sügavusest maapinna suhtes (vt joonis 5).

²³ Plahvatuse ja soojuskiirguse mõju inimestele ja ehitistele 2008, lk 83–85.

²⁴ *Ibid.*

²⁵ Tomberg, T., Veersalu, K. 2017. Lõhketööd I: mäenduslikud ja enamlevinud lõhketööd. Loengukonspekt. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, lk 96–98. [Tomberg, Veersalu 2017] <https://ttu.ee/public/g/Geoloogia_instituut/Oppematerjal/LOHKETOOD_LOENGIKONSPEKT.pdf> (11.06.2019).



Joonis 5. Kraatri parameetrid²⁶

Pinnasesse moodustunud kraatri riskianalüüsi parameetrid on loetletud allpool.

- Nähtav kraater – nähtav süvend maapinnas, mis on osaliselt täitunud väljapaisatud materjaliga. Nähtavat kraatrit iseloomustavad kraatri nähtav raadius ja sügavus.
- Tegelik kraater – maapinda tegelikult tekkinud süvend, mille mõõdmetes ei ole arvestatud väljapaisatud materjali tagasikukkumist kraatrisse. Seda iseloomustavad kraatri tegelik raadius ja sügavus.
- Lõhede tekkimise ala – ala kraatri külgede (moodustaja) ümber, mida iseloomustab intensiivne lõhede teke kivimites. Savipinnases võib lõhede tekke tsoon puududa.
- Plastne deformatsioonide ala – ala kraatri külgedel, kus on toimunud kivimi või pinnase ulatuslikud plastsed deformatsioonid. Plastsete deformatsioonide ala piirneb lõhede tekke tsooniga. Kivimi või pinnase massiiv on tunduvalt vähem häiritud kui lõhede tekke tsoonis.
- Kraatri vall – väljapaisatud materjalist kõrgendik ümber kraatri perimeetri.²⁷

²⁶ AASTP-4, 2016 = Manual on Explosives Safety Risk Analysis (AASTP-4), Part II: Technical Background, Ed. 1, Version 4, 2016. NATO, Allied Ammunition Storage and Transport Publication, p. 189.

²⁷ Tomberg, Veersalu 2017, lk 96–98;

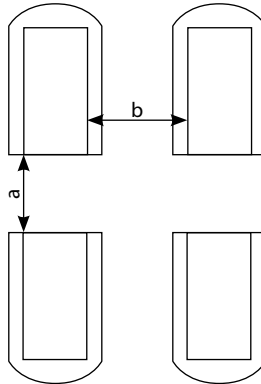
Rooke, A., D.; Carnes, B. L.; Davis, L. K. 1974. Cratering by Explosions – A Compendium and an Analysis. USA: US Army Waterways Experiment Station, TR-N-74-1, pp. 37–40. [Rooke et al. 1974]

<<https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/b024657.pdf>> (11.06.2019).

3. Matemaatiliste mudelite koostamine

3.1. Fiktiivne ladu

Fiktiivse laona käsitleti mingile territooriumile korrapäraselt paigutatud neljast hoidlast koosnevat pealmaa-laokompleksi (vt joonis 6).

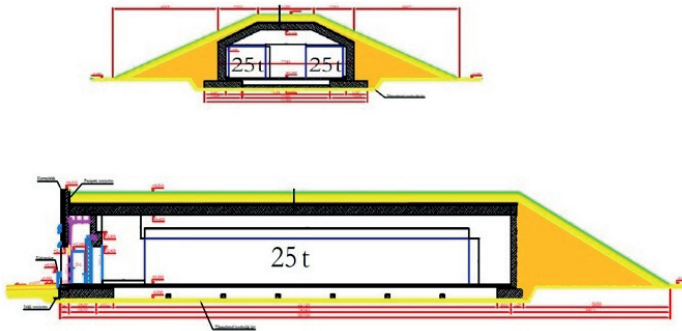


Joonis 6. Fiktiivse laokompleksi plaan

Fiktiivseks hoidlaks võeti päris hoidla mõõtu ja lähedase konstruktsiooniga tugev, kolmebaarist ülerõhku taluv raudbetoonehitis, mis oli kaetud pinnasega. Joonisel 7 on esitatud hoidla rist- ja pikilõige.

Laokomplekside riskianalüüsi matemaatilised mudelid koostati nii, et hoidlate mõõtmed, kasutatavad ehitusmaterjalid ja -konstruktsioonid, vahemaa, paigutus üksteise suhtes ning ladustatava lõhkeaine kogus oleksid mudelis hõlpsasti muudetavad. Koostatud matemaatilised mudelid on seega üsna universaalsed: neis saab muuta nimetatud suursusi ning vajaduse korral ka empiirilisi võrrandeid ja/või konstante.

Matemaatiliste mudelite koostamise aluseks võeti 50 000 kilogrammi (lõhkeaine netomassis) 1.1-ohuklassi ehk massplahvatusohtlike lõhkematerjalide ladustamine pinnasega kaetud raudbetoonhoidlas (vt joonis 7).



Joonis 7. Fiktiivse hoidla rist- ja pikilõige

3.2. Matemaatilised mudelid

Matemaatilised mudelid koostati 1.1-ohuklassi lahingumoona pealmaa-hoidlas toimuda võivate avariide järgmiste füüsikaliste ohutegurite parameetrite määramiseks:

- õhulööklaine;
- plahvatusel laiali paiskuvad hoidla rusud;
- plahvatusel pinnasesse moodustuva kraatri mõõtmed ja sealt välja paiskuv materjal.

Matemaatilistes mudelites arvatati eri ohutegurite võimalik mõjuulatus ning nende eeldatav mõju lao naaberrajatistele.

3.3. Ohutegurid

3.3.1. Õhulööklaine

Õhulööklaine ülerõhku on muudest ohuteguritest lihtsam prognoosida. See meetod on üsna usaldusväärne, sest põhineb paljudel katsetustel ja avariide analüüsidel. Üsna lihtne on prognoosida ka dünaamilise ülerõhu tekitatavaid kahjustusi ja vigastusi.

Peamised füüsikalised parameetrid, mis määravad õhulööklaine kahjustava mõju inimestele ja mitmesugustele rajatistele, on lööklaine impulss ja tipprõhk. Seejuures väljendab impulss, eelkõige selle positiivne faas, mehaanilist tööd, mis omakorda tekitab vigastusi ja purustusi. Kahjustav mõju ilmneb vaid siis, kui tipprõhk ületab kindla väärtuse²⁸.

²⁸ AASTP-4, 2005, pp. II-16–II-22.

Õhulööklainet vaadeldi sfäärilise lainena, mille tippsurve muutus sõltub plahvatavast lõhkeaine kogusest ja kaugusest plahvatuskohast. Muutused keskkonnas (nt õhutemperatuur, õhurõhk, tuule kiirus) võivad muuta löök-laine parameetreid, kuid üksnes vähesel määral²⁹.

Matemaatiliste mudelite koostamisel kasutatud õhulööklaine prognoosimise meetod põhineb empiirilistel seostel, mis arvestavad lõhkeainet ja selle kogust. Selle meetodi puhul on sõltuvate muutujate ehk õhulööklaine dünaamilise ülerõhu ja impulsi määramisel vaja teada lõhkeaine netomassi, lõhkeaine TNT-ekvivalenti ning vahemaad laengu keskpunktini.

Mudelite koostamisel prognoositi õhulööklaine peamisi parameetreid (tipprõhk ja -impulss ning löök-laine positiivse faasi kestus) järgmist viisi ladustamisel:

- ladustamine lahtiselt (teoreetiline võimalus, millega kontrolliti seaduspärasusi);
- ladustamine pinnasega kaetud raudbetoonhoidlas.

Pinnasega kaetud raudbetoonhoidlate matemaatiliste mudelite koostamisel arvestati ka asjaoluga, et õhulööklaine mõjuulatus on hoidla fassaadi, külge- ja tagaseina suunas erinev.

3.3.2. Laialipaiskuvad rusud

Rusude laialipaiskumise matemaatilises mudelis modelleeriti peamiselt tükkide ja kildude laialipaiskumist ümbruskonda. Lähtudes asjaolust, et mudelid koostati 1.1-ohuklassi lõhkematerjali ladustamise riskianalüüsi väljatöötamiseks, milles esmaste kildude teke ja mõju on teisestest tunduvalt vähem oluline, analüüsiti vaid teiseste tükkide või kildude moodustumist ja laialipaiskumist.

Plahvatuse korral moodustuvad äärmiselt ebakorrapärase kuju ja erisuguste lineaarmõõtmetega tükid. Neid on keeruline prognoosida, seetõttu esitati mudelis tükid lihtsustatud suuruse ja kujuga. Empiirilisel andmestikul ja seostel põhineva mudeli aluseks võeti hoidla konstruktsioonile, ehitusmaterjalile, ladustatavale lõhkematerjalile ja hoidla parameetritele tuginev plahvatuse tagajärjel tekkivate materjalitükkide prognoositav keskvärtus.

²⁹ **Kaplan, K.** 1978. Effects of Terrain on Blast Prediction Methods and Predictions. BRL Contract Report ARBRL-CR-00364. Maryland: US Army Armament Research & Development Command, Ballistic Research Laboratory, pp. 55–56.
<<https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a051569.pdf>> (11.06.2013).

Teise lihtsustusena plahvatusgaaside surve prognoosimisel kohandati ladustatava lõhkematerjali vahetus läheduses (vähem kui 1 m) teistes tingimustes (vahetu kontakt laenguga ja kaugus alates 5 m-st) kehtivaid empiirilisi seoseid kaugusele 0,2–1 m³⁰.

Empiiriliste seoste järgi prognoositi mudelis hoidla konstruktsiooni, mõõtmete, kasutatud ehitusmaterjalide ning ladustatava lõhkematerjali koguse põhjal peamised riskianalüüsis vajalikud rusude laialipaiskumise ohtlikkuse parameetrid. Need olid järgmised:

- plahvatusse mõjul tekkiva sekundaarse tüki keskmine lineaarmõõde ja mass;
- moodustuvate tükkide arv (suurusjärk);
- tükkide laialipaiskumise algkiirus;
- tükkide langemisulatus ruumis.³¹

Plahvatusel tekkivate tükkide moodustumise prognoosiks koostati Tallinna Tehnikaülikooli mehaanika ja tööstustehnika instituudis hoones (ladu) toimuva plahvatusse lõplike elementide meetodil (LEM) põhinev imitatsioon.

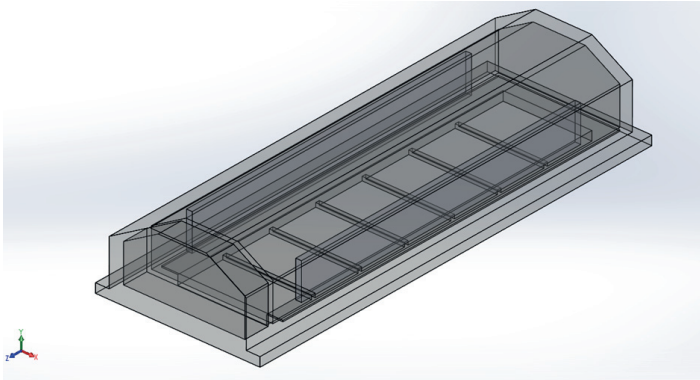
Selleks modelleeriti etteantud mõõtmete alusel hoidla 3D-mudel (vt joonis 8) programmis SolidWorks ning kanti see üle analüüsitarkvarasse ANSYS Autodyn.

ANSYS Autodyn on lõplike elementide meetodil põhinev analüüsitarkvara, mis võimaldab modelleerida gaaside, vedelike, tahkiste ja nende vastasmõju mittelineaarset dünaamikat. See võimaldab ka analüüsida lõhkeainete plahvatusse tingitud resultantpingeid empiiriliste Jones-Wilkins-Lee (JWL) võrrandite abil.

Tegelike mõõtmega hoidla töötava, st tõrgeteta esitatava prognoosimudeli loomiseks vajaliku lihtsustusena valiti hoidla materjaliks armeerimata betoon ja lõhkeaineks standardlõhkeaine TNT. Lõhkeainet on hoidlas 50 tonni ja see on jaotatud võrdselt kaheks klotsiks, mis asuvad kummalgi pool hoone pikikülgedes seinast 200 mm kaugusel (vt joonis 9). See on vähim ohutusnõuetele vastav vahemaa lõhkeaine taara ühiku ja hoidla seinaga vahel.

³⁰ Kingery, C. N.; Bulmash, G. 1984. Airblast Parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Surface Burst. Report Number ARBRL-TR-02555. Maryland: US Army Armament and Development Center, Ballistic Research Laboratory, p. 67.

³¹ UFC 3-340-02, 2008, pp. 14–16.

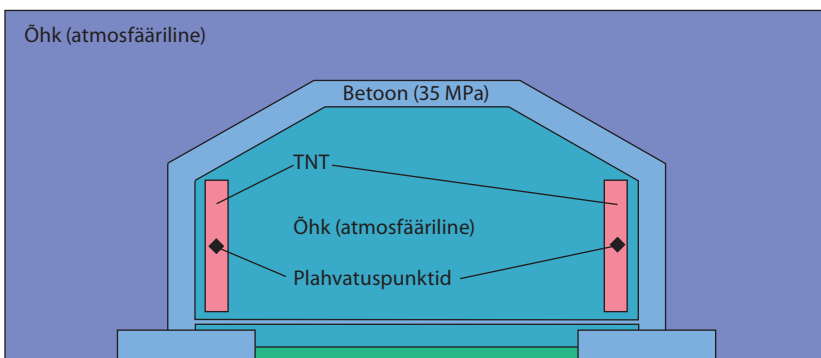


Joonis 8. Laohoone mudel

Plahvatusesurve modelleerimiseks kasutati tabelis 3 esitatud materjali mudeleid.

Tabel 3. Modelleerimisel kasutatud materjalide olekuvõrrandid ja tugevusmudelid

Materjal	Olekuvõrrand	Tugevusmudel	Tihedus (kg/m ³)	Nihkemoodul (kPa)
Betoon (35 MPa)	P-alpha	RHT* ³²	2750	1.67e + 7
TNT	JWL		1630	
Õhk	Ideaalgaas		1.225	



Joonis 9. Hoidla arvutusmudeli lõige

³² RHT on betooni dünaamilisi tugevusomadusi kirjeldav matemaatiline tugevusmudel.

Hoidla jaotati lõplikeks elementideks küljepikkusega 200 mm, mis tegi kokkuvõttes betoonist osa peale 2 365 439 elementi. Lahendusmeetodiks oli Lagrange'i meetod. TNT puhul kasutati lahendusmeetodina silutud osakeste hüdrodünaamilist mudelit (SPH), mis koosnes 245 070 sõlmest. Atmosfääriõhu modelleerimisel väljaspool hoidlat ja hoidla sees kasutati Euleri lahendusmeetodit.

Arvutuste tulemusel saadi üksikasjalik ülevaade hoidla purunemisest kuni 20 millisekundi jooksul pärast lõhkeaine plahvatust. Programm võimaldab saada salvestussammu pikkuse järgi informatsiooni eri ajahetkedel tekkinud fragmentide kohta, nt elementide arv fragmendis, fragmendi mass, maht, asukoht mudeli koordinaatsüsteemi järgi, pikkus, kineetiline energia, keskmine kiirus.

3.3.3. Kraater ja sellest välja paiskuv materjal

Plahvatuse võimalikke tagajärgi ennustavad lõhkematerjali ladustamisviisid:

- 1) lõhkematerjali lahtine ladustamine otse pinnasel;
- 2) lõhkematerjali ladustamine raudbetoonist tugeva põrandakonstruktsiooniga kergehitisest hoidlas;
- 3) lõhkematerjali ladustamine pinnasega kaetud raudbetoonhoidlas.

Modelleerimise põhirõhk oli kolmandal variandil, esimest kahte modelleeriti vaid teoreetilise võimalusena seaduspärasuste arvutuslikuks kontrolliks.

Matemaatilistes mudelites modelleeriti võimaliku hoidla ehituse ja aluspinnase alusel:

- 1) tegeliku ning nähtava kraatri laius ja sügavus;
- 2) kraatri maht;
- 3) kraatrist välja paiskunud materjali jaotus ruumis.

Pinnasega kaetud tugevate raudbetoonhoidlate kohta ei leidu piisavalt empiirilist andmestikku, sest täiemõõdulisi katsetusi ei ole selles vallas tehtud. Samuti on seda tüüpi hoidlates toimunud usaldusväärse empiirilise andmestiku kogumiseks liiga vähe õnnetusi. Kraatri parameetrite prognoosi matemaatiline mudel koostati³³ välja töötatud võrrandite alusel. Mudelis

³³ **Henderson, J.** 1990. Joint Australian/UK Stack Fragmentation Trials. Phase 4 Preliminary Report. United Kingdom: Ministry of Defense, Explosives Storage and Transport Committee (ESTC), p. 1846.

<<https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a531117.pdf>> (17.06.2019);

Rooke et al., pp. 37–40.

prognoositi plahvatava lõhkeaine koguse järgi kraatri fiktiivne raadius ning eeldatava tegeliku kraatri pikkus, laius, sügavus ja maht.

4. Kokkuvõte

Laskemoonaladudes aset leidva avari toimemehhanismi ja võimalike tagajärgede prognoosiks on Tallinna Tehnikaülikoolis loodud esialgne metoodika, mille järgi koostada 1.1-ohuklassi lõhkematerjalide pealmaaladustamise riskianalüüsi. Metoodika põhineb selle ohuklassi lõhkematerjali pealmaaladustamise peamiste ohutegurite – õhulööklaine, hoidla laialipaiskuvad rusud ja tükid ning maapinnas moodustuv kraater – parameetrite analüüsi matemaatilistel mudelitel, mis on koostatud empiiriliste seoste põhjal. Nende mudelite arvutuslikuks katsetamiseks koostati fiktiivse lao mudel, milles on võimalik modelleerida laskemoonalaos toimuvat avariid, muutes näiteks lao konstruktsiooni, paigutust ja lõhkeaine netokogust.

Esmast metoodikat üha täiustatakse. Praegused tegevussuunad on järgmised:

- matemaatiliste mudelite sidumine ühtseks arvutiprogrammiks ning selle katsetamine fiktiivse laskemoonalaos mudeliga;
- riskianalüüsi metoodika täiendamine, st matemaatiliste mudelite loomine teiste ohuklasside lõhkematerjalide ladustamise analüüsiks;
- riskianalüüsi metoodika arvutiprogrammide kasutajale mugavamaks muutmise;
- päris laskemoonalaos riskianalüüs.

Artiklis käsitlesime vaid oma uuringu peamisi suundi ja esialgseid tulemusi. Tallinna Tehnikaülikoolis on valminud teaduslikult põhjendatud, väikeriigile sobiva ja kasutajasõbraliku lahingumoonalaos ladustamise riskianalüüsise koostamise metoodika esimene etapp, mida tuleb koostöös Kaitseväge ja Kaitseministeeriumiga edasi arendada.

Kirjandus

AASTP-1 = Manual of NATO Safety Principles for the Storage of Military Ammunition and Explosives (AASTP-1) 2010. NATO, Allied Ammunition Storage and Transport Publication.

AASTP-3 = Manual of NATO Safety Principles for the Hazard Classification of Military Ammunition and Explosives (AASTP-3) 2009. NATO, Allied Ammunition Storage and Transport Publication.

- AASTP-4**, 2005 = Manual on Explosives Safety Risk Analysis (AASTP-4), Ed. 1, Version 3, 2005. NATO, Allied Ammunition Storage and Transport Publication.
- AASTP-4**, 2016 = Manual on Explosives Safety Risk Analysis (AASTP-4), Part II: Technical Background, Ed. 1, Version 4, 2016. NATO, Allied Ammunition Storage and Transport Publication.
- Aruküla, H., Eigo, L., Joosep, E., Reinsalu, E.** 1980. Puur- ja lõhketööd. Tallinn: Valgus, lk 128–138.
- Charmaz, K.** 2006. Constructing Grounded Theory: A Practical Guide through Qualitative Analysis. London, Los Angeles, New Delhi, Singapore: SAGE Publications Ltd.
- EKSS = Eesti keele seletav sõnaraamat** 2009. Eesti Keele Instituut.
<<http://www.eki.ee/dict/ekss/>> (17.06.2019).
- Henderson, J.** 1990. Joint Australian/UK Stack Fragmentation Trials. Phase 4 Preliminary Report. United Kingdom: Ministry of Defense, Explosives Storage and Transport Committee (ESTC).
<<https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a531117.pdf>> (17.06.2019).
- Kaplan, K.** 1978. Effects of Terrain on Blast Prediction Methods and Predictions. BRL Contract Report ARBRL-CR-00364. Maryland: US Army Armament Research & Development Command, Ballistic Research Laboratory.
<<https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a051569.pdf>> (11.06.2019).
- Kingery, C. N.; Bulmash, G.** 1984. Airblast Parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Surface Burst. Report Number ARBRL-TR-02555. Maryland: US Army Armament and Development Center, Ballistic Research Laboratory.
- Lepik, K.; Strömpl, J.** 2018. Põhistatud teooria. – Sotsiaalse analüüsi meetodite ja metodoloogia õpibaas. Tartu: Tartu Ülikool.
<<http://samm.ut.ee/pohistatud-teooria>> (01.12.2018).
- Ngo, T., Mendis, P., Gupta, A., Ramsay, J.** 2007. Blast Loading and Blast Effects on Structures – an Overview. – Electronic Journal of Structural Engineering (EJSE). Special Issue: Loading on Structures, pp. 76–91.
<https://www.researchgate.net/publication/279897768_Blast_loading_and_blast_effects_on_structures_-_An_overview> (11.06.2019).
- Plahvatuse ja soojuskiirguse mõju inimestele ja ehitistele: ohutusraamatud 1 ja 2**, 2008. Ministerie van Verkeer en Waterstaat. Tallinn: Sisekaitseakadeemia Kirjastus.
- Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings** 2003. Federal Emergency Management Agency (FEMA).
<<http://www.fema.gov/media-library-data/20130726-1455-20490-6222/fema426.pdf>> (11.02.2015).
- Rooke, A., D.; Carnes, B. L.; Davis, L. K.** 1974. Cratering by Explosions – A Compendium and an Analysis. USA: US Army Waterways Experiment Station, TR-N-74-1.
<<https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/b024657.pdf>> (11.06.2019)
- Tomberg, T.** 2014. Lõhkematerjalide käitlemise alused. Täienduskoolitus „Lõhketööd“, 21.11.–24.11.2014 TTÜ mäeinstituudis.

Tomberg, T., Veersalu, K. 2017. Lõhketööd I: mäenduslikud ja enamlevinud lõhketööd. Loengukonspekt. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool.

<https://ttu.ee/public/g/Geoloogia_instituut/Oppematerjal/LOHKETOOD_LOENGUKONSPEKT.pdf> (11.06.2019).

UFC 3-340-02 = Unified Facilities Criteria (UFC) 3-340-02: Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions 2008. US Department of Defense.

<https://www.wbdg.org/FFC/DOD/UFC/ARCHIVES/ufc_3_340_02.pdf> (11.06.2019).

UN Recommendations on the Transport of Dangerous Goods 2011. 17th revised edition, Vol. 1. United Nations.

<https://www.unece.org/trans/danger/publi/unrec/rev20/20files_e.html> (05.06.2019).

Weerheijm, J.; Voort, M. M. van der 2002. A Statistical Description of Explosion Produced Debris Dispersion. – International Journal of Impact Engineering, Vol. 59, pp. 29–37.

<https://www.msiac.nato.int/sites/default/files/attachments/vander_voort_ijie_debris_dispersion.pdf> (11.06.2009).

Kapten (res) **TÕNU TOMBERG**, MSc

Tallinna Tehnikaülikooli loodusteaduskonna geoloogia instituudi
mäendustingimuste labori juhataja

Kolonelleitnant, PhD **RAUL JÄRVISTE**

Kaitseväe Akadeemia rakendusuuringute osakonna ülem

MAARJUS KIRS, MSc

Tallinna Tehnikaülikooli inseneriteaduskonna mehaanika ja tööstustehnika
instituudi nooremteadur

ALEKS STRAZDIN, BSc

Tallinna Tehnikaülikooli loodusteaduskonna geoloogia instituudi tehnik

SIIM EENSOO, BSc

Tallinna Tehnikaülikooli loodusteaduskonna geoloogia instituudi tehnik