

Aalto-yliopisto
Perustieteiden korkeakoulu
Teknillisen fysiikan ja matematiikan tutkinto-ohjelma

Suojarakenteiden vaikutus kohteiden selviytymiseen sirpale- ja painevaikutuksen alla

Kandidaatintyö
8. lokakuuta 2018

Patrik Lahti

Työn saa tallentaa ja julkistaa Aalto-yliopiston avoimilla verkkosivuilla.
Muilta osin kaikki oikeudet pidätetään.

Tekijä Patrik Lahti

Työn nimi Suojarakenteiden vaikutus kohteiden selviytymiseen sirpale- ja painevaikutuksen alla

Koulutusohjelma Teknillisen fysiikan ja matematiikan koulutusohjelma

Pääaine Matematiikka ja systeemitieteet

Pääaineen koodi SCI3029

Vastuuopettaja Prof. Kai Virtanen

Työn ohjaaja(t) DI Heikki Puustinen

Päivämäärä 08.10.2018

Sivumäärä 3+34+1

Kieli suomi

Tiivistelmä

Räjähdevaikutuksilta voidaan pyrkiä suojautumaan erilaisilla linnoitteilla ja suojarakenteilla, sekä kohteiden hajauttamisella ja sijoittelulla. Tämän työn tavoitteena on kehittää laskentamalli, joka mahdollistaa aiempaa tarkemman epäsuoran tulen ja täsmäaseiden vaikutuksen mallintamisen. Työssä kehitetään laskentamalli, jolla voidaan ottaa huomioon suojarakenteiden vaikutus tuhoutumistodennäköisyyksiin.

Työssä kehitetään laskentamalli laajentamaan olemassa olevaa simulointiohjelmistoa, jolla voidaan simuloida epäsuoran tulen vaikutusta. Laskentamalli kehitetään käyttämällä apuna analyytistä ja laskennallista geometriaa. Työn laskentamalli perustuu ajatukselle, jossa suojarakenteet projisoidaan kohteiden pinnalle ja kohteita vahvistetaan projektoiden määräämiltä alueilta suojarakenteen materiaalin vahvuudella. Laskentamalli paitsi ratkaisee projisointitehtävän, myös erottelee kohteen pinnalle syntyvät eripaksuiset alueet. Lisäksi laskentamalli huomioi simulointiohjelmiston vaatimuksen, jonka mukaan kaikkien kappaleiden tulee koostua neliöistä. Tämä pakottaa ratkaisemaan ongelman, jossa kohteen pinnalta erotellut monikulmiot joudutaan neliöimään.

Työssä esitetään lisäksi esimerkkisimulaatioita, joilla osoitetaan laskentamallin toimivuus, sekä simulaatio, joka toimii käyttöesimerkinä. Esimerkkisimulaatioissa osoitetaan laskentamallin pätevyys, sekä kyky huomioida suojarakenteen materiaalin vahvuudesta riippuva vaimennus.

Työssä esitellään laskentamallin matemaattinen perusta ja analysoidaan esimerkkisimulaatioiden tuloksia. Lopputuloksena työssä saadaan aikaan malli, joka kykenee huomioimaan suojarakenteiden vaikutuksen. Työssä havaitaan lisäksi, että suojarakenteiden vaikutus noudattaa eksponentiaalista vaimenemista. Työssä toteutetun laskentamallia voidaan jatkossa vastata uudennlaisiin tutkimuskysymyksiin, kuten mikä vaihtoehtoisista sijoituspaikoista on paras suojaamaan arvokkaita kohteita.

Avainsanat Epäsuora tuli, laskentamalli, simulointi, suojarakenteet

Sisältö

1	Johdanto	1
2	Työn tausta	2
2.1	Simulointiohjelmisto	2
2.1.1	Paine- ja sirpalevaikutuksen mallintaminen ja simulointi	4
2.1.2	Simulointiohjelmiston käyttö ja periaatteet	6
2.2	Tutkimusongelma	8
3	Räjähdyksivaikutuksen laskentamalli	8
3.1	Suojarakenteen projektio maalipinnalle	10
3.2	Monikulmioiden neliöinti	13
3.2.1	Neliöinnin muodostaminen	13
3.2.2	Neliöiden yhdistelyalgoritmi	15
4	Esimerkkisimulaatiot	17
4.1	Yksinkertaisen suojarakenteen vaikutus selviytymistodennäköisyyteen	19
4.2	Suojarakenteen paksuuden vaikutus selviytymistodennäköisyyteen	21
4.3	Infrastruktuurimaisen suojarakennejärjestelmän vaikutus selviytymistodennäköisyyteen	22
5	Tulokset	24
5.1	Yksinkertaisen suojarakenteen vaikutus selviytymistodennäköisyyteen	24
5.2	Suojarakenteen paksuuden vaikutus selviytymistodennäköisyyteen	25
5.3	Infrastruktuurimaisen suojarakennejärjestelmän vaikutus selviytymistodennäköisyyteen	29
6	Johtopäätökset	31
A	Esimerkkisimulaatioiden kuvia	35

1 Johdanto

Epäsuora tuli on yksi sodankäynnin merkittävimmistä vaikuttamisen keinoista tappioiden suhteen tarkasteltuna. Epäsuoralla tulella yleensä tarkoitetaan tulivaikutusta, joka toimitetaan kohteeseen, joka ei ole tähtääjän näkyvässä (NATO Standardization Office, NSO 2018). Epäsuoran tulen merkitys on kasvanut aina ensimmäisestä maailmansodasta nykypäivään. Moderni epäsuora tuli koostuu perinteisten tykistöaseiden lisäksi etäohjattavista täsmäaseista (Dullum et al. 2017). Viimeaikaisissa sodissa epäsuoran tulen arvioidaan tuottaneen noin 50 - 80 % tappioista (Bellamy & Zajtchuck 1991). Lisäksi täsmäaseiden merkittävä tuhovaikutus, erityisesti strategisesti tärkeisiin kohteisiin, on havaittu selvästi esimerkiksi Lähi-idän viimeaikaisissa konflikteissa (Pape 1997). Korkea epäsuoran tulen uhka on luonut tarpeen arvioida vihollisvaikutuksen aiheuttamia tappioita sekä vaikutusta omaan toimintaan ja ryhmitukseen. Tämä sodankäynnin kehitys on johtanut erilaisten laskentamallien ja taistelusimulaatioiden tarpeeseen ja kehitykseen.

Viime vuosikymmeninä laskentamallit ja simulaatiot ovat kehittyneet yhä paremmiksi kasvaneen laskentatehon ja algoritmien tehokkuuden johdosta. Tämä on johtanut monien erilaisten laskentamallien ja työkalujen kehittämiseen (Lappi 2012). Viimeaikaisessa epäsuoraa tulta käsittelevässä tutkimuksessa on keskitytty erityisesti laskenta- ja simulointimallien kehittämiseen ja validointiin (ks. Åkesson et al. 2013). Lisäksi tutkimuksessa on pyritty sisällyttämään malleihin merkittäviä lisätekijöitä, kuten puuston vaikutus (Roponen 2015).

Viime aikoina on erityisesti keskitytty simulointimalliin, joka mallintaa ja simuloi epäsuoraa tulta ottaen huomioon maaston vaikutuksen (Klemola 2016). Tämä malli on kuitenkin osin puutteellinen, sillä se ei kykene huomioimaan erilaisten suojarakenteiden vaimentavaa vaikutusta tai olettaa niiden pysäyttävän asevaikutuksen. Tämän työn tavoitteena on kehittää laskentamalli, joka ottaa huomioon suojarakenteiden vaimentavan vaikutuksen.

Tässä työssä laajennetaan aikaisemmin kehitettyä mallia ottamalla huomioon suojarakenteiden vaimentava suojavaikutus, joka aikaisemmassa mallissa on oletettu pysäyttäväksi. Laskentamallin toteuttaminen mahdollistaa aiempaa monimutkaisempien skenaarioiden tarkemman mallintamisen ja simuloinnin, joita voidaan käyttää apuna esimerkiksi tukikohdan ryhmitukseen liittyvässä päätöksenteossa. Tutkimuksen päämääränä on tuottaa tarkennettu laskentamalli ja yhdistää se olemassa olevaan simulointiohjelmistoon (Klemola 2016). Lisäksi tavoitteena on osoittaa laskentamallin toimivuus, tuottaa alan kirjallisuutta ja osoittaa kohteita jatkotutkimukselle.

2 Työn tausta

Sotilasalan ilmiöitä, kuten epäsuora tuli, arvioitaessa on periteisesti päätöksenteossa luotettu päätöksentekijöiden kokemukseen ja intuitioon. Modernit aseet ja sodankäynnin kehittyminen ovat tuoneet tarpeen systeemi- ja operaatiotutkimuksen menetelmille, sillä tarkasteltavat ilmiöt ovat monimutkaisia ja sisältävät monia erilaisia muuttujia. Sotilasjohtajien kohtaamat päätöksenteko-ongelmat ovat usein hyvin moniulotteisia ja niillä voi olla kauaskantoisia seurauksia. Erityisesti sodan luonne aiheuttaa tarpeen analysoida tulevia tapahtumia, jotta mahdolliset tappiot voitaisiin minimoida. Epäsuoran tulen kontekstissa tulivaikutuksen arvioiminen vaatii käytännössä tietokonesimulaatioita tai muita laskennallisia menetelmiä, sillä kokeisiin liittyy muun muassa paljon satunnaisuutta ja epävarmuutta. Lisäksi luonnollisista syistä esimerkiksi oman ryhmittymisen toimivuutta epäsuoran tulen iskussa on vaikea arvioida. Erityisesti sotilasoperaatiotutkimuksella pyritään tuomaan tieteeseen pohjautuvaa tietoa päätöksenteon tueksi. (Jaiswal 2012.)

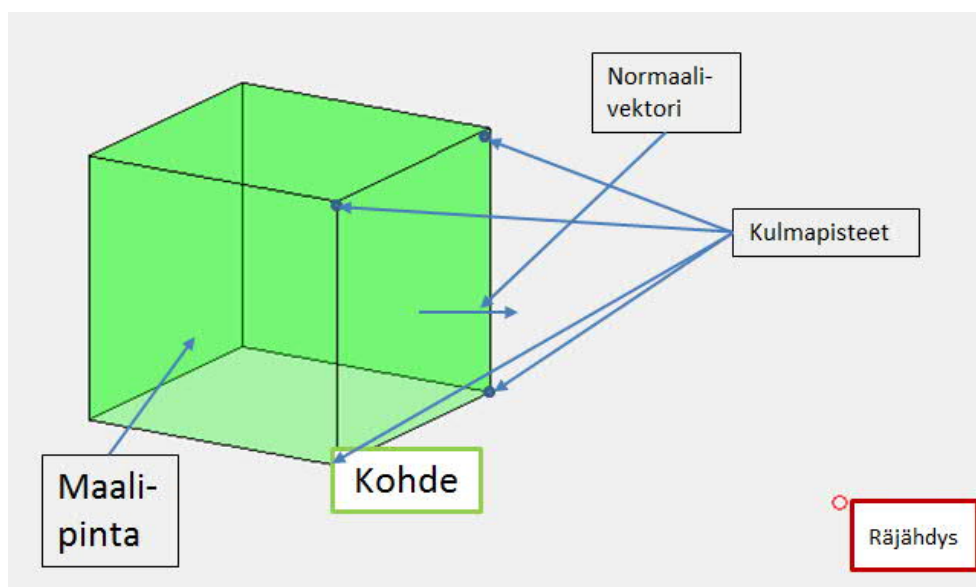
Tässä työssä käytetään pohjana valmista simulointiohjelmistoa ja kehitetään siihen pohjautuva laskentamalli. Käytettävän simulointiohjelmiston (Klemola 2016) perusajatus pohjautuu sille, mitä tapahtuu ammuksen räjähtäessä. Räjähdyspisteestä lähtee kolmiulotteiset, ammuksesta riippuvat, sirpaleviuhkat sekä painevaikutus, joka etenee fysikaalisesti palloaaltona. Simulointiohjelmistossa painevaikutus on toteutettu laskemalla räjähdysen TNT-ekvivalentin aiheuttaman paineaallon etenemistä ja tarkastelemalla kappalekohtaisesti, millä todennäköisyydellä kyseisellä etäisyydellä oleva kappale tuhoutuu painevaikutuksen vuoksi. Sirpaleviuhkat on toteutettu etenemään suoraviivaisesti kyseisen räjähdysen tuottaman sirpalemassajakauman mukaisesti kolmiulotteisina viuhkoina. Simulointiohjelmistossa sirpaleviuhkojen etenemistä mallinnetaan fysikaalisesti ja otetaan huomioon muun muassa ilmanvastus (Klemola 2016).

2.1 Simulointiohjelmisto

Työssä käytettävä simulointiohjelmisto pohjautuu fysikaaliseen malliin. Simulointiohjelmistossa voidaan mallintaa erilaisia kappaleita. Kaikille kappaleille yhteisenä vaatimuksena on niiden muoto ja määrittely. Simulointiohjelmisto vaatii, että jokainen kappale koostuu yhdestä tai useammasta neljästä. Jokaiselle kappaleelle tulee määritellä koordinaattien referenssipiste, joka osoittaa kappaleen pohjan keskipisteen, sekä korkeus, joka kertoo, millä korkeudella referenssipiste on verrattuna maaston korkeuteen keskipisteessä.

Jokaiselle kappaleelle tulee lisäksi määritellä, mistä pinnoista se koostuu. Näiden pintojen tulee olla neliöitä. Neliölle tulee määritellä sen kulmapisteiden koordinaatit, pinta-ala sekä "paksuus" eli vahvuus teräsekvivalenttina. Lisäksi neliölle tulee määritellä suunnistus eli pinnan normaalivektori. Jokainen määritelty neliö on siis pinta, joka kuuluu osaksi jotakin isäntäkappaletta.

Simulointiohjelmistossa voidaan laskea jokaiselle määritellylle kappaleelle tuhoutumistodennäköisyydet simuloimalla asevaikutusta. Asevaikutus määritellään simulointiohjelmistolle määrittelemällä vaikutuksen koordinaatit. Tästä pisteestä räjähdevaikutus etenee fysikaalisten etenemismallien mukaisesti. Alkuperäisessä simulointiohjelmistossa kappaleet toimivat esteinä sirpaleille. Tämä tarkoittaa sitä, että asevaikutus pysähtyy kappaleeseen, eikä sen takana oleva toinen kappale voi tuhoutua. Edellä kuvattu on esitetty visualisoituna kuvassa 1.



Kuva 1: Visualisointi simulointiohjelmistoon liittyvistä peruskäsitteistä.

Edellä kuvattua valmista simulointiohjelmistoa pyritään tässä työssä laajentamaan siten, että tarkasteluun voidaan lisätä suojarakenne. Tällöin on myös tarpeellista tarkentaa käsitteitä. Tässä työssä kappaleet jaetaan kohteisiin ja suojarakenteisiin. Kohteet taas jaetaan erikseen osiin maalipinnoiksi ja vastaavasti suojarakenteet suojapinnoiksi. Tällöin tarkasteltavaa tilannetta voidaan visualisoida kuvan 2 esittämällä tavalla.

Kuvassa 2 on esitettyä työn ydinkäsitteet visualisoituna. Kuvassa 2 esitetty suojarakenne on käytännössä kuitenkin vain laskennallinen apuväline ja simulointiohjelmistolle ei koskaan välitetä tietoa kappaleesta itsestään, vaan vain sen vaikutuksista. Kuvassa 2 esitetty suojarakenteen projektio esitellään luvussa 3.

Epäsuoran tulen vaikutuksen mallintaminen vaatii kykyä simuloida asevaikutuksesta syntyvä räjähdysten aiheuttama painevaikutus sekä lisäksi tappioiden suhteessa merkityksellisempi sirpalevaikutus. Sirpalevaikutuksen mallintamista on käsitelty alalla jo 1980-luvulla, jolloin esitettiin laskentamalleja räjähddevaikutukselle (Heininen 2006). Kuitenkin epäsuoran tulen simuloimallien järjestelmällinen kehittäminen aloitettiin Suomessa vasta 2000-luvun ensimmäisellä vuosikymmenellä, sillä varsinaisia tarkkoja malleja ei ollut (Lappi 2012). Kehitettävissä malleissa on kasvavissa määrin pyritty ottamaan huomioon vaikutusten realistisuus. Malleja on pyritty rakentamaan fysikaaliselle ja tilastolliselle pohjalle.

Tietokonesimulaatioiden ja laskennallisten menetelmien kehittyminen viime vuosikymmeninä on mahdollistanut tilastollisten menetelmien ja stokastisen simuloinnin käyttöönottoon sotilasoperaatiotutkimuksessa (Lappi 2012). Tämä työn perustana toimii sirpaloituvan ammuksen tuho vaikutuksen formu-

lointi moderneille tietokoneille (Heininen 2006). Heininen (2006) esittää artikkelissaan laskentamallin, joka perustuu Poisson-jakaumalle ja fysikaaliselle geometrialle. Tällä menetelmällä voidaan Heinisen (2006) mukaan olennaisesti välttää Monte Carlo -menetelmät, mikä vähentää vaadittavaa laskenta-aikaa. Lisäksi laskentamallissa tuhoutumistodennäköisyys lasketaan useissa eri pisteissä ja esitetään tasa-arvokäyrien avulla, mikä mahdollistaa tuhoutumistodennäköisyyden esittämisen suoraan räjähdyspisteen ja kohteen välisen etäisyyden funktiona. Heinisen (2006) esityksen pohjalta toteutettiin myöhemmin simulointimalli, jossa Heinisen (2006) esittämää sirpaloitumismallia laajennetaan ja siihen lisätään suorien osumien ja paineaallon vaikutus (Lappi et al. 2008).

Jatkotutkimuksessa Lappi et al. (2008) esittämää korjattua mallia laajennettiin edelleen siten, että malli kykenee ottamaan huomioon maaston vaikutuksen. Tällä laajennuksella saatiin huomattavasti lisää tarkkuutta verrattuna malliin, jossa maasto oletettiin tasaiseksi (Lappi et al. 2012). Maastovaikutuksen huomioon ottavassa mallissa oletettiin maaston olevan aluskasvuston sekä läpäisemätön. Myöhemmin tämä maaston huomioon ottava, laajennettu malli validoitiin kenttäkokeilla ja havaittiin, että fysikaaliselle pohjalle rakennettu malli oli ylivoimainen verrattuna perinteisiin cookie cutter ja Carleton -malleihin. Tutkimuksessa havaittiin erityisesti, että fysikaalista mallia käyttämällä vältetään cookie cutter- ja Carleton-mallien vaatimat parametrien sovitukset. (Åkesson et al. 2013)

Tuorein tutkimus, jolle tämä työ pohjautuu, on tehty vuonna 2015 International Data Farming Communityn työpajassa, jossa tutkimusryhmän tehtävänä oli selvittää tilapäisten suojarakenteiden suojavaikutusta (Borén et al. 2015). Työssä käytettiin mallia, jonka kehittäminen oli aloitettu jo 2006 Puolustusvoimien tutkimuslaitoksella. Mallia oli paranneltu ja laajennettu siten, että se noudatti (Åkessonin et al. 2013) tutkimuksessaan validoimaa (Lapin et al. 2012) esittämää mallia. Saman laskentamallin pohjalta on tuotettu simulointiohjelmisto, jota on käsitelty myös myöhemmin Puolustusvoimien tutkimuslaitoksen vuosikirjassa (Klemola 2016).

Borén et al. (2015) oletivat suojarakenteiden olevan hiekkasäkeistä koostuvia eli käytännössä tavallista maastoa. Suojarakenteet toteutettiin laskentamalliin muokkaamalla tasaisen alueen maaston korkeusprofiilia kunkin suojarakenteen mukaiseksi ja sen jälkeen laskemalla kohteen tuhoutumistodennäköisyys. Kohteena käytettiin kuorma-autoa, joka oli laskentaohjelmiston vaatimuksesta jaettu neliönmuotoisiksi pinnoiksi eri haavoittuvien alueiden suhteen. Lisäksi eri alueille oli määritelty paksuudet, jotka vastasivat kirjallisuuslähteistä arvioituja vahvuuksia kullekin eri aluetta vastaavalle osalle.

Borén et al. (2015) pyrkivät selvittämään, mikä on paras muoto tilapäiselle suojarakenteelle. Työssä testattiin 11 erilaista suojarakennemallia, joista yksi oli kontrollimalli, joka vastasi tilannetta, jossa ollaan tasaisella maalla ilman suojaa. Borén et al. (2015) arvioivat tuhoutumista tuhoutuneiden kohteiden odotusarvolla, joka laskettiin simulointiohjelmiston tuottamista tuhoutumistodennäköisyyksistä. Borén et al. (2015) havaitsivat, että suojarakenteen korkeus on suurin yksittäinen tuhoutumistodennäköisyyteen vaikuttava tekijä. Lisäksi havaittiin, että seinien ja kuoppamaisten suojien suojavaikutuksella on huomattavia eroja. Borén et al. (2015) ehdottaa, että tulevaisuudessa kannattaisi erityisesti tutkia esteiden läpäisemättömyysoletusta sekä mallinustarkkuuden vaikutusta. Lisäksi ehdotettiin kattorakenteiden suojavaikutuksen tutkimusta epäsuoraa tulta vastaan. (Borén et al. 2015)

Borén et al. (2015) esittämän laskentamallin suurin ongelma on oletus suojarakenteiden läpäisemättömyydestä, sillä esimerkiksi Puolustusvoimat (2017) mukaan tiivis maa suojaa käsiaseiden tulelta 100 cm paksuisena kerroksena ja hiekkasäkit 50 cm paksuudessa. Samoin kuin hiekkasäkit, myös kivinen maasto antaa suojaa käsiaseiden tulelta 50 cm paksuudessa. Paitsi läpäisemättömyysoletuksen mielessä, myös ainoastaan maastoon rinnastettavien suojien käyttäminen tekee laskentamallin soveltamisen hankalaksi, sillä suojarakenteet tulisi mallintaa hyvin paksuiksi, vaikka todellisuudessa paksuus ei ole vastaava. Erityisesti haasteita ilmenee, mikäli halutaan kuvata monimutkaisempia esteitä, kuten rakennuksia.

2.1.2 Simulointiohjelmiston käyttö ja periaatteet

Simulointiohjelmistona tässä työssä käytetään Puolustusvoimien tutkimuslaitoksen kehittämää ohjelmistoa (Klemola 2016). Pohjimmiltaan ohjelmisto perustuu Lappi et al. (2012) ehdottamalle laskentamallille, mutta ohjelmistoa on kehitetty uusilla toiminnallisuuksilla ja lisäyksillä. (Klemola 2016) Simulointiohjelmisto tuottaa tuhoutumistodennäköisyyksiä kappaleille, jotka kyseiseen skenaarioon on mallinnettu. Tuhoutumistodennäköisyyksiä voidaan muuttaa selviytymistodennäköisyyksiksi hyödyntämällä komplementtiodennäköisyyttä,

$$p_{\text{survive}} = 1 - p_{\text{kill}}, \quad (1)$$

jossa p_{kill} on tuhoutumistodennäköisyys. Ohjelmistossa kyetään siis ottamaan huomioon maaston vaikutus siten, että maaston muodostamat esteet ovat pysäyttäviä, eli niiden takana olevien kohteiden tuhoutumistodennäköisyys on 0. Yhtälön (1) mukaan kohde siis selviytyy varmasti.

Suurimpana haasteena simulointiohjelmistoon liittyen on sen asettama vaatimus kohteille ja suojarakenteille. Simulointiohjelma vaatii, että kaikki kappaleet koostuvat neliönmuotoisista pinnoista, joille määritellään erikseen suunta (pinnan normaali), pinta-ala ja paksuus (Borén et al. 2015). Lisäksi pinnoilla on suhteellinen sijainti sen kappaleen koordinaattien suhteen, jota kyseinen neliöpinta muodostaa. Käytännössä tämä pakottaa ratkaisemaan ongelman, miten mielivaltaisen muotoisia kappaleita mallinnetaan neliöistä koostuvina. Tämä on tärkeää, sillä kappaleiden mallintaminen luo pohjan reaalimaailman tilanteiden simuloimiselle.

Saatuana kohteet neliönmuotoisina pintoina, simulointiohjelma laskee tuhoutumistodennäköisyyden jokaisesta räjähdyksestä jokaiselle sille syötetylle maalipinnalle ja koostaa tämän jälkeen kokonaisten kohteiden tuhoutumistodennäköisyyden ottaen huomioon erikseen paine- ja sirpalevaikutuksen aiheuttaman vaikutuksen kaavalla

$$p_{\text{kill}} = 1 - (1 - p_{\text{bkill}})(1 - p_{\text{fkill}}), \quad (2)$$

jossa p_{bkill} on todennäköisyys, että painevaikutus tuhoaa kohteen ja p_{fkill} todennäköisyys, että sirpalevaikutus tuhoaa kohteen. Kullekin kappaleelle voidaan siis määrittellä, millaisen vaikutuksen kyseinen kappale tarvitsee tuhoutuakseen.

Simulointiohjelmistossa on tehty oletus, jonka mukaan räjähdys voi vaikuttaa ainoastaan pintoihin, jotka ovat suunnattu räjähdystä kohti. Formaalisti tämä määritellään siten, että räjähdyspisteestä piirrettävien sirpaleviuhkojen suuntavektoreiden pistetulo maalipinnan normaalivektorin kanssa tulee olla negatiivinen, eli

$$N_{\text{Surface}} \cdot v_{\text{blast}} < 0, \quad (3)$$

jossa N_{Surface} on maalipinnan normaalivektori ja v_{blast} on tarkasteltavan räjähdysen muodostaman sirpaleviuhkan suuntavektori tarkasteltavan kohteen suunnassa. Yhtälön (3) tulee olla aidosti pienempi kuin 0, sillä myöskään kohtisuorassa oleviin pintoihin ei oletuksen mukaan voida vaikuttaa.

Tässä työssä simulointiohjelmistoa käytetään tuottamaan tuhoutumistodennäköisyyksiä. Simulointiohjelmistoa käytetään, koska kyseinen malli on havaittu tuottavan luotettavia tuloksia suhteessa kenttäkokeisiin, sekä sen fysiikaalisen perustan vuoksi. (Klemola 2016)

2.2 Tutkimusongelma

Tämän työn tarkoituksena on toteuttaa laskentamalli, jonka avulla voidaan huomioida suojarakenteiden ja muiden rakenteiden vaikutus kohteen selviytymistodennäköisyyteen. Työssä toteuttava laskentamalli pyrkii vastaamaan Borén et al. (2015) ehdottamaan suojarakenteiden läpäisevyyteen. Käytettävä simulointiohjelmisto on sama, kuin Borén et al. (2015) tutkimuksessaan käyttämä. Simulointiohjelmistoa on myös kuvailtu Puolustusvoimien tutkimuslaitoksen vuosikirjassa (Klemola 2016). Tämä tarkoittaa sitä, että suojarakenteiden tulisi kasvattaa kohteen selviytymistodennäköisyyttä. Työssä toteutettava laskentamalli mahdollistaa samalla myös Borén et al. (2015) ehdottaman kattorakenteiden vaikutuksen tarkastelun, sillä olennaisesti kattorakenne on samanlainen suojarakenne kuin mikä tahansa muukin este tai suoja. Tässä työssä kuitenkin keskitytään laskentamallin toteuttamiseen sekä suojarakenteiden vaikutuksen tutkimiseen.

3 Räjähdyksivaikutuksen laskentamalli

Tässä työssä kehitettävä laskentamalli perustuu luvussa 2.1 esitellylle mallille ja laajentaa sitä. Tässä työssä oletetaan, että sirpaleet jatkavat keskimäärin etenemistä suoraviivaisesti osuttuaan suojarakenne-esteeseen. Vastaavasti paineaallon vaikutus jätetään huomiotta, sillä sen tarkastelu vaatisi monimutkaisia ja laskennallisesti kalliita, fysikaalisia tarkasteluja. Paineaallon eteneminen ympäristössä, jossa on esteitä on monimutkaista. Paineaalto voi esimerkiksi heijastua tai kohdata kanavoitumisilmiön, jossa aaltorintama ei hajoa normaalisti. Aaltojen etenemiseen vaikuttaa merkittävästi esteiden asetelmat. (Smith & Rose 2006). Asetelmia, joihin esteet voivat päätyä on tämän työn kontekstissa vaikea ennustaa ja siten mallintaa. Lisäksi paineaallon tuho vaikutuksen oletetaan olevan suhteessa merkittävästi pienempi, kuin sirpalevaikutuksen, kun oletetaan kohteen olevan riittävän kaukana räjähdyksestä.

Näiden oletuksien perusteella voidaan tilannetta tarkastella siten, että jokaisesta suojarakenteesta lasketaan projektio kohteen maalipinnoille räjähdysten suhteen. Intuiitiivisesti nämä projektiot ovat kohteen maalipinnalle räjähdyspisteestä tarkasteltaessa syntyvät varjot. Näiden varjojen alueelle voidaan lisätä suojarakenteen vahvuuden määrittämältä paksuudelta materiaalia. Materiaalien vahvuuksia käsitellään teräsekvivalentteina, joten vahvuuden lisääminen voidaan toteuttaa yksinkertaisella yhteenlaskulla kohteen

pinnan vahvuudesta ja suojarakenteen pinnan vahvuudesta. Projektiot, jotka eivät osu maalipinnalle voidaan jättää huomiotta, sillä niillä ei ole vaikutusta tarkasteltavan kohteen selviytymistodennäköisyyteen. Mikäli suojarakenteita on useita ja niiden aiheuttamat projektiot menevät päällekkäin, on laskettava maalipinnalle syntyvien eripaksuisten alueiden hajotelma pinnalle, eli eriteltävä jokainen erivahvuinen alue. Mikäli räjähdyskiä on useita, on jokaiselta räjähdykseltä syntyvät projektiot tarkasteltava erikseen niiden suojaavan vaikutuksen vuoksi.

Tarkasteltaessa tuhoutumistodennäköisyyksiä tulee ottaa huomioon, että kohde tuhoutuu, mikäli yksikin maalipinta tuhoutuu. Näin ollen tuhoutumistodennäköisyys lasketaan selvittämällä, millä todennäköisyydellä yksikään pinta ei tuhoudu ja laskemalla yhtälöä 1 todennäköisyys, että yksi tai useampi pinta tuhoutuu. Kappaleen kaikkien pintojen selviytymistodennäköisyys saadaan kaavasta

$$p_{\text{all survive}} = \prod_{i=1}^N p_{\text{survive}}(i) = \prod_{i=1}^N (1 - p_{\text{kill}}(i)), \quad (4)$$

jossa i on pinnan indeksi ja N on pintojen lukumäärä. Yhtälön p_{kill} lasketaan yhtälöstä (2). Vastaavasti, tarkasteltaessa kokonaista systeemiä, jossa on mahdollisesti useita räjähdyskiä, tulee tarkastella, tuhoutuuko kappale minäkään räjähdysten seurauksena. Tämä voidaan laskea hyödyntämällä jälleen yhtälöä (4).

$$p_{\text{kills target}} = 1 - \prod_{j=1}^n p_{\text{all survive}}(j), \quad (5)$$

jossa $p_{\text{all survive}}(j)$ on räjähdysten indeksillä j olevan kappaleen, kaikkien pintojen selviytymistodennäköisyys. n on tarkasteltavien räjähdysten lukumäärä.

Halutun kohteen selviytymistodennäköisyyden selvittämiseksi täytyy pysyä ensin laskemaan projektiot suojarakenteista maalipinnoille ja sen jälkeen tarvittaessa laskemaan eripaksuiset projektioiden sijainnit. Jotta voidaan käyttää valmista simulointiohjelmistoa, tulee syntyneet kohteet, joille suojarakenteet on projisoitu, kyetä esittämään neliöinä. Tämä johtuu siitä, että simulointiohjelmo tarkastelee simulaatioissa aina yksittäisiä räjähdysmaali-alkiopareja. Erityisesti kohteen muoto on simulointiohjelmiston asettama vaatimus. Tämä pakottaa ratkaisemaan ongelman, jossa mielivaltaisen muotoisia alueita tulee kyetä neliöimään. Neliöinnin jälkeen voidaan edellä esitetyillä yhtälöillä (1)-(5) tarkastella jokaisen kohteen tuhoutumistodennäköisyys, joka voidaan muuntaa selviytymistodennäköisyydeksi yhtälöllä (1).

Tässä työssä esiteltävä laskentamalli koostuu kahdesta algoritmista, joista ensimmäinen projisoi suojarakenteen maalipinnalle ja erottelee päällekkäiset projektio, ja toinen algoritmi muodostaa erotelluista projektioista neliönmuotoisia pintoja. Jälkimmäinen algoritmi toteutetaan erityisesti simulointiohjelmiston edellä kuvatun neliönmuotoisuus-vaatimuksen vuoksi.

3.1 Suojarakenteen projektio maalipinnalle

Tarkastellaan tilannetta räjähdyspisteestä ja valitaan se origoksi $(0,0,0)$. Koordinaatiston valinnalla ei ole merkitystä, sillä teknisessä toteutuksessa koordinaatisto kiinnitetään sopivaan viitekehykseen, kuten esimerkiksi kartan koordinaatistoon. Koska simulointiohjelmisto vaatii, että kaikki kappaleet koostuvat neliöistä, ja että yhdestä tai useammasta neliöstä koostuvan maalipinnan edessä on yhdestä tai useammasta neliöstä koostuva suojarakenne. Jokainen kohteen maalipinta voidaan luonnollisesti jakaa maalialkioihin, jotka koostuvat tasan yhdestä neliöstä. Näin ollen jokainen maalipinnan neliö, eli maalialkio, joka osallistuu pinnan muodostamiseen, voidaan tarkastella erikseen. Tällöin tilanne muuttuu sellaiseksi, että origon ja maalialkion välissä on yhdestä tai useammasta neliöstä koostuva suojarakenne.

Ensimmäisessä vaiheessa projisointialgoritmia tulee selvittää, voiko maalialkioon kohdistua vaikutus, eli onko maalialkion pinnan normaalivektorilla ja origosta lähtevän räjähdysviuhkan vektoreille vastakkaissuuntaisia komponentteja, eli onko yhtälö (3) voimassa. Mikäli ei ole, pinta voidaan sivuuttaa. Jotta tarkastelu voidaan tehdä, tulee pinnan kulmien koordinaatit selvittää. Tarkastelu voidaan tehdä laskemalla yhteen pinnan isäntäkappaleen koordinaatit, sekä pinnan suhteellinen sijainti isäntäkappaleen suhteen. Isäntäkappaleen jokaiselle pinnalle on kappale, jonka muodostamisen kyseinen pinta mahdollistaa. Kun kulmapisteiden koordinaatit on selvitetty, voidaan hyödyntää tietoa neliön pinta-alasta koordinaattien laskemiseen seuraavasti: Olkoon x_0 isäntäpinnan koordinaatit ja x' maalialkion pinnan suhteellinen sijainti. Lisäksi A olkoon neliön pinta-ala. Tällöin pinta-alasta A voidaan laskea sivun pituus $s = \sqrt{A}$. Kun tiedetään lisäksi, että koordinaatit sekä isäntäkappaleelle että pinnan suhteelliselle sijainnille vastaavat pinnan keskipisteen koordinaatteja, voidaan laskea pinnan kulmapisteiden olevan:

$$\hat{x} = \begin{bmatrix} (x^* - s, x^* + s) \\ (x^* + s, x^* + s) \\ (x^* + s, x^* - s) \\ (x^* - s, x^* - s) \end{bmatrix},$$

jossa $x^* = x_0 + x'$. Pinnan koordinaattien avulla voidaan laskea parametrisointi koordinaattien virittämälle tasolle, josta saadaan pinnalle normaalivektori. Normaalivektoria voidaan verrata vektoriin, joka lasketaan räjähdyspistees-tä alkaen, eli origosta tason keskipisteeseen. Vertailu tehdään yhtälön (3) kriteerillä. Mikäli ehto täyttyy, siirrytään tarkastelemaan suojarakennetta.

Koska myös suojarakenne koostuu yhdestä tai useammasta neliöstä, tarkas-tellaan jokainen suojarakenteen muodostava neliö yksi kerrallaan. Samoin kuin edellä, aloitetaan selvittämällä suoja-alkion kulmapisteiden koordinaa-tit. Tämän jälkeen määritellään suorat, jotka kulkevat valitusta origosta suoja-alkion kulmapisteiden kautta. Suorat ovat muotoa:

$$y = (x_2 - x_1)t + x_1. \quad (6)$$

Valitaan x_1 räjähdyspisteeksi, joka valittiin aikaisemmin origoksi, jolloin se supistuu pois. Lisäksi valitaan x_2 :ksi tarkasteltava kulmapiste, joka voidaan esittää myös $\hat{x}$:n alkioina. Kaikkien kulmapisteiden ollessa kerättynä vek-toriin $\hat{x}$, voidaan laskea kaikille kulmapisteille suorat soveltaen yhtälöä (6).

$$y_i = (x_i^* - x_1)t + x_1 = x_i^*t, \quad (7)$$

jossa jokaista kulmapistettä vastaa x^* :n indeksoinnin mukaan yksi piste. Tä-män jälkeen voidaan vektorisoida yhtälö (7) x^* :n määritelmän nojalla ja edel-leen ratkaista leikkauspisteet maalialkio pinnan kanssa. Mikäli kaikki leik-kauspisteet ovat negatiivisia, on maalialkio suojan ja räjähdyskeskuksen välissä, jolloin intuitionmukaisia varjoja ei muodostu, eikä projektiotakaan ole ole-massa.

Kun tiedetään jokaisen kulman projektiot maalialkion pintaa vastaavalle ta-solle, niin seuraavaksi tulee tarkastaa, mitkä osat projektioista kuuluvat oi-kean maalialkion pinnalle. Tässä työssä tämä on toteutettu MATLAB:n si-säänrakennetun monikulmiotyökalun avulla. Sen avulla voidaan maalialkios-ta määritellä monikulmio, hyödyntäen kulmapisteitä, ja laskea maalialkion ja projektion leikkaus. Tämän jälkeen voidaan maalialkion kulmapisteiden avulla laskea, missä kohtaa projektiot ylittävät maalialkion. Näin ollen tie-detään, minkä muotoiset projektiot maalialkioille aiheutuvat kustakin kul-mapisteestä.

Osa syntyneistä projektioista voi mennä päällekkäin. Ongelma esiintyy eri-tyisesti tilanteissa, joissa suojarakenteita on useita erillisiä tai suojarakentei-den paksuudet ovat keskenään poikkeavia. Näissä tilanteissa pinnalle syntyy alueita, joissa projektiota on päällekkäin eri määriä. Tämä luo tarpeen ero-tella eripaksuisia alueita muodostavat alueet, joilla on eri määrä päällekkäisiä

projektioita. Projektoiden erottelu tehdään iteroimalla läpi kaikki maalialkioiden pinnat, joilla on projektioita. Projektoiden erottelussa oletetaan, että projektoiden koolle voidaan määrittää alaraja, jota pienempiä projektioita ei huomioida.

Erottelu aloitetaan laskemalla kaikki mahdolliset varjokombinaatiot (A, B) , jotka pinnalla on. Jokaista paria (A, B) tarkastellaan yksitellen. Ensimmäisenä varjoparista tarkastetaan, onko jompikumpi varjoista tyhjä. Jos on, niin ei varjo voi olla minkään kanssa päällekkäin. Ei-tyhjille varjopareille (A, B) selvitetään molempien varjojen koordinaatit maalipinnalla. Tämän jälkeen selvitetään varjojen leikkaus $(A \cap B)$. Mikäli leikkaus on tyhjä joukko, niin ei päällekkäisyyttä synny ja voidaan siirtyä seuraavaan varjopariin. Jos varjot ovat päällekkäin leikataan toisesta varjosta varjoparin leikkaus pois $(A \setminus (A \cap B))$. Mikäli leikkauksesta ei jää yli mitään, eli toinen varjo peittää toisen kokonaan $(A \subseteq B)$ tai leikkauksesta jää pinta-alaltaan oletetun kokorajan alittava varjo, siirrytään tarkastelemaan suurempaa varjoa, joka on sen parin peite. Tehdään samantyyppinen tarkastelu uudelleen, mutta käännetään asetelma toisinpäin. Leikataan jälkimmäisestä varjosta ensimmäinen pois $(B \setminus A)$ ja tarkastetaan, että jäljelle jäävä osa on pinta-alaltaan tarpeeksi suuri. Tämän jälkeen suuremmasta pinnasta leikatusta varjosta määritellään uusi varjo maalialkion pintaa vastaavalle pinnalle. Kuitenkin tämän varjon paksuus on summa varjon paksuudesta ja pinnan paksuudesta. Samalla tarkasteltavalta, alkuperäiseltä pinnalta poistetaan tarkasteltu leikkaus, jotta sitä ei käsitellä useampaa kertaa. Tämä tarkastelu tehdään kaikille varjopareille, jonka jälkeen ollaan saatu selvitettyä kaikki päällekkäiset varjoparit ja tarkasteltu, alkuperäinen maalipinta on tyhjä varjoista. Tämän jälkeen siirrytään tarkastelemaan maalipinnan vastinetta, jolle päällekkäiset varjot määriteltiin, jossa toistetaan sama, edellä kuvattu tarkastelu. Kun kaikkien päällekkäisten varjojen käsittelyn jälkeen päädytään tilanteeseen, jossa päällekkäisiä varjoja määritellään uudelle, alkuperäistä pintaa vastaavalle tasolle vähemmän kuin kaksi, ei tarkastelua enää ole järkevä jatkaa, sillä leikkauksia ei voi syntyä ja on saatu selvitettyä paksuin, päällekkäinen varjokerros. Samalla on myös selvitetty kaikki muut eripaksuiset varjot.

Kun tiedetään, missä kunkin räjähdysen tuottamien suojarakenneprojektoiden varjostukset maalipinnoille ovat päällekkäin ja ne voidaan erotella maalipinnasta. Tämän perusteella tiedetään, millä alueilla varjon paksuutta tulee lisätä ja kuinka paljon. Suurin ongelma, joka projektoiden laskemisessa ja erittelyssä sekä parsimisessa syntyy, liittyy varjojen muotoon. Jokainen neliön muotoinen suojarakenteen alkio projisoidaan yhdestä tai useammasta neliöstä koostuvalle maalipinnalle. Näiden projektoiden yhteisvaikutus voi peittää maalipinnasta minkä tahansa kokoisen ja muotoisen alan. Erityisesti

ongelman muodostaa varjojen muoto. Projisoinnissa syntyvät varjot voivat olla mielivaltaisen muotoisia monikulmioita. Simulointiohjelmisto vaatii kuitenkin sille syötettävien maalien olevan neliöitä. Tämä tuottaa siis tarpeen algoritmille, joka jakaa mielivaltaisia monikulmioita neliöiksi.

3.2 Monikulmioiden neliöinti

Monikulmioiden neliöinti on laskennallisesti hankala tehtävä. Tehtävällä on yhteyksiä moniin erilaisiin laskennallisen geometrian tehtäviin, joissa pyritään ratkaisemaan optimaalisia peitteitä tai täyttösuhteita. Luonnollinen tavoite neliöinnille on muodostaa neliöinti mahdollisimman tarkasti. Kuitenkin osana laskentamallia algoritmissa on otettava huomioon käytettävissä oleva aika. Tällöin tehtävän luonne muuttuu. Tavoitteena tässä työssä on muodostaa neliöinti siten, että valtava räjähdys-maaliakioparien määrä ei aiheuta pullonkaulaa simulaatiossa ja silti neliöinti on riittävän tarkka.

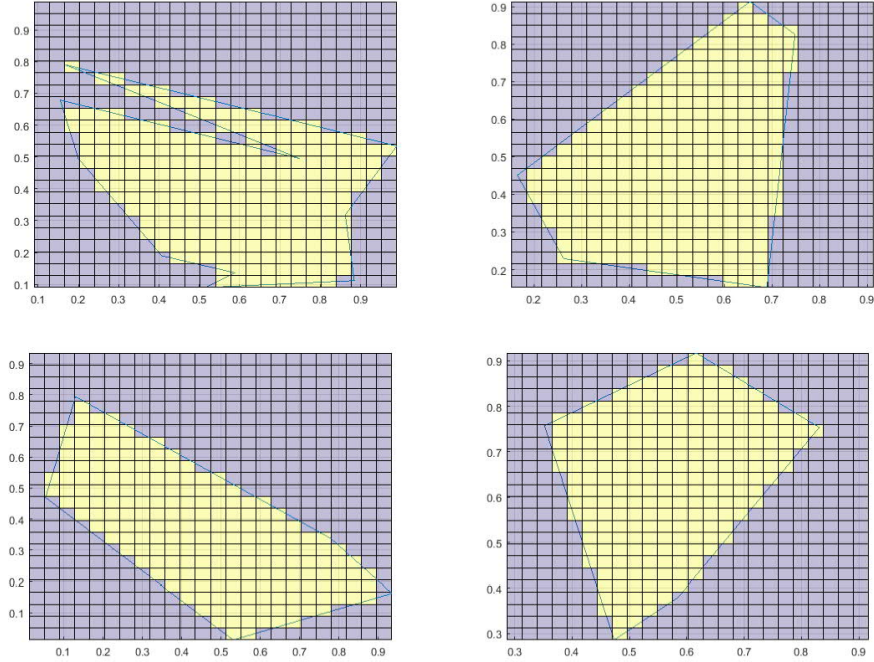
Tässä työssä tehtävää lähdetään ratkaisemaan siten, että suoritetaan ensin neliöinti tasavälisesti halutulla tarkkuudella, jonka jälkeen pyritään yhdistelemään neliöitä suurimmiksi mahdollisiksi neliöiksi ahneella algoritmilla (eng. greedy algorithm) (Cormen et al. 2009).

3.2.1 Neliöinnin muodostaminen

Koska jokainen räjähdys tuottaa omat projektionsa suojarakenteista, niiden tuottamat varjot tulee kaikki neliöidä erikseen. Jokaiselle räjähdykselle neliöidään siis jokaiselle maalipinnalle syntyneet projektiot erikseen.

Varjojen neliöinti tehdään jokaiselle varjolle erikseen, toisistaan riippumattomatta. Neliöinti aloitetaan selvittämällä varjon dimensiot. Koska varjo on maalipinnalla, niin se on aina kaksiulotteinen, sillä paksuus oletetaan olevan koordinaatistoon liittymätön ominaisuus. Varjon dimensioille lasketaan läpimitta ja dimensioista valitaan suurempi. Seuraavaksi muodostetaan neliö, joka vastaa sivun pituudeltaan suuremman dimension kokoa. Neliö muodostetaan siten että molempien dimensioiden suunnassa tasavälinen jaotus alkaen kyseisen dimension pienimmän koordinaatin arvosta ja jatkuen suuremman dimension läpimitan pituuden verran. Jaotuksen tiheys voidaan ajatella neliöinnin resoluutiona, sillä mitä enemmän jakovälejä on, sitä pienempiä neliöitä syntyy. Mitä pienempiä neliöitä syntyy, sitä tarkemmin monikulmiot voidaan mallintaa. Mikäli neliöinnin tarkkuus on liian pieni, voi tämä aiheuttaa päällekkäisyyttä varjojen reunoilla, sillä vierekkäisten varjojen neliöin-

nit osuvat päällekkäin. Esimerkkejä neliöinnin muodostamisesta mielivaltaisille monikulmioille on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3: Esimerkkejä monikulmion peitteen asettelusta ja osituksesta.

Olennaista monikulmion peittävän neliön muodostamisessa on, että edellä kuvatulla tavalla muodostettu neliön on monikulmion peite, eli se peittää monikulmion jokaisen pisteen. Tämä tieto on hyödyllinen, sillä nyt voidaan rajoittaa tarkastelu neliöinnille muodostetun peitteen sisälle. Tämä tarkoittaa sitä, että neliöt, jotka muodostavat jaotuksen löytyvät kaikki peiteneliön sisältä. Lisäksi näiden määrittäminen on helppoa, sillä molempien dimensioiden suunnassa jaotus on tehty samalla jakovälillä. Myös jakovälin pituus d voidaan määritellä helposti kahden vierekkäisen ruudun keskipisteen välisenä etäisyytenä, tai vastaavasti kahden ruudun samojen reunojen välisenä etäisyytenä. Jakoväli voidaan myös formaalisti esittää käyttämällä valittua sivun pituutta ja jakovälien määrää. Tällöin

$$d = \frac{\max(\Delta y, \Delta x)}{n - 1}, \quad (8)$$

jossa Δx ja Δy ovat tarkasteltavan varjon dimensioiden läpimitat ja n on jakovälien lukumäärä, eli valittu resoluutio.

Nyt on selvitetty lopullinen neliöinnin tuottava neliöiden joukko. Koska joukossa on vielä tarpeettomia neliöitä, määritellään nyt peruste sille, että valitaanko neliö maalipinnan approksimaatioon vai ei. Valitaan mallinnusheuristiikaksi ehto, että jokaisen peitteestä valittavan neliön keskipisteen tulee kuulua mallinnettavan monikulmion sisälle.

Jotta neliöiden keskipisteiden sijainti voidaan tarkastaa, tulee ne ensin määritellä. Koska edellä kuvattu monikulmion konvekksi peite määrittelee neliöiden kulmapisteet tasavälisen hilan avulla, niin myös keskipisteet voidaan helposti laskea. Yhtälön (8) nojalla kahden keskipisteen väli d on tarkasteltavasta varjosta ja valitusta resoluutiosta riippuva vakio. Kaikki tarkasteltavat neliöinnin alkioit ovat tasakokoisia ja kaikkien sivun pituus on d . Konveksin peitteen muodostava neliön jaotusten perusteella voidaan laskea jokaisen neliön kulmat. Valitaan tarkastelu pisteeksi vasen alakulma, josta keskipiste saadaan helposti lisäämällä molempiin koordinaatteihin $d/2$, jossa d on yhtälön (8) vakio. Vektorimuodossa kaikki keskipisteet saadaan laskemalla

$$c = \left(x + \frac{d}{2}, y + \frac{d}{2} \right), \quad (9)$$

jossa x ja y ovat dimensioiden jaotukset vektoreihin kerättynä. Nyt kun tunnetaan kaikkien neliöiden keskipisteet, niin voidaan tarkastaa jokaiselle keskipisteelle erikseen, kuuluuko kyseinen piste monikulmion sisäpuolelle vai ei. Näin voidaan muodostaa $n \times n$ matriisi, jossa jokaiselle yhtälön (9) keskipisteelle määritellään arvo 1, jos se on monikulmion muodostamalla alueella ja 0, mikäli ei. Tämän matriisin perusteella voidaan tunnettaessa jaotus määrittää kaikki neliöt, jotka täyttävät heuristiikkaehdon ja muodostaa niistä simulointiohjelmiston kohteita. Huomion arvoista on, että tiedetään, että näin keskipisteet laskettaessa viimeinen piste on aina varmasti ulkopuolella, koska se ei kuulu edes konvekssiin peitteeseen. Näin ollen matriisin reunaan syntyy aina yksi rivi ja yksi sarake nollia. Syntyneen matriisin perusteella voidaan nyt päätellä monikulmion approksimaatio. Jokainen matriisin arvo 1 kuvaa approksimaatioon valittavan neliön keskipistettä.

3.2.2 Neliöiden yhdistelyalgoritmi

Suurilla pinnoilla neliöiden määrä voi kasvaa hyvin suureksi, mikäli vaaditaan tarkka resoluutio. Tämä ongelma voidaan kuitenkin välttää yhdistelemällä pienempiä neliöitä isommiksi.

Neliöiden yhdistelyalgoritmissa nojaututaan aikaisemmin muodostettuun binaariseen matriisiin sekä kaksikulotteisiin diskreetteihin konvoluutioihin. On-

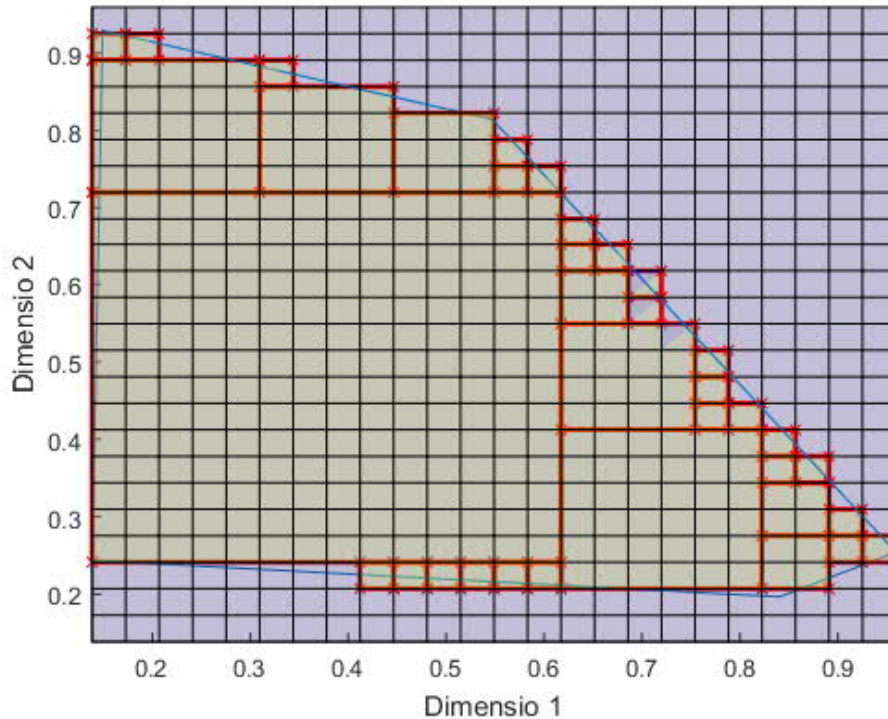
gelma itsessään vastaa suurimman tyhjän ympyrän etsimiseen, jolloin myös suurinta neliötä voidaan etsiä soveltamalla Voronoi-diagrammeja (Atallah, 1998). Tässä työssä neliöintialgoritmi on toteutettu siten, että binaarimatriisin arvot invertoidaan siten, että sen sijaan, että neliön keskipisteen kuulumista monikulmion sisälle vastaisi arvo 1, niin sitä vastaakin 0. Tällä pyritään siihen, että voidaan etsiä suurin dimensiainen konvoluutio, joka tuottaa 0:n.

Kaksiulotteinen konvoluutio symmetrisen välin yli määritellään kaavalla

$$g(i, j) = \sum_{k=i-w}^{i+w} \sum_{l=j-v}^{j+v} f(k, l)h(i - k, j - l), \quad (10)$$

jossa f on syöte, eli tämän ongelman tapauksessa binaarimatriisi, h on konvoluutioydin, joka määrää painokertoimet syötteen alkioille, jotka kuuluvat sen vaikutusalaan (Niblack, 1986). Tässä tapauksessa h :na käytetään ykkösmatriisia, koska tavoitteena on laskea konvoluutioikkunan alkioiden summa. Ykkösmatriisin käyttäminen konvoluutioytimenä johtaa siihen, että jokainen konvoluutioikkunan alkio lasketaan yhteen painokertoimella 1. Koska binaarimatriisi invertoitiin, niin suurin mahdollinen neliö voidaan löytää tarkastelemalla kaikki validit konvoluutioikkunat, alkaen suurimmasta, ja valitsemalla ensimmäinen arvokseen 0:n tuottava. Validit konvoluutioikkunat määritellään siten, että yhtälön summausindeksit k ja l valitaan siten, että konvoluutioikkuna ei ylitä syötematriisin reunoja.

Suurimman neliön löydyttyä algoritmia jatketaan muuttamalla kaikki neliöön kuuluvat alkiot ykkösiksi, jotta samoja neliöitä ei voida valita suurimpaan neliöön uudestaan. Tämän jälkeen etsitään taas suurin jäljellä oleva tyhjä neliö. Hakua jatketaan iteratiivisesti, kunnes binaarimatriisi on muuttunut ykkösmatriisiksi. Neliöiden yhdistelyalgoritmin lopputulos on esitetty kuvassa 4. Kuvasta nähdään hyvin, kuinka neliöiden suuria neliöitä ei suoraanaisesti löydy montaa, mutta silti neliöiden määrä pienenee huomattavasti, sillä pienempiä neliöiden yhdistelyjä (esim. 2×2) löytyy enemmän.



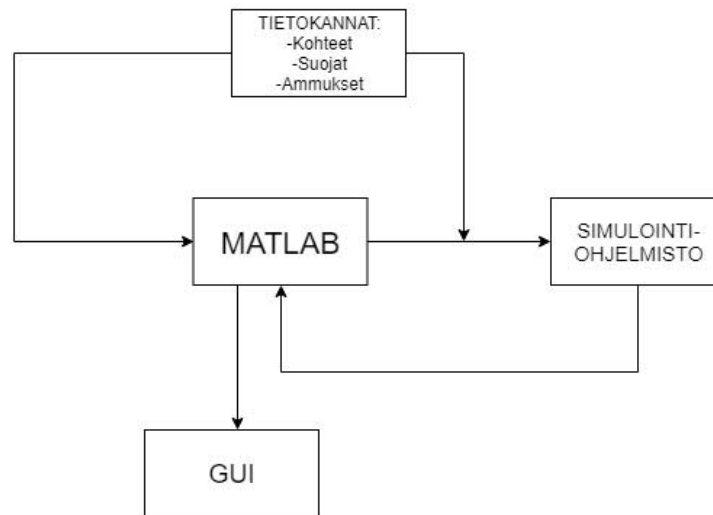
Kuva 4: Esimerkki neliöiden yhdistelyalgoritmien etenemisestä.

Jokaisella iteraatiokierroksella syntyneen neliön kulmapisteet voidaan selvittää helposti konvoluution tarkasteltavista indekseistä. Valitun suurimman neliön kulmapisteet säilötään jokaiselta iteraatiokierrokselta tietorakenteeseen, jossa voidaan pitää kirjaa jokaisesta neliöidystä kohteesta, sen paksuudesta ja suunnasta.

4 Esimerkkisimulaatiot

Tässä työssä simulaatioiden toteuttaminen tehtiin pääosin käyttäen MATLAB-ohjelmistoa. MATLAB:issa luotiin oliopohjainen tietorakennejärjestelmä, joka säilyttää tiedot kohteista, suojarakenteista ja räjähdyksistä, sekä niiden välisistä suhteista. Ennen simulaatioiden ajamista simulointiohjelmiston suojarakenne- ja kohdetietokantoja muokattiin MATLAB:ssa ja luotiin simulaatioihin tarvittavat tietokannat kullekin simulaatiolle.

Simulaatioita valmisteltaessa ensimmäisenä rakennettiin simulointiskenaariot ja määriteltiin kappaleiden paikat simulaatiojärjestelmään. Kappaleet, kuten suojarakenteet ja kohteet haettiin tietokannoista ja ne käsiteltiin luotuun tietorakennejärjestelmään sopiviksi. Simulaatioskenaarion luomisen jälkeen laskettiin luodulla laskentamallilla tarvittavat projektiot, joiden pohjalta muodostettiin tietokannat kohteista, jotka välitettiin simulointiohjelmiston käyttöön. Itse simulointiohjelmistoa ohjattiin MATLAB:sta käsin komentorivin välityksellä. Simulaatioiden ajamiseksi simulointiohjelmistolle välitettiin koordinaattijärjestelmä, johon kappaleet sidottiin, kohde-, suojarakenne- ja ammustietokannat, sekä valmiiksi simulointiohjelmistolle räätälöity tiedosto, johon oli kirjoitettu tieto siitä, mille räjähdys-kohdepareille räjähdysvaikutus simuloidaan. Lisäksi simulointiohjelmistolle annettiin tiedosto, johon ohjelmisto kirjottaa samojen, sille annettujen räjähdys-kohdeparien tuhoutumistodennäköisyydet. Tämä simulointiohjelmiston kirjoittama tiedosto luettiin jälleen MATLAB:iin ja siirrettiin graafiseen käyttöliittymään. Kaavakuva simulaation etenemisestä on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5: Kaavakuva simulaation etenemisestä.

Työssä kehitettävää laskentamallia, joka on kuvattu kuvassa 5 käytetään suojarakenteiden vaikutuksen tutkimiseen kolmessa erilaisessa esimerkiskenaariossa:

- (i) Yksinkertaisen suojarakenteen vaikutus selviytymistodennäköisyyteen
- (ii) Suojarakenteen paksuuden vaikutus selviytymistodennäköisyyteen

- (iii) Infrastruktuuriamaisen suojarakennejärjestelmän vaikutus selviytymistodennäköisyyteen

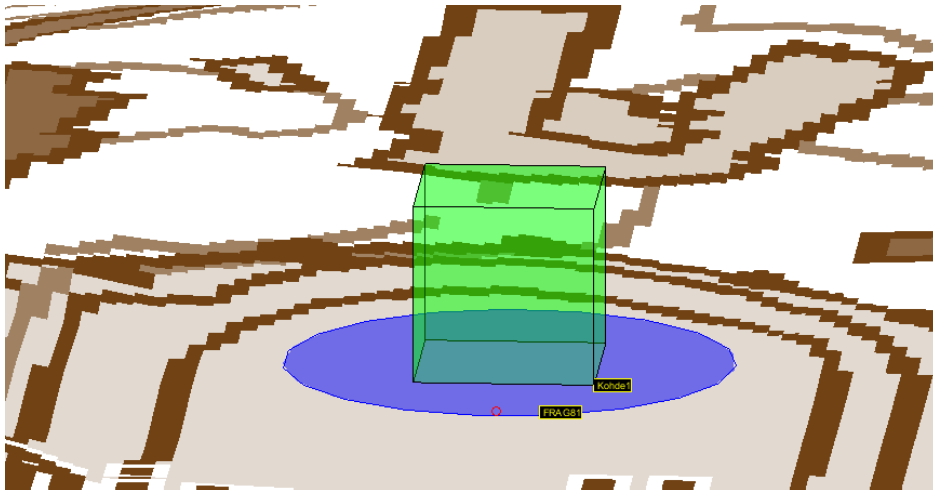
Edellä mainittuja skenaarioita käsitellään tarkemmin luvussa 4. Ensimmäisellä esimerkkisimulaatiolla tavoitellaan laskentamallin toimivuuden osoittamista ja validointia. Toisella simulaatiolla vastaavasti osoitetaan, että paksuudella on todella merkitystä ja että laskentamalli huomioi paksuuden laskettaessa selviytymistodennäköisyyksiä. Tällä myöskin osoitetaan erivahvuisten pintojen mahdollisuus. Kolmannella simulaatiolla osoitetaan, että muodostettu laskentamalli soveltuu monimutkaisempiinkin tilanteisiin ja sitä voidaan soveltaa reaali maailman tilanteissa.

Jokainen toteutettu simulaatio noudattaa pääpiirteiltään kuvassa 5 esitettyä mallia. Jokaisessa simulaatio skenaariossa käytettiin lisäksi erikseen kohde- ja ammuskohtaisia parametrejä, jotka määriteltiin ennen simulaatiota. Käytetyt parametrit on ilmoitettu kunkin simulaation kuvauksen yhteydessä kapaleissa 4.1-4.3.

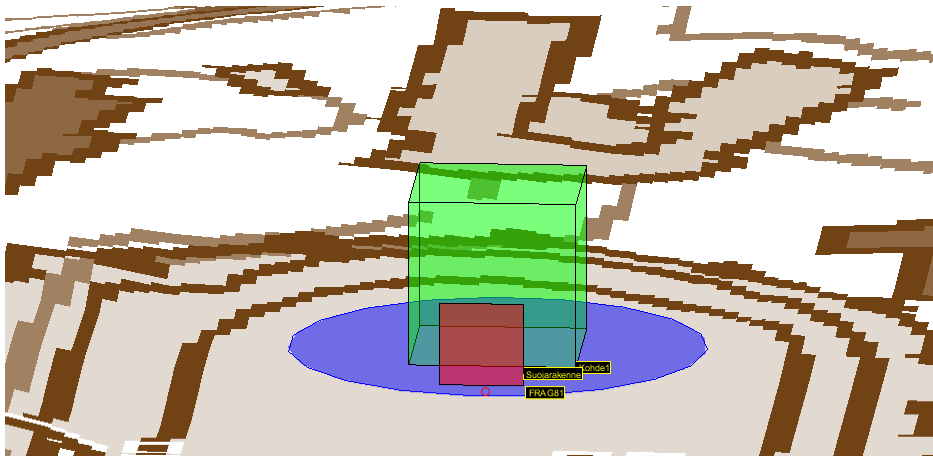
4.1 Yksinkertaisen suojarakenteen vaikutus selviytymistodennäköisyyteen

Yksinkertaisin mahdollinen tapa tutkia suojarakenteen vaikutusta selviytymistodennäköisyyteen on tarkastella tilannetta, jossa kohdetta mallinnetaan kuutiolla ja suojarakenne-esteenä käytetään neliönmuotoista suojarakennetta. Tämä voisi mallintaa esimerkiksi tilannetta, jossa taistelun- tai tulenjohtokonttia mallinnetaan kuutiolla ja sen eteen, uhkasuuntaan, on asetettu suojalevy. Tässä skenaariossa simulaatio on myös suoritettu tasaisella maastolla, vaikka simulointiohjelmisto kykenee ottamaan huomioon myös maaston vaikutuksen. Tällä vältetään mahdollinen maaston aiheuttama räjähddevaikutuksen vaimeneminen.

Esimerkkisimulaatiossa verrataan siis mallinnetun suojan huomioon ottamisen vaikutusta kohteen selviytymistodennäköisyyteen. Vertailu tehdään ajamalla simulaatio ensin ilman suojarakennetta, jonka jälkeen kohteen eteen asetetaan suojarakenne ja käytetään luvussa 3 kuvattuja laskentamalleja projisoimaan suoja kohteelle ja muodostamaan neliöinti. Tämän jälkeen ajetaan simulaatio uudelleen ja vertaillaan saatuja todennäköisyyksiä. Simulaatiossa käytetään ammuksena simulointiohjelmalla mallinnettua 81 mm sirpaloituvaa kranaattia. Kohdeen pintojen paksuus simulaatiossa vastaa 10 mm terästä. Vastaavasti suojarakenteen paksuus on 4 mm terästä. Edellä kuvatuista simulaatioskenaariosta on esitetty havainnekuvat kuvissa 6 ja 7.



Kuva 6: Kuvakaappaus skenaariosta, jossa on pelkästään räjähdys (punainen ympyrä) ja kohde (vihreä kuutio). Sininen ympyrä kuvaa kohteen selviytymistodennäköisyyttä.



Kuva 7: Kuvakaappaus skenaariosta, jossa suojarakenne on lisätty. Kuvassa räjähdys on punainen ympyrä, kohde vihreä kuutio ja suojarakenne punainen neliö. Sininen ympyrä kuvaa kohteen selviytymistodennäköisyyttä.

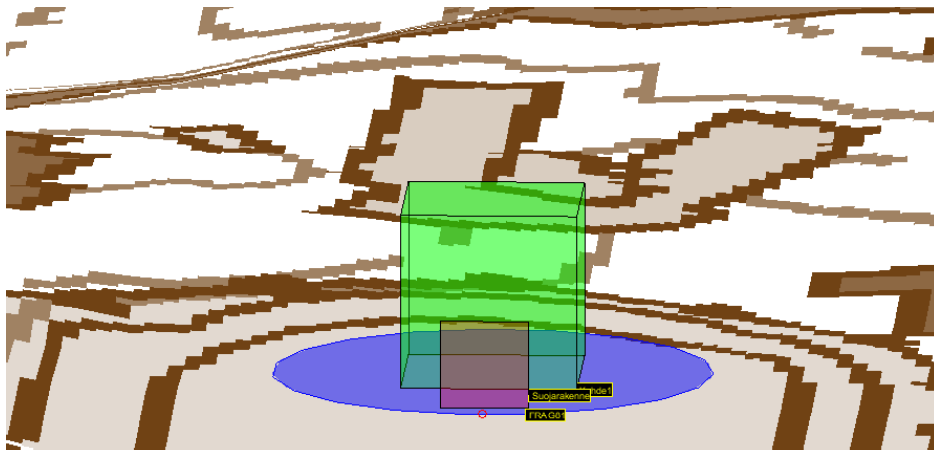
Kuvassa 6 on esitetty skenaario, jossa tarkastellaan pelkästään kohteen tuhoutumistodennäköisyyttä. Tämä skenaario vastaa tilannetta, jota on mahdollista tarkastella myös alkuperäisellä simulointiohjelmistolla. Kuvassa 7 vastaavasti on räjähdys ja kohteen välissä suojarakenne, joka alkuperäistä simulointiohjelmistoa käytettäessä olisi pysäyttänyt räjähdysvaikutuksen.

Simulaatiosta kerätään tieto etäisyydestä kohteen ja räjähdysvälillä, sekä simulointiohjelman tuottamat tuhoutumistodennäköisyydet. Näiden perusteella voidaan päätellä, onko tuhoutumistodennäköisyys laskenut suojarakenteen asettamisen vuoksi.

4.2 Suojarakenteen paksuuden vaikutus selviytymistodennäköisyyteen

Haluttaessa tarkastella laskentamallin toimivuutta on syytä tarkastella laskentamallin tuloksia myös muuttaessa parametrejä. Olennaisinta sovelluksien kannalta on, että eripaksuiset, mutta muuten samanlaiset suojarakenteet vaimentavat räjähdysvaikutusta suhteessa paksuuden kasvuun.

Laskentamallin suojarakenteen paksuuden huomioiminen varmistetaan toteuttamalla simulaatioita, joissa samoissa koordinaateissa olevan suojarakenteen paksuutta muutetaan ja tarkastellaan selviytymistodennäköisyyksiä jokaisella tapauksessa. Simulaatiot toteutetaan samantyyppisellä mallilla kuin kohdassa 4.1. Käytetty malli on kuvattu kuvassa 8.



Kuva 8: Simulaatiossa käytetty malli, jossa kuvatus suojan paksuutta muutettiin pitäen paikka vakiona. Kuvassa räjähdys on punainen ympyrä, kohde vihreä kuutio ja suojarakenne punainen neliö. Sininen ympyrä kuvaa kohteen selviytymistodennäköisyyttä.

Kuvan 8 skenaariossa suojarakenteen paksuutta muutettiin ensin tasaisella, mutta loppua kohti pitenevällä välillä. Lopuksi testattiin vielä suojan paksuus 0 mm, sekä tuhoutumistodennäköisyys ilman suojaa. Simulaatiossa

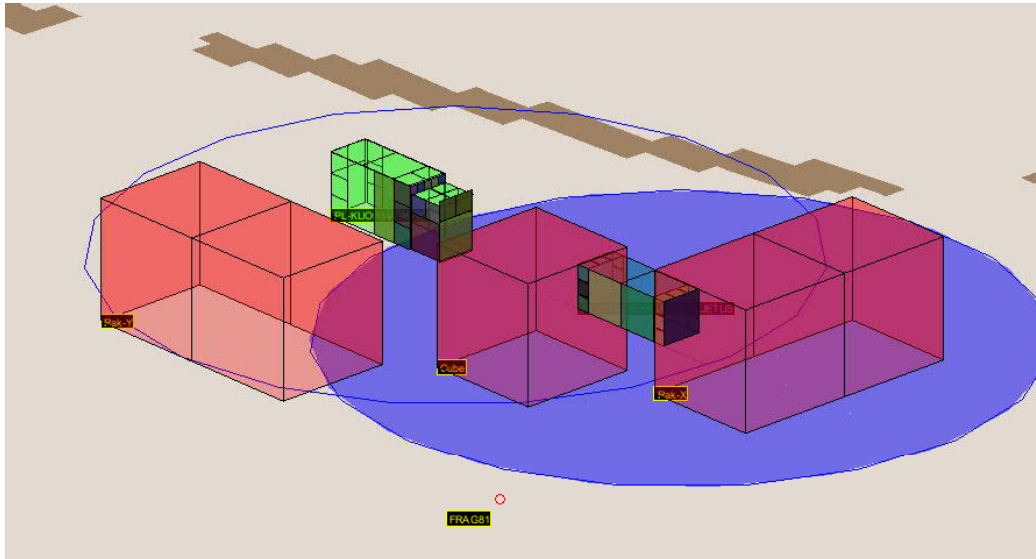
käytettiin räjähteenä simulointiohjelmaan mallinnettua 81 mm sirpaloituvaa kranaattia. Suojarakenteen materiaalina käytettiin terästä.

4.3 Infrastruktuurimaisen suojarakennejärjestelmän vaikutus selviytymistodennäköisyyteen

Luonnollinen käyttötarkoitus kehitetyn laskentamallin hyödyntämiselle on mallintaa jonkinlaista tukikohtarakennetta ja tarkastella ympäröivien esteiden suojavaikutusta. Esimerkiksi voidaan mallintaa kuorma-auto, jonka voidaan ajatella sisältävän räjähdysaineita. Tämä on selvästi arvokas kohde, sillä sen tuhoutuminen muodostaa merkittävästi epäsuoran tulen uhkaa suuremman uhan ryhmyksen kalustolle ja henkilöstölle.

Tässä simulaatiossa tarkastellaan tilannetta, jossa edellä kuvattu räjähdelas-tissa oleva kuorma-auto on ajettu ryhmyykseen, joka koostuu kiinteistä rakenteista, kuten taloista ja muista rakenteista, jotka on mallinnettu kuutioina tai kuutioista koostuvina rakenteina. Näiden lisäksi ryhmyykseen sijoitettu viestiasemakontti, joka tulkitaan myös arvokkaaksi kohteeksi. Simulaatiossa tarkastellaan näiden molempien kohteiden selviytymistodennäköisyyksiä. Tarkoituksena on osoittaa paitsi monimutkaisempien tilanteiden mallinnuksen toimivuus, myös useampien kappaleiden tuhoutumistodennäköisyyksien seuraamisen mahdollisuus.

Skenaariossa kuorma-auto on mallinnettu tietokantaan siten, että se koostuu 39 neliöstä. Viestiasemakontti on mallinnettu 26 neliönmuotoisella pinnalla siten, että kontti vastaisi ulkomitoiltaan mahdollisimman realistisesti oikeaa kohdetta. Varsinaiset mitat on arvioitu Conlog Groupin verkkosivuilla (Conlog Group 2018) esiintyneistä kuvista. Simulaatioskenaario on esitetty havainnekuvana kuvassa 9.



Kuva 9: Kuvakaappaus simulaatioskenaariosta, Kahden rakennuksen ja yhden varistorakennuksen katveessa on kuorma-auto, sekä viestiasemakontti. Kuvassa värikkäät neliöt kuvaavat suojien projektioita. Kohteet on merkitty vihreällä ja suojarakenteet punaisella. Siniset ympyrät visualisoivat selviytymistodennäköisyyttä.

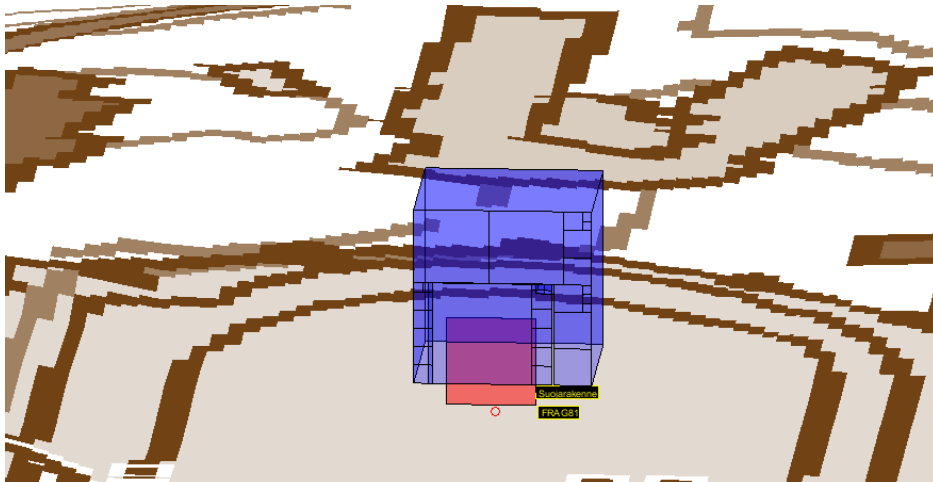
Kuvassa 9 on esitetty havainnekuva simulaatioskenaariosta. Valitusta kuvakulmasta nähdään, että räjähdevaikutus pääsee myös osin vaikuttamaan suojarakenteiden välistä suoraan kohteelle, sillä kuvassa 9 värikkäät neliöt, jotka kuvaavat suojarakenteiden tuottamaa suojavaikutusta eivät peitä kappaleita kokonaan. Simulaatiossa käytetään tämän työn esittelemää laskentamallia huomioimaan suojarakenteiden vaikutus. Kohteet on mallinnettu simulaatioskenaarioon siten, kuorma-auton paksuus on tarkasteltavan pinnan sijainnista riippuen 2 mm - 5 mm teräsekvivalenttia. Paksummat pinnat on mallinnettu takaosaan, jossa ne kuvaavat kuorma-auton konttia. Viestiasemakontti on mallinnettu tasapaksuiseksi. Sen paksuus on kaikkialta 20 mm teräsekvivalenttia. Ammuksena tässä simulaatiossa käytetään simulointiohjelmaan mallinnettua 81 mm sirpaloituvaa kranaattia.

5 Tulokset

5.1 Yksinkertaisen suojarakenteen vaikutus selviytymistodennäköisyyteen

Tässä simulaatiossa oli tarkoituksena osoittaa, että laskentamalli todella toimii ja suojarakenteilla olisi tuhoutumistodennäköisyyttä pienentävä vaikutus. Simulaatiossa laskettiin ensin tuhoutumistodennäköisyys kuvassa 7 esitetylle skenaariolle, jonka jälkeen suojarakenne poistettiin ja laskettiin uudelleen tuhoutumistodennäköisyys ilman suojarakennetta.

Suojarakenteen ollessa kappaleen ja räjähdysen välissä saatiin käyttämällä tässä työssä esiteltyä laskentamallia skenaario muutettua kuvassa 10 esitettyyn muotoon. Tässä muodossa suojarakenteen vaikutus tarkastellaan simulointiohjelmiston vaatimalla tavalla yhtä räjähdystä ja yhtä kappaletta, joka saa koostua yhdestä tai useammasta maalipinnasta

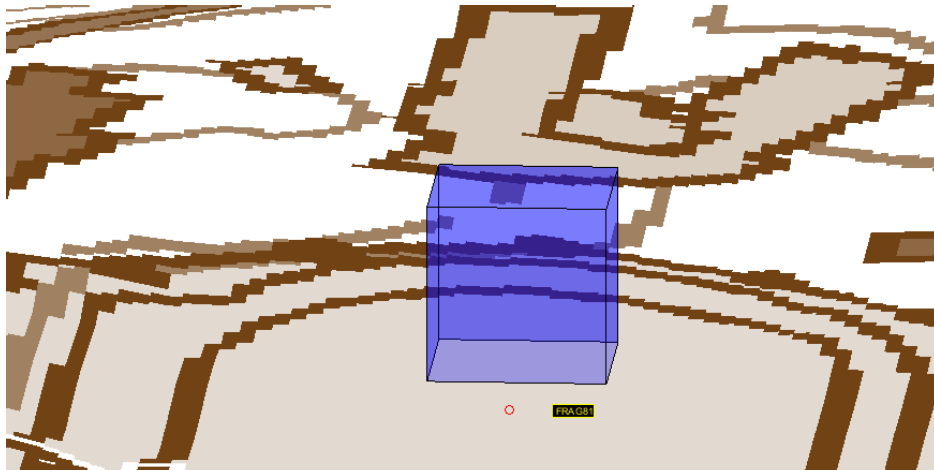


Kuva 10: Neliöity, suojarakenteen suojaama kohde. Kuvassa sinisellä on neliöity kohde, punainen neliö on suojarakenne ja punainen ympyrä räjähdde.

Kuvassa 10 esitetyn perusteella ajettiin simulaatio, josta saatiin tulokseksi, että kohteen ollessa 23.0 metrin etäisyydellä räjähdyksestä, suojarakenteen varjostaessa sitä kuvan 7 mukaisesti, on kappaleen tuhoutumistodennäköisyys 0.20. Näin ollen siis suojattuna kohde selviytyy tästä epäsuora tulen iskusta 80 % todennäköisyydellä.

Vastaavasti, kun suojarakenne poistettiin ja ajettiin simulaatio kuvan 6 mu-

kaisesti saatiin käyttämällä tämän työn laskentamallia muodostettua kohde, joka on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11: Neliöinti kohteesta ilman suojarakenteen varjostusta. Sininen kuu-tio on neliöity kohde. Punainen ympyrä on räjähdys.

Kuvasta 11 huomataan, että tilanne on täsmälleen samanlainen kuin kuvassa 6. Näin ollen voidaan todeta, että laskentamalli onnistuu neliöimään neliön-muotoiset kappaleet oikein.

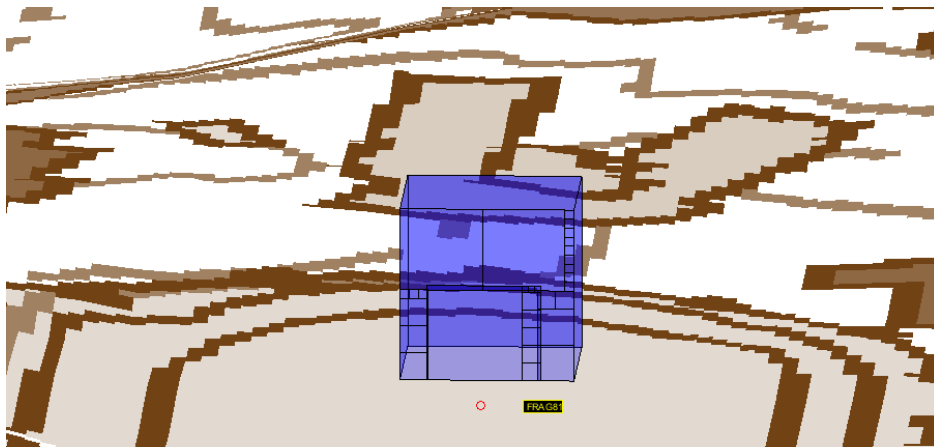
Simulaation tuloksena saatiin, että ilman suojarakennetta kohteen tuhoutumistodennäköisyys on 0.28. Näin ollen kappale siis selviytyy 23.0 metrin päässä tapahtuvan räjähdysten vuoksi 72 % todennäköisyydellä. Tämä tarkoittaa sitä, että ilman suojarakennetta kohde tuhoutuu 8 prosenttiyksikköä, eli noin 11 % todennäköisemmin, kuin suojarakenteen kanssa. Tulos vaikuttaa realistiselta ja järkevältä, sillä suojan paksuus on 40 % varsinaisen kohteen paksuudesta. Tällöin olettaessa lineaarinen riippuvuus tuhoutumistodennäköisyyden ja paksuuden välille, tuhoutumistodennäköisyyden tulisi pienentyä noin 7 prosenttiyksikköä, suojarakenteen varjostaessa arviolta noin 60 % kohteesta, kuvan 7 mukaisesti. Tämän arvion valossa saatu tulos on mielekäs.

5.2 Suojarakenteen paksuuden vaikutus selviytymistodennäköisyyteen

Toisessa simulaatiossa tavoitteena oli osoittaa, että laskentamalli ottaa huomioon myös suojarakenteen paksuuden. Samalla halutaan tarkastella, millai-

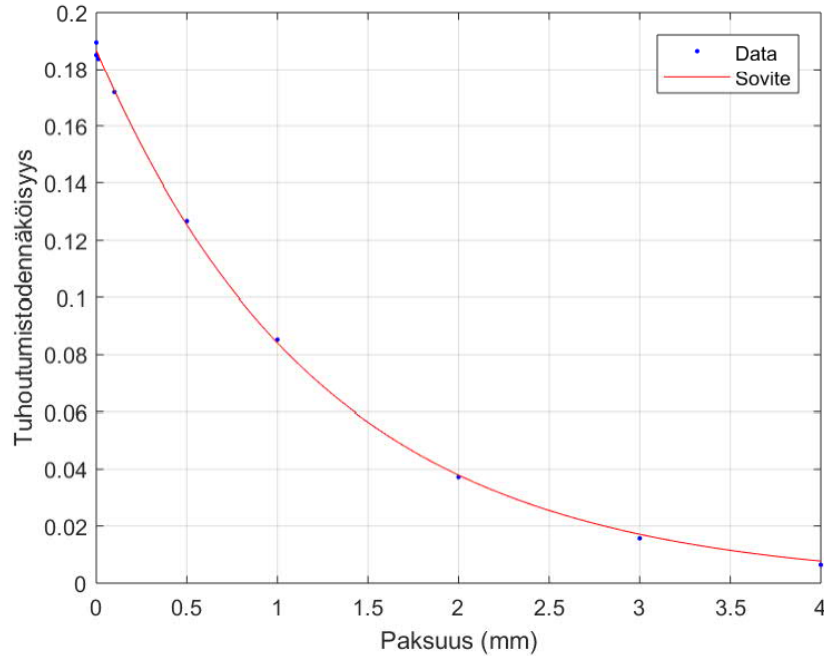
nen riippuvuus tuhoutumistodennäköisyyden ja suojarakenteen paksuuden vaikutuksella on.

Käytetty simulaatioskenaario on esitelty kuvassa 8. Tämän perusteella laskettiin, tämän työn laskentamallia käyttäen, suojarakenteen varjostuksen aiheuttamat varjot ja niiden neliöinti. Tämän laskennan lopputulos on esitetty kuvassa 12.



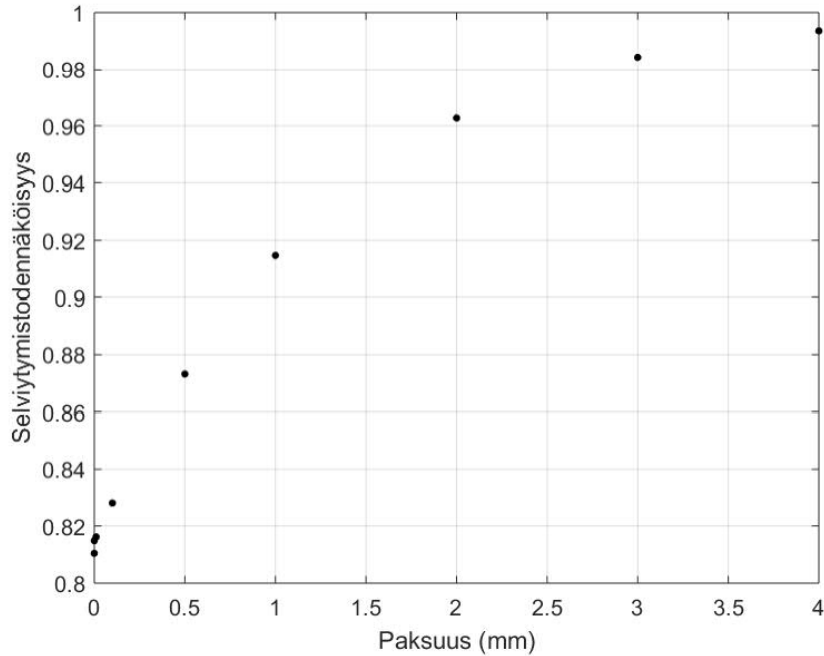
Kuva 12: Laskentamallin tuottama neliöinti kohteelle kuvan 8 mukaisesta tilanteesta. Sinisellä on merkitty neliöity kohde. Punainen ympyrä on räjähdys.

Kuvan 12 vastine, jossa suojarakenne on poistettu, on esitetty kuvassa 18. Simulaatio toteutettiin luvussa 4.2 esitetyn mukaisesti. Simulaatioiden tulosten perusteella voidaan piirtää seuraava kuvaaja 13.



Kuva 13: Simulointiohjelmiston tuottamat tuhoutumistodennäköisyydet suojarakenteen paksuuden funktiona.

Kuvassa 13 on esitettyä tuhoutumistodennäköisyydet paksuuden funktiona. Kuvaajassa on esitettyä kaksi todennäköisyyttä suojan paksuudelle 0 mm, sillä simulaatio laskettiin sekä suojalle, jonka paksuus on 0 mm, eli, jossa suoja on edelleen paikallaan, mutta sillä ei ole paksuutta, että tilanteelle, jossa suoja on poistettu. Verrattaessa kuvaajia 12 ja 18 (liite A) huomataan, että tilanteessa, jossa suojan paksuus on 0 mm, osittelu jakaa pinnan useampaan osaan, mikä tässä tapauksessa pienentää tuhoutumistodennäköisyyttä. Tämä pieneminen johtuu laskentamallin käyttämästä tuhoutumistodennäköisyyden geometrisesta tulkinnasta, jolloin yksittäiset pienemmät alueet tuhoutuvat vaikeammin kuin suuret, yhtenäiset alueet. Kuvaajasta 13 kuitenkin nähdään, että tuhoutumistodennäköisyys vaikuttaa laskevan eksponentiaalisesti vaimennuksen kasvaessa. Tämä vaikuttaa järkevältä, sillä tilanne on käytännössä vastaava sähkömagneettisen säteilyn väliainevaimenemisen kanssa, jossa vaimenemislaki (Beer-Lambert laki) on eksponentiaalisesti vaimeneva. Swinehart (1962) Simulointiohjelmiston tuloksista voidaan helposti laskea käyttämällä yhtälöä (1) myös selviytymistodennäköisyydet, jotka on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14: Kohteen selviytymistodennäköisyydet suojarakenteen paksuuden funktiona.

Kuvan 14 perusteella vaikuttaa, että selviytymistodennäköisyys lähestyy ykköstä, kun suojarakenteen paksuus kasvaa. Lisäksi olennaisesti huomataan, että aikaisemmin oletettu suhde selviytymistodennäköisyyden ja suojarakenteen paksuuden välillä ei ole lineaarinen. Sama havainto voidaan tehdä myös kuvasta 13.

Simulaation tuloksiin, jotka on esitetty kuvassa 13 voidaan sovittaa eksponentiaalisuus-havainnon nojalla vähenevä eksponenttifunktio, joka on muotoa.

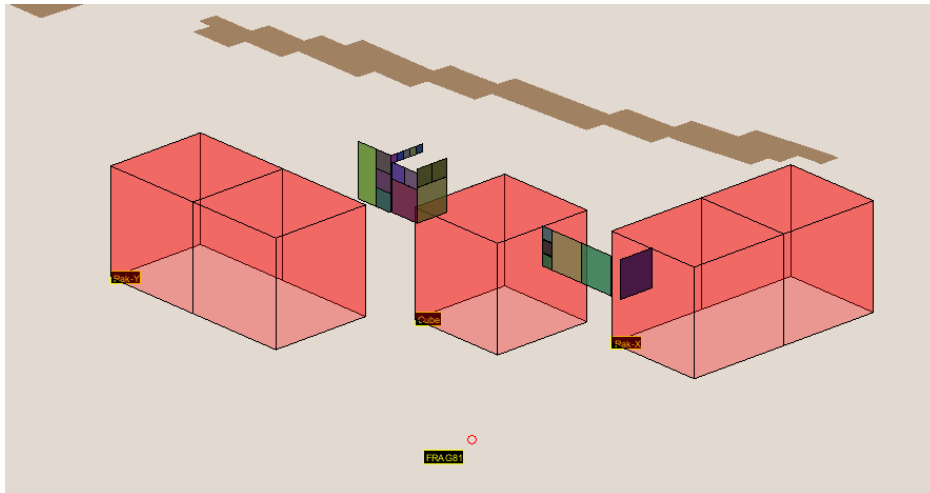
$$y = ae^{-bx}, \quad (11)$$

jossa a ja b ovat sovitettavia parametrejä. Sovittamalla mallin 11 mukaisen mallin käyttämällä epälineaarista pienimmän neliösumman menetelmää saadaan parametreiksi arvot $a = 0.1869$ ja $b = 0.7973$. Sovituksen hyvyttä voidaan arvioida tarkastelmalla sovituksen R^2 arvoa, joka tässä tapauksessa on 0.9996. Tämä tarkoittaa sitä, että sovite sopii pistejoukkoon lähes täydellisesti, sillä täydellisen sopivuuden $R^2 = 1$. Toinen arvio sovituksen hyvyydelle voidaan tehdä parametrien luottamusvälien leveydestä. Luottamusvälien pituudet ovat vastaavasti $\Delta a = 0.0041$ ja $\Delta b = 0.0610$. Luottamusvälien pituudet ovat pienet, joka puoltaa sovituksen hyvyttä.

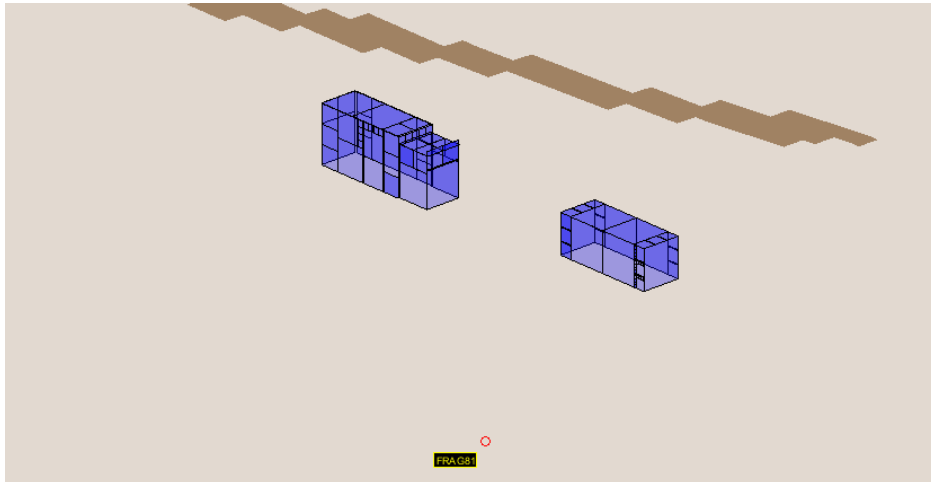
Tämän simulaation tuloksena saatiin siis, että laskentamalli huomioi suojarakenteen paksuuden ja itseasiassa laskentamalli vaikuttaa toimivan vastaavasti, kuin edellä mainitussa esimerkiksi Beer-Lambert laissa Swinehart (1962). Tämä tulos on tärkeä, sillä tämä osoittaa laskentamallin toimivuuden, mikä antaa perusteet soveltaa laskentamallia monimutkaisempiin tilanteisiin ja luo pohjan niiden antamille tuloksille.

5.3 Infrastruktuurimaisen suojarakennejärjestelmän vaikutus selviytymistodennäköisyyteen

Tämän simulaation tarkoituksena oli osoittaa laskentamallin käyttökelpoisuus, paitsi teoriassa, myös käytännön tilanteessa. Aikaisemmissa simulaatioissa todettiin, että laskentamalli toimii oikein ja kykenee lisäksi huomioimaan suojarakenteen paksuuden. Tässä simulaatiossa näitä tietoa sovellettiin muodostamalla monimutkaisempi systeemi, jonka tarkoituksena oli erityisesti osoittaa laskentamallin soveltuvuutta myös reaaliaikailman mallintamiseen. Simulaatio tuottaa ensin tämän työn laskentamallia käyttäen suojarakenteiden varjostavan suojarakennevaikutuksen ja sitä vastaavan neliöinnin, joka on esitetty kuvassa 15 ja 16.

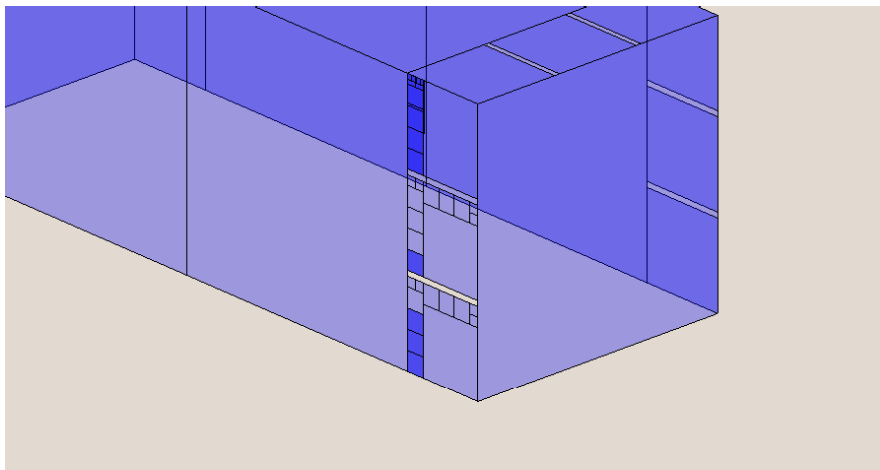


Kuva 15: Kuvakaappaus simulaatioskenaarion suojarakenteiden muodostamasta suojavaikutuksesta. Suojarakenteet ovat punaisia neliöitä. Punainen ympyrä on räjähdys. Värikkäät nelikulmiot ovat suojarakenteiden projektiota.



Kuva 16: Kuvakaappaus simulaatioskenaarion suojarakenteiden muodostamasta suojavaikutuksesta. Neliöidyt kohteet on merkitty sinisellä. Räjähdyks on punainen ympyrä.

Kuva 15 havainnollistaa, kuinka osa vaikutuksesta pääsee etenemään suoraa kohteelle. Tämä osoittaa, että kohteiden sijoittelulla räjähdykseen nähden on merkitystä. Lisäksi kuvasta 16 nähdään, että nyt kun varjojen lukumäärä on suurempi pintojen määrän kasvettua, onnistuu laskentamalli silti neliöimään varjot ongelmitta. Erityisesti huomataan, että laskentamalli kykenee poimiin pienempiä yksityiskohtia. Tämä nähdään tarkemmin kuvasta 17, jossa on esitetty tarkennettu kuva viestiasemakontin neliöinnistä.



Kuva 17: Kuvakaappaus simulaatioskenaarion suojarakenteiden muodostamasta suojavaikutuksesta. Siniset neliöt ovat osa kohteen neliöintiä.

Simulaatiossa saatiin tulokseksi, että 31.7 m päässä oleva kuorma-auto tuhoutuu 50 %:n todennäköisyydellä ja 22.8 m päässä oleva viestiasema 0 %:n todennäköisyydellä. Tämä tulos on järkevä, sillä viestiasema kontti on huomattavasti paksumpi, sekä olennaisesti paremmin sijoitettu suhteessa räjähdyspisteeseen. Kuvasta 15 nähdään, että viestiasemasta paljastuu ainoastaan pieni osa pinnasta suoraan räjähdykselle, kun taas kuorma-autosta paljastuu lähes koko räjähdykseen päin oleva kylki.

Tuloksista voidaan todeta, että laskentamalli kykenee huomioimaan suojarakenteiden vaikutuksen ja myös suojarakenteiden paksuuden. Tämän lisäksi viimeisessä simulaatiossa kyettiin osoittamaan, että laskentamallia voidaan käyttää myös monimutkaisempien systeemien käsittelyyn.

6 Johtopäätökset

Tässä työssä esiteltiin paranneltu laskentamalli epäsuoran tulen mallintamiseen. Erityisesti työssä toteutettiin laajennus olemassa olevaan simulointiohjelmistoon, millä kyetään ottamaan huomioon suojarakenteiden vaikutus kappaleiden selviytymistodennäköisyyteen. Tähän liittyen toteutettiin suojarakenteiden projisointialgoritmi, jolla suojarakenteiden kohteen pintoja suojaava vaikutus voidaan huomioida. Lisäksi toteutettiin algoritmi, joka laskee eri suojarakenteista syntyvät projektiot ja erittelee niistä päällekkäisyyden vuoksi eri vahvuudella suojaavat osat. Näiden lisäksi toteutettiin algoritmi, jolla projisointialgoritmin lopputuotteet voidaan yhdistää olemassa olevaan simulointiohjelmistoon. Tällä algoritmilla lasketut suojarakenneprojektiot voidaan neliöidä, mikä mahdollistaa simulointiohjelmiston käytön. Lisäksi työssä osoitettiin esimerkkisimulaation laskentamallin toimivuus.

Työssä esitettyjen esimerkkisimulaatioiden pohjalta todettiin, että suojarakenteet vaikuttavat positiivisesti kohteen selviytymistodennäköisyyteen. Lisäksi työssä havaittiin, että mitä paksumpi suojarakenne kohteen eteen asetetaan, sitä enemmän se suojaa kohdetta. Simulaatioissa saadut tulokset ovat intuitiivisia, mutta niitä ei ole aikaisemmin voitu huomioida simulaatioissa. Intuition ulkopuolelta havaittiin, että paksuuden vaikutus tuhoutumistodennäköisyyteen vaikuttaa olevan eksponentiaalinen, mikä vastaa muita vaimennuslakeja. Lisäksi viimeisessä simulaatiossa osoitettiin laskentamallin olevan sovellettavissa reaali maailman tilanteisiin.

Tässä työssä tehtiin oletuksia, jotka jättävät malliin jatkokehitysmahdollisuuksia. Tärkein oletus työssä liittyy kohteisiin. Työssä on oletettu, että vai-

kutuksen kohteet eivät muodosta suojavaikutusta toisille kohteille. Lisäksi työssä oletettiin, että paineaallon vaikutus on suhteellisesti merkityksetön, minkä vuoksi sen vaikutus suojarakenteen peittämälle kohteelle jätettiin huomiotta. Lisäksi räjähdysvaikutukseen liittyen tehtiin oletus, jonka mukaan sirpalevaikutuksen eteneminen jatkuu myös suojarakenteeseen osumisen jälkeen suoraviivaisena. Tämän mallintaminen vaatisi räjähdysvaikutuksen etenemisen tarkempaa tutkimusta.

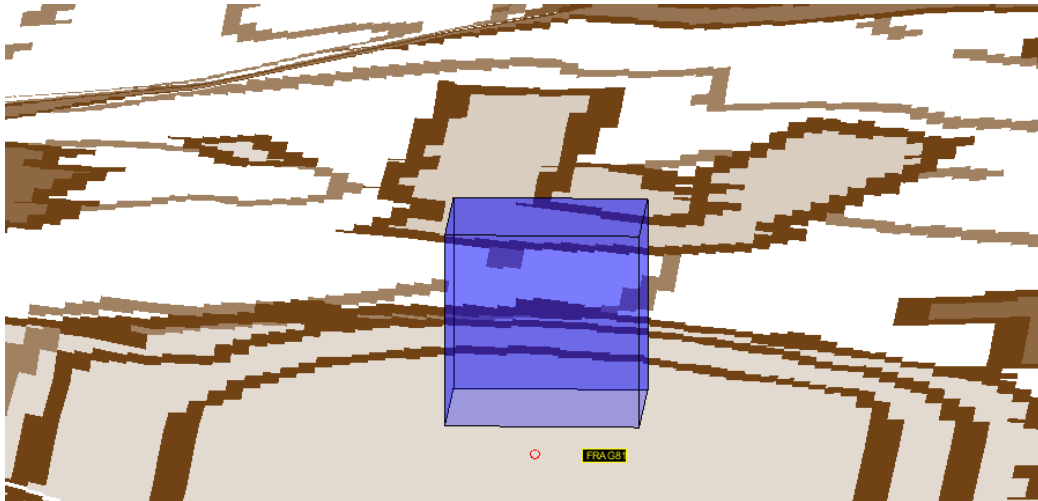
Työssä esitelty laskentamalli nostaa esiin uusia tutkimuskysymyksiä ja mahdollistaa erilaiset simulointiskenaariot. Esitellyn laskentamallin avulla voidaan esimerkiksi vertailla tilapäissuojarakenteen muotoja tai tarkastella kattorakenteiden vaikutusta selviytymistodennäköisyyteen ilmaiskussa. Suojarakenteen muodon lisäksi voidaan ratkaista tehtäviä, joissa halutaan vertailla ryhmitysten paremmuutta esimerkiksi arvokkaisen kohteiden selviytymistodennäköisyyksien suhteen. Tämän laskentamallin perusteella voidaan myös pyrkiä kehittämään erilaisia työkaluja sotilaspäätöksenteon avuksi.

Viitteet

- Åkesson, B. M., Lappi, E., Pettersson, V. H., Malmi, E., Syrjänen, S., Vulli, M., & Stenius, K. (2013). Validating indirect fire models with field experiments. *The Journal of Defense Modeling and Simulation*, 10(4), pp. 425–434.
- Atallah, M. J. (1998). *Algorithms and theory of computation handbook*. CRC press. (pp. 2-13)
- Bellamy, R. F., & Zajtcuk, R. (1991). Assessing the effectiveness of conventional weapons. *Textbook of Military Medicine, Part I: Warfare, Weaponry, and the Casualty*, pp. 53–82.
- Borén, A., Mikkola, P., Kangasniemi, I., Lappi, E., Reijonen, P., Solanti, J., & Åkesson, B. (2015). Team 5: Protection of high-value targets from indirect fire using temporary constructions. *Scythe: Proceedings and Bulletin of the International Data Farming Community, Issue 17, Workshop 29*, pp. 22–26.
- Conlog Group. (2018). *Conlog Group, Tuotteet ja palvelut*. Saatavilla: <http://www.conlog-group.fi/tuotteet+ja+palvelut/>. (Luettu: 12.09.2018)
- Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., & Stein, C. (2009). *Introduction to algorithms* (3. p.). MIT press. (pp. 414–415)
- Dullum, O. S., Fulmer, K., Jenzen-Jones, N., Lincoln-Jones, C., & Palacio, D. G. (2017). *Indirect fire: A technical analysis of the employment, accuracy, and effects of indirect-fire artillery weapons* (Tekn. rap.). Perth: Armament Research Services (ARES).
- Heininen, T. (2006). A method to calculate the lethality of fragmenting ammunition. *Lanchester and Beyond—A Workshop on Operational Analysis Methodology*, 11, pp. 19–30.
- Jaiswal, N. K. (2012). *Military operations research: quantitative decision making* (osa 5). Springer Science & Business Media. (pp. 1–12)
- Klemola, O. (2016). *Puolustusvoimien tutkimuslaitoksen vuosikirja 2016*. Ylöjärvi: Puolustusvoimien tutkimuslaitos. (pp. 44–45)
- Lappi, E. (2012). *Computational methods for tactical simulations* (väitöskirja). Maanpuolustuskorkeakoulu, Helsinki.
- Lappi, E., Pottonen, O., Mäki, S., Jokinen, K., Saira, O., Åkesson, B., & Vulli, M. (2008). Simulating indirect fire—a numerical model and validation

- through field tests. *2nd Nordic Military Analysis Symposium, Stockholm, Sweden, 10(4)*.
- Lappi, E., Sysikaski, M., Åkesson, B., & Yildirim, U. Z. (2012). Effects of terrain in computational methods for indirect fire. *Simulation Conference (WSC), Proceedings of the 2012 Winter*, pp. 1–12.
- NATO Standardization Office, NSO. (2018). *Nato glossary of terms and definitions (english and french)*. (Edition 2017)
- Niblack, W. (1986). *An introduction to digital image processing* (osa 34). Prentice-Hall Englewood Cliffs. (pp. 69–73)
- Pape, R. A. (1997). The limits of precision-guided air power. *Security Studies*, 7(2), pp. 93–114.
- Puolustusvoimat. (2017). *Sotilaan käsikirja 2017*. Pääesikunta. (pp. 220)
- Rojonen, J. (2015). *Simulating artillery fire in forest environment; epäsuo-
ran tulen mallintaminen metsämaastossa* (diplomityö). Aalto-yliopisto, Espoo.
- Smith, P. D., & Rose, T. A. (2006). Blast wave propagation in city streets—an overview. *Progress in structural engineering and materials*, 8(1), pp. 16–28.
- Swinehart, D. (1962). The beer-lambert law. *Journal of chemical education*, 39(7), pp. 333.

A Esimerkkisimulaatioiden kuvia



Kuva 18: Skenaarion 2 (kuva 8) neliöinti laskentamallilla, kun suojarakenne poistetaan. Kuvassa punainen ympyrä on räjähdys ja sininen kuutio neliöity kohde.