



# Paikallavaletun väestönsuojan algoritmiavusteinen suunnittelu

Elias Partti

OPINNÄYTETYÖ  
Toukokuu 2021

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka  
Talorakennustekniikka

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka  
Talonrakennustekniikka

PARTTI, ELIAS:

Paikallavaletun väestönsuojan algoritmiavusteinen suunnittelu

Opinnäytetyö 76 sivua  
Toukokuu 2021

---

Tässä työssä luotiin rakenteiden analysointiin ja mitoitukseen keskittyvä algoritmiavusteinen suunnitteluprosessi paikallavalettujen S1-luokan väestönsuojien suunnittelua varten. Samalla kerättiin selkeäksi kokonaisuudeksi rakennesuunnittelun kannalta olennaiset väestönsuojien suunnittelua ohjaavat säännöt ja ohjeet sekä selvitettiin algoritmiavusteisen suunnittelun perusteet. Opinnäytetyö on tehty A-Insinöörit Suunnittelu Oy:n toimeksiannosta.

Väestönsuojien rakentamista ohjataan Suomessa laeilla ja asetuksilla, minkä vuoksi niiden rakenteet toistuvat kohteesta toiseen hyvin samantapaisina. Tästä syystä myös väestönsuojarakenteiden suunnittelu sisältää runsaasti mekaanista ja toisteista työtä, jonka siirtäminen algoritmin suoritettavaksi mahdollistaisi manuaaliseen suunnitteluun verrattuna tehokkaamman suunnitteluprosessin.

Työssä esitellään yleisesti väestönsuojia sekä niiden rakentamiseen ja suunnitteluun liittyviä sääntöjä ja ohjeita. Lisäksi työssä käydään läpi pääperiaatteittain väestönsuojien laattamaisten teräsbetonirakenteiden laskentaperusteita sekä mitoitusmenetelmiä ja esitellään algoritmiavusteisen suunnittelun perusteet. Työn loppuosassa esitellään algoritmiavusteisen suunnitteluprosessin toimintaperiaatteet ja arvioidaan luodun algoritmin toimivuutta.

Opinnäytetyön tuloksena onnistuttiin työn tavoitteen mukaisesti luomaan väestönsuojien suunnittelua tehostava algoritmi, jonka avulla väestönsuojan laskentamallin luonti onnistuu automatisoidusti haluttuun muotoon muokattujen lähtötietojen perusteella. Lisäksi algoritmin avulla saadaan mitoitettua väestönsuojien laatat ja paineseinät sekä määriteltä näille pääraudoitukset. Selkeä jatkokehityskohde työlle olisi kehittää algoritmiavusteista suunnitteluprosessia eteenpäin väestönsuojan parametriseen mallintamiseen ja aina piirustustuotantoon saakka.

---

Asiasanat: algoritmiavusteinen suunnittelu, grasshopper, väestönsuoja

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Construction Engineering  
Building Construction

ELIAS PARTTI:  
Algorithm-Aided Design of Cast-in-Place Civil Defense Shelter

Bachelor's thesis 76 pages  
May 2021

---

In this thesis, an algorithm-aided design process for analyzing and designing the structures of S1-class cast-in-place civil defense shelters was created. Also, all the important rules and guidelines for structural design of civil defense shelters and basics of algorithm-aided design were gathered up. This thesis work has been commissioned by A-Insinöörit Suunnittelu Oy

The construction of civil defense shelters is regulated by the laws and decrees in Finland, and therefore the structures of civil defense shelters are very similar in every building. For this reason, the design of civil defense shelters contains a lot of mechanical and redundant work which could be automated by algorithm making the design process more efficient compared to the manual design process.

In the thesis, civil defense shelters and their building and design principles were presented in general. Also, the main points of structural design of concrete slab structures in civil defense shelters were explained and the basics of algorithm-aided design were presented. Finally, the operating principles of algorithm-aided design process were explained, and the functionality of algorithm was evaluated.

As a result of this thesis, the algorithm to make structural design of civil defense shelters more effective was created successfully. With the algorithm, the calculation model from structures of civil defense shelters can be created automatically based on the source information collected in a specific form. The slab and pressure wall structures of civil defense shelters can also be designed, and main reinforcements defined with the algorithm. Developing this algorithm-aided design process to parametric modeling and drawing production of civil defense shelter would be one great further development target for this thesis.

---

Key words: algorithm-aided design, grasshopper, civil defense shelter

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	7
2	VÄESTÖNSUOJAT .....	8
	2.1 Väestönsuojan rakentamisvelvoite .....	9
	2.2 Suojaluokat .....	10
	2.3 Väestönsuojan koko ja sijainti .....	11
	2.4 Suojatilat ja kulkureitit.....	13
	2.4.1 Väestönsuojaan kuuluvat tilat .....	14
	2.4.2 Suojaantulo- ja hätäpoistumisreitit.....	16
	2.4.3 Ovet, luukut ja läpiviennit.....	19
	2.5 Mitoituksen lähtötiedot.....	20
	2.5.1 Kuormitus .....	20
	2.5.2 Materiaalit ja muut lähtötiedot.....	24
	2.5.3 Rakenteet ja raudoitusperiaatteet.....	26
3	VÄESTÖNSUOJARAKENTEIDEN SUUNNITTELU .....	30
	3.1 Laskentamenetelmät .....	32
	3.1.1 Massiivilaattamenetelmä .....	32
	3.1.2 Kaistamenetelmä.....	34
	3.1.3 Myötöviivateoria.....	35
	3.2 Rakenteiden mitoitus.....	38
	3.2.1 Taivutusmitoitus.....	38
	3.2.2 Leikkaus- ja lävistysmitoitus .....	39
	3.3 Väestönsuojan FEM-laskenta .....	40
	3.3.1 RFEM .....	40
	3.3.2 Mallinnus- ja laskentaperusteet .....	41
	3.3.3 Laskentamallin luonti .....	45
4	ALGORITMIAVUSTEINEN SUUNNITTELU .....	47
	4.1 Rhinoceros 3D ja Grasshopper .....	49
5	TUTKIMUSOSIO: VÄESTÖNSUOJAN ALGORITMIAVUSTEINEN SUUNNITTELU.....	53
	5.1 Lähtötiedot .....	54
	5.2 Geometrian luonti .....	56
	5.3 Laskentamallin luonti.....	57
	5.3.1 Geometria ja tuennat.....	58
	5.3.2 Kuormien määrittely ja kuormitusyhdistelmät .....	60
	5.4 Mitoitus ja raportointi .....	64
6	ALGORITMIN TOIMIVUUDEN ARVIOINTI.....	68

6.1 Laskentamallin luonti.....	68
6.2 Mitoitus ja raportointi .....	70
6.3 Käyttökelpoisuus .....	71
6.4 Jatkotutkimus .....	72
7 YHTEENVETO.....	74
LÄHTEET.....	75

**LYHENTEET JA TERMIT**

BIM	tietomalli (Building Information Model)
DWG	Autocadin käyttämä tiedostoformaatti
FEM	elementtimenetelmä (Finite Element Method)
Grasshopper	visuaaliseen ohjelmointiin käytettävä Rhinoceros 3D - ohjelman lisäosa
MBP	massiivilaattamenetelmä (Massiva Betong Plattor)
RFEM	Dlubal Softwaresin FEM-laskentaohjelma
Rhinoceros 3D	McNeelin 3D-mallinnusohjelma

## 1 JOHDANTO

Algoritmiavusteisella suunnittelulla tarkoitetaan algoritmien, eli täsmällisesti määriteltyjen komentoketjujen hyödyntämistä osana suunnitteluprosessia. Rakennesuunnittelussa algoritmiavusteinen suunnittelu on vielä melko uusi suunnittelumenetelmä, mutta sen luomia mahdollisuuksia on selvitetty viime vuosina jonkin verran. Selvitysten perusteella on todettu, että sen edut saadaan hyödynnettyä parhaiten suunnittelutehtävissä, joissa käsitellään haastavia geometrioita, joissa vaaditaan erilaisten suunnitteluvaihtoehtojen vertailua ja joissa vaaditaan suurta määrää erilaisia analyyseja. Näiden lisäksi algoritmiavusteisen suunnittelun avulla saavutetaan etua perinteisiin suunnittelumenetelmiin tapauksissa, joissa luotua algoritmia voidaan hyödyntää uudelleen myös tulevaisuuden suunnittelutehtävissä.

Väestönsuojat ovat niille pelastuslaissa asetetun rakentamisvelvoitteen vuoksi hyvin yleisiä rakenteita suomalaisessa rakennuskulttuurissa. Väestönsuojien rakentamista ohjataan Suomessa voimakkaasti laeilla ja asetuksilla, minkä vuoksi niiden rakenteet toistuvat kohteesta toiseen periaatteiltaan hyvin samantapaisina. Näin ollen myös niiden suunnittelu noudattaa aina samoja pääperiaatteita. Tässä työssä tutkitaankin, voitaisiinko algoritmiavusteisen suunnittelun avulla poistaa väestönsuojien suunnitteluun liittyvää mekaanista, kohteesta toiseen samanlaisena toistuvaa työtä ja siten tehostaa suunnitteluprosessia.

Työn päätavoite on selvittää väestönsuojien suunnittelun ja mitoituksen pääperiaatteet sekä algoritmiavusteisen suunnittelun perusteet ja näiden pohjalta luoda algoritmi, jonka avulla väestönsuojarakenteisiin vaikuttavat rasitukset ja rasituksen vaatimat pääraudoitukset saadaan selvitettyä. Lopuksi luotua algoritmia on tarkoitus arvioida teknisen toimivuuden, käyttökelpoisuuden ja hyödyllisyyden näkökulmasta.

## 2 VÄESTÖNSUOJAT

Väestönsuojalla tarkoitetaan väestönsuojeluun tarkoitettuja tiloja, jotka on suunniteltu suojelemaan ihmisiä pääasiassa sotilaallisen selkkauksen vaaroilta, kuten räjähdys-, sirpale- ja asevaikutuksilta, paineaalloilta, rakennusten sortumilta, ionisoivalta säteilyltä ja terveydelle vaarallisilta aineilta (Pelastuslaki 379/2011, 74 §). Suomessa väestönsuojien rakentamista on alettu ohjata laeilla ja asetuksilla virallisesti jo vuona 1939, jolloin voimaan tuli väestönsuojelulaki 375/1939 (Rajajärvi 2016, 86). Nykyään väestönsuojien määrän ja toimivuuden varmistamiseksi määrätään niiden rakentamisesta pelastuslaissa 379/2011. Pelastuslain lisäksi väestönsuojien suunnittelua ja rakentamista ohjataan valtioneuvoston asetuksella väestönsuojista 408/2011 ja sisäasiainministeriön asetuksella väestönsuojien teknisistä vaatimuksista ja väestönsuojien laitteiden kunnossapidosta 506/2011. Lisäksi näihin lakeihin ja asetuksiin perustuvaa ohjeistusta väestönsuojien suunnitteluun ja rakentamiseen liittyen löytyy esimerkiksi RT-kortista 92-11173 S1-luokan teräsbetoniväestönsuoja (2015).

Väestönsuojia koskevan rakentamisvelvoitteen vuoksi väestönsuojia on Suomessa määrällisesti melko paljon. Rakennusneuvos Pekka Rajajärvi arvioikin vuonna 2016 julkaistussa kirjassaan ”Väestönsuojien rakentamisen historia ja käsikirja 1927-2016”, että Suomessa on vuoden 2013 lopulla ollut noin 50 000 erillistä väestönsuojaa ja näissä suojapaikka noin neljälle miljoonalle ihmiselle (Rajajärvi 2016, 286).

Tämä työ on rajattu käsittelemään ainoastaan S1-luokan teräsbetonirakenteisia väestönsuojia. S1-luokan väestönsuojien betonirakenteet on perinteisesti toteutettu paikallavalurakenteina, mutta viime vuosikymmeninä elementtitekniikan kehittymisen myötä niitä on alettu enenevässä määrin toteuttamaan myös elementtirakenteisina. Elementtirakentamisen useista eduista huolimatta väestönsuojan toteuttaminen paikallavalettuna on edelleen varteenotettava vaihtoehto. Vuonna 2015 julkaistun RT-kortin 92-11173 mukaan tuolloin kaikista uusista väestönsuojista noin puolet tehtiin edelleen paikalla valaen (RT 92-11173 S1-luokan teräsbetoniväestönsuoja 2015, 19). Kuvassa 1 on esitetty eräs paikallavalettu S1-luokan teräsbetoniväestönsuoja.





KUVA 1. Paikallavalettu S1-luokan teräsbetoniväestönsuoja

## 2.1 Väestönsuojan rakentamisvelvoite

Pelastuslaissa määrätään, että väestönsuoja on pääsääntöisesti rakennettava uudisrakentamisen yhteydessä, mikäli rakennettavan rakennuksen tai samalla tontilla sijaitsevan rakennusryhmän yhteenlaskettu kerrosala on vähintään 1200 m<sup>2</sup> ja rakennuksessa tai rakennusryhmässä asutaan tai muutoin oleskellaan tai työskennellään pysyvästi. Teollisuus-, tuotanto-, varasto- ja kokoontumisrakennusten yhteydessä väestönsuoja on rakennettava yhteenlasketun kerrosalan ollessa vähintään 1500 m<sup>2</sup>. Näiden ehtojen lisäksi väestönsuojan rakentamisvelvoite ei koske uudisrakentamisen yhteydessä tapauksia, joissa vähintään toinen edellä mainituista ehdoista täyttyy, mutta

- rakennus on maankäyttö- ja rakennuslain luvun 23 pykälän 176 mukainen tilapäinen rakennus tai jokin muu määräajan paikallaan pysytettävä rakennus
- väestönsuojan rakentamiskustannukset olisivat kohtuuttoman korkeat koko rakennuksen rakentamiskustannuksiin verrattuna
- tontilla tai rakennuspaikalla sijaitsevassa tai muussa pelastuslain ehdot täyttävässä väestönsuojassa on jo riittävästi tilaa myös uuden rakennuksen suojapaikkatarpeen kattamiseksi
- rakennettava rakennus on maatilatalouden tuotantorakennus.

Uudisrakentamisen yhteydessä väestönsuojan rakentamisvelvoitetta määritettäessä ei pinta-alalaskelmissa oteta huomioon samalla tontilla tai rakennuspaikalla sijaitsevaa rakennusta, jota varten on jo väestönsuoja tai rakennuksia, joiden osittaisesta loppukatselmuksesta on rakennuslupahakemuksen vireille tullessa yli viisi vuotta. Lisäksi rakennusluvan myöntävä viranomainen voi myöntää vapautuksen väestönsuojan rakentamisvelvollisuudesta alueellisista, taloudellisista tai teknisistä syistä. (Pelastuslaki 379/2011, 71 §.)

Korjaus- ja muutostöiden tai rakennuksen käyttötarkoituksen muutoksen yhteydessä on pelastuslain mukaan myös väestönsuoja päivitettävä vastaamaan soveltuvilta osin uudisrakentamisen yhteydessä esitettyjä vaatimuksia, mikäli toimenpiteitä voidaan maankäyttö- ja rakennuslain luvun 18 pykälän 125 mukaan pitää rakennustöihin verrattavina (Pelastuslaki 379/2011, 72 §).

## 2.2 Suojaluokat

Pelastuslaissa rakennettavaksi määrättävien väestönsuojien koosta, rakenteesta ja sijainnista määrätään valtioneuvoston asetuksessa väestönsuojista (408/2011). Sen mukaisesti väestönsuojat jaetaan Suomessa suojan koon perusteella kolmeen, taulukossa 1 esitettyyn suojaluokkaan (Valtioneuvoston asetus väestönsuojista 408/2011, 2 §).

TAULUKKO 1. Väestönsuojien suojaluokat ja niiden suurimmat sallitut pinta-alat. (Valtioneuvoston asetus väestönsuojista 408/2011, 2 §)

Varsinainen suojatila enintään m <sup>2</sup>	Suojaluokka
135	S1 teräsbetonisuojana
900	S2 teräsbetonisuojana
4500	Kalliosuojana

Väestönsuojilta lakisääteisesti vaadittavat tekniset ja toiminnalliset ominaisuudet riippuvat väestönsuojan suojaluokasta. Yksi merkittävimmistä suojaluokan mukaan määräytyvistä seikoista on kuormitus, jolle väestönsuojan rakenteet tulee

mitoittaa. Väestönsuojan rakenteiden mitoituksessa käytettävän paineaallon aiheuttaman kuorman suuruus määräytyy suojaluokan nimessä olevan numeron mukaan. S1-luokan väestönsuojat täytyy mitoittaa kestämään 1 baarin, S2-luokan 2 baarin ja kallioväestönsuojat 3 baarin kuormitus. (Valtioneuvoston asetus väestönsuojista 408/2011, 4 §.)

Tässä työssä keskitytään pääasiassa S1-luokan teräsbetoniväestönsuojoihin ja niille lakisääteisesti asetettuja toiminnallisia vaatimuksia on käsitelty tarkemmin tämän työn luvuissa 2.3 ja 2.4. Suojaluokan mukaisia teknisiä vaatimuksia puolestaan käsitellään tarkemmin luvussa 2.5.

### **2.3 Väestönsuojan koko ja sijainti**

Väestönsuojan suojatilan koko ja siten osaltaan myös rakennettavan väestönsuojan suojaluokka määräytyy rakennuksen käyttötarkoituksesta ja koosta riippuen joko rakennuksen tai rakennusryhmän yhteenlasketun kerrosalan tai rakennuksessa keskimäärin oleskelevien henkilöiden lukumäärän mukaan. Ensisijaisesti suojatilan pinta-ala määräytyy rakennuksen kerrosalan mukaan ja tällöin se on varastotilojen sekä myymälä-, teollisuus-, tuotanto- ja kokoontumisrakennusten yhteydessä 1% ja muiden rakennustyyppien yhteydessä 2% rakennuksen tai rakennusryhmän yhteenlasketusta kerrosalasta. (Valtioneuvoston asetus väestönsuojista 408/2011, 2 §.)

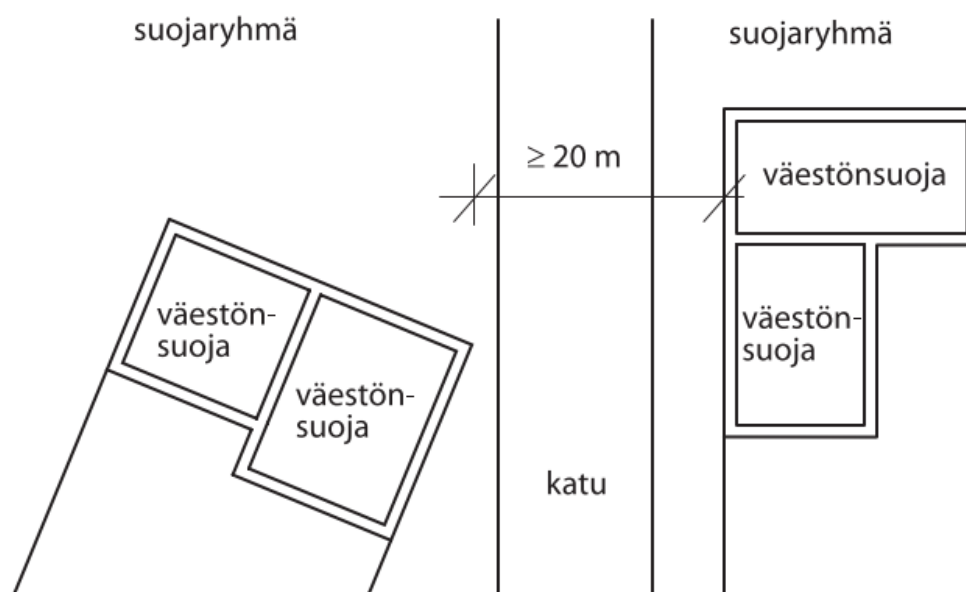
Kerrosalaan perustuvasta mitoitusmenettelystä voidaan kuitenkin poiketa, mikäli todetaan näin lasketun väestönsuojan koon olevan liian pieni tai kohtuuttoman suuri suhteessa rakennuksessa tai samalla tontilla jatkuvasti oleskelevien tai työskentelevien henkilöiden määrään. Tällöin suojatilan koko tulee mitoittaa siten, että se on 0,75 neliometriä henkilöä kohden. Pienimmilläänkin väestönsuojan varsinaisen suojatilan tulee olla kuitenkin 20 m<sup>2</sup>, vaikka pinta-ala- tai henkilöperusteisen mitoituksen mukaan pienempikin suoja riittäisi. (Valtioneuvoston asetus väestönsuojista 408/2011, 2 §.)

Esimerkiksi opetus- tai hoitoalan rakennusten yhteydessä pinta-alamitoitukseen perustuvan väestönsuojan koko voi jäädä liian pieneksi oppilas- tai potilaspaik-

kojen määrän verrattuna, jolloin suojatilan koon mitoittamiseen tulee käyttää henkilömäärään perustuvaa mitoittamista. Vastaavasti esimerkiksi varasto-, tuotanto- tai teollisuusrakennusten yhteydessä voi tulla vastaan tilanne, jossa suojasta tulisi kohtuuttoman suuri ja tällöin henkilömäärään perustuen suojatila voidaan pienentää. (Valtioneuvoston asetus väestönsuojista 408/2011, 2 §.)

Tässä työssä keskitytään käsittelemään S1-luokan väestönsuojia, joiden suojatilan suurin sallittu pinta-ala on 135 m<sup>2</sup>. Näin ollen yhdellä S1-luokan väestönsuojalla voidaan kattaa esimerkiksi kerrosalaltaan 6750 neliömetrin suuruinen asuinrakennus tai 13 500 neliömetrin suuruinen myymälä-, teollisuus-, tuotanto-, varasto- tai kokoontumisrakennus olettaen, ettei rakennuksen henkilömäärä edellytä muuta.

Toistensa läheisyyteen sijoitettavista S1-luokan väestönsuojista on mahdollista muodostaa suojaryhmiä, joiden avulla voidaan kattaa myös suurempien kerrosalojen mukainen suojatilavaatimus ilman rakenteiltaan järeämpää S2-luokan väestönsuojaa. Yhden suojaryhmän yhteenlaskettu varsinaisen suojatilan pinta-ala saa olla enintään 270 m<sup>2</sup> ja suojaryhmien välisen etäisyyden tulisi olla kuvion 1 mukaisesti ainakin 20 metriä. (RT 92-11173 S1-luokan teräsbetoniväestönsuoja 2015, 6.)



KUVIO 1. Suojaryhmät ja niiden välinen suositusetäisyys (RT 92-11173 S1-luokan teräsbetoniväestönsuoja 2015, 6)

Suojaryhmässä suojat voidaan sijoittaa joko vierekkäin tai päällekkäin. Mikäli suojat sijoitetaan vierekkäin, tulee niiden toisiaan koskevien ympärysseiniä väliin jättää liikuntasauama. Toistensa päällä sijaitsevien erillisten suojien väliin ei puolestaan saa tehdä liikuntasauamaa ja välipohjan minimipaksuus on kattolaatan paksuusvaatimuksen mukaisesti 300 mm (katso luku 2.5.3). (Laine 1993, 21; RT 92-11173 S1-luokan teräsbetoniväestönsuoja 2015, 18.)

Väestönsuojat tulee sijoittaa rakennettavassa rakennuksessa tai rakennusryhmässä sijaitsevien oleskelu- ja työpaikkojen suhteen keskeisesti. Suojat voidaan sijoittaa joko maanpinnan ylä- tai alapuolelle. Rakenteiden ulottamista pohjavedenpinnan keskikorkeuden alapuolelle tulee kuitenkin välttää, eikä väestönsuojien rakenteita tulisi viedä yli metriä pohjavedenpinnan alapuolelle. (RT 92-11173 S1-luokan teräsbetoniväestönsuoja 2015, 6.)

Valtioneuvoston asetukseen väestönsuojista (408/2011) tuli vuoden 2019 alussa voimaan muutossäädös, jonka mukaan väestönsuoja saadaan sijoittaa 500 metrin päähän rakennuksesta, jota varten se rakennetaan (Muutossäädös 28.12.2018/1378). Tästä poiketen rakennusluvan myöntävä viranomais voi pelastusviranomaista kuultuaan hyväksyä yhteisen väestönsuojan sijoitettavaksi myös yli 500 metrin päähän rakennuksesta, jota varten se on tarkoitettu (Valtioneuvoston asetus väestönsuojista 408/2011, 3 §). Tällöinkin suositeltavana väestönsuojan maksimietäisyytenä rakennuksesta voidaan pitää enintään yhtä kilometriä (RT 92-11173 S1-luokan teräsbetoniväestönsuoja 2015, 6).

## **2.4 Suojatilat ja kulkureitit**

S1-luokan väestönsuojan voidaan ajatella koostuvan väestönsuojaan kuuluvista tiloista sekä väestönsuojaan liittyvistä tiloista. Väestönsuojaan kuuluvilla tiloilla tarkoitetaan painekuormilta ja säteilyltä suojaavien, kaasutiiviiden ympärysrakenteiden rajaamaa tilaa. Väestönsuojaan liittyviä tiloja sen sijaan ovat ympärysrakenteiden ulkopuolella sijaitsevat sisääntulo- ja poistumisreitit sekä suojatilan ulkopuoliset kanavien ja laitteiden vaatimat tilat. (RT 92-11173 S1-luokan teräsbetoniväestönsuoja 2015, 7.) Käytännössä S1-luokan väestönsuojien ympärysrakenteiden sisäpuolinen suojatila koostuu tyypillisesti varsinaisesta suojatilasta, sulkuteltasta tai -huoneesta ja ilmanvaihtolaitteiden vaatimista tiloista. Lisäksi

suojan ympäröityjen sisään saattaa jäädä liian matalia tiloja, joita ei saada laskea suojatilaksi. Erillistä ensiaputilaa ei S1-luokan väestönsuojaan tarvitse sisällyttää, sillä ensiaputila vaaditaan vasta varsinaisen suojatilan koon ylittäessä 135 m<sup>2</sup>. (RT 92-11173 S1-luokan teräsbetoniväestönsuoja 2015, 8). S1-luokan väestönsuojien tilojen nimitykset on esitetty kootusti taulukossa 2.

TAULUKKO 2. S1-luokan väestönsuojien tilojen nimitykset.

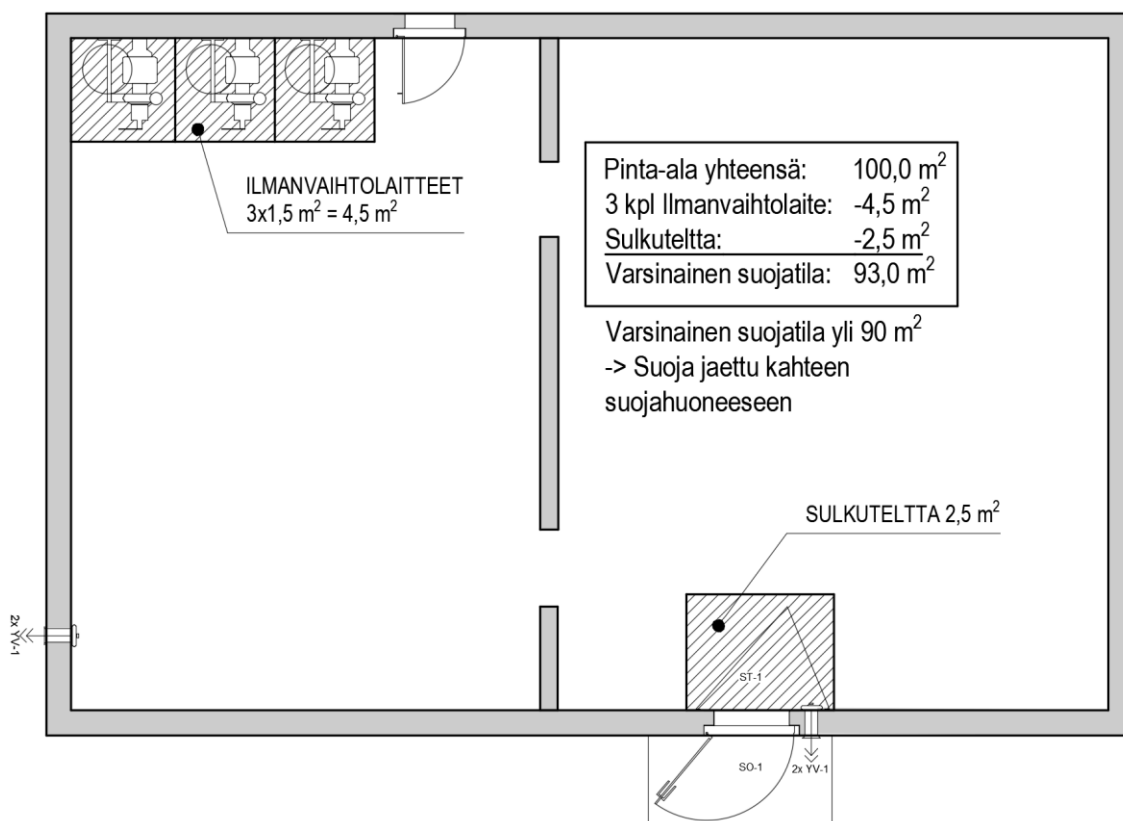
<b>Väestönsuojaan kuuluvat tilat</b>	Painesuojauksen sisäpuoliset tilat: - varsinainen suojatila - sulkutelta- tai huone - IV-koneiden vaatimat tilat
<b>Väestönsuojaan liittyvät tilat</b>	- suojaantulo- ja hätäpoistumisreitit - painerakenteiden ulkopuolisten laitteiden ja kanavien vaatimat tilat sekä muut näihin verrattavat tilat

#### 2.4.1 Väestönsuojaan kuuluvat tilat

Väestönsuojaan kuuluvista tiloista varsinaisella suojatilalla tarkoitetaan niitä väestönsuojan osia, jotka on tarkoitettu ihmisten oleskelua varten. Oleskelutilan ohella varsinainen suojatila sisältää tilavaraukset keittiölle, varavesisäiliöille, jäteastioille ja käymälöille. Näiden varsinaiseen suojatilaan liittyvien tilavarausten ja suojiin sijoitettavien varusteiden vaatimuksia on käsitelty tarkemmin muun muassa RT-kortissa RT 92-11173 S1-luokan teräsbetoniväestönsuoja.

Varsinaiseen suojatilaan lasketaan tilat, joiden huonekorkeus on vähintään 2,3 metriä ja palkkien ja kanavien kohdalla tilat, joissa vapaata korkeutta on vähintään 2,0 metriä. Lisäksi alle 1,6 metriä korkeita tiloja ei lasketa lainkaan varsinaisen suojatilan pinta-alaan. (RT 92-11173 S1-luokan teräsbetoniväestönsuoja, 2015, 9.) Mikäli S1-luokan väestönsuojan varsinaisen suojatilan pinta-ala ylittää 90 m<sup>2</sup>, tulee väestönsuoja jakaa vähintään kahteen suojahuoneeseen teräsbetonirakenteisella väliseinällä. Väliseinä saa sisältää normaaliolojen aikaisen käytön vaatimat aukot. (Sisäasiainministeriön asetus väestönsuojien teknisistä vaatimuksista ja väestönsuojien laitteiden kunnossapidosta 506/2011, 2 §.)

Varsinaisen suojatilan lisäksi S1-luokan väestönsuojan sisäpuolisiin tiloihin kuuluu aina vähintään sulkutelta tai sulkuhuone ja väestönsuojan ilmanvaihtolaitteiden vaatima tila. Sulkuteltan tai -huoneen tulee S1-luokan väestönsuojassa olla kooltaan vähintään 2,5 m<sup>2</sup> ja sen tarkoitus on estää vaarallisia aineita sisältävän ulkoilman kulkeutuminen varsinaiseen suojatilaan suojaovesta kuljettaessa. Ilmanvaihtolaitteiden määrä ja siten niiden vaatiman tilan suuruus puolestaan määräytyy varsinaisen suojatilan pinta-alan mukaan siten, että jokaista alkavaa 45 m<sup>2</sup> varsinaista suojatilaa kohden tulee olla yksi ilmanvaihtolaite. Jokaiselle ilmanvaihtolaitteelle tulee varata tilaa 1,5 m<sup>2</sup>. Ilmanvaihtolaitteille varattu tila tulee normaaliolojen vallitessa rajata lukittavalla ja helposti purettavalla komerolla tai muulla vastaavalla suojauksella, jossa normaaliolojen vallitessa säilytetään myös väestönsuojan varusteita ja kalusteita sekä väestönsuojapiirustuksia. (RT 92-11173 S1-luokan teräsbetoniväestönsuoja 2015, 8, 3, 10, 25.) Kuviossa 2 on esitetty esimerkki väestönsuojan sisäisten tilojen jakautumisesta.

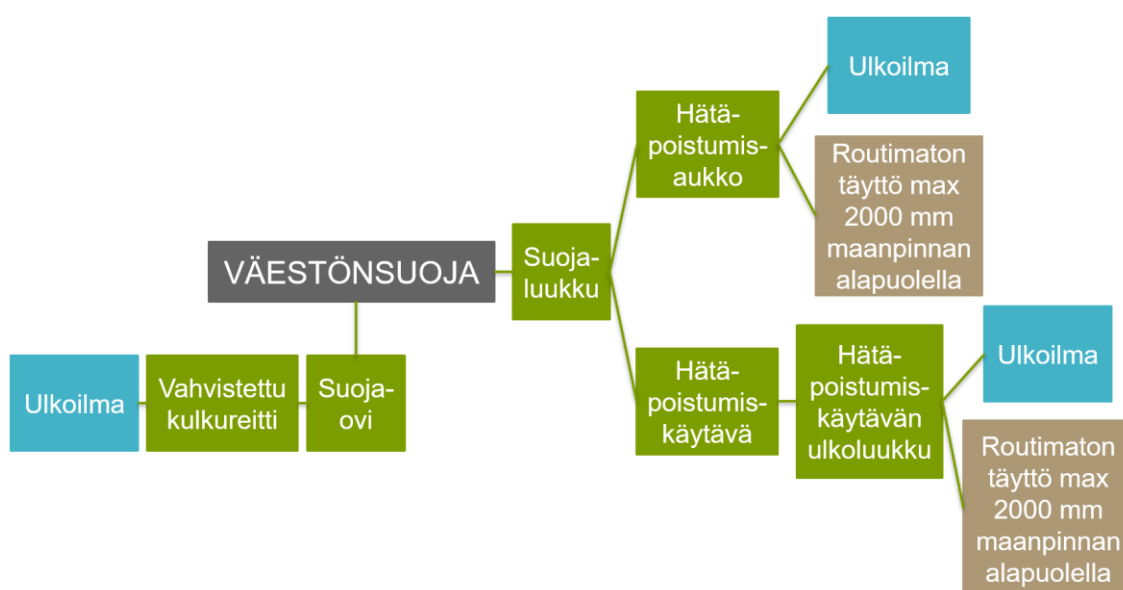


KUVIO 2. Esimerkki S1-luokan väestönsuojaan kuuluvien tilojen jakautumisesta

## 2.4.2 Suojaantulo- ja hätäpoistumisreitit

Jotta väestönsuojaan ja sieltä pois on mahdollista päästä sekä rauhanaikaisessa tilanteessa että väestönsuojan suojakäytön aikaisessa tilanteessa, tulee S1- ja S2-luokan teräsbetonirakenteisissa väestönsuojissa olla vähintään yksi suojaantulo- ja tämä lisäksi ainakin yksi hätäpoistumisreitti. Kalliosuojissa puolestaan tulee sisääntuloreitin lisäksi olla vähintään kaksi hätäpoistumisreittiä. (Sisäasiainministeriön asetus väestönsuojien... 506/2011, 7 §.) Suojaantulo- ja väestönsuojaan voi olla useita, mutta vähintään yhden niistä tulee olla kulkureitin leveyden osalta vähintään 1200 mm leveä ja vapaan ovileveyden osalta vähintään 900 mm leveä. Lisäksi suojaantulo- ja reitti tulee järjestää siten, että liikuntakyvytön henkilö voidaan paarien avulla kuljettaa suojaan sen kautta. (RT 92-11173 S1-luokan teräsbetoniväestönsuoja 2015, 11.) Käytännössä katsoen suojaantulo- ja reitti järjestetään suojaovella varustetun oviaukon kautta.

S1-luokan väestönsuojan sisääntulo- ja poistumisreitit tulee järjestää siten, että helpon ja selkeän suojaantulo- ja reitin lisäksi niiden kautta väestönsuojasta voidaan poistua turvallisesti ainakin kahteen eri suuntaan (RT 92-11173 S1-luokan teräsbetoniväestönsuoja 2015, 12). Erilaisia väestönsuojan poistumisreittivaihtoehtoja on esitetty kuviossa 3.



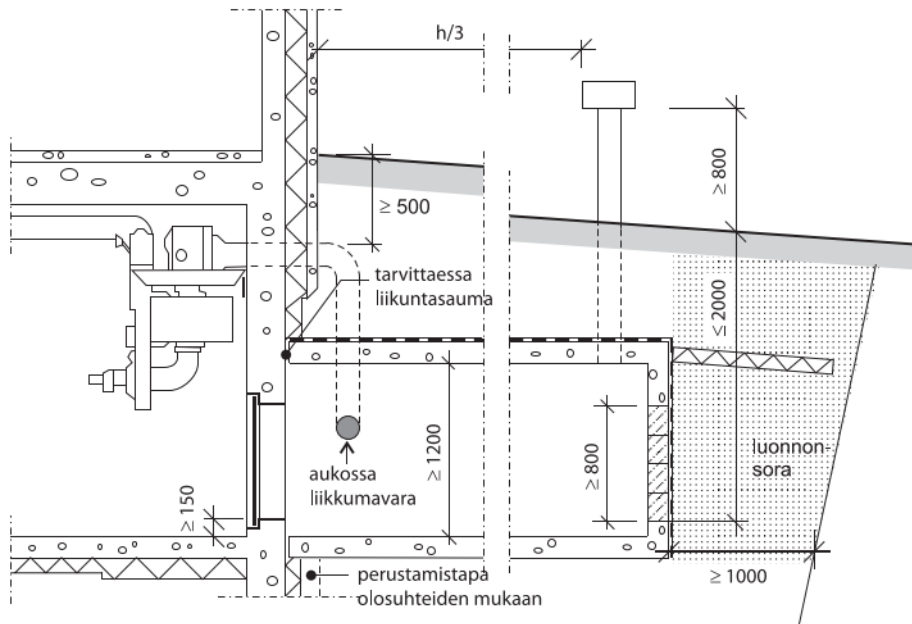
KUVIO 3. S1-luokan väestönsuojan hätäpoistumisreittivaihtoehtoja



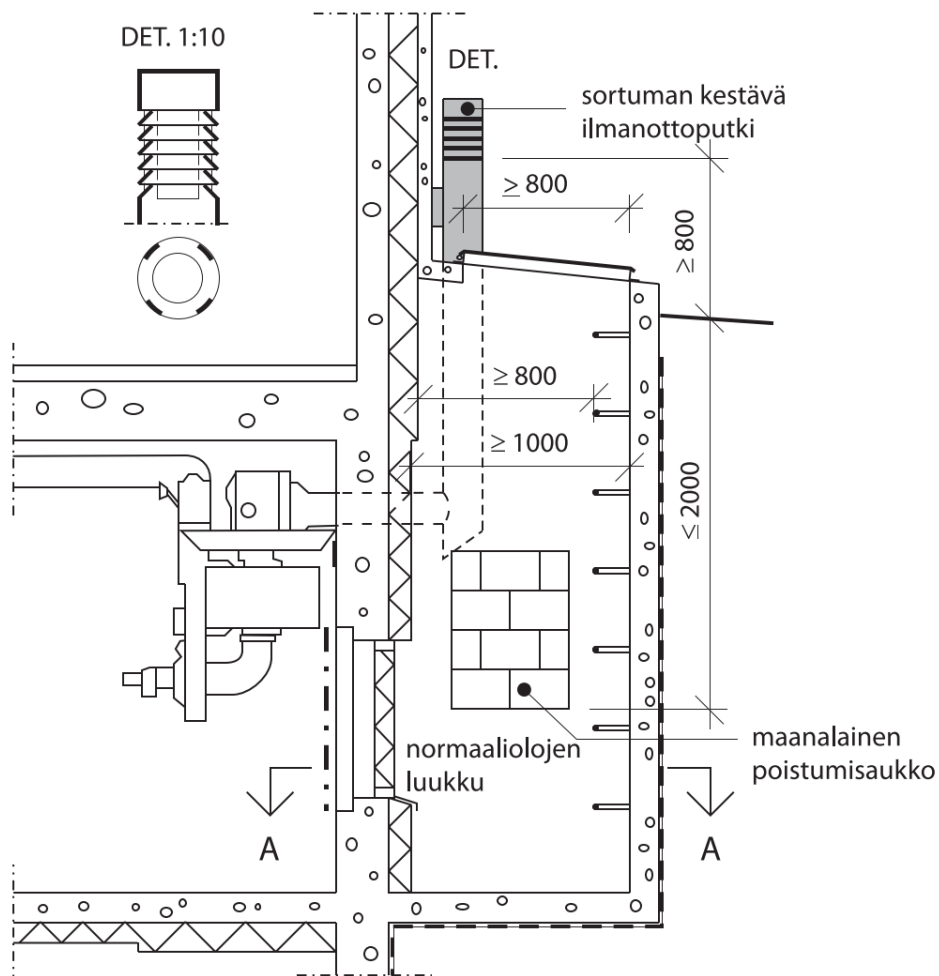
Väestönsuojan poistumisreitit voidaan järjestää kuvion 3 mukaisesti hätäpoistumisaukon, hätäpoistumiskäytävän tai vahvistetun kulkureitin kautta. Hätäpoistumisaukolla tarkoitetaan väestönsuojan ympäryseinässä sijaitsevaa, suojaluukulla varustettua aukkoa, jonka kautta väestönsuojasta on tarvittaessa mahdollista poistua. Hätäpoistumiskäytävä puolestaan on väestönsuojasta pois päin johtavaa maanalainen käytävää, joka voi päättyä joko maanpinnan ala- tai yläpuoliseen poistumisaukkoon. (RT 92-11173 S1-luokan teräsbetoniväestönsuoja 2015, 14–17.) Vahvistetulla kulkureitillä taas tarkoitetaan väestönsuojan suoja-ovelta rakennuksen ulkoseinälinjalle päättyvää, vähintään 1,2 metriä leveää reittiä, jonka rakenteet on mitoitettu kestämään tavanomaisten kuormien lisäksi 25 kN/m<sup>2</sup> suuruinen sortumakuorma (RT 92-11173 S1-luokan teräsbetoniväestönsuoja 2015, 4).

Hätäpoistumisaukko voi sijaita joko maanpinnan ylä- tai alapuolella. Maanpinnan yläpuolella sijaitessaan hätäpoistumisaukko voi johtaa suoraan ulkoilmaan. Maanpinnan alapuolelle avautuvan poistumisaukon tapauksessa tulee aukon ulkopuolella olevan maan olla ruotimatonta ja helposti kaivettavaa vähintään 1 metrin etäisyydelle aukosta. Mikäli aukon alareuna on yli 2000 mm maanpinna alapuolella, ei pelkkä hätäpoistumisaukko riitä, vaan tarvitaan ylöspäin johtava hätäpoistumiskäytävä. (RT 92-11173 S1-luokan teräsbetoniväestönsuoja 2015, 16–17.)

Mikäli hätäpoistumisreitti toteutetaan hätäpoistumiskäytävänä, tulisi se pyrkiä sijoittamaan siten, että se päättyy sortuma-alueen (1/3 rakennuksen korkeudesta kyseisellä kohdalla) ulkopuolelle. Mikäli tämä ei kuitenkaan ole mahdollista, voidaan maanalaisen suojan hätäpoistumisreitti toteuttaa rakennuksen ulkoseinälinjalla maanpinnalle nousevana pystykäytävänä, jonka yläpäässä oleva luukku on mitoitettu sortumakuormalle. Tämän lisäksi sortuma-alueelle päättyvän käytävän sivuseinään on tehtävä poistumisaukko, jonka alareuna sijaitsee enintään 2 metriä maanpinnan alla. Kaikki hätäpoistumiskäytävän rakenteet tulee tavanomaisten kuormien lisäksi mitoitaa 25 kN/m<sup>2</sup> suuruiselle sortumakuormalle. (Piitulainen 2009, 29; RT 92-11173 S1-luokan teräsbetoniväestönsuoja 2015, 14–17) Esimerkkikuvat maanpinnan ylä- ja alapuolelle päättyvistä hätäpoistumiskäytävistä on esitetty kuvioissa 4 ja 5.



KUVIO 4. Maanpinnan alapuolelle päättyvä hätäpoistumiskäytävä (RT 92-11173 S1-luokan teräsbetoniväestönsuoja 2015, 16)



KUVIO 5. Maanpinnan yläpuolelle johtava hätäpoistumiskäytävä (RT 92-11173 S1-luokan teräsbetoniväestönsuoja 2015, 16)

### 2.4.3 Ovet, luukut ja läpiviennit

Muun muassa suojaantulo- ja poistumisreittien sekä normaaliolojen ja suojaikäytön vaatimien taloteknisten asennusten vuoksi väestönsuojan ympärusrakenteisiin tulee väistämättä aukkoja. Nämä aukot tulee toteuttaa siten, etteivät ne heikennä väestönsuojan suojaominaisuuksia. Niinpä kulkureiteissä ja läpiviennissä käytetään tarkoitukseen soveltuvia suojaovia, suojaluukkuja, sulkulaitteita ja painekuormitusta vastaanottavia venttiilejä, joille on asetettu tietyt vaatimukset valtioneuvoston asetuksessa väestönsuojan laitteista ja varusteista (409/2011). Lakisääteisten vaatimusten vuoksi suojaovet, hätäpoistumislukut, paineventtiilit ja sulkulaitteet toistuvat kohteesta toiseen samanlaisina ja niiden koot ja rakenteet on hyvin pitkälti vakioitu.

S1-luokan väestönsuojissa käytettävien suojaovien (SO-1) tulee olla ulospäin aukeavia, molemmilta puolilta käsin suljettavissa ja avattavissa olevia kaasutiiviitä ovia. S1-luokan väestönsuojissa käytettäviä hätäpoistumislukkuja (HS-1) koskevat edellä mainitut suojaovien vaatimukset sillä erotuksella, että hätäpoistumislukun avautumissuunnan tulee olla sisäänpäin. (Valtioneuvoston asetus väestönsuojan laitteista ja varusteista 409/2011, 10–11 §.) Sekä oville että luukuille on valtioneuvoston asetuksessa 409/2011 esitetty vakioimitat, joita noudattaen vakiotuotteet on tehty. SO-1 suojaovet ovat näiden vakioimittojen mukaisesti kooltaan tyypillisesti 900 mm x 2000 mm, 1200 mm x 2000 mm tai 1500 mm x 2000 mm. HS-1 hätäpoistumislukut taas ovat vakioimitoiltaan 600 mm x 800 mm tai 700 mm x 1200 mm. (Valtioneuvoston asetus väestönsuojan laitteista ja varusteista 409/2011, Liite 3.)

Sekä ovia että luukkuja valmistetaan sirpalesuojaamattomina (SO-1 ja HS-1) ja sirpalesuojattuina (SO1-s ja HS-1s). Sirpalesuojaamattomat ovet ja luukut tulee suojata rakenteellisesti luodeilta ja sirpaleilta, jotka tulevat vähintään 45 asteen kulmassa (RT 92-11173 S1-luokan teräsbetoniväestönsuoja 2015, 21). Sirpalesuojattuja ovia ja luukkuja ei puolestaan tarvitse erikseen suojata sirpaleilta (Laine 1993, 54).

Painekuormia vastaanottavia venttiilejä ovat esimerkiksi väestönsuojan suojaikäytönaikaiseen ilmanvaihtojärjestelmään liittyvät ylipaineventtiilit, joiden kautta

ilma poistuu väestönsuojasta. Sulkulaitteilla puolestaan tarkoitetaan väestönsuojan ympärysseiniin sijoitettavia läpivientikappaleita, joiden kautta esimerkiksi normaaliolojen ilmanvaihtojärjestelmä saadaan ulotettua väestönsuojan sisään. Suojakäyttöön siirryttäessä sulkulaitteen läpi kulkeva kanava voidaan poistaa ja aukko sulkea sulkulaitteeseen kuuluvalla sulkulevyllä. (RT 92-11173 S1-luokan teräsbetoniväestönsuoja 2015, 22, 24, 25.)

## **2.5 Mitoituksen lähtötiedot**

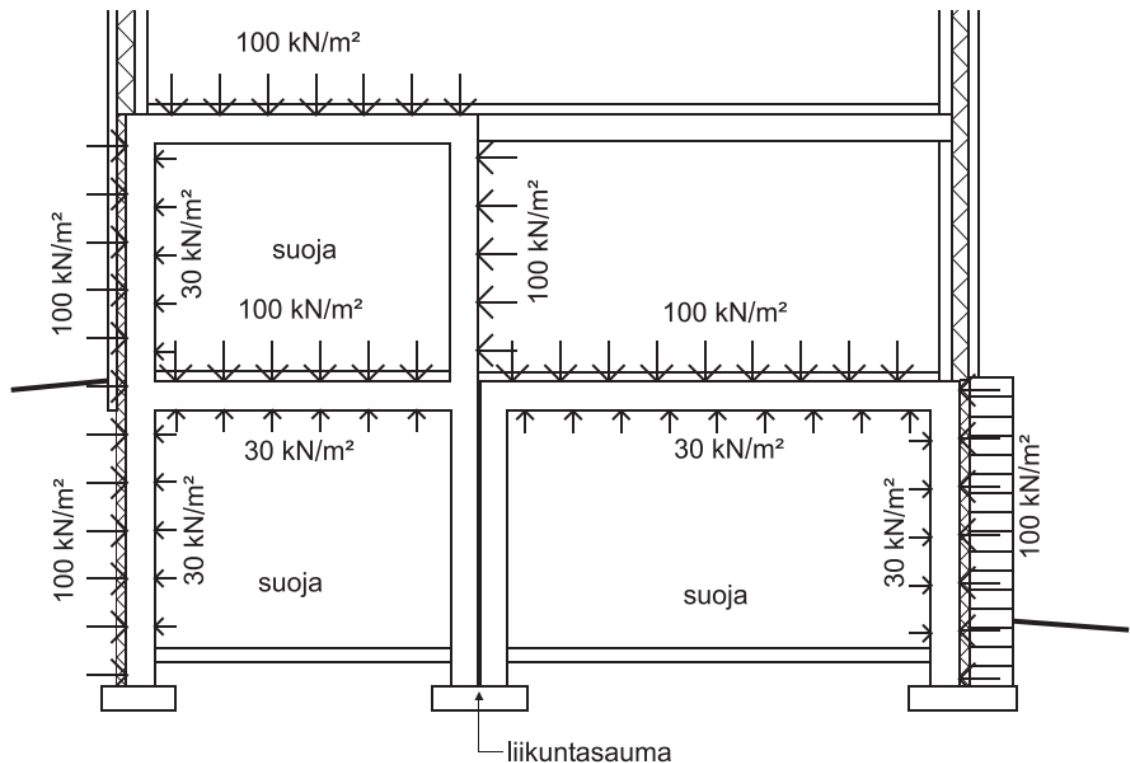
Väestönsuojien mitoituksen kannalta olennaiset tekniset vaatimukset riippuvat pitkälti väestönsuojan suojaluokasta. Suojaluokasta riippuvien vaatimusten lisäksi laeissa ja asetuksissa on joukko sääntöjä, raja-arvoja ja ohjeita, jotka koskevat väestönsuojien suunnittelua suojaluokasta riippumatta.

### **2.5.1 Kuormitus**

Rakennesuunnittelun näkökulmasta yksi merkittävimmistä suojaluokan mukaan määräytyvistä seikoista on eittämättä kuormitus, jolle väestönsuojan rakenteet tulee mitoittaa. Väestönsuojan rakenteet mitoittavan paineaallon aiheuttama kuorma on S1-luokan väestönsuojille suuruudeltaan 1 baari, S2-luokan väestönsuojille 2 baaria ja kallioväestönsuojille 3 baaria. (Valtioneuvoston asetus väestönsuojista 408/2011, 4 §.)

Tässä työssä keskitytään S1-luokan väestönsuojiiin, joille kohdistettava 1 baarin painekuorma vastaa suuruudeltaan  $100 \text{ kN/m}^2$ . Painekuorma tulee kohdistaa vaikuttamaan suojan kattoon, ympärysseiniin ja ilmaa vasten oleviin lattioihin. Maata vasten valettujen lattioiden yhteydessä ei painekuormaa tarvitse huomioida. Suojaovista, suojaluukuista ja sulkulaitteista sekä painekuormituksia vastaanottavista venttiileistä väestönsuojan rakenteille siirtyvät kuormat sen sijaan tulee ottaa huomioon 1,5-kertaisina. Painekuorman lisäksi S1-luokan väestönsuojat tulee mitoittaa painekuorman suuntaan nähden vastakkaissuuntaiselle takaisinheilahduskuormalle, jonka suuruus on  $1/3$  painekuorman suuruudesta sekä suuruudeltaan vähintään kaksi kertaa väestönsuojan rakenteen massan suuruiselle tärähdyskuormalle, jonka vaikutussuunta on mielivaltainen. (Sisäasi-

ainministeriön asetus väestönsuojien... 506/2011, 12–13 §.) S1-luokan väestönsuojille kohdistuvat paine- ja takaisinheilahduskuormat on esitetty kuviossa 6.



KUVIO 6. S1-luokan väestönsuojille kohdistuvat paine- ja takaisinheilahduskuormat (RT 92-11173 S1-luokan teräsbetoniväestönsuoja 2015, 19)

Painekuormitettujen rakenteiden lisäksi väestönsuojien hätäpoistumiskäytävien ja -reittien rakenteet sekä suojaovien aukeamista suojaavat rakenteet tulee mittailla tavanomaisten kuormitusten lisäksi  $25 \text{ kN/m}^2$  suuruiselle sortumakuormalle (Sisäasiainministeriön asetus väestönsuojien... 506/2011, 12 §). Väestönsuojan perustukset puolestaan tulee S1-luokan väestönsuojien tapauksessa mittailla normaalin kuormituksen lisäksi kuormalle, joka on suuruudeltaan neljäsosa pystysuuntaisista paine- ja sortumakuormista (Valtioneuvoston asetus väestönsuojista 408/2011, 10 §). Kaikki sisäasiainministeriön asetuksen mukaiset asevaikutukseen perustuvat kuormat S1-luokan väestönsuojille on koottu taulukoon 3.

TAULUKKO 3. S1-luokan väestönsuojoiin ja niihin liittyviin rakenteisiin kohdistuvat, asevaikutukseen perustuvat kuormat

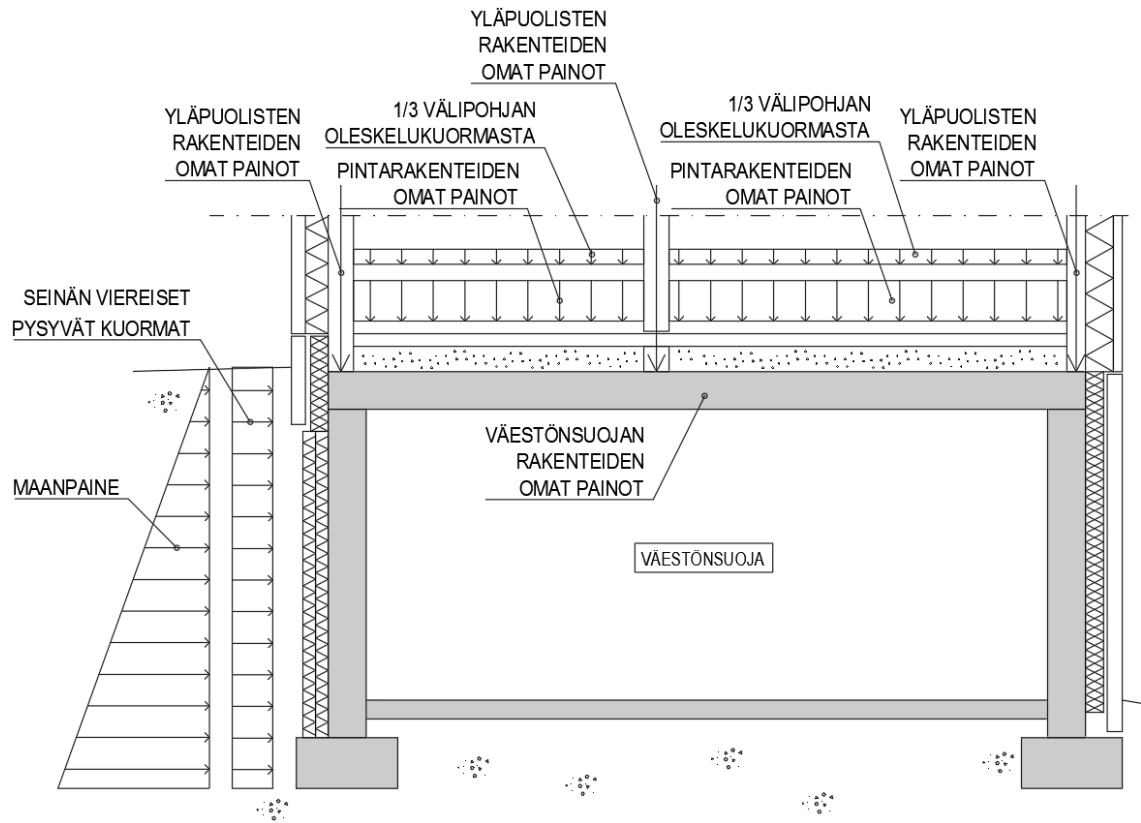
	<i><b>Kuorman suuruus</b></i>	<i><b>Kuorman vaikutuskohde</b></i>	<i><b>Vaikutussuunta</b></i>
<i><b>Painekuormat</b></i>	100 kN/m <sup>2</sup>	Väestönsuojan katto, ympärysesinät ja ilmaa vasten olevat lattiat	Ulkoa sisäänpäin
<i><b>Takaisinheilahduskuormat</b></i>	33 kN/m <sup>2</sup> (1/3 painekuormasta)	Rakenteet, joihin painekuorma kohdistuu	Vastakkainen painekuorman vaikutussuuntaan nähden
<i><b>Tärähdyskuormat</b></i>	2 x väestönsuojan rakenteen massa	Kaikki väestönsuojan rakenteet	Mielivaltainen
<i><b>Sortumakuormat</b></i>	25 kN/m <sup>2</sup>	Hätäpoistumiskäytävän rakenteet, suojaoven aukeamista suojaavat rakenteet ja hätäpoistumisreitien katto	Ylhäältä alaspäin
<i><b>Perustuksiin kohdistuvat kuormat</b></i>	1/4 pystysuuntaisista paine- ja sortumakuormista	Väestönsuojan alla sijaitsevat perustusrakenteet	Ylhäältä alaspäin

Laeissa ja asetuksissa esitettävien asevaikutukseen perustuvien katastrofikuormien ohella väestönsuojan suunnittelussa tulee huomioida normaaliin tapaan myös kaikki tavanomaiset kuormat. Tavanomaisista kuormista asevaikutukseen perustuvien kuormien kanssa samaan aikaan oletetaan vaikuttavan ainakin seuraavien:

- väestönsuojarakenteen oma paino
- väestönsuojan yläpuolisten rakenteiden omat painot sekä näiden välittämät pysyvät kuormat
- mahdollinen maanpaine
- maanalaisen suojan tapauksessa seinän viereiset pysyvät kuormat.

Lisäksi sisäasiainministeriön asetuksen väestönsuojien teknisistä vaatimuksista ja väestönsuojien laitteiden kunnossapidosta mukaisesti välipohjan oleskelukuormasta tulee ottaa asevaikutukseen perustuvia kuormia sisältävien kuormitusyh-

distelmien yhteydessä huomioon yksi kolmasosa. (Hänninen 1987, 84; Sisäasiainministeriön asetus väestönsuojien... 506/2011, 13 §.) Asevaikutukseen perustuvien kuormien yhteydessä huomioitavia tavanomaisia kuormia on esitelty kuviossa 7.



KUVIO 7. S1-luokan väestönsuojien suunnittelussa asevaikutukseen perustuvien kuormien yhteydessä huomioitavat tavanomaiset kuormat

Väestönsuojat tulee mitoittaa erikseen sekä tavanomaisista kuormista muodostettaville murto- ja käyttörajatilamitoituksen mukaisille kuormitusyhdistelmille, että asevaikutukseen perustuvia paine-, takaisinheilahdus-, tärähdys- ja sortumakuormia sisältäville kuormitusyhdistelmille.

Murto- ja käyttörajatilamitoituksen mukaiset kuormitusyhdistelmät muodostetaan normaalisti tavanomaisista kuormista. Asevaikutukseen perustuvia kuormia sisältäviä kuormitusyhdistelmiä muodostettaessa tulee osavarmuuskertoimen puolestaan olla vähintään 1. Tällöin paine-, takaisinheilahdus-, tärähdys- ja sortumakuormien aiheuttaman kuormituksen voidaan ajatella olevan staattista. (Valtioneuvoston asetus väestönsuojista 408/2011, 11§.) Staattisen tarkastelun lisäksi painekuormituksia voidaan käsitellä myös dynaamisina kuormina. Tällöin

kuorman suuruuden oletetaan nousevan äkillisesti huippuarvoonsa ja hiipuvan suoraviivaisesti nolnaan siten, että kuorman vaikutusaika on yksi sekunti. Kuormien dynaamisessa tarkastelussa on lisäksi käytettävä tarkoitukseen hyväksytyä laskentatapaa. (Piitulainen 2009, 39.)

Staattisessa tarkastelussa asevaikutukseen perustuvia kuormia sisältävät kuormitusyhdistelmät muodostetaan siten, että kuormat asetetaan kohdistumaan jokaiselle seinälle ja holville erikseen ja kaikille ympärusrakenteille samanaikaisesti. Kohdistettaessa kuormat samanaikaisesti kaikille rakenteille, oletetaan sisältä ulospäin ja ulkoa sisäänpäin vaikuttavien kuormien vaikuttavan eri aikaan. (Piitulainen 2009, 39.)

### **2.5.2 Materiaalit ja muut lähtötiedot**

Sisäasiainministeriön asetus väestönsuojien teknisistä vaatimuksista ja väestönsuojien laitteiden kunnossapidosta (506/2011) ohjeistaa, että S1-luokan väestönsuojat tulee suunnitella ja toteuttaa Suomen rakentamismääräyskokoelman rakenneluokan 2 vaatimusten mukaan. S2-luokan väestönsuojat sekä kallioväestönsuojat puolestaan ohjeistetaan toteutettaviksi rakenneluokan 1 vaatimusten mukaan. (Sisäasiainministeriön asetus väestönsuojien... 506/2011, 14 §.) Rakenneluokat ovat kuitenkin poistuneet käytöstä eurokoodien mukaisiin suunnittelukäytäntöihin siirryttäessä. Eurokoodien mukaisessa suunnittelussa rakenneluokkia vastaavina luokkina voidaan pitää toteutus-, toleranssi- ja seuraamusluokkia. Rakenneluokkien ja eurokoodin mukaisten luokkien on todettu vastaavan toisiaan siten, että rakenneluokka 1 vastaa likimain toteutusluokkaa 3 ja toleranssiluokkaa 2 ja siten kuuluu seuraamusluokkaan CC3. Rakenneluokka 2 puolestaan vastaa likimain toteutusluokkaa 2 ja toleranssiluokkaa 1 ja näiden perusteella kuuluu seuraamusluokkaan CC2. (SKOL 2012.)

Kuormien sekä rakenne-, toleranssi-, toteutus- ja seuraamusluokka vaatimusten lisäksi väestönsuojien suunnittelua ohjataan lainsäädännössä rakenteille ja materiaaleille asetettujen vaatimusten ja ohjeiden avulla. Valtioneuvoston asetuksen väestönsuojista (408/2011) mukaisesti S1-luokan väestönsuojat toteutetaan aina teräbetonirakenteisina ja sekä rakenteissa käytettävälle betonille että raudoitus-teräksille on asetettu omat vaatimuksensa.



S1-luokan väestönsuojarakenteissa käytettävän betonin tulee kuulua lujuudeltaan vähintään luokkaan C25/30. Betoniteräksillä teräslaataa rajoittavana tekijänä on puolestaan teräksen kokonaistasavenymä, jonka tulee olla vähintään 5%. (Sisäasiainministeriön asetus väestönsuojien... 506/2011, 14§.) Tämä johtaa käytännössä siihen, että väestönsuojarakenteissa pää- ja jakorauoituksena ei voida käyttää Suomessa yleisesti käytössä olevia teräslaadun B500A (ent. B500K) verkkorauoituksia, sillä niiden kokonaistasavenymä on vain 2,5%. Yleisesti käytössä olevat luokan B500B (ent. A500HW) harjaterästangot sen sijaan täyttävät juuri 5,0% kokonaistasavenymävaatimuksen. (SFS 1300 2020, 12.)

Valtioneuvoston asetuksen väestönsuojista mukaan väestönsuojien tapauksessa sekä betonin puristuslujuuden että teräksen lujuuden ominaisarvoa saadaan korottaa enintään 20% ja materiaaliosavarmuusluvun tulee olla vähintään 1. Lisäksi pykälässä sanotaan, että väestönsuojarakenteiden mitoituksessa sallittuna jännityksenä käytetään edellä mainitulla tavalla korotettua ominaislujuutta. (Valtioneuvoston asetus väestönsuojista 408/2011, 11 §.) Sallituilla jännityksillä viitataan Suomessa ennen eurokoodien mukaista suunnittelumenetelmää käytettyyn Suomen rakennusmääräyskokoelma B4:n mukaiseen mitoitusmenettelyyn. On siis hieman tulkinnanvaraista, kuinka kyseistä pykälää kuuluisi eurokoodien mukaisen rajatilamitoituksen yhteydessä tulkita.

Suomen rakentamismääräyskokoelmassa termillä ominaislujuus viitataan betonin puristuslujuuden tapauksessa luvulla 0,7 kerrottuun betonin nimelliseen kuutiolujuuteen ( $f_{ck,cube}$ ) (Suomen rakentamismääräyskokoelma B4 2005, 10). Eurokoodi 2:ssa puristuslujuuden ominaisarvolla viitataan puolestaan suoraan betonin lieriölujuuteen ( $f_{ck}$ ) (SFS-EN 1992-1-1+A1+AC 2015, 19). Jo ominaislujuuden osalta pykälää voi siis tulkita eri tavoilla.

Mikäli mitoituksessa käytettävä betonin ominaislujuus määriteltäisiin sallittuihin jännityksiin perustuvan rakennusmääräyskokoelma B4:n mukaan kertomalla betonin nimellinen kuutiolujuus luvulla 0,7 ja korottamalla tämän jälkeen ominaislujuutta 20% saataisiin esimerkiksi C30/37-lujuusluokan betonilla puristuslujuuden mitoituksessa käytettäväksi ominaisarvoksi 31,08 MPa. Mikäli mitoituslujuuden laskennassa taas käytettäisiin eurokoodin mukaista lieriölujuutta ja huomioitaisiin

myös pitkäaikaistekijät ja kuorman vaikuttamistavasta aiheutuvat epäedulliset tekijät huomioiva kerroin  $\alpha_{cc}$ , jonka arvona Suomessa käytetään 0,85, saataisiin 20% korotuksen jälkeen mitoituslujuudeksi 30,6 MPa, joka on melko lähellä rakentamismääräyskokoelma B4:n mukaan saatavaa lujuutta. Mikäli valtioneuvoston asetuksen pykälää tulkittaisiin siten, että kerrointa  $\alpha_{cc}$  ei korotetun ominaislujuuden määrittelyssä huomioida, olisi korotetun mitoituslujuuden arvo puolestaan 36 MPa. Edellä esitetyillä tulkintatavoilla korotettuja betonin ominaislujuuksia on esitetty taulukossa 4.

TAULUKKO 4. Eri tavoilla laskettuja betonin korotettuja ominaislujuuksia

Betonin lujuusluokka	Lieriölujuus $f_{ck}$ (Eurokoodi) [MPa]	Kuutiölujuus $f_{ck,cube}$ (RakMk B4) [MPa]	RakMk B4 mukainen korotettu ominaislujuus kaavalla $1,2 \cdot 0,7 \cdot f_{ck,cube}$ [MPa]	Eurokoodin mukainen korotettu lujuus kaavalla $1,2 \cdot \alpha_{cc} \cdot f_{ck}$ [MPa]	Eurokoodin mukainen korotettu lujuus kaavalla $1,2 \cdot f_{ck}$ [MPa]
C25/30	25	30	25,2	25,5	30
C30/37	30	37	31,08	30,6	36
C35/45	35	45	37,8	35,7	42
C40/50	40	50	42	40,8	48
C50/60	50	60	50,4	51	60

Taulukosta nähdään, että väestönsuojarakenteissa tyypillisesti käytettävillä betonin lujuusluokilla eurokoodin mukainen,  $\alpha_{cc}$ -kertoimen huomioiva, laskutapa on C25/30- ja C50/60-lujuusluokan betonilaatua lukuun ottamatta varmimmalla puolella. Niinpä tällä laskutavalla laskettua ominaislujuutta käytetään tässä työssä betonin mitoituslujuutena. Betoniterästen myötölujuuden osalta 20% lujuuskorotus puolestaan voidaan tehdä suoraan betoniteräksen ominaismyötölujuuteen. B500B harjateräksen mitoituslujuutena voidaankin väestönsuojien mitoituksessa käyttää 600 MPa.

### 2.5.3 Rakenteet ja rauditusperiaatteet

S1-luokan teräsbetoniväestönsuojan runko muodostuu tyypillisesti seinistä, katto-, välipohja- ja lattialaatoista sekä mahdollisesti pilareista ja palkeista. Lisäksi väestönsuojien runkorakenteisiin kuuluvat niin ikään teräsbetonirakenteiset hätäpoistumiskäytävät ja vahvistetut kulkureitit.

Väestönsuojien laatta- ja seinärakenteiden sekä pilareiden paksuudelle on asetettu tietyt raja-arvot. S1-luokan suojassa ympäryseinien ja kattolaatan tulee

olla paksuudeltaan vähintään 300 mm. Suojan teräsbetonisten väliseinien, pilaarien, lattialaatan sekä suojan sisäisten välipohjalaattojen tulee puolestaan olla paksuudeltaan vähintään 150 mm. (Valtioneuvoston asetus väestönsuojista 408/2011, 5 §). Mikäli kaksi erillistä S1-luokan väestönsuojaa on rakennettu päällekkäin, tulee teräsbetonisen välipohjalaatan olla vähintään 300 mm paksu. Väestönsuojan kattoon ei saa tehdä lainkaan taloteknisiä uppoasennuksia, vaan mahdollisille väestönsuojan yläpuolisille LVIS-asennuksille tulee varata erikseen niille tarkoitettu asennustila. Väestönsuojan seiniin sen sijaan voidaan tehdä väestönsuojaan kuuluvat uppoasennukset. (RT 92-11173 S1-luokan teräsbetoniväestönsuoja 2015, 18.)

Halkaisijaltaan väestönsuojan laatta- ja seinärakenteiden raudoitteiden tulee olla 8-20 mm. Maata vasten olevassa lattiassa sekä paine- ja sortumakuormille mitoitettavissa rakenteissa suurin sallittu tankojako rakenteen sisäpinnassa on 150 mm ja ulkopinnassa 300 mm. (Sisäasiainministeriön asetus väestönsuojien... 506/2011, 14 §.) Kuten aiemmin todettu, paine- ja sortumakuormille altistuvia rakenteita ovat väestönsuojan ympäröivät, katto, ilmaan rajoittuvat lattiat, hätäpoistumiskäytävän ja -reitien rakenteet sekä suojaoven aukeamista suojaavat rakenteet. Tankojakovaatimus koskee siis kaikkia näitä rakenteita.

Taivutetuissa rakenteissa raudoituksen poikkileikkauspinta-alan tulee kummasakin suunnassa ja erikseen rakenteen molemmissa pinnoissa olla vähintään 0,17% rakenteen poikkileikkauspinta-alasta. Lisäksi tällaisissa rakenteissa pääraudoitus tulee viedä ja ankkuroida tuelle, eikä pääraudoitusta saa jatkaa kenttämomentin alueella. Muista laattarakenteista poiketen väestönsuojan maanvarainen lattia saadaan kuitenkin raudoittaa yhdellä keskeisellä verkko-raudoitteella (Hänninen 1987, 83; Sisäasiainministeriön asetus väestönsuojien... 506/2011, 14 §.)

Asetusten mukaisten raudoitusvaatimusten lisäksi väestönsuojarakenteet tulee raudoittaa niin, että ne kestävät rakenteisiin syntyvät taivutus- ja leikkausrasitukset ja täyttävät tavanomaisilla kuormilla käyttörajatilamitoituksen mukaiset vaatimukset. Rakenteiden mitoitusta on käsitelty tarkemmin luvussa 3.2.

Varsinaisten rakenteellisten raudoitusterästen lisäksi teräsbetonisen väestönsuojan kattolaatan alapinnassa tulee olla pääraudoitukseen sidottu niin kutsuttu väestönsuojaverkko tai betoniin kiinnittyvä teräspoimulevy (Sisäasiainministeriön asetus väestönsuojien... 506/2011, 14 §). Nykyisistä asetuksista ei suoraan löydy tarkempia vaatimuksia tälle väestönsuojaverkolle tai teräspoimulevyille. Pekka Laineen vuonna 1993 julkaisemassa teoksessa ”Väestönsuojien rakentamisopas: K- ja teräsbetoninen S1-luokka” on väestönsuojaverkolle kuitenkin esitetty vuoden 1991 S1-luokan väestönsuojille asetettuihin teknisiin vaatimuksiin pohjautuva vaatimus, jonka mukaan verkon langan paksuuden tulisi olla 2-3 mm ja verkkosilmän suuruuden 35-50 mm (Laine 1993, 64). Nykyään tyypillisin väestönsuojaverkkona käytettävä verkko onkin juuri nämä vaatimukset täyttävä 3 mm teräksestä hitsaamalla valmistettu verkko 50 mm verkkosilmällä. Erään väestönsuojan holvin raudoitusta väestönsuojaverkko mukaan lukien on esitetty kuvassa 2.



KUVA 2. Väestönsuojaholvin raudoitusta

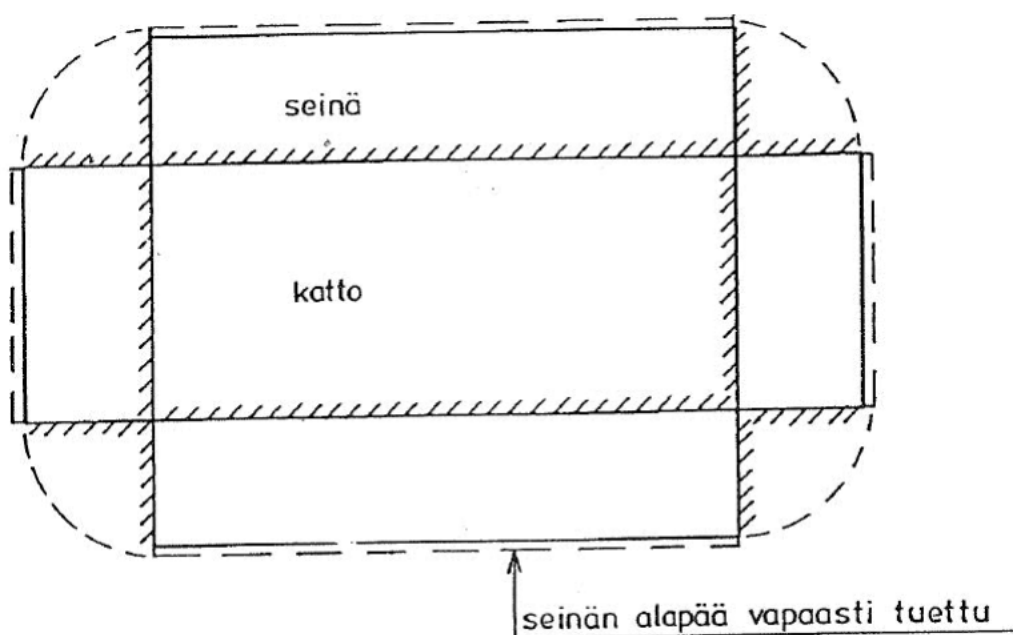
Väestönsuojarakenteiden raudoitukset sisältävät myös runsaasti yksityiskohtia, joihin liittyvät raudoitusperiaatteet on tärkeä tuntea väestönsuojia suunniteltaessa. Tällaisia yksityiskohtia ovat esimerkiksi seinien, laattojen, nostojen ja muiden rakenteiden väliset liitokset sekä oviaukkojen ja läpivientien vaatimat lisäraudoitukset. Tässä työssä raudoitusten suunnittelussa keskitytään ainoastaan pääraudoitusten määrittelyyn, joten raudoitukseen liittyvien yksityiskohtien käsittely on rajattu työn ulkopuolelle. Tarkemmin väestönsuojien raudoituksen yksityiskohtia on käsitelty esimerkiksi Karoliina Koskipään (2020) diplomityössä ”Paikallavalettujen väestönsuojien mallinnuspohjaisen raudoitussuunnittelun tehostaminen”.

### 3 VÄESTÖNSUOJARAKENTEIDEN SUUNNITTELU

Teräsbetoniväestönsuojat koostuvat laatta-, seinä-, pilari- ja palkkirakenteista. Tässä työssä rakenteiden mitoitusmenetelmien esittelyssä keskitytään näistä painekuormitettujen laattojen ja seinien mitoituksessa, sillä ne ovat väestönsuojien tyypillisimpiä, jokaisessa väestönsuojassa esiintyviä rakenteita.

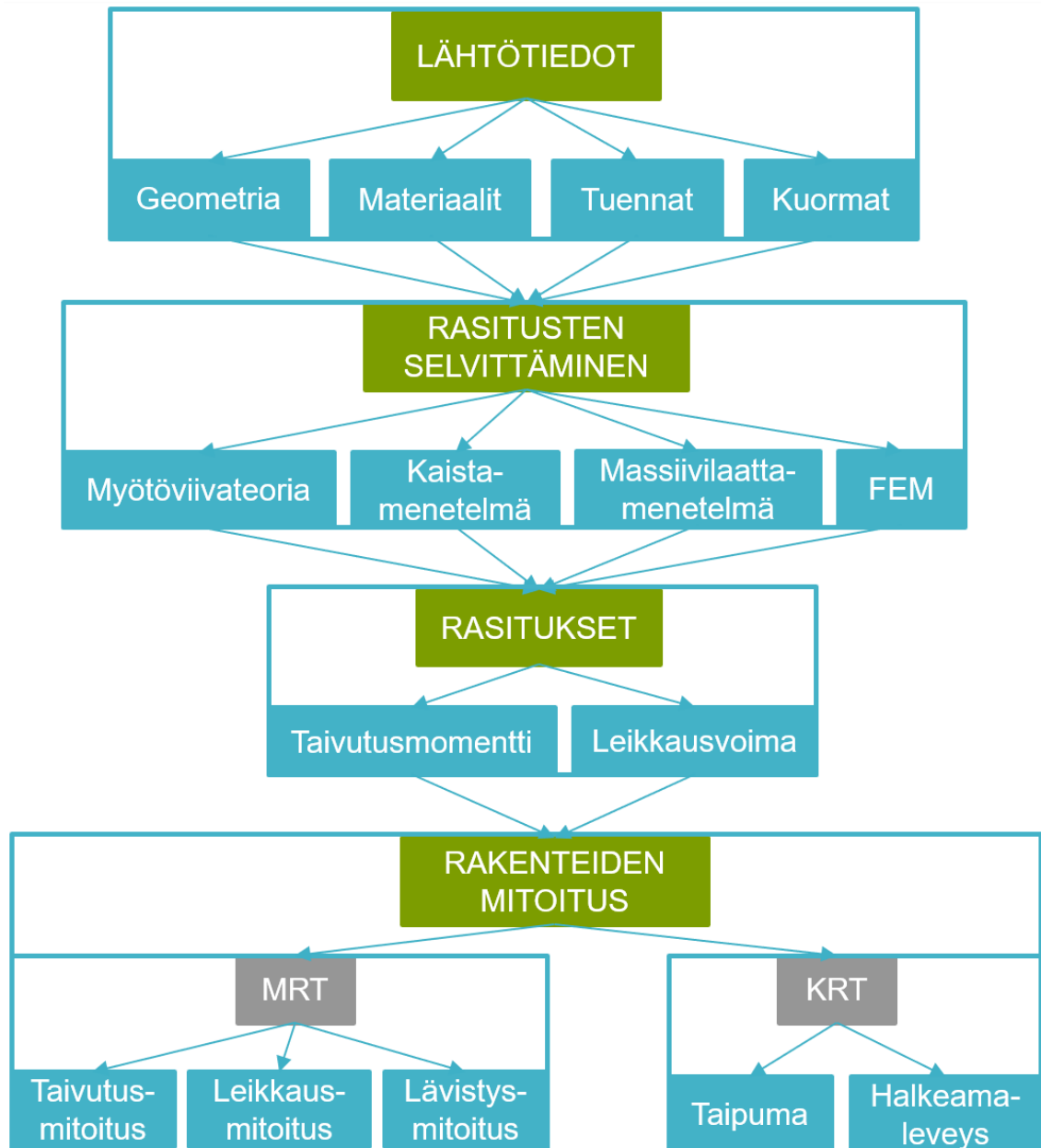
Paikallavalettujen väestönsuojien painekuormitetuista laattamaisista rakenteista holvit ovat tyypillisesti ristiin kantavia, neljältä sivulta jäykästi tuettuja laattoja, jotka tukeutuvat jäykästi väestönsuojan ympärysseiniin. Suojan ympärysseinät taas tukeutuvat yläpäästään jäykästi kattolaattaan, päistään jäykästi viereisiin seiniin ja alapäästään nivelisesti lattiaan tai perustuksiin. (Hänninen 1987, 87.)

Koska väestönsuojien ympärysseiniin kohdistuva vaakasuuntainen painekuorma on kuormista selvästi hallitsevin, voidaan myös väestönsuojan painekuormille alttiit ympärysseinät mitoittaa holvien tapaan massiivilaattoina (Suomen Betoniyhdistys ry 2014, 156). Mikäli väestönsuojassa on paineseinien lisäksi kantavia väliseiniä, joille painekuorma ei kohdistu suoraan, mitoitetaan ne normaaliin tapaan teräsbetoniseiniinä. Tyypillisen suorakaiteen muotoisen, paineseinistä ja kattolaa-  
tasta koostuvan väestönsuojan rakenteet tasoon levitettynä on esitetty kuviossa 8.



KUVIO 8. Suorakaiteen muotoinen väestönsuoja (Hänninen 1987, 87)

Väestönsuojan laattamaisten rakenteiden mitoitusprosessi etenee massiivilaattojen mitoituksen tavoin. Aluksi selvitetään laatoissa vaikuttavat rasitukset ja tämän jälkeen mitoitetaan rakenteet kestävämmän kyseiset rasitukset eurokoodin mukaisen rajatilamenettelyn avulla. Laattamaisten rakenteiden mitoitusprosessi on pääpiirteittäin esitetty kuviossa 9.



KUVIO 9. Väestönsuojan laattoina mitoittavien rakenteiden mitoituksen kulukaavio

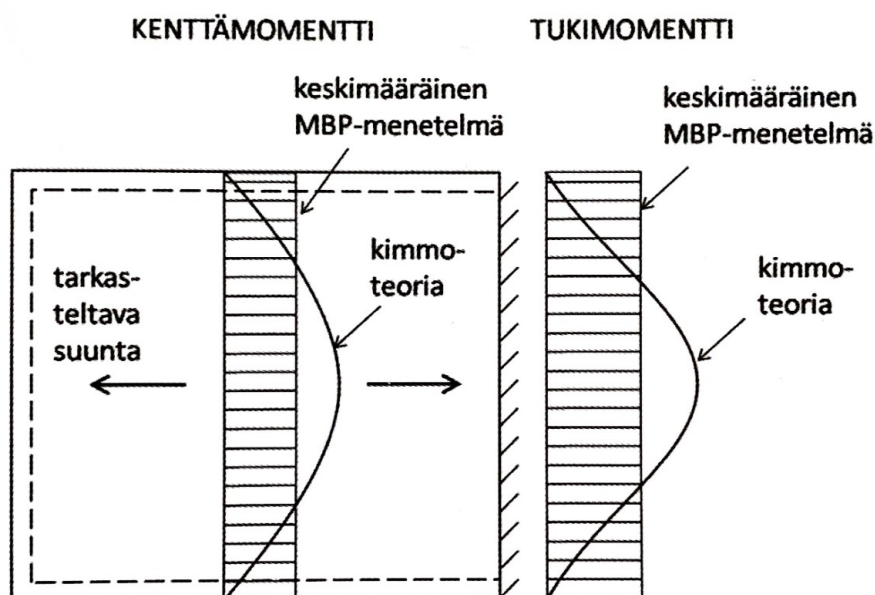
### 3.1 Laskentamenetelmät

Väestönsuojarakenteiden voimasuureiden ja rasitusten laskentaan on olemassa useita käyttökelpoisia menetelmiä, joskin rasitus- ja voimajakaumien tarkka selvittäminen on haastava tehtävä. Väestönsuojan ympärusrakenteisiin kuuluvien laattojen ja laattoina tarkasteltavien seinien voimasuureet ja rasitukset voidaan käsin laskien ratkaista muun muassa kaistamenetelmällä, massiivilaattamenetelmällä ja myötöviivateorialla. Tarkimpiin tuloksiin päästään kuitenkin elementtimenetelmään perustuvilla FEM-laskentaohjelmilla. (Suomen Betoniyhdistys ry 2014, 15.) Tässä työssä käsinlaskentamenetelmät esitellään vain yleisten toimintaperiaatteiden tasolla. Tarkemmin niitä on käsitelty esimerkiksi Matias Lappalaisen (2018) kandidaatintyössä ”S1-luokan väestönsuojan mitoitus paikallavalurakenteena”. Elementtimenetelmään perustuvaa FEM-laskentaa puolestaan käsitellään hieman tarkemmin luvussa 3.3

#### 3.1.1 Massiivilaattamenetelmä

Massiivilaattamenetelmä (MBP-menetelmä) on melko yksinkertainen tapa selvittää sekä yksiaukkoisten että jatkuvien, ristiin kantavien laattojen momenttijakaumat menetelmään liittyvien valmiiksi laadittujen taulukoiden avulla. Menetelmällä saatavat momentit ovat lineaarisen kimmoteorian mukaisia keskimääräisiä momenteja. (Suomen Betoniyhdistys ry 2014, 15–16.) Toisin sanoen laatassa vaikuttavat lineaarisen kimmoteorian mukaiset momenttijakaumat on tasattu tuella koko tuen matkalle ja kentissä koko laatan leveyden matkalle kuvion 10 mukaisesti.





KUVIO 10. Massiivilaattamenetelmän tuloksena saatavan ja kimmoteorian mukaan saatavan momenttijakauman ero (Suomen Betoniyhdistys ry 2014, 17)

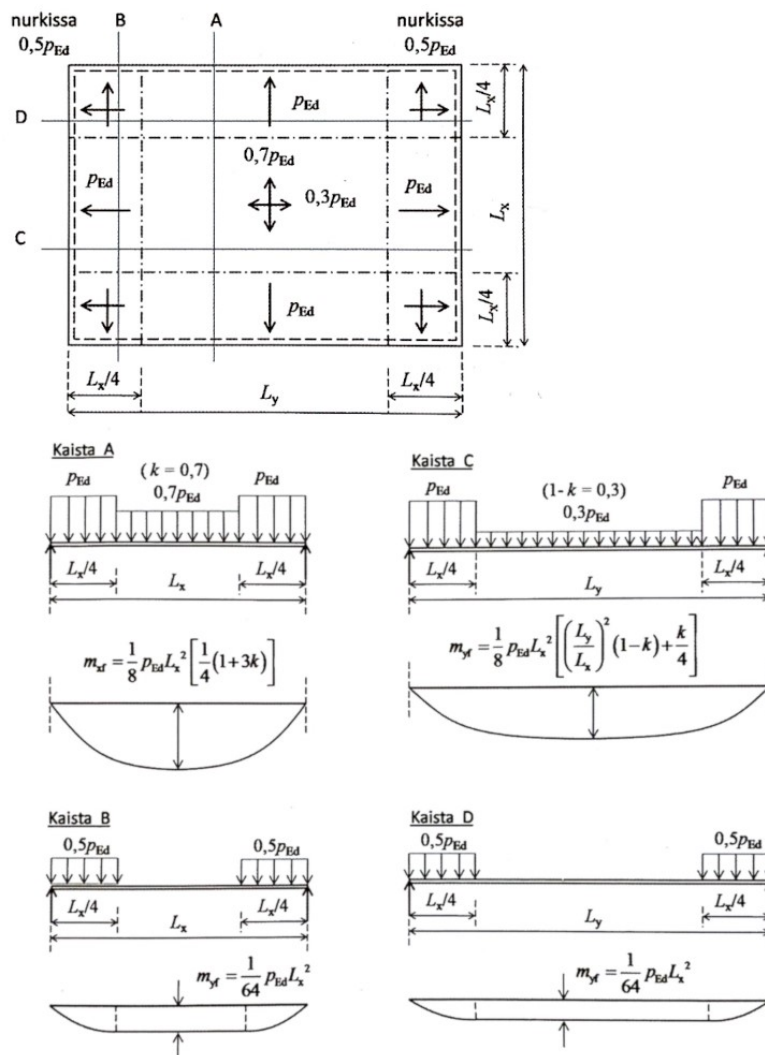
Kuten kuviosta 10 nähdään, lineaarisen kimmoteorian mukainen momentti saavuttaa sekä tuella että kentässä massiivilaattamenetelmällä saatavaa momenttia suuremman arvon. Menetelmä on kuitenkin murtorajatilassa varmallalla puolella, sillä lineaarisen kimmoteorian mukaiset momentin huippuarvot tasoittuvat todellisuudessa halkeilun ja plastisoitumisen vaikutuksesta. (Suomen Betoniyhdistys ry 2014, 16–17.)

Betonirakenteiden suunnittelun oppikirjan By211 - osassa 2 (2014) on esitetty yksinkertainen menetelmä leikkausvoimien selvittämiseksi massiivilaattamenetelmän yhteydessä. Menetelmä ei suoranaisesti liity massiivilaattamenetelmässä käytettäviin taulukoihin, eikä siten ole kovinkaan ominainen massiivilaattamenetelmälle. Menetelmän mukaan ristiin kantavassa laatasta laattakentän kuormat siirtyvät lähimmälle tuelle laatan tuentatapojen mukaan. Näin seinämäisten tukien tukireaktiot ja laatan leikkausrasitukset saadaan laskettua kutakin seinää kuormittavan laatan osan leveyden ja laattaa kuormittavan pintakuorman tulona. (Suomen Betoniyhdistys ry 2014, 20.)

### 3.1.2 Kaistamenetelmä

Kaistamenetelmässä laatan ajatellaan muodostuvan ristikkäin toisiinsa nähden sijaitsevista, yhteen suuntaan kantavista kaistoista, jotka toimivat palkkien tavoin. Näiden kaistojen ajatellaan ottavan pituussuunnassa vastaan ainoastaan taivutus- ja leikkausrasitusta. Vierekkäisten laattakaistojen välistä leikkausvoimaa tai laattakaistoihin kohdistuvaa vääntöä ei menetelmässä ajatella syntyvän. Menetelmällä saadut momenttijakaumat ovat plastisuusteorian alarajalauseen mukaisia ja toteuttavat siten tasapainoehdot ja laatan reunaehdot. (Suomen Betoniyhdistys ry 2014, 23.)

Kaistamenetelmässä laatalle kohdistuvat kuormat jaetaan sopivassa suhteessa ristikkäisille kaistoille ja tämän jälkeen lasketaan asetettujen kuormien aiheuttamat rasitukset kullekin laattakaistalle. Kuormien jaosta riippuen menetelmällä voidaan siis saada useita erilaisia tasapainoehdot ja laatan reunaehdot täyttäviä momenttijakaumia, joista kaikki ovat murtorajatilan suhteen varmallalla puolella. Lähimpänä tarkkaa ratkaisua on suurimman kuormankantokyvyn antava jakauma, joka on lähimpänä kimmoteorian mukaista momenttijakaumaa. (Suomen Betoniyhdistys ry 2014, 23.) Kaistamenetelmällä ominaista kuormien jakoa ja valitulla kuormitusjaolla saatuja taivutusmomenteja neljältä sivulta vapaasti tuetun laatan tapauksessa on havainnollistettu kuviossa 11.

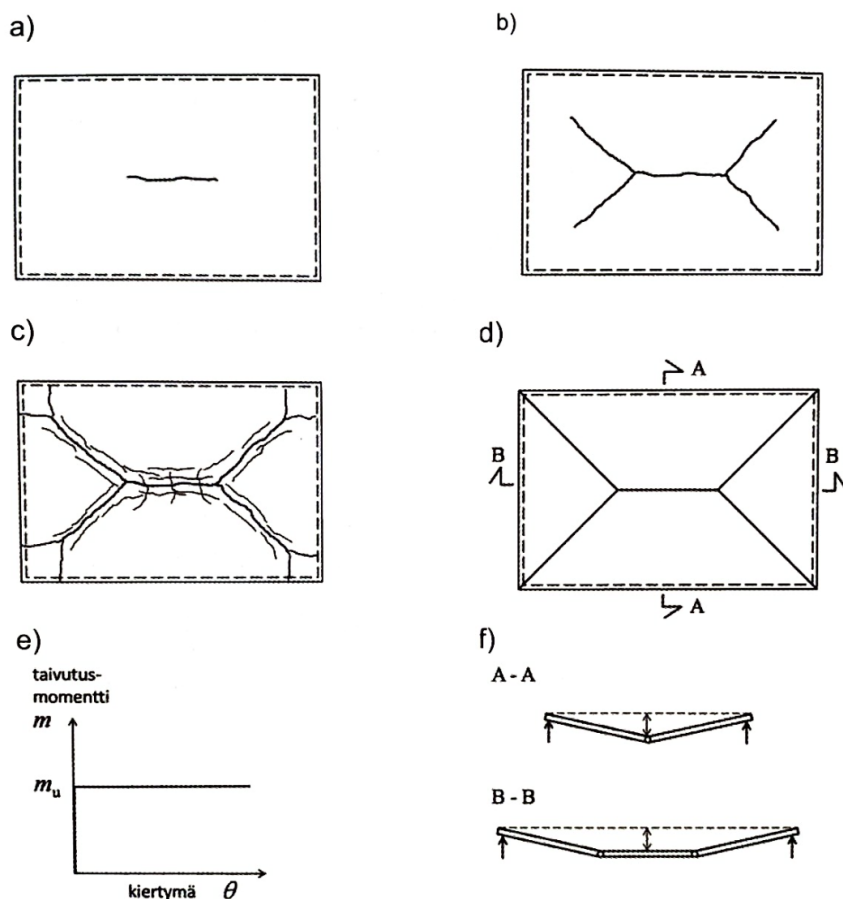


KUVIO 11. Kuormien jako sen mukaan kaistamenetelmällä saatavat taivutusmomentit (Suomen Betoniyhdistys ry 2014, 25)

### 3.1.3 Myötöviivateoria

Myötöviivateorian mukainen laskenta poikkeaa kaistamenetelmästä ja massiivilaattamenetelmästä siten, että sen avulla ei saada selville rakennetta kuormittavia taivutusmomenteja ja päästä siten määrittelemään vaadittavia raudoituksia. Sen sijaan myötöviivateorian avulla saadaan selville laatan kuormankantokyky tietyllä raudoituksella. Menetelmällä saatava myötömomentti ja sitä vastaava murtokuorma ovat plastisuusteorian ylärajalauseen mukaisia, eli menetelmällä saatava murtokuorma on vähintään yhtä suuria tai jopa suurempia, kuin todellinen murtokuorma. Käytännössä menetelmä on kuitenkin varmallalla puolella, sillä esimerkiksi kalvovoimien ansiosta laatan todellinen kuormankantokyky on menetelmällä laskettua arvoa suurempi. (Suomen Betoniyhdistys ry 2014, 33.)

Laskentaperiaatteeltaan myötöviivateoria perustuu oletukseen, jonka mukaan ristiin kantavaa laattaa kuormitettaessa muodostuu laattaan myötöviivat, joita pitkin laatan osat pääsevät kiertymään toistensa suhteen ja näin laatta muodostaa mekanismin (Suomen Betoniyhdistys ry 2014, 33). Myötöviivateorian mukaista myötöviivojen muodostumista ja kehittymistä kuormituksen lisääntyessä on esitelty kuviossa 12.



KUVIO 12. Ristiin kantavan laatan murtumismekanismin kehitys myötöviivateorian mukaan (Suomen Betoniyhdistys ry 2014, 32)

Kuten kuvion 12 kohdasta a) nähdään, alkaa ristiin kantavaan teräsbetonilaattaan aluksi syntyä halkeamia suurimpien taivutusmomenttien alueille. Tämän seurauksena laatan taivutusjäykkyys halkeamien kohdilla pienenee huomattavasti ja halkeamien kohdille alkaa syntyä kasvavaa muodonmuutosta (kiertymää). Siirryttäessä edelleen kohti murtoa, eniten rasitettujen kohtien halkeamat etenevät ja niiden alueella rauditus alkaa myötää (kuvio 12 b-c). Halkeamattomilla alueilla taivutusjäykkyys ei puolestaan juurikaan muutu, eikä näille alueille synny merkittä-

viä muodonmuutoksia, vaan muodonmuutokset keskittyvät halkeilualueille. Halkeilualueille muodostuu kuormitusta edelleen lisättäessä myötövyöhykkeet, joita menetelmässä käsitellään myötöviivoina. Lopulta, kun myötöviivojen muodostama myötökuvio on täysin kehittynyt (kuvio 12 d), syntyy laatasta mekanismi, joka ei enää ota vastaan lisää kuormaa. Toisin sanoen tällöin on saavutettu laatan murtokuorma. (Suomen Betoniyhdistys ry 2014, 32.)

Myötöviivateorian yhteydessä seinämäisten tukien tukireaktiot ja tukialueiden leikkausrasitukset saadaan selville massiivilaattamenetelmän tapaan pintakuorman ja tuelle kuormansa siirtävän laatan osan leveyden tulona. Myötöviivateoriassa kullekin tuelle kuormansa siirtävänä laatan osana voidaan käyttää myötökuvion mukaan jaettuja alueita. (Suomen Betoniyhdistys ry 2014, 20.) Kaikkien edellä esiteltyjen laskentatapojen ominaisuuksia on menetelmien vertailemiseksi koottu Betonirakenteiden suunnittelun oppikirjan By211 – osasta 2 (2014) taulukoon 5.

TAULUKKO 5. Ristin kantavien laattojen laskentamenetelmien ominaisuuksia

	<i><b>MBP</b></i>	<i><b>Kaistamenetelmä</b></i>	<i><b>Myötöviivateoria</b></i>
<i><b>Kuvaus</b></i>	Hyödynnetään laskennassa valmiiksi laadittuja taulukoita	Jaetaan laatta yhteen suuntaan kantaviin kaistoihin	Selvitetään murtoon vaadittavan myötömomentti sisäisen työn periaatteiden avulla
<i><b>Teoria-pohja</b></i>	Lineaarinen kimmoteoria	Plastisuusteorian alarajalause	Plastisuusteorian ylärajalause
<i><b>Tulokset</b></i>	Taivutusmomentit ja leikkausrasitukset tuilla	Taivutusmomentit ja leikkausrasitukset tuilla	Murtokuorma, myötömomentit ja leikkausrasitukset tuilla
<i><b>Muuta</b></i>	Laattojen on oltava - suorakaiteen muotoisia - kaikilta sivuilta tuettuja - tasaisesti kuormitettuja	Ei sovellu KRT tarkastelun teoriapohjansa vuoksi	Jokaiselle laatalle on useita myötömekanismeja. Määrävin niistä on pienimmällä kuormalla syntyvä

## 3.2 Rakenteiden mitoitus

Rakenteiden mitoituksen näkökulmasta väestönsuoja on toisaalta osa rakennuksen runkoa ja siten sen tulee kestää tavanomaisten kuormien aiheuttamien rasitusten vaikutukset sekä murtorajatilassa että käyttörajatilassa aivan, niin kuin muidenkin rakenteiden. Toisaalta asevaikutukseen perustuvien katastrofikuormien suhteen väestönsuojan ainoa tarkoitus on suojata sen sisällä oleskelevia henkilöitä räjähdys-, sirpale- ja asevaikutuksilta, paineaalloilta, rakennusten sortumilta, ionisoivalta säteilyltä ja terveydelle vaarallisilta aineilta (Hänninen 1987, 83; Pelastuslaki 379/2011, 74 §). Näin ollen asevaikutuksista aiheutuvien kuormien ja niitä sisältävien kuormitustapausten yhteydessä ainoastaan murtorajatilamitoituksen mukainen tarkastelu väestönsuojan rakenteille riittää. Usein painekuormille mitoitettut rakenteet täyttävät myös tavanomaisilla kuormilla suoritettujen murto- ja käyttörajatilatarkasteluiden mukaiset vaatimukset. Niinpä niiden käsittely on rajattu tämän työn ulkopuolelle.

Tässä luvussa käsitellään väestönsuojan massiivilaattoina mitoitettavien holvien ja paineseinien murtorajatilamitoitusta. Muut väestönsuojien teräsbetonirakenteet, kuten pilarit, palkit ja väliseinät mitoitetaan normaalisti eurokoodin 2 mukaisesti, huomioiden kuitenkin väestönsuojarakenteille asetetut erityisvaatimukset.

### 3.2.1 Taivutusmitoitus

Väestönsuojan painekuormitetut seinät ja holvit mitoitetaan ristiin kantavina laattoina. Ristiin kantaviksi laatoiksi lasketaan laatat, jotka on tuettu neljältä, kolmelta tai kahdelta sivulta siten, että niihin syntyy merkittävää taivutusta kahdessa toisinaan vastaan kohtisuorassa suunnassa. Lisäksi neljältä sivulta tuettujen, ristiin kantavien laattojen sivumittojen suhde saa olla enintään kaksi. Mikäli sivumittojen suhde ylittää tämän, muodostuu laattaan keskialueelle yhteen suuntaan kantava vyöhyke. Tällöinkin laatan neliömäiset päätyosat toimivat kuitenkin ristiin kantavina. (Suomen Betoniyhdistys ry 2008, 389, 396.)

Laattarakenteiden taivutusmitoitus noudattaa pääosin samoja periaatteita, kuin teräsbetonipalkkien taivutusmitoitus. Laattoja tarkastellaan yhden yksikön levyisinä kaistoina, joiden korkeus on laatan paksuus. (Suomen Betoniyhdistys ry

2008, 389; Suomen Betoniyhdistys ry 2014, 79.) Ristiin kantavien laattojen taivutusmitoituksessa mitoitusmomentteina käytetään laatan pääsuuntien maksimimomentteja ja raudoitukset määritellään erikseen laatan kummassakin pinnassa kumpaankin pääsuuntaan. (Suomen Betoniyhdistys ry 2014, 48).

### 3.2.2 Leikkaus- ja lävistysmitoitus

Väestönsuojarakenteisiin kohdistuvien suurten kuormien vuoksi rakenteiden leikkauslujuuden tarkasteluun on kiinnitettävä erityistä huomiota (Piitulainen 2009, 51). Ristiin kantavien laattojen leikkauslujuuden tarkastelu tehdään niin ikään palkkirakenteiden leikkausmitoituksen tapaan tietyn poikkeuksin. Lähtökohtaisesti laattarakenteet pyritään kuitenkin toteuttamaan ilman erillistä leikkausraudoitusta.

Pääasiassa tasaisesti kuormitettujen laattojen leikkausmitoituksessa mitoittavaksi leikkausvoimaksi saadaan valita voima, joka vaikuttaa laatan tehollisen korkeuden etäisyydellä tuen reunasta, kunhan tuella vaikuttava maksimileikkausvoima ei ylitä leikkauskestävyyden ylärajaa. (SFS-EN 1992-1-1+A1+AC 2015, 84). Lisäksi vaikka laatan tuella vaikuttava leikkausvoimajakama ei todellisuudessa ole tasainen, vaan suurin leikkausvoima keskittyy tuen keskialueelle, esitetään Reino Hännisen (1987) julkaisussa ”Paikko-projekti: paikallavalun kehittäminen koerakennuskohteessa” periaate, jonka mukaan väestönsuojien mitoituksessa leikkausvoima voidaan jakaa tasan koko tuen matkalle (Hänninen 1987, 88).

Leikkaus- ja taivutusmitoituksen lisäksi väestönsuojan ympärirakenteisiin syntyy suurten kuormien vaikutuksesta etenkin pilarien päiden ja seinien päätyjen alueille usein suuri lävistysmurron riski. Lävistysmurrolla tarkoitetaan murtomekanismia, jossa pienelle alalle kohdistuvan kuorman vaikutuksesta laatasta leikautuu irti betonikartio (Suomen betoniyhdistys ry 2008, 288). Tyypillisesti laatat pyritään toteuttamaan ilman erillisiä lävistysraudoituksia, mutta väestönsuojarakenteisiin kohdistuvien suurten kuormien vuoksi leikkauskestävyyden lisäksi myös lävistyskestävyyden kasvattaminen on toisinaan tarpeen melko suurista rakennepaksumuksista huolimatta (Suomen betoniyhdistys ry 2014, 64).

Lävistysmitoituksessa tutkitaan ensin, kestäkö rakenne lävistymisvaaraa aiheuttavat leikkausrasitukset ilman erillisiä toimenpiteitä. Mikäli ei, voidaan rakenteen lävistyskestävyyttä parantaa kasvattamalla laatan paksuutta tai pilarin poikileikkausta joko kauttaaltaan tai paikallisesti, tihentämällä yläpinnan pääraudoitusta tai lisäämällä erillisiä leikkausraudoitteita tai tehdasvalmisteisia lävistysraudoitteita (Suomen Betoniyhdistys ry 2008, 415.)

Murtorajatilamitoitusta ei tämän työn teoriaosuudessa käsitellä tarkemmin, sillä työn päätarkoitus on kuvata paikallavaletun väestönsuojan algoritmiavusteisen suunnitteluprosessin kehittämistä. Teräsbetonirakenteiden taivutus-, leikkaus- ja lävistysmitoitusta on kuitenkin käsitelty jo useissa opinnäytetöissä. Taivutus- ja leikkausmitoitusta väestönsuojien laattamaisille rakenteille on käsitelty esimerkiksi Lappalaisen (2018) kandidaatintyössä ”S1-luokan väestönsuojan mitoitus paikallavalurakenteena”. Lävistysmitoitusta teräsbetonirakenteiden yhteydessä puolestaan on käsitelty esimerkiksi Paula Romakkaniemen (2019) opinnäytetyössä ”Betonirakenteiden lävistysmitoitus”.

### **3.3 Väestönsuojan FEM-laskenta**

Nykyään väestönsuojarakenteiden rasitukset selvitetään ja rakenteet mitoitetaan pääasiassa elementtimenetelmään perustuvia FEM-laskentaohjelmia hyödyntäen. FEM-laskentaohjelmien avulla päästään tarkkoihin tuloksiin ja laskenta on tehokasta ja nopeaa verrattuna käsinlaskentamenetelmiin. Myös algoritmiavusteisen suunnittelun näkökulmasta kyseisten ohjelmien käyttäminen on erittäin hyödyllistä ja FEM-laskennan hyödyntämisellä on merkittävä osa myös työssä esitettävässä väestönsuojien algoritmiavusteisessa suunnitteluprosessissa.

#### **3.3.1 RFEM**

Tässä työssä väestönsuojarakenteiden analysointiin käytetään Dlubal Software:n kehittämää RFEM 5 ohjelmaa. RFEM on elementtimenetelmään (Finite Element Method) perustuva 3D-laskentaohjelma, jonka avulla saadaan selvitettyä erilaisten sauvoista, laatoista, seinistä, kuorista, kehistä ja kolmiulotteisista kappaleista koostuvien rakenteiden ja rakennekokonaisuuksien sisäiset voimat, rasitukset, tukireaktiot sekä muodonmuutokset. (Dlubal Software 2020, 6.)



RFEM on rakenteeltaan modulaarinen ohjelma (Dlubal Software 2020, 6). Ohjelman perusmoduulissa määritellään rakenteen geometria, materiaalit sekä kuormitukset ja lasketaan sisäiset voimat rasitukset ja tukireaktiot. Perusmoduulin lisäksi ohjelmaan tarjolla olevilla lisämoduuleilla puolestaan voidaan mitoitaa esimerkiksi erityyppisiä ja eri materiaaleista valmistettavia rakenteita haluttujen suunnittelustandardien mukaisesti. (A-Insinöörit 2016.)

RFEM:iin saatavilla olevista mitoitukseen käytettävistä lisämoduuleista väestönsuojarakenteiden mitoitamiseen soveltuvia voisivat olla esimerkiksi RF-CONCRETE Surfaces, jonka avulla saataisiin selvitettyä laattamaisten rakenteiden vaatimat pääraudoitusmäärät sekä RF-PUNCH Pro, jonka avulla voitaisiin suorittaa teräsbetonirakenteiden lävistysmitoitustarkastelu. Tässä työssä RFEM-lisämoduuleja ei kuitenkaan käytetä niiden monimutkaisuuden ja käytön vaativuuden vuoksi, vaan rakenteiden mitoitusta suoritetaan algoritmin yhteyteen luotavien, väestönsuojarakenteiden mitoitukseen tarkoitettujen komponenttien avulla.

RF-CONCRETE Surfaces lisäosan käyttöä teräsbetoniaattojen mitoituksessa on käsitelty tarkemmin esimerkiksi Juho Ikävalkon (2017) opinnäytetyössä ”RFEM laskenta- ja mitoitushje teräsbetonilaatoille”. RF-PUNCH Pro lisämoduulin hyödyntämistä teräsbetonirakenteiden lävistysmitoituksessa puolestaan on esitelty esimerkiksi Romakkaniemen (2019) opinnäytetyössä ”Betonirakenteiden lävistysmitoitus”.

### **3.3.2 Mallinnus- ja laskentaperusteet**

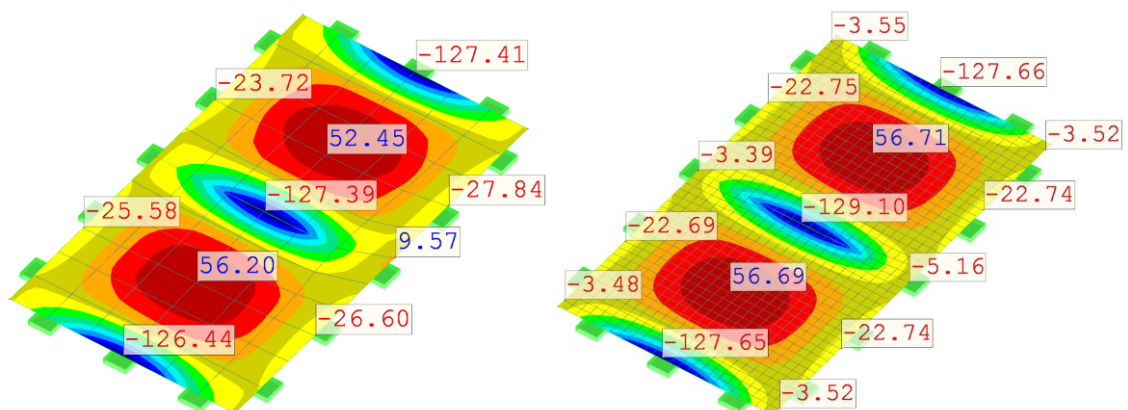
FEM-laskentaohjelmien toiminta perustuu yleisellä tasolla siihen, että aluksi mitoitettava rakenne mallinnetaan ohjelmaan mahdollisimman todenmukaisesti. Tämän jälkeen rakenne jaetaan pienempiin elementteihin, joiden avulla ohjelma laskee rakenteisiin syntyvät siirtymät ja rasitukset.

FEM-laskentamallia luotaessa lähtökohta on, että laskentamalli on aina yksinkertaistettu esitys todellisesta rakenteesta. Se kuinka paljon todellista rakennetta yksinkertaistetaan laskentamallissa vaikuttaa merkittävästi siihen, kuinka todenmukaisia tuloksia laskentamalli antaa. Laskentamallia luotaessa yksinkertaistuksia

aiheuttavat esimerkiksi liitosten ja tuentojen jäykkyyssasteiden valinnat sekä laskentaparametrien, kuten analyysityypin ja materiaalmallien valinnat. Mallinnustavalla ja siinä tehtävillä valinnoilla onkin olennainen vaikutus mitoituksen onnistumisen kannalta ja yksinkertaistukset on aina pyrittävä tekemään siten, että tulokset pysyvät varmalla puolella. (A-Insinöörit 2016.)

FEM-laskenta perustuu siis elementtimenetelmään, jossa laskentamalliin luotavat rakenteet jaetaan rakenteen tyyppin mukaan pienempiin, elementeiksi kutsuttaviin osiin, jotka liittyvät toisiinsa solmupisteissä. Tätä elementeistä ja niiden solmupisteistä muodostuvaa verkkoa kutsutaan elementtiverkoksi. Elementtimenetelmään perustuvassa laskennassa siirtymät ja rasitukset lasketaan elementtiverkon solmupisteissä ja niinpä elementtiverkon tiheys ja laatu vaikuttavat merkittävästi laskennassa saavutettavien tulosten tarkkuuteen. (A-Insinöörit 2016.)

Elementtiverkon tiheyden vaikutusta laattamaisen rakenteen taivutusrasitukseen on havainnollistettu RFEM-laskentaohjelman avulla kuviossa 13. Kuviossa vasemmalla puolella esitettyssä laskentamallissa elementtiverkon elementtien likimääräinen sivumitta on 800 mm ja oikealla puolella esitettyssä 200 mm. Kuormituksena laatalle on kummassakin tapauksessa laatan oma paino ja  $100 \text{ kN/m}^2$  tasaista kuormaa. Laatan paksuus on 400 mm ja se on tuettu väestönsuojan holvin tapaan reunoiltaan jäykästi ja laatan puolesta välistä nivelisesti. Kuviossa esitetyt taivutusmomentin arvot ovat laatan pidemmän sivun suuntaisen momentin paikalliset ääriarvot. Momentin yksikkö kuviossa on kNm.



KUVIO 13. Elementtiverkon tiheyden vaikutus lasketun taivutusmomentin [kNm] suuruuteen

Kuten kuviosta 13 nähdään, eri kokoisilla elementtiverkoilla laskentatulokset poikkeavat toisistaan jonkin verran. Esimerkiksi kuviossa ylempänä olevaan laattakenttään saadaan harvemmalla elementtiverkolla taivutusmomenttia 52,45 kNm ja tiheämmällä elementtiverkolla 56,71 kNm. Tämä johtuu siitä, että harvemmalla elementtiverkolla elementtien nurkkaan muodostuva solmupiste jää kauemmas kentän todellisen maksimimomentin kohdasta, kuin tiheämmällä elementtiverkolla.

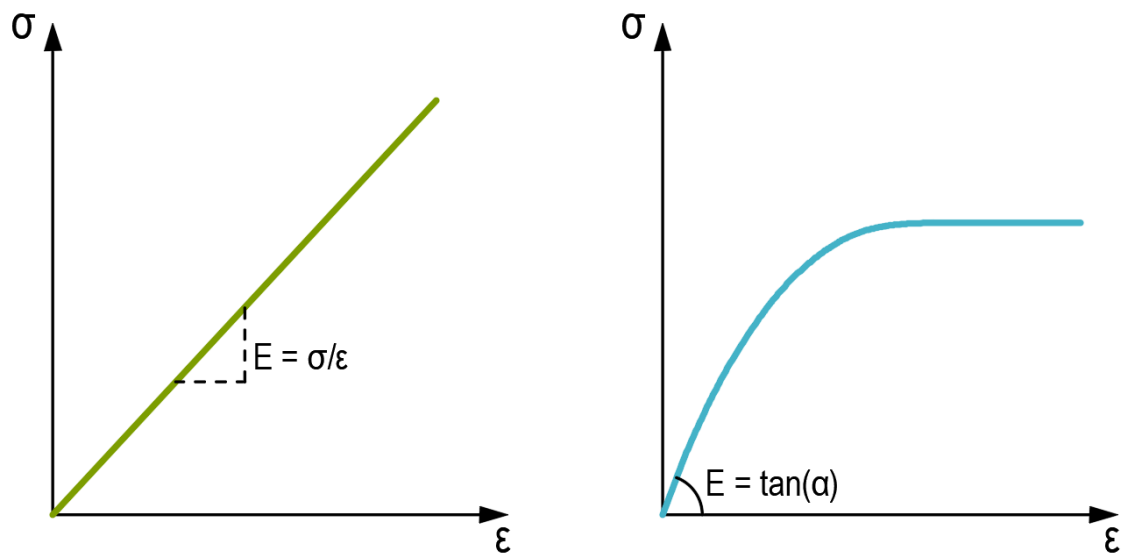
Yleisesti ottaen tiheämmällä elementtiverkolla saavutetaan FEM-laskennassa tiettyyn rajaan saakka tarkempi laskentatuloks, kuin harvalla. Toisaalta elementtiverkon tihentäminen pidentää ohjelman laskenta-aikaa ja etenkin suurten mallien tapauksessa tämä voi muodostua ongelmaksi. Lisäksi liian pienen elementtiverkon käyttö saattaa toisinaan vääristää laskentatuloksia. (A-Insinöörit 2016.)

Elementtiverkon tiheys vaikuttaa tulosten tarkkuuden lisäksi myös FEM-laskennalle etenkin laattarakenteiden yhteydessä ominaisten singulariteettiongelmiin syntyminen ja havaitsemiseen. Singulariteettiongelmissä tarkoitetaan tiettyyn pisteeseen FEM-laskennassa syntyvää poikkeuksellisen suurta ja epätodellista jännitystilaa, jonka suuruus kasvaa kohti ääretöntä, kun elementtiverkkoa tihennetään. Singulariteettiongelmiin syntyneille otollisia kohtia ovat esimerkiksi piste-mäiset tuet ja -kuormat, epäjatkovat seinämäiset tuet sekä laattojen sisänurkat. (Dlubal Software 2018). Tarkemmin elementtimenetelmän toimintaa ja singulariteettiongelmaa on käsitelty muun muassa Ikävalkon (2017) opinnäytetyössä ”RFEM laskenta- ja mitoitusohje teräsbetonilaatoille”.

Geometrian, liitosten ja tuentojen mallinnustavan sekä elementtiverkon tiheyden ja laadun lisäksi FEM-laskennan tuloksiin vaikuttavat myös laskenta-asetukset ja materiaalimallien vallinta. S1-luokan väestönsuojien rakennusmateriaalina käytettävä teräsbetoni on hyvin epälineaarinen materiaali. FEM-laskennassa teräsbetonin käyttäytymistä voidaan mallintaa useilla erilaisilla lineaarisilla ja epälineaarilla materiaalimalleilla (Suomen Betoniyhdistys ry 2008, 34).

Lineaarilla materiaalimallilla tarkoitetaan Hooken lain mukaista materiaalin käyttäytymismallia, jonka mukaan ulkoisen voiman rakenteelle aiheuttamat siirty-

mät ja rakenteeseen syntyvät jännitykset käyttäytyvät lineaarisesti ulkoisen voiman suuruuden muuttuessa. Lineaarielastisen materiaalmallin tapauksessa materiaalin oletetaan käyttäytyvän lisäksi täysin kimmoisasti, eli kun rakenteeseen vaikuttavat kuormat poistetaan, kaikki muodonmuutokset palautuvat. Epälineaarissa materiaalmallissa puolestaan ulkoisen kuorman muuttuessa rakenteessa vallitsevien jännitysten ja rakenteeseen syntyvien siirtymien välinen korrelaatio muuttuu epälineaariseksi. (Rombach 2011, 3, 181.) Esimerkit lineaarisen ja epälineaarisen materiaalin jännitys-venymäkuvaajista on esitetty kuviossa 14.



KUVIO 14. Lineaarisen (vas.) ja epälineaarisen (oik.) materiaalin periaatteellinen jännitys-venymäkuvaajat

Kuviossa 14 vaakakselillä ( $\epsilon$ ) on kuvattu rakenteeseen syntyvää muodonmuutosta ja pystyakselillä ( $\sigma$ ) rakenteessa vaikuttavaa jännitystä. Vaikka epälineaarinen materiaalmalli kuvaa teräsbetonin todellista toimintaa realistisemmin, on FEM-laskenta kuitenkin merkittävästi tehokkaampaa ja nopeampaa suorittaa lineaarisesta materiaalmallia käyttäen ja sen avulla saavutettava tarkkuustaso on yleisesti ottaen riittävä. (Suomen Betoniyhdistys ry 2008, 34; Rombach 2011, 3, 8.) Näin ollen epälineaaristen materiaalmallien käyttö ei useinkaan tavanomaisissa tapauksissa ole tarpeen tai järkevää.

Myös FEM-laskennassa käytettävä laskentamenetelmä voidaan RFEM-laskentaohjelman tapauksessa valita useista vaihtoehdoista. Yleisimmät laskentamenetelmät ovat lineaarinen analyysi ja toisen kertaluvun analyysi. Lineaarisessa

analyysissä kuormitusten rakenteille aiheuttamia geometrian muutoksia ja näistä aiheutuvia lisärasituksia ei huomioida. Epälineaarinen laskenta, eli toisen kertaluvun vaikutukset huomioon ottava laskentamenetelmä puolestaan huomioi nämä kuormien rakenteille aiheuttamat siirtymät ja niiden vaikutukset. RFEM käyttää oletuslaskenta-asetuksena yksittäisille kuormitustapauksille lineaarista analyysiä ja kuormitusyhdistelmille toisen kertaluvun analyysiä. (A-Insinöörit 2016.)

### 3.3.3 Laskentamallin luonti

Väestönsuojan laskentamallin luontiin on useita eri tapoja. Laskentamalli voidaan luoda esimerkiksi perinteisiä käsinlaskentamenetelmiä mukaillen levittämällä seinistä ja holvista koostuvan väestönsuojan rakenteet yhteen tasoon ikään kuin yhdeksi jatkuvaksi laataksi. Toinen reilusti yksinkertaistettu tapa on mallintaa erikseen kaikki väestönsuojan rakenteet tuentoineen. Lähtökohtaisesti näitä tapoja huomattavasti parempi tapa on luoda 3D-laskentamalli, jossa seinät ja holvit sekä mahdolliset pilarit ja palkit on mallinnettu oikeille sijainneilleen ja rakenteiden välisten liitosten tyypit ja jäykkyyssasteet saadaan määritelty oikein. Tällaisen laskentamallin luontia puoltaa esimerkiksi se, että näin rakenteilta toisille siirtyvät kuormat sekä rasitukset välittyvät mallissa todenmukaisesti ilman turhia manuaalisia välivaiheita.

Laskentamallin luonti aloitetaan RFEM:ssä valitsemalla suunnittelustandardi, jonka mukaan laskenta halutaan toteuttaa. Tämän jälkeen mallinnetaan suunniteltavan rakenteen, tässä tapauksessa väestönsuojan, geometria aukotuksineen valituilla materiaaleilla. Lisäksi laskentamalliin määritellään rakenteiden välisten liitosten jäykkyyssasteet sekä tuennat. Laskennassa käytettävän elementtiverkon RFEM muodostaa automaattisesti kullekin mallinnetulle rakenteelle käyttäen elementtien kokona ohjelmalle syötettyä tavoitekokoa. Elementtiverkon elementtien koko, sekä elementtiverkkoon mahdollisesti tarvittavat paikalliset tihennykset ohjelman käyttäjän tulee siis määritellä tutkittavan tapauksen mukaan laskentamallia luotaessa.

Geometrian ja elementtiverkon luonnin jälkeen malliin lisätään rakenteisiin vaikuttavat kuormat. Ennen kuormien luontia RFEM:iin luodaan kuormitustapaukset,

joiden alle varsinaiset kuormat lisätään. Kuormitustapauksista puolestaan muodostetaan rakenteen mitoituksen kannalta tarpeelliset kuormitusyhdistelmät. Mikäli laskennassa halutaan hyödyntää ainoastaan RFEM:n perusmoduulia sisäisten voimasuureiden, muodonmuutosten ja tukireaktioiden laskemiseen, eikä malli vaadi muita erityistoimenpiteitä, on se tällöin valmis ja FEM-laskenta voidaan suorittaa.

## 4 ALGORITMIAVUSTEINEN SUUNNITTELU

Algoritmiavusteisesta suunnittelusta puhuttaessa termien kirjo on laaja ja termejä käytetään jokseenkin ristiin. Tässä työssä käsitellään algoritmiavusteista suunnittelua, jonka suomenkielisinä synonyymeinä voidaan pitää ainakin parametrissa suunnittelua ja algoritmista suunnittelua. Algoritmiavusteisella suunnittelulla tarkoitetaan algoritmien eli tarkkaan määriteltyjen komentoketjujen hyödyntämistä osana suunnitteluprosessia siten, että ainakin jokin suunnittelun osatehtävä ratkaistaan algoritmia hyödyntäen. Algoritmit voidaan suorittaa manuaalisesti vaihe vaiheelta, mutta tyypillisesti tähän hyödynnetään tietokoneiden laskentatehoa ja -tarkkuutta. Edellä mainittujen termien lisäksi parametrinen mallintaminen on hyvin yleinen algoritmiavusteisen suunnittelun yhteydessä käytettävä termi. Parametrinen mallintaminen eroaa käsitteenä algoritmiavusteisesta suunnittelusta siten, että sillä tarkoitetaan geometrian mallintamista algoritmin avulla niin, että algoritmia ohjaavia parametreja muuttamalla geometriamalli päivittyy reaaliaikaisesti. (Tanska & Österlund 2014, 11, 13.)

Algoritmi on alun perin matemaattinen käsite, joka tarkoittaa sarjaa yksiselitteisesti määriteltyjä komentoja, joita tietyssä järjestyksessä noudattaen saadaan suoritettua haluttu tehtävä ja päästään näin lähtötilanteesta haluttuun lopputulokseen. Mikäli siis lähtötilanne ja algoritmi pysyvät muuttumattomina, johtaa algoritmin toistaminen jokaisella suorituskerralla samaan lopputulokseen. Eräänä arkielämän analogiana algoritmille voidaan pitää leivonnassa käytettävää reseptiä. Sen avulla raaka-aineista saadaan valmistettua reseptiä noudattaen haluttu leivonnainen. (Tanska & Österlund 2014, 11, 20.) Samaan tapaan esimerkiksi tasokuvan ja taulukon muodossa esitetyistä väestönsuojan suunnittelulähtötiedoista voidaan tiettyä komentosarjaa noudattaen luoda laskentamalli, ratkaista sen avulla väestönsuojarakenteiden rasitukset, määritellä rasitusten vaatimat raudoitukset ja luoda lopputuloksesta visuaalinen raportti, josta kaikki tarvittavat tiedot saadaan helposti luettua.

Kuten algoritmiavusteisen suunnittelun synonyyminä käytettävästä termistä, parametrinen suunnittelu, voidaan päätellä, myös käsitteet parametri ja parametriisuus liittyvät olennaisesti algoritmiavusteiseen suunnitteluun. Parametrilla tarkoitetaan algoritmista prosessia ohjaavaa lähtötietoa, eli informaatiota, joka määrää

osaltaan algoritmin avulla aikaansaatavan tuloksen. Parametrit voivat olla esimerkiksi muuttujia, lukuarvoja tai muita määreitä, jotka käyttäjä määrittää tai jotka määräytyvät luotujen sääntöjen mukaan. Parametrisuus puolestaan tarkoittaa suunnitteluprosessin näkökulmasta tilannetta, jossa algoritmissa avoimeksi jätetyt parametreja muuttamalla suunnittelija voi vaikuttaa prosessin lopputulokseen. (Tanska & Österlund 2014, 3.)

Käyttäjän manuaalisesti määrittämiä parametreja kutsutaan vapaiksi parametreiksi. Vapaiden parametrien määrällä ja valinnalla on erittäin suuri vaikutus muun muassa algoritmin toimivuuden ja käyttökelpoisuuden kannalta, sillä mikäli suunniteltavaa kokonaisuutta ei vapaiden parametrien avulla saada muokattua kaikkiin haluttuihin muotoihin, on muutosten aikaansaamiseksi usein muokattava koko algoritmin rakennetta. (Davis, Burry & Burry 2011, 363.)

Algoritmiavusteisessa suunnittelussa käytettävät algoritmit voidaan luoda perinteiseen tapaan tekstimuotoisena ohjelmointikoodina, eli skriptinä. Toinen yleinen tapa luoda algoritmeja on visuaalinen ohjelmointi. Visuaalisessa ohjelmoinnissa parametreja ja tietyn komentosarjan sisältäviä visuaalisia ohjelmakomponentteja yhdistellään toisiinsa visuaaliseen ohjelmointiin tarkoitettussa ohjelmassa. Tällaisessa algoritmissa jokaiselle komponentille syötetään tietoa, jonka se käsittelee komponentille ominaisella tavalla ja syöttää tämän jälkeen prosessoidun tiedon eteenpäin seuraaville komponenteille. Kun tieto on kulkenut kaikkien komponenttien läpi, on se saatu haluttuun, lähtötietoparametreista riippuvaan muotoon. Visuaalisen ohjelmoinnin etuna on se, ettei algoritmin luoja tarvitse osata mitään tiettyä ohjelmointikieltä voidakseen luoda algoritmeja. Visuaalisen ohjelmoinnin alustana käytettäviä ohjelmia ovat esimerkiksi McNeelin Grasshopper, Autodeskin Dynamo sekä Bentleyyn Generative Components. (Tanska & Österlund 2014, 13, 28.)

Arkkitehtisuunnittelussa algoritmiavusteista suunnittelua hyödynnetään jo jonkin verran etenkin algoritmiavusteisen mallintamisen muodossa, mutta rakennesuunnittelussa algoritmiavusteisen suunnittelun mahdollisuuksia on alettu hyödyntää vasta viime vuosina. Algoritmiavusteisen suunnittelun mahdollisuuksia rakennesuunnittelun näkökulmasta on kartoitettu muun muassa Petteri Karjalaisen



(2018) diplomityössä ”Kantavien rakenteiden algoritmiavusteisen rakennesuunnitteluprosessin kehittäminen” sekä Alex Lalla (2017) diplomityössä ”Kantavien rakenteiden parametrinen suunnittelu ja mallintaminen”. Diplomityössään Lalla esittää, että algoritmiavusteisen suunnittelun edut ovat merkittävimmät suunnittelutehtävissä, joissa

- projektin edetessä suunnitelmiin on odotettavissa paljon muutoksia
- halutaan vertailla erilaisia suunnitteluratkaisuja
- suunniteltava kohde sisältää haastavaa geometriaa
- suunniteltavat rakenteet toistuvat periaatteeltaan samankaltaisina kohteesta toiseen ja näin samaa algoritmia voidaan hyödyntää toistuvasti.

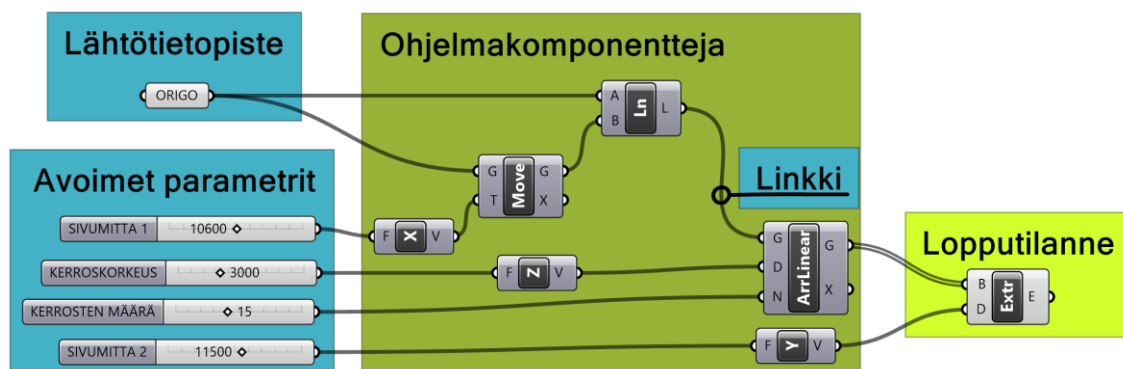
(Lalla 2017, 91.)

Karjalainen puolestaan esittää diplomityössään (2018) algoritmiavusteisen suunnittelun yleistymiseen ja käytettävyyteen liittyviksi merkittäviksi haasteiksi suunnittelumenetelmän uutuuden ja erilaisuuden perinteiseen suunnitteluun verrattuna, minkä vuoksi rakennesuunnittelijoiden keskuudessa ei ole vielä syntynyt vakiintuneita tapoja algoritmiavusteiseen suunnitteluun liittyen (Karjalainen 2018, 54). Algoritmiavusteisen suunnittelun periaatteiden eroavuus perinteiseen suunnitteluun verrattuna tulee esiin siinä, että perinteisessä suunnittelutavassa pääpaino asetetaan lopputuotteelle, kun taas algoritmiavusteisessa suunnitteluprosessissa pääpaino tulee kiinnittää itse suunnitteluprosessiin ja sen kehittämiseen (Tanska & Österlund 2014, 24).

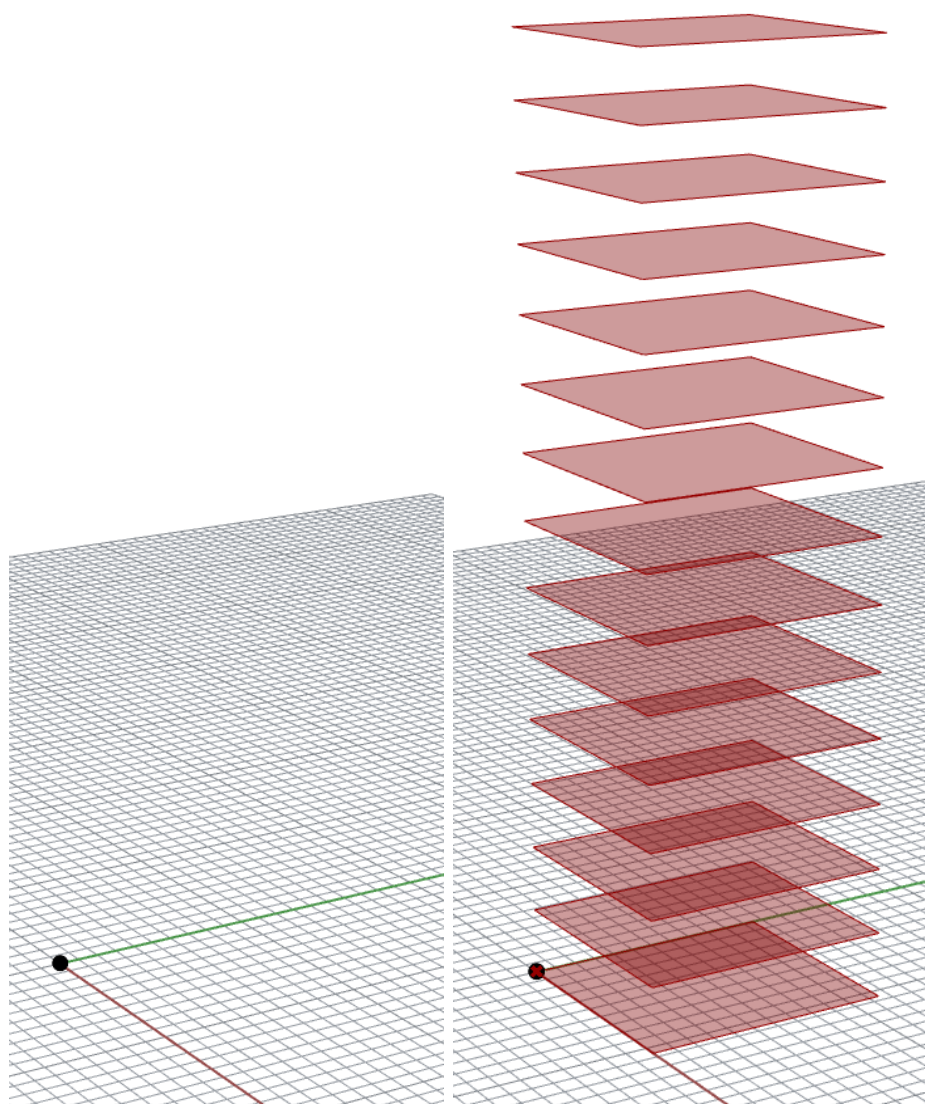
#### **4.1 Rhinoceros 3D ja Grasshopper**

Visuaaliseen ohjelmointiin käytettävistä ohjelmointialustoista rakennusalalla hyvin yleisesti käytössä on Grasshopper. Grasshopper ei ole itsenäinen ohjelma, vaan McNeelin Rhinoceros 3D-mallinnusohjelmaan (myöhemmin Rhino) integroitu lisäosa, jonka toiminta perustuu siihen, että sen avulla luotavat algoritmit muokkaavat Rhinossa auki olevaa 3D-mallia. Grasshopperin avulla voidaan siis luoda Rhinoon reaaliaikaisesti päivittyviä parametrisia malleja. Grasshopperin ja Rhinon välistä yhteistoimintaa on havainnollistettu esimerkin avulla kuvioissa 15 ja 16. Kuviossa 15 on esitetty Grasshopperiin luotu yksinkertainen algoritmi ja kuviossa 16 algoritmin 3D-malliin aikaansaama muutos. Lähtötilanteessa Rhinon luodussa 3D-mallissa on ainoastaan yksi origossa sijaitseva piste. Tästä

yhdestä pisteestä algoritmin muotoon kirjoitetun komentosarjan avulla saadaan Rhinoon luotua joukko päällekkäin sijaitsevia tasoja, joiden määrää, kokoa ja etäisyyttä toisistaan saadaan säädettyä algoritmia ohjaavien parametrien avulla.



KUVIO 15. Grasshopperilla toteutettu yksinkertainen algoritmi



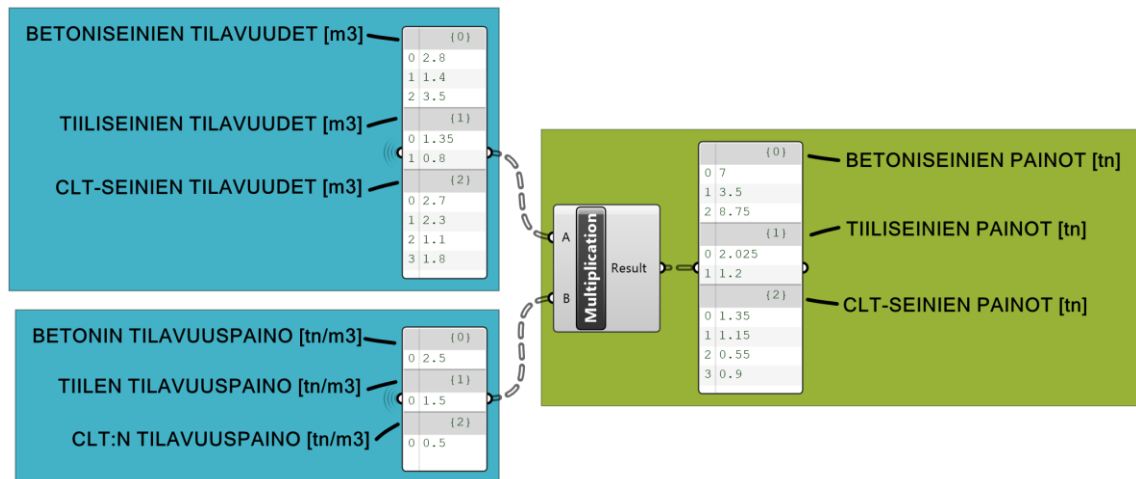
KUVIO 16. Kuvion 15 mukaisella algoritmilla aikaansaatua muutos Rhinossa

Eräs olennaisista Grasshopperin ominaisuuksista on sen avoimuus, joka mahdollistaa Grasshopperin ketterän linkittämisen useisiin muihin suunnittelussa käytettäviin ohjelmiin ja sovelluksiin ohjelmistorajapintojen kautta. Linkittämällä ohjelmia keskenään saadaan suunnittelun edetessä kertyvää tietoa siirrettyä ohjelmasta toiseen ja siten rikastettua muiden sovellusten tarjoamien työkalujen avulla. Samalla Grasshopperiin luotujen algoritmien käyttömahdollisuuksia saadaan kehitettyä parametrisesta mallintamisesta kohti monipuolisempaa algoritmiavusteista suunnitteluprosessia. Rakennesuunnittelussa etenkin erilaisten BIM- ja FEM-ohjelmien linkittäminen ja datan siirtäminen näiden ohjelmien välillä Rhinon ja Grasshopperin avulla on usein erittäin hyödyllistä.

Ohjelmistorajapintojen hyödyntämismahdollisuuden lisäksi yksi Grasshopperin vahvuuksista on sen muokattavuus omiin käyttötarkoituksiin sopivaksi. Grasshopper sisältää jo valmiiksi suuren joukon visuaalisia ohjelmakomponentteja, minkä lisäksi ohjelman avoin luonne mahdollistaa helpon uusien ohjelmakomponenttien kehittämisen ja laajentaa siten ohjelman käyttömahdollisuuksia. Kuka vain Grasshopperin käyttäjä voi siis luoda uusia komponentteja ja jakaa niitä tai ladata muiden tekemiä komponentteja esimerkiksi Food4Rhino-sivustolla. Uusien ohjelmakomponenttien luomisen lisäksi Grasshopperin käyttömahdollisuuksia laajentaa myös se, että ohjelma tarjoaa yksinkertaiset työkalut, joiden avulla esimerkiksi Python-, C#- tai Visual Basic -ohjelmointikielellä luotua tekstimuotoista koodia voidaan lisätä osaksi visuaalista algoritmia (ModeLab 2018, 6). Näin visuaaliseen algoritmiin saadaan tarvittaessa yhdistettyä myös tekstimuotoisen algoritmin etuja.

Suuret datamäärät ja niiden käsittely ovat olennainen osa algoritmiavusteista suunnittelua. Grasshopperin tapa käsitellä ja järjestää dataa sisältäviä listoja perustuu eräänlaiseen puurakenteeseen, josta tämän työn yhteydessä käytetään nimitystä datapuu. Käytännössä puurakenne tarkoittaa sitä, että kunkin datalistan sisältämä tieto jaetaan pienempiin osakokonaisuuksiin, joita Grasshopperissa kutsutaan datapuun oksiksi. Puumaisen datarakenteen avulla kullakin oksalla olevaa dataa voidaan käsitellä omana osakokonaisuutenaan. (ModeLab 2018, 122.) Esimerkiksi kuviossa 17 kertolaskukomponentti saa lähtötiedokseen kaksi datalistaa, joista toisessa on eri materiaalien tilavuuspainot ja toisessa kyseisistä materiaaleista valmistettavien seinien tilavuudet. Data on jaettu puurakenteeseen

siten, että tilavuuspainoja esittävässä listassa kunkin materiaalin tilavuuspaino on omalla oksallaan ja kustakin materiaalista valmistettujen seinien tilavuudet ovat toisessa datapuussa materiaalin tilavuuspainoa vastaavilla oksilla. Kun data syötetään komponentille oikeaan puurakenteeseen jaettuna, kertoo komponentti tietystä materiaalista valmistettavat seinät oikealla tilavuuspainolla ja näin lopputulokseksi saadaan kaikkien eri materiaaleista valmistettavien seinien painot.

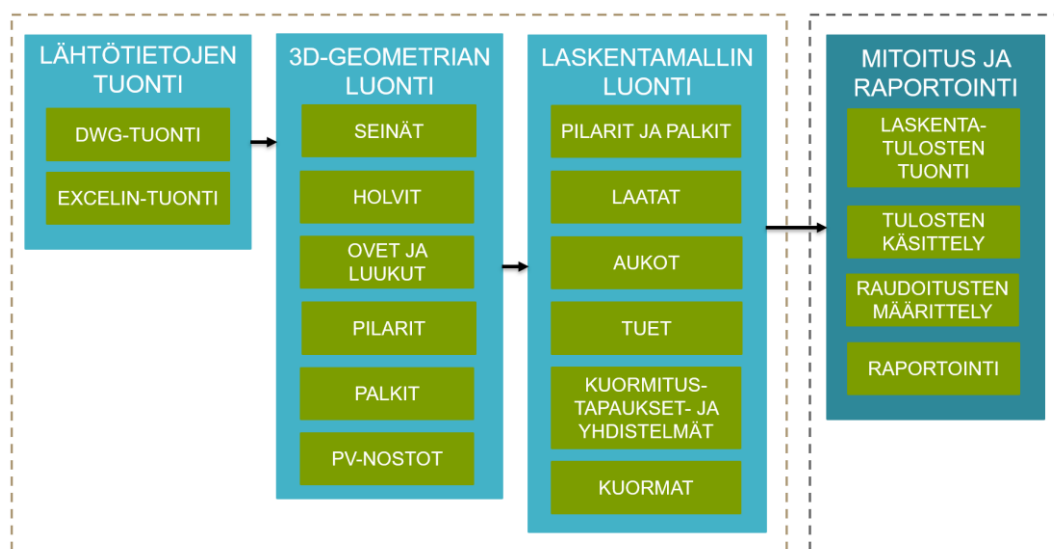


KUVIO 17. Esimerkki Grasshopperin puumuotoisesta datarakenteesta

## 5 TUTKIMUSOSIO: VÄESTÖNSUOJAN ALGORITMIAVUSTEINEN SUUNNITTELU

Tässä luvussa käydään läpi pääperiaatteet, joiden mukaisesti väestönsuojien rakenteiden suunnitteluun käytettävä algoritmi toteutetaan. Algoritmi luodaan visuaalisena algoritmina Grasshopper-ohjelmointialustalla. Lisäksi suunnitteluprosessissa hyödynnetään AutoCad-, Excel-, Rhinoceros 3D- ja RFEM-ohjelmia. Periaatteiden esittelyn tukena luvussa kuljetetaan mukana esimerkkipäestönsuojaa, jonka suunnittelulähtötiedot on esitetty kuviossa 19 ja taulukossa 6 ja jonka avulla algoritmin toiminnan vaiheita havainnollistetaan. Algoritmin toimivuutta puolestaan arvioidaan tässä luvussa esitetyn esimerkkipäestönsuojan avulla saavutettuihin tuloksiin pohjautuen luvussa 6. Algoritmin luomisessa on osittain ja soveltaen hyödynnetty Matias Hirvikosken (2019) diplomityössä ”Korkeiden rakennusten hankekehitysvaiheen stabiiliteettimallin luonti algoritmiaavusteisesti” esitettyjä periaatteita. Osaltaan tämä työ voidaan nähdä soveltavana jatkotutkimuksena Hirvikosken diplomityölle.

Rakenteeltaan työssä kuvattu algoritmi jakautuu neljään pääosioon, joista jokainen sisältää joukon tietyn tehtävän suorittamiseen keskittyviä alaosioita, joita tämän työn yhteydessä kutsutaan segmenteiksi. Algoritmin pääosioita ovat kuvion 18 mukaisesti lähtötietojen tuonti, 3D-geometrian luonti, laskentamallin luonti sekä mitoitus ja raportointi. Pääosioiden lisäksi kuviossa 18 on esitetty kuhunkin pääosioon sisältyvät alaosiot.



KUVIO 18. Työssä esitettävän algoritmin rakenne

## 5.1 Lähtötiedot

Työssä väestönsuojan rakennesuunnitteluprosessin lähtötietona käytetään arkkitehdin tasokuvia. Vaikka mallintava rakennussuunnittelu on nykyään hyvin yleistä, valittiin työssä käytettäväksi lähtötietoformaatiksi perinteiset tasokuvat, sillä vielä toistaiseksi ne ovat ainoa jokaisesta kohteesta varmasti saatavilla oleva lähtötieto.

Ennen varsinaista algoritmin hyödyntämistä suunnittelussa tarvittava lähtötieto on muokattava ja järjestettävä muotoon, jonka algoritmi pystyy yksiselitteisesti tulkitsemaan. Tässä tapauksessa halutuksi lähtötietoformaatiksi valittiin DWG-tiedostoformaattissa algoritmille syötettävä keskilinjaesitys rakennesuunnittelun kannalta olennaisista väestönsuojan rakenteista ja niihin vaikuttavien lisäkuormien vaikutusalueista sekä joukko taulukkomuotoon koottuja avain-arvo -pareja.

Algoritmin lähtötietona toimivat tasopiirustukset luodaan arkkitehdin suunnitelmia referenssinä käyttäen siten, että eri rakenneosat piirretään omille ennalta määrätyille ja loogisesti nimetyille kuvatasoilleen. Näin varmistetaan, että algoritmi tunnistaa eri rakenneosat ja osaa käsitellä niitä halutulla tavalla.

Taulukkomuotoiset lähtötiedot puolestaan syötetään Microsoft Excel -taulukkolaskentaohjelmaan valmiiksi luotuun pohjaan, jossa on selkeä paikka kaikille halutuille lähtötiedoille. Taulukkomuotoisina avain-arvo -pareina kerättävä tieto on luonteeltaan sellaista, että sen esittäminen 2D-kuvassa ei ole algoritmille syötettävän lähtötiedon yksiselitteisyyden kannalta järkevää. Tällaisia olennaisia lähtötietoja ovat esimerkiksi holvien korot, rakennepaksuudet, materiaalit, aukkojen korot ja korkeudet sekä tavanomaisten kuormien ja mahdollisten lisäkuormien suuruudet.

Lähtötiedon jalostaminen haluttuun muotoon on toistaiseksi täysin manuaalinen työvaihe, joka vie jonkin verran aikaa ja syö näin algoritmiavusteisen prosessin tehokkuutta. Lähtötiedon keräämisen automatisointi vaatisi arkkitehtisuunnitteluun yhtenäisiä mallinnuskäytäntöjä ja rakenteiden nimeämissäntöjä, jolloin oikeat rakenteet ja lähtötiedot voitaisiin poimia algoritmin avulla suoraan arkkiteh-



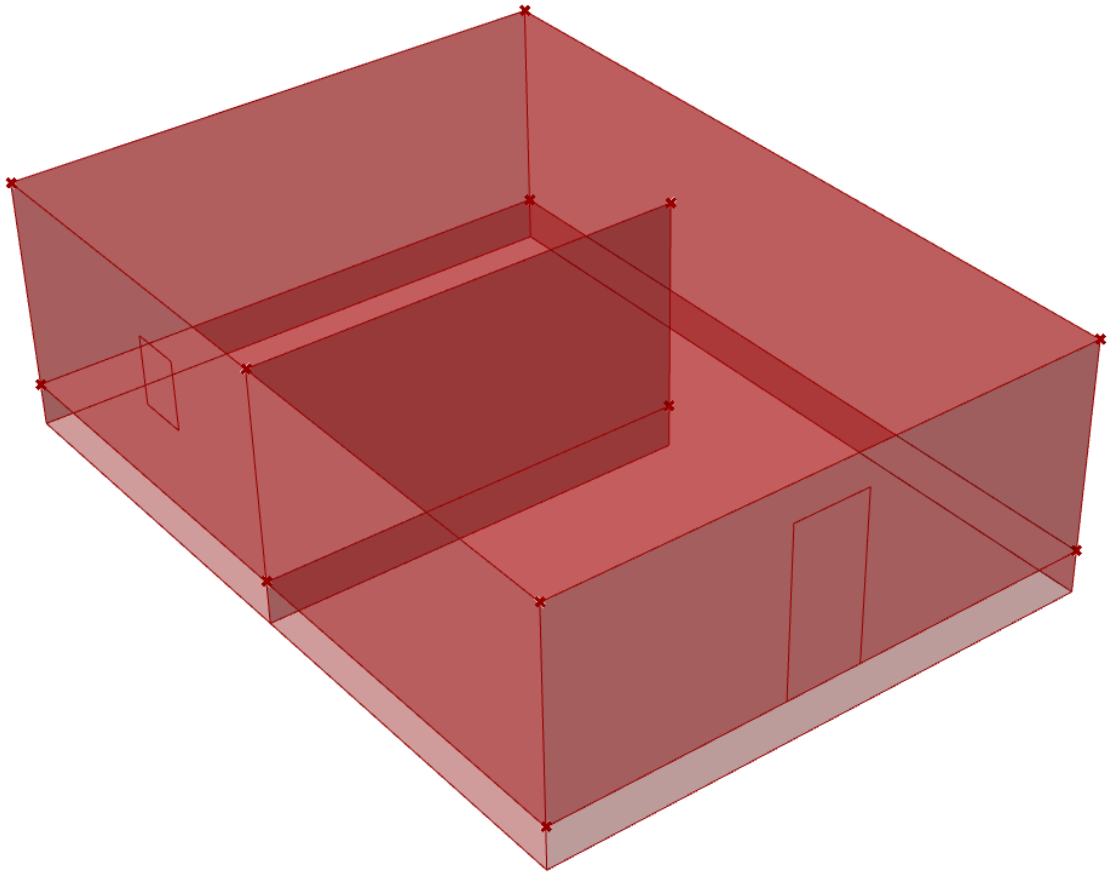
## 5.2 Geometrian luonti

Kun lähtötiedot on koottu haluttuun muotoon, tuodaan lähtötietopiirustukseen piirretyt viivat Python-ohjelmointikielellä luodun Grasshopper-komponentin avulla Rhinoon ja taulukkomuotoinen tieto luetaan siihen tarkoitetulla komponentilla ja tuodaan Grasshopperiin omiksi listoikseen. 3D-geometria pyritään luomaan Rhinoon sillä periaatteella, että se voidaan myöhemmin siirtää sellaisenaan RFEM-laskentaohjelmaan rasiusten selvittämistä varten. Väestönsuojissa esiintyvät rakenteet ovat laattamaisia ja viivamaisia ja RFEM:ssä näitä rakenteita halutaan käsitellä pisteinä, viivoina ja viivojen rajaamina kuorina. Niinpä rakenneosat luodaan Rhinoon siten, että laattamaiset rakenteet muodostuvat nurkkapisteissä yhdistyvien viivojen rajaamista kuorista ja viivamaiset rakenteet päätepisteitä yhdistävistä viivoista.

3D-geometrian luonti Rhinoon tapahtuu kunkin rakenneosan tapauksessa kyseisen osan geometrian luomiseen tarkoitetun segmentin avulla. Peruseriaatteella kaikki 3D-geometriaa luovat segmentit toimivat samalla tavalla. Aluksi segmentti tunnistaa Rhinosta tietylle tasolle piirretyt viivat, jotka se siirtää lähtötietotaulukossa annetun tiedon mukaisesti oikeaan rakenteen lähtökorkoon. Tämän jälkeen vertikaalisten rakenneosien, eli seinien, nostojen ja pilarien tapauksessa algoritmi pursottaa viivat ja pisteet määriteltyjen korkojen mukaisesti oikean korkeiksi tasoiksi ja viivoiksi. Horisontaalisten rakenneosien, eli laattojen ja palkkien tapauksessa algoritmi puolestaan luo rakenteen tyyppin mukaan joko ääriviivojen rajaaman tason tai rakenteen keskilinjaa kuvaavan viivan.

Myös ovien ja luukkujen vaatimat aukot luodaan Rhinoon aukon kokoisina tasoina samalla periaatteella, kuin seinätkin. Näin aukot saadaan luotua RFEM:iin kyseisten tasojen reunaviivojen avulla. 3D-geometrian luonti edellä kuvatulla tavalla onnistuu käyttäen Grasshopperiin sisäänrakennettuja ohjelmakomponentteja. Luvussa esimerkkinä käytettävän väestönsuojan lähtötietopiirustuksesta (kuvio 19) Rhinoon luotu 3D-malli on esitetty kuviossa 20.





KUVIO 20. Kuviossa 19 esitetystä keskilinjaesityksestä luotu 3D-malli Rhinossa

Varsinaisen 3D-geometrian luonnin lisäksi tämä algoritmin osio sisältää logiikkaa, joka pyrkii korjaamaan manuaalisesti piirrettyssä lähtötietogeometriassa mahdollisesti esiintyviä epätarkkuuksia, jotka saattaisivat aiheuttaa ongelmia laskentamallin luonnissa ja laskennassa. Piirustustarkkuuden aiheuttamille ongelmille alttiita kohtia ovat esimerkiksi seinien päiden väliset liitokset, väliseinien liitokset ympärysseiniin sekä aukkoja kuvaavien viivojen osuminen seinää esittävän viivan päälle. Lisäksi kaksikerroksisten suojien tapauksessa kerrosten kohdentaminen täsmällisesti toistensa päälle on olennaisen tärkeää toimivan laskentamallin aikaansaamiseksi. Piirtotarkkuuden korjaamiseen työssä on hyödynnetty Hirvikosken diplomityössään (2019) esittämiä menetelmiä.

### 5.3 Laskentamallin luonti

Kun 3D-geometria on saatu luotua Rhinoon oikein, siirtää algoritmin seuraava osio sen osakokonaisuuksina RFEM-laskentaohjelmaan. Luodun 3D-geometrian

ohella RFEM:iin syötetään algoritmin avulla kullekin rakenteelle lähtötietotaulukossa annetut materiaalit ja rakennepaksuudet sekä rakenteiden tuennat ja mahdolliset vapautukset rakenteiden välisissä liitoksissa. Lisäksi algoritmin avulla malliin luodaan rakenteisiin kohdistuvat kuormat, kuormitustapaukset ja kuormitusyhdistelmät.

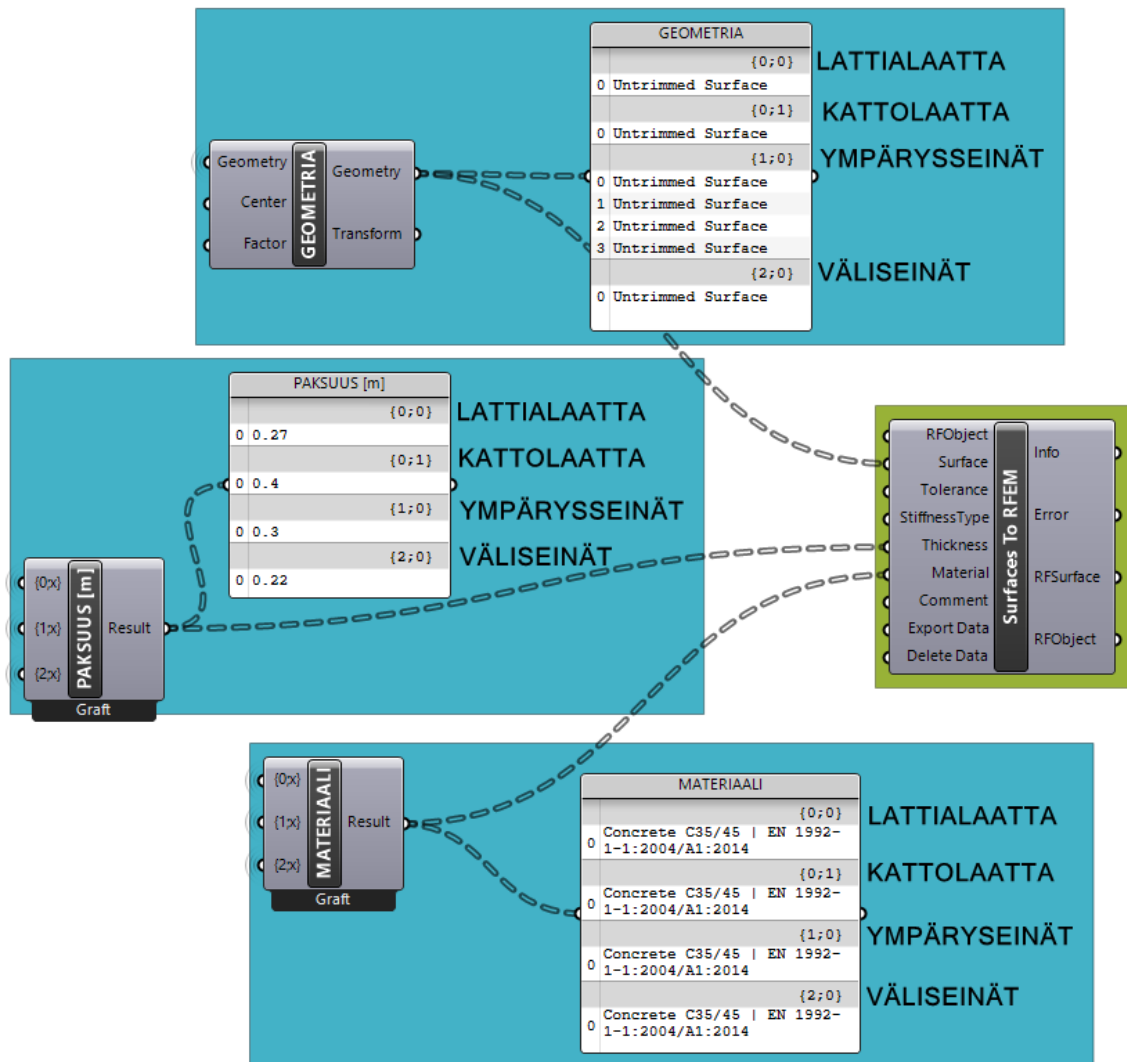
Grasshopperin ja RFEM:n väliseen tiedonsiirtoon on olemassa useita lisäosia. Yksi niistä on Dlubalin oma työkalukokonaisuus, joka kuitenkin on vielä hyvinkin alkeellinen ja tähän käyttötarkoitukseen riittämätön. Dlubalin kehittämien komponenttien lisäksi Food4Rhino-sivuston kautta yleisessä jaossa on Diego Apellánizin luoma Parametric FEM Toolbox -työkalukokonaisuus, joka on huomattavasti monipuolisempi ja soveltuisi melko hyvin kuvatussa algoritmista käytettäväksi. Tässä työssä päädyttiin kuitenkin käyttämään A-Insinöörit Suunnittelu Oy:ssä kehitetyn GH-RFEMLink -lisäosan komponentteja, joiden avulla tiedonsiirto ohjelmien välillä onnistuu jouhevasti. Lisäksi näiden komponenttien päivitys ja kehitys onnistuu tarvittaessa helpommin, verrattuna ulkopuolisten tahojen tarjoamiin komponentteihin.

### **5.3.1 Geometria ja tuennat**

Ennen geometrian siirtoa RFEM:iin, määritellään kullekin Rhinoon luodulle tasomaiselle ja viivamaiselle rakenteelle tieto rakenteen materiaalista sekä rakenteen paksuudesta tai poikkileikkauksesta. Nämä tiedot on annettu laattamaisten rakenteiden ja palkkien osalta algoritmin lähtötietona käytettävässä lähtötietotaulukossa ja pilarien osalta lähtötietona käytettävissä tasokuvissa.

RFEM-mallin luontia varten materiaali-, rakennepaksuus- ja poikkileikkaustiedot on järjestettävä muotoon, jossa on yksiselitteisen selvää, mikä tieto kuuluu millekin rakenneosalle. Käytännössä tämä tapahtuu lajittelemalla data Grasshopperille ominaisiin puurakenteisiin siten, että rakenteiden geometriat ja niille kuuluvat ominaisuudet on jaettu omissa datapuissaan samoille oksille. Tällöin viettäessä tietoa eteenpäin osaavat ohjelmakomponentit poimia kustakin lähtötietona saamastaan listasta samat oksat ja käsitellä niitä omina osakokonaisuuksinaan. Grasshopperin datarakennetta on yleisellä tasolla käsitelty tarkemmin tämän

työn luvussa 4.1. Esimerkki erään yksinkertaisen väestönsuojan geometrian, materiaalitietojen ja rakennepaksuuksien jakamisesta datapuun oksille on esitetty kuviossa 21.



KUVIO 21. Esimerkki RFEM:iin syötettävien tietojen datarakenteesta

Kun rakenteiden geometria on siirretty oikein RFEM:iin, on rakenteille luotava oikeanlaiset tuennat. Kuten aiemmin luvussa 5.2 todettiin, RFEM:ssä väestönsuojarakenteiden geometriaa käsitellään pisteinä, viivoina ja viivojen rajaamina kuorina. Tukien luontia varten määritellään Grasshopperin avulla näistä geometrisista osista ne viivat ja pisteet joihin tuet halutaan asettaa. Näitä viivoja ja pisteitä ovat luonnollisesti alimpien seinien alareunaviivat sekä pilarien alapäitä kuvaavat pisteet. Kun nämä pisteet ja viivat on saatu poimittua, määritellään niille halutut tuennat. Väestönsuojissa seinien tuenta perustuksiin on määritelty niveliseksi, joten se voidaan algoritmissa asettaa lukituksi parametriksi. Pilarien päiden tuennat

ja liitosten vapausasteet sen sijaan voivat vaihdella ja ne määritelläänkin tarvittaessa lähtötietotaulukossa kullekin pilarille erikseen.

### **5.3.2 Kuormien määrittely ja kuormitusyhdistelmät**

Geometria- ja materiaalitietojen sekä tuentojen lisäksi laskentamalliin luodaan rakenteisiin vaikuttavat kuormat, sekä näistä muodostuvat kuormitusyhdistelmät. Väestönsuojarakenteisiin kohdistuvat kuormat voidaan jakaa tavanomaisiin kuormiin, eli omiin painoihin, pysyviin kuormiin ja hyötykuormiin, sekä asevaikutuksesta aiheutuviin kuormiin, joita ovat paine-, takaisinheilahdus-, tärähdys- ja sortumakuormat. Tarkemmin väestönsuojarakenteisiin kohdistuvia kuormia ja kuormitusyhdistelmät on käsitelty luvussa 2.5.1.

Tavanomaisia kuormia varten RFEM-laskentaohjelmaan luodaan vähintään kolme kuormitustapausta, joista yksi on rakenteiden omille painoille, toinen muille pysyville kuormille ja kolmas hyötykuormille. Väestönsuojarakenteiden omia painoja varten luotavalle kuormitustapaukselle RFEM osaa syötettyjen geometria- ja materiaalitietojen perusteella laskea ja lisätä kunkin rakenteen oman painon. Muiden pysyvien kuormien, kuten väestönsuojan holvin yläpuolisten rakenteiden aiheuttamien ja välittämien kuormien sekä hyötykuormien suuruudet puolestaan määritellään lähtötietotaulukossa ja kuormat lisätään alkeiskuormina kuorman tyyppin mukaisille kuormitustapauksille. Edellä mainittujen kuormien lisäksi muut väestönsuojarakenteisiin mahdollisesti vaikuttavat tavanomaiset kuormat, kuten maanpaine luodaan niin ikään laskentamalliin kuorman tyyppin mukaisille kuormitustapauksille.

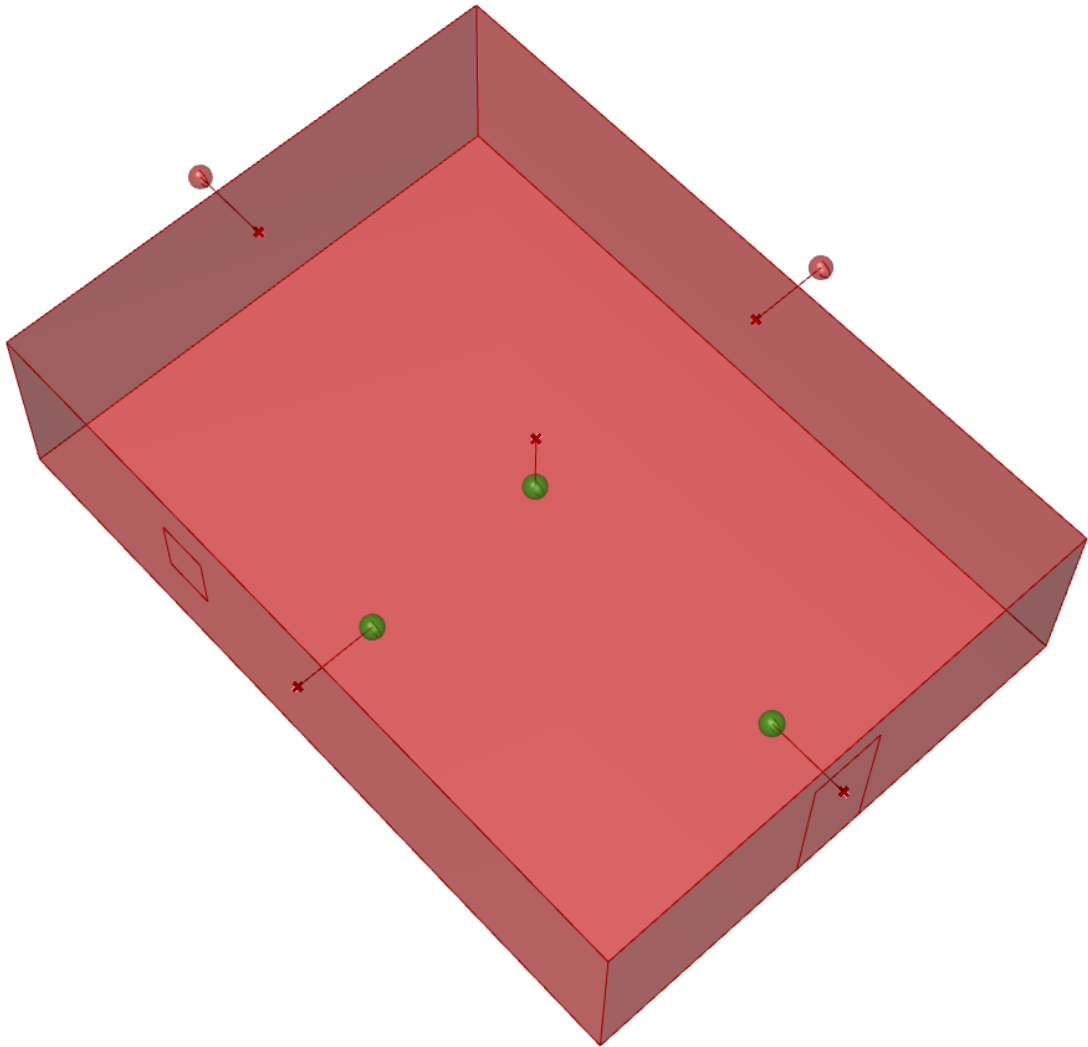
Tasaisten neliökuormien lisäksi väestönsuojarakenteisiin voi kattolaatan yläpuolisten seinämäiset ja pilarimaisten rakenteiden vaikutuksesta syntyä viivamaisia ja pistemäisiä kuormia. Näitä väestönsuojan yläpuolisia tavanomaisia kuormia varten lähtötietotasopiirustukseen piirretään omille kuvatasoilleen viivamaisten ja pistemäisten kuormien vaikutusalueet. Lähtötietotaulukkoon puolestaan kerätään tasokuvaan piirretyille viivoille ja pisteille kohdistettavien kuormien suuruudet ja tyypit. Näin kuormien vaikutusalueita kuvaavat viivat ja pisteet sekä niillä

vaikuttavat kuormat saadaan siirrettyä Grasshopperin kautta RFEM-laskentaohjelmaan laskentaa varten. Myös nämä viivamaiset ja pistemäiset kuormat lisätään kuorman tyyppin mukaisille kuormitustapauksille.

Asevaikutuksista aiheutuvien kuormien suuruuden määrittely on hyvin yksinkertaista, sillä S1-luokan väestönsuojille painekuorman suuruus on aina  $100 \text{ kN/m}^2$ , takaisinheilahduskuorman suuruus yksi kolmasosa painekuorman suuruudesta ja tärähdyskuorman vähintään kaksi kertaa väestönsuojarakenteen painon suuruisen (katso luku 2.5.1). Näin ollen kyseisten kuormien suuruuden määrittely voidaan automatisoida täysin. Edellä mainittujen kuormien vaikutussuunnat ovat painekuormilla ulkoa sisäänpäin, takaisinheilahduskuormilla sisältä ulospäin ja tärähdyskuormalla vaikutussuunta on mielivaltaisen.

Painekuormien vaikutussuunnan määrittelemiseksi on algoritmiin luotava loogiikka, jonka avulla saadaan selvitettyä, miltä puolelta painekuorma tulee kullekin rakenteelle kohdistaa, sillä Rhinon mallinnetut seinät eivät suoraan tiedä, kumpi puoli seinästä on suojan sisäpuolella ja kumpi ulkopuolella. Tässä työssä rakenteille kohdistuvien painekuormien suuntien selvittämiseen käyttäen seiniä ja holveja kuvaavien kuorten normaalivektoreita sekä väestönsuojan ylimmän ja alimman tason ja suojan ympäryseinien rajaamaa geometrista aluetta.

Rhinosssa kutakin seinää kuvaavalla lähtötietoviivalla on alkupiste ja loppupiste, jotka määräytyvät sen mukaan, missä suunnassa rakennetta kuvaavat viivat on 2D-lähtötietokuvaan piirretty. Kun lähtötietoviivasta luodaan Rhinosssa kuori, voidaan kuorelle määrittää keskipiste sekä kyseistä kuorta vastaan kohtisuora vektorimuotoinen normaali. Se kummalle puolelle kuorta normaali osoittaa riippuu siitä, kumpi tason lähtötietona käytetyn viivan päätepisteistä on alkupiste ja kumpi loppupiste. Kun kaikille halutuille kuorille on saatu määriteltyä normaalit ja keskipisteet, luodaan Rhinon kunkin kuoren keskipistettä normaalivektorin suuntaan siirtämällä uudet pisteet. Tämän jälkeen tutkitaan, onko luotu piste väestönsuojan ympärysrakenteiden sisä- vai ulkopuolella ja sen mukaan määräytyy rakenteelle kohtisuoraan kohdistettavan painekuorman suunta. Periaatetta on havainnollistettu kuviossa 22.



KUVIO 22. Paine kuormien suunnan määrittämisen periaate

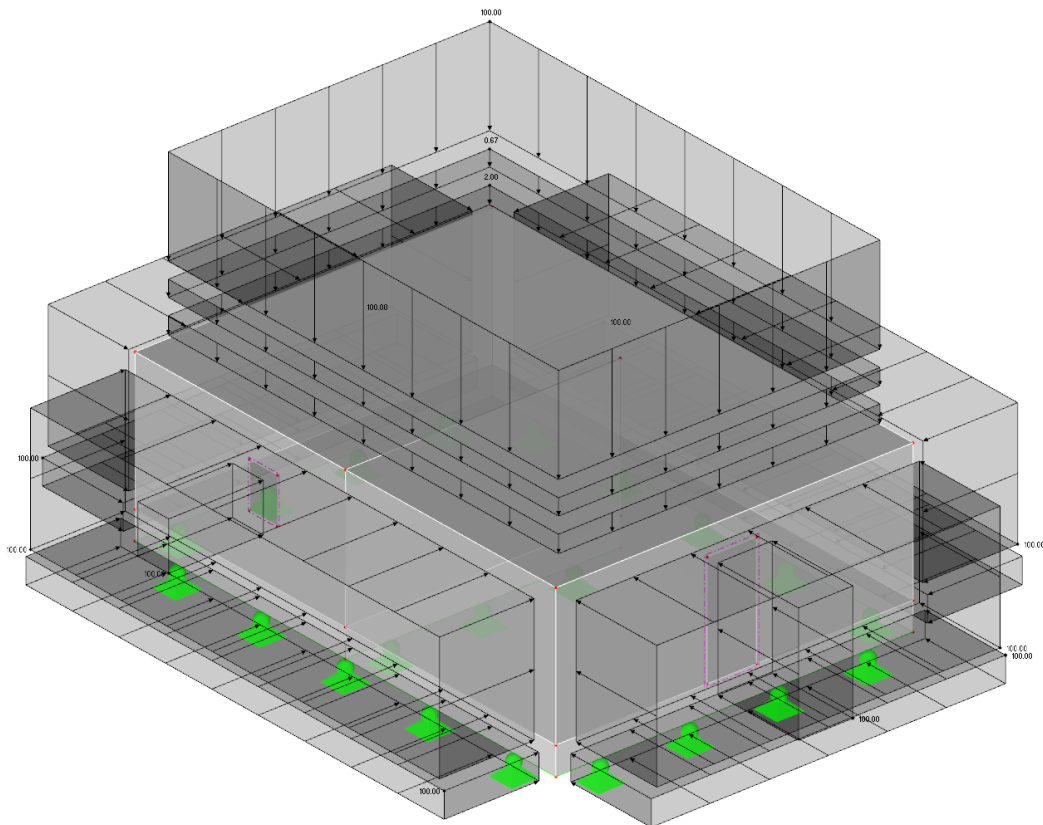
Kuviossa 22 on esitetty luvussa esimerkkinä käytettävän väestönsuojan paineseinät ja painekuormitettu kattolaatta sekä näiden keskipisteet ja keskipisteistä rakennetta kuvaavan tason normaalin suuntaan siirretyt pisteet. Lisäksi kuviossa on esitetty suojan ylimmän ja alimman tason sekä paineseinien rajaama kolmiulotteinen alue. Normaalin suuntaan siirretyistä pisteistä on esitetty kuviossa vihreillä palloilla ne, jotka ovat suojan ympärysrakenteiden rajaaman alueen sisäpuolella ja punaisilla palloilla ne, jotka ulkopuolella. Punaiset rastit kuvaavat kuorten keskipisteitä. Tämän testin perusteella saadun tiedon mukaisesti Grasshopperissa voidaan määrittää kahdesta kutakin tasoa vastaan kohtisuorasta suunnasta painekuormituksen suunnan kannalta oikea.

Väestönsuojan ympärysseinille asevaikutuksesta aiheutuvat paine- ja takaisinheilaudus- ja tärähdyskuormat luodaan laskentamalliin siten, että samalla sivulla

sijaitseville yhdensuuntaisille seinille kohdistuvat saman tyyppiset kuormat lisätään samalle kuormitustapaukselle. Myös kaikille väestönsuojan painekuormiteuille holville luodaan omat kuormitustapauksensa kutakin kuormatyyppiä varten.

Kuormien ja kuormitustapausten lisäksi Grasshopperissa määritellään laskentaa varten tarvittavat paine- ja takaisinheilahduskuormia sisältävät kuormitusyhdistelmät (kts. luku 2.5.1), jotka siirretään RFEMLink-komponenttien avulla RFEM:iin. Normaalit murto- ja käyttörajatilamitoituksen mukaiset kuormitusyhdistelmät RFEM osaa luoda itse ohjelman laskenta-asetuksissa tehtyihin valintoihin perustuen.

Kun kaikki haluttu data on jaettu oikeaan rakenteeseen, syötetään se RFEMLink-komponenteille, jotka siirtävät datan RFEM-laskentaohjelmaan. Tämän jälkeen voidaan suorittaa laskenta ja siirtyä tulosten käsittelyyn ja analysointiin. Luvussa tutkittavasta esimerkkipainekuormiteistä algoritmin avulla luotu RFEM-laskentamalli on esitetty kuviossa 23.



KUVIO 23. Esimerkipainekuormiteistä algoritmin avulla luotu RFEM-laskentamalli

## 5.4 Mitoitus ja raportointi

Kun RFEM-laskenta on suoritettu, tuodaan laskennan tulokset takaisin Grasshopperiin A-Insinöörit Suunnittelu Oy:n kehittämien RFEMResults-komponenttien avulla. Komponenttien avulla Grasshopperiin ja sitä kautta Rhinoon saadaan tuotua muun muassa laskentamallin geometria, FEM-laskennassa käytetyn elementtiverkon solmupisteet sekä lasketut rasitukset kussakin solmupisteessä.

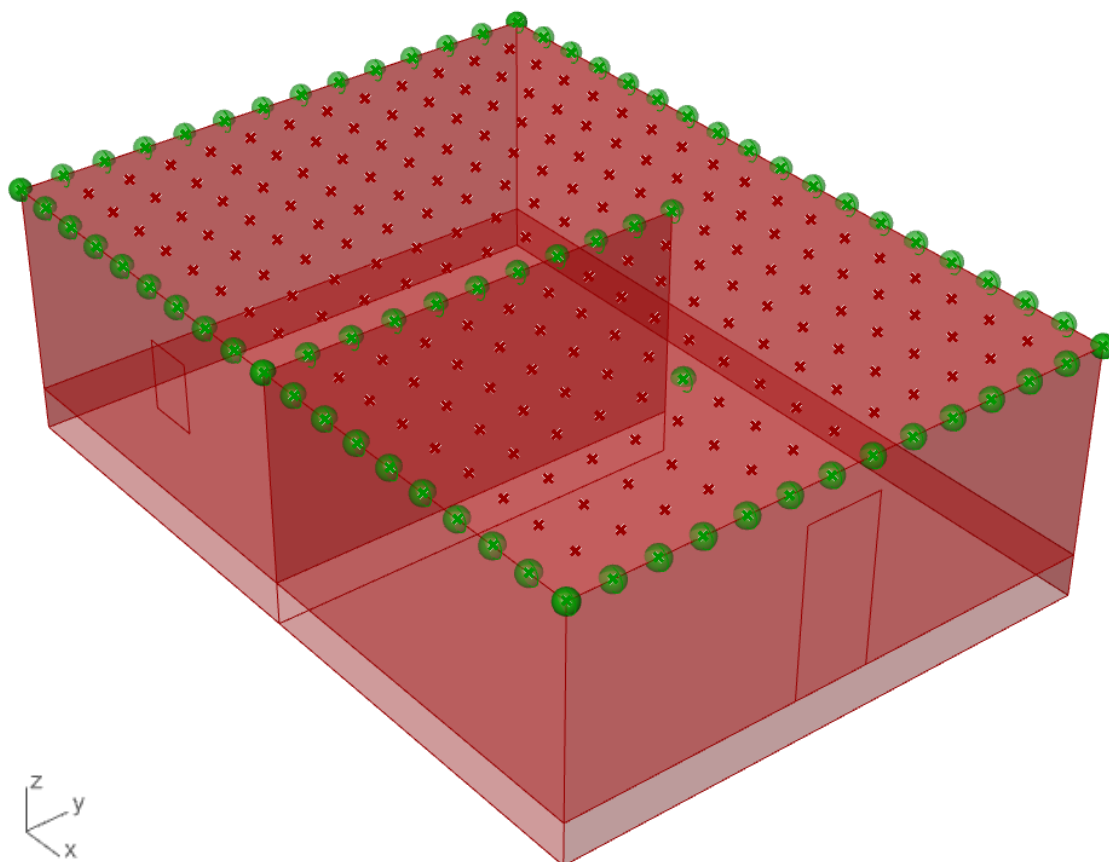
RFEM:stä tuodut rasitustiedot ja elementtiverkon solmupisteet jaetaan omissa datalistoiissaan omille oksilleen sen mukaan mille rakenneosalle ne kuuluvat. Kun halutut tiedot on tuotu ja järjestetty Grasshopperiin, poimitaan datajoukosta kullekin rasitustyypille ominaisella tavalla oikeat elementtiverkon pisteet ja pisteissä vaikuttavat rasitukset. Taivutusmitoitusta varten poimitaan momentin paikalliset ääriarvot myöhemmin tässä luvussa esitettävällä periaatteella, leikkausmitoitusta varten tukialueiden läheisyydestä leikkausrasitukset elementtiverkon solmupisteistä, jotka sijaitsevat lähimpänä laatan tehollisen korkeuden etäisyydellä tuen reunasta piirrettyä viivaa ja lävistysmitoituksessa leikkausrasitukset pistemäisten tukien, kuten pilarien, kohdalta sekä laatan sisällä päättyvien seinien päiden kohdalta. Tämän jälkeen rakenteille suoritetaan valittujen rasitusten perusteella eurokoodin 2 mukainen mitoitus.

Eurokoodin 2 mukainen mitoitus tehdään tässä työssä käyttäen Grasshopperiin Python-ohjelmointikielellä luotuja mitoituskomponentteja. Kaikille suojan teräsbetonirakenteille tehdään komponenttien avulla taivutus-, leikkaus- ja lävistysmitoitusta, mutta tässä luvussa algoritmin mitoitusosion yleiset toimintaperiaatteet esitellään väestönsuojan holvin taivutusmitoituksen avulla.

Taivutusmitoitusta varten Grasshopperiin tuodusta datajoukosta valitaan siis kullekin rakenneosalle taivutusmitoituksen kannalta olennaiset paikalliset ääriarvot. Tässä työssä taivutusmitoitusta varten poimitaan holvista elementtiverkon solmupisteet ja näitä vastaavat taivutusmomentin arvot jokaisen ympärysseinän linjalta ja jokaisen kantavan väliseinän kohdalta sekä koko holvin maksimikenttämomentin kohdalta molempiin pääsuuntiin. Ympärysseinistä valitaan samalla periaatteella momentin maksimiarvot nurkkien, väliseinien ja holvien muodostamien tukien kohdalla sekä suurimpien kenttämomentin kohdalla. Kuviossa 24 on vihreillä

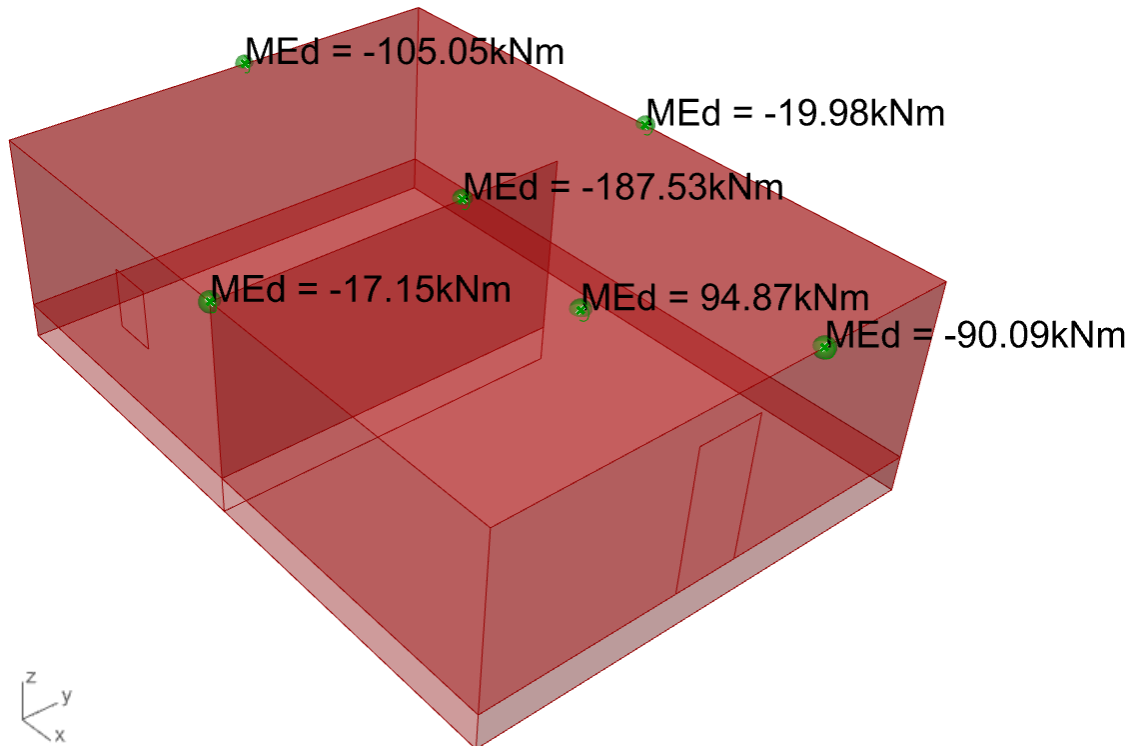


palloilla esitetty luvussa esimerkkinä käytettävän väestönsuojan holvista edellä mainitulla periaatteella poimitut elementtiverkon solmupisteet. Väestönsuojan holvin elementtiverkon muut solmupisteet on esitetty kuviossa punaisilla rasteilla.



KUVIO 24. Elementtiverkosta valittavat solmupisteet

Kuvion 24 mukaisesti valituista solmupisteistä valitaan tämän jälkeen kussakin tapauksessa molempiin pääsuuntiin pisteet, joissa taivutusmomentin arvo on suurin. Kuviossa 25 on esitetty tällä periaatteella poimitut väestönsuojan holvin x-akselin suuntaiset maksimimomentit ja elementtiverkon pisteet, joissa ne vaikuttavat.



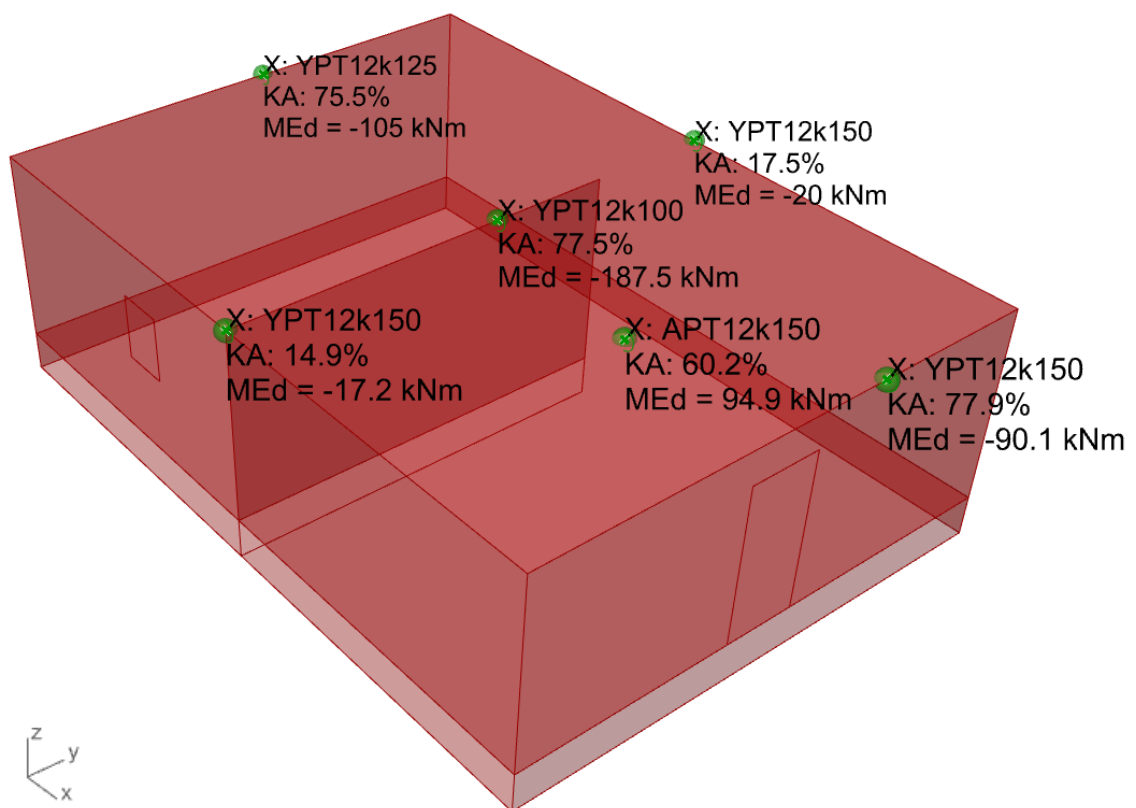
KUVIO 25. Momentin paikalliset ääriarvot x-akselin suunnassa väestönsuojan holvissa

Kun tarvittavat taivutusmomentin paikalliset ääriarvot on saatu selvitettyä ja valittua koko Grasshopperiin tuodusta datajoukosta, syötetään momentit ja muut tarvittavat lähtötiedot, kuten rakenteiden paksuudet, materiaalit ja suojabetonietäisyydet mitoituskomponentille. Mitoituskomponentista saadaan ulos kunkin momentin vaatima raudoitusmäärä ja sen mukainen käyttöaste.

Mitoituskomponentti on ohjelmoitu määrittelemään raudoitukset niin, että rauditusjako on jaollinen 25 mm ja raudoituksella saavutettava käyttöaste taivutusmomentin suhteen on maksimissaan 80%. Käytettävän raudoitustangon koon komponentti määrittelee siten, että mikäli mitoituksessa alkuarvauksena käytettävillä 12 mm paksuilla harjateräksillä vaadittu rauditusjako olisi alle 50 mm, vaihtaa komponentti käytettävät raudoitteet 16 mm paksuisiksi harjateräksiksi ja vastaavasti mikäli tankojako olisi 16 mm teräksillä alle 50 mm vaihtaa komponentti harjateräkset 20 mm paksuisiksi.

Kuviossa 26 on esitetty kuviossa 25 esitettyjen taivutusmomenttien vaatimat raudoitukset väestönsuojan holville x-akselin suunnassa. Raudoitukset on merkitty

momentin paikallisten ääriarvojen vaikutuspisteisiin. Kuvion 26 merkinnöissä ensimmäinen kirjain tarkoittaa raudoituksen suuntaa valitussa koordinaatistossa, YP yläpinnan terästä, AP alapinnan terästä, T:n jälkeinen numero raudoitustangon halkaisijaa ja k:n jälkeinen numero tankojakoa. Määritellyn raudoituksen lisäksi merkinnän toisella rivillä on ilmoitettu esitettyllä raudoituksella saavutettava käyttöaste taivutusmomentin suhteen ja alimmalla rivillä pisteessä vaikuttavan taivutusmomentin arvo. Holvin ja paineseinien välisissä nurkissa mitoituskomponentti käyttää mitoitukseen ohuemman rakenteen paksuutta. Näin rauditus saadaan jatkettua samalla tankokoolla ja -jaolla nurkan yli.



KUVIO 26. Kuviossa 25 esitettyjen momenttien vaatimat raudoitukset ja niiden käyttöasteet x-akselin suunnassa

Kun vaadittavat raudoitukset on saatu määriteltyä, raportoidaan saadut tulokset. Tämän opinnäytetyön puitteissa tulosten raportointi toteutetaan tulostamalla Rhinosta dokumentti, jossa on visuaalisesti esitetty kaikille rakenteille niihin kohdistuvien taivutus- leikkaus- ja lävistysrasitusten paikalliset ääriarvot. Lisäksi raportissa esitetään kullekin rakenteelle mitoituksessa määritellyt paikallisten maksimirasitusten mukaiset rauditusmäärät ja näiden mukaiset käyttöasteet. Tulosten esitysmuoto raportissa vastaa kuvioissa 25 ja 26 esitettyä tyyliä.

## 6 ALGORITMIN TOIMIVUUDEN ARVIOINTI

Tässä luvussa arvioidaan luvussa 5 esitetyn algoritmin toimivuutta teknisen toimivuuden ja käyttökelpoisuuden näkökulmasta. Algoritmin teknisen toimivuuden arvioinnissa keskitytään tämän työn yhteydessä kahteen päätavoitteeseen, jotka ovat:

- Väestönsuojan laskentamallin luonti algoritmiavusteisesti annetuista lähtötiedosta.
- Laskentamallista saatujen rasiusten analysointi, rasiusten mukaisten raudoitusten määrittely sekä tulosten raportointi.

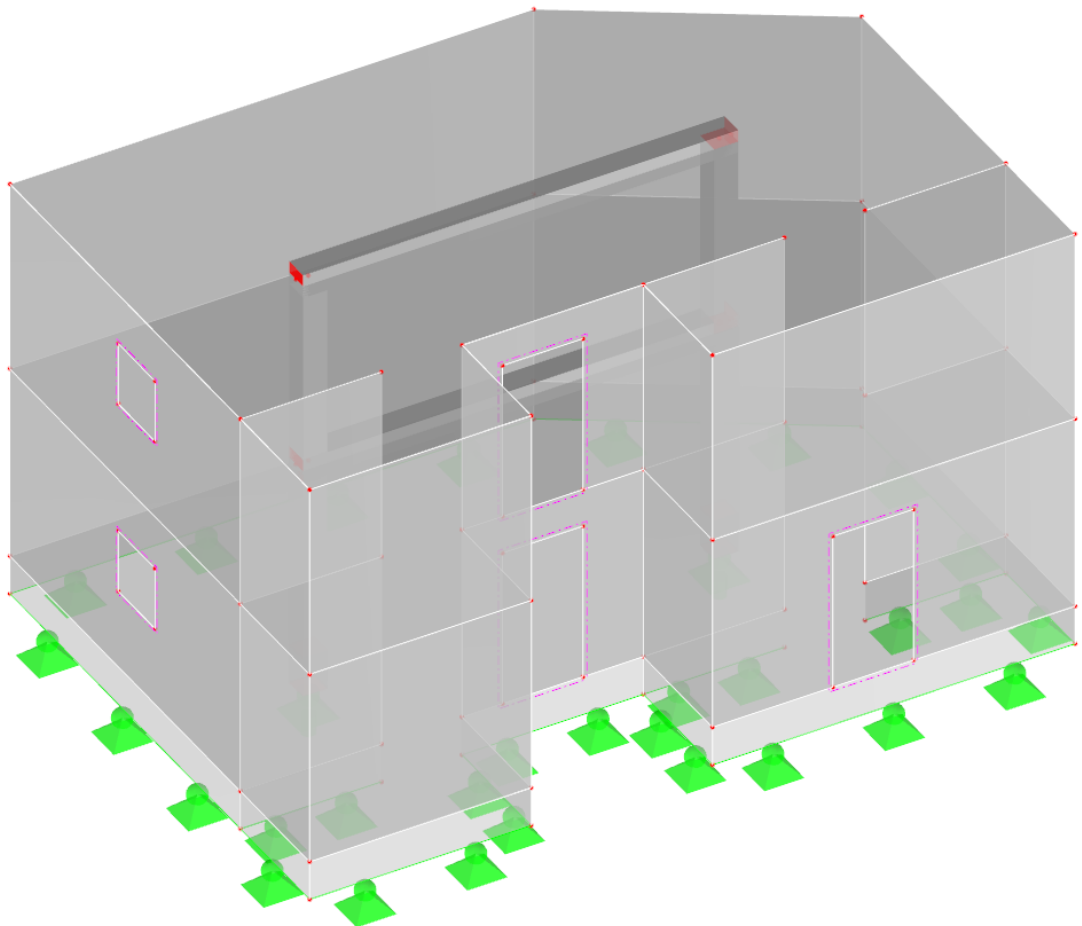
Teknisen toimivuuden lisäksi luvussa arvioidaan algoritmia sen rakennesuunnitteluprosessiin luoman lisäarvon näkökulmasta ja pohditaan sen käyttökelpoisuutta jokapäiväisessä suunnittelutyössä. Lisäksi luvussa pohditaan mahdollisia jatkokehitys- ja tutkimuskohteita.

### 6.1 Laskentamallin luonti

Väestönsuojan 3D-geometrian luonti Rhinoon lähtötietojen perusteella oli logiikaltaan algoritmin helpon toteutettava osakokonaisuus. Väestönsuojan tai väestönsuojista koostuvan suojaryhmän seinien, holvien, pilarien, palkkien ja aukkojen geometrian luomiseen vaadittava logiikka on melko yksinkertainen, mutta toimiva. Lisäksi koska jokaisen rakenneosan 3D-geometrian luontia varten on algoritmissa oma segmenttinsä, on tämän algoritmin osan päivittäminen ja jatkokehittäminen tarvittaessa myöhemmin helppoa.

Kuormien luonnin osalta eniten haasteita aiheutti seiniin kohdistuvien painekuormien suunnan määrittely siten, että lähtötietopiirustuksen luomisessa käytettävää viivojen piirtosuuntaa ei jouduta ennalta määräämään ja siten hankaloittamaan algoritmin käyttöä suunnittelutyökaluna. Kuormien suunnan määrittely saatiin toimimaan luvussa 5.3.2 esitetyllä tavalla tason normaalien avulla. Rhinoon luotujen rakenteiden, tuentojen ja kuormitustietojen siirtäminen RFEM:iin rakenteiden todelliset paksuudet ja materiaaliominaisuudet huomioiden vaati huolellista datarakenteen muotoilua, mutta onnistui lopulta hyvin.

Kaiken kaikkiaan laskentamallin luominen algoritmin avulla saatiin työssä esitetyillä periaatteilla toimimaan varsin hyvin. Monipuoliset geometriat ja kuormat saatiin luotua malliin luotettavasti. Ainoastaan laattamaisia rakenteita sisältävissä väestönsuojissa algoritmin avulla luodun laskentamallin hyödyntäminen sellaiseenaan algoritmin mitoitusosion lähtötietona onnistuu työn yhteydessä tehdyn testauksen perusteella hyvin. Pilareita ja palkkeja sisältävät laskentamallit sen sijaan saattavat vaatia vielä toistaiseksi mallin manuaalista muokkausta ja hienosäätöä luotettavien laskentatulosten saavuttamiseksi. Esimerkiksi palkin ja laatan välisen yhteistoiminnan todenmukainen mallintaminen vaatii suunnittelijalta tapauskohtaisia valintoja, joiden perusteet rajautuvat tämän tuon ulkopuolelle. Kuviossa 27 on esitetty eräs monimutkaisimmista algoritmin testauksen aikana luoduista RFEM-laskentamalleista.



KUVIO 27. Päällekkäin sijaitsevista väestönsuojista koostuvan suojaryhmän laskentamalli

## 6.2 Mitoitus ja raportointi

Mitoituksen ja raportoinnin osalta tavoitteena oli päästä tilanteeseen, jossa väestönsuojan kaikille rakenteille on algoritmin avulla tehty taivutus-, leikkaus- ja lävistysmitoitus ja määritelty rasiusten vaatimat pääraudoitukset. Lisäksi saaduista tuloksista oli tavoitteena luoda selkeä ja helposti tulkittava raportti. Työn edetessä laskentamallin laskentatulosten analysointiin, rakenteiden mitoitukseen ja tulosten raportointi keskittyvä kokonaisuus päätettiin erottaa muusta algoritmista omaksi autonomiseksi kokonaisuudekseen. Näin luotiin mahdollisuus hyödyntää mitoitus- ja raportointialgoritmia myös laskentamalleihin, joita ei ole alun perin toteutettu työssä esitellyn algoritmin alkuosan avulla.

Oikeiden rasiusten poimiminen laskentamallista Grasshopperiin tuotujen tietojen joukosta onnistui pääsääntöisesti hyvin luvussa 5.4 esitettyjen periaatteiden mukaan. Jonkin verran ongelmia rasiusten poiminnassa aiheuttivat kuitenkin FEM-laskennalle tyypillisten singulariteetti-ongelmien aiheuttamat jännityspiikit (katso luku 3.3.2). Toistaiseksi tämän algoritmin tapauksessa paras ja varmin tapa käsitellä singulariteettien aiheuttamia ongelmia, on tunnistaa potentiaaliset paikat singulariteettien syntymiselle ja tuloksia tarkastaessa arvioida niiden oikeellisuutta vertaamalla yksittäistä tulosta koko tulosjoukkoon. Lisäksi Singulariteetti-ongelmien aiheuttamat virheet laskennassa ovat varmalla puolella rakenteen kestävyyskannalta, joten ne eivät vaaranna väestönsuoja rakenteellista kestävyttä.

Singulariteetti-ongelmien lisäksi elementtiverkon tiheydellä on etenkin leikkausrasituksia poimittaessa vaikutusta rasiusten suuruuteen, sillä leikkausrasituksia valittaessa poimitaan elementtiverkosta solmupisteet, jotka sijaitsevat lähimpänä laatan tehollisen korkeuden etäisyydelle tuen reunasta piirrettyä viiva. Tällöin poimittavan rasiuksen todellinen etäisyys tuesta vaihtelee riippuen elementtiverkon tiheydestä. Tämä ongelma saadaan kuitenkin ratkaistua määrittelemällä elementtiverkon elementtien koko siten, että elementtiverkon solmupisteet osuvat tuen läheisyydessä juuri laatan tehollisen korkeuden etäisyydelle tuen reunasta.

Varsinaisten mitoituskomponenttien luonti Python-ohjelmointikielellä sujui hyvin. Etuna omien mitoituskomponenttien luonnissa verrattuna esimerkiksi RFEM:n

mitoitusmoduuleihin tai valmiisiin Excel- ja Mathcad-laskentapohjiin on se, että omat mitoituskomponentit saatiin odotetulla tavalla huomioimaan suoraan ainoastaan väestönsuojarakenteille ominaiset raudoitusvaatimukset ja tavanomaisesta murtorajatilamitoituksesta poikkeavat säännöt.

Tuloksista saatiin algoritmin avulla tuotettua dokumentti, jossa kaikki algoritmin avulla saadut tulokset on esitetty. Toistaiseksi raporttiin esitys muoto on hyvin pelkistetty ja raportti sisältää vain lopputulokset. Esimerkiksi haluttujen välivähiäiden esittäminen raportissa ei ole toistaiseksi mahdollista ja raportin muoto ja tyyli kaipaavat kehittämistä.

### **6.3 Käyttökelpoisuus**

Algoritmin soveltuvuuden ja käyttökelpoisuuden arviointi osana jokapäiväistä suunnittelutyötä perustuu toistaiseksi melko suppeaan, algoritmin luonnin yhteydessä tehtyyn testaukseen. Ennen algoritmin ottamista laajempaan käyttöön vaatisi se vielä laajempaa testausta ja luotettavuuden arviointia, mutta suppean testauksen perusteella tulokset vaikuttavat lupaavilta.

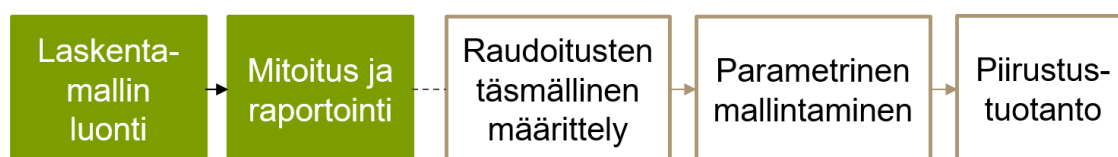
Yksittäisen suunnittelijan näkökulmasta työssä kuvatun algoritmiavusteisen työkalun hyödyllisyys ja käyttökelpoisuus riippuu varmasti suunnittelijan tottumuksista. Työkalun käyttö on pyritty tekemään mahdollisimman yksinkertaiseksi luomatta työkalulle kuitenkaan erillistä käyttöliittymää. Toistaiseksi algoritmin hyödyntäminen vaatii siis lähtötietojen kokoamista algoritmia varten luotuun kansiorakenteeseen, visuaalisen algoritmin avaamista Grasshopperissa ja sen suorittamista algoritmiin luodun pääkytkimen avulla. Mikäli algoritmiavusteinen suunnittelu ja Grasshopperin käyttö ovat siis edes perusteiden tasolla hallussa, on työkalun avulla mahdollista tehostaa väestönsuojan suunnitteluprosessia. Seuraava kehitysaskel työkalun käytettävyyden helpottamiseksi olisi luoda erillinen käyttöliittymä, jonka avulla työkalua voisivat helposti käyttää myös suunnittelijat, joille Grasshopperin käyttö ei ole tuttua.

Kuten työn luvussa 3.3 esitettiin, yksinkertaisenkin väestönsuojan laskentamallin luontiin on useita eri tapoja ja FEM-laskennan tulos voi vaihdella mallinnustavan ja laskenta-asetusten mukaan. Työssä kuvatun algoritmiavusteisen prosessin

avulla tätä laskentamalleissa esiintyvää hajontaa on mahdollista saada vähennettyä, sillä algoritmi luo laskentamallin aina samoja tarkkaan määriteltyjä periaatteita noudattaen. Äärimmäisen tärkeää on kuitenkin muistaa, että algoritmivusteisen suunnittelun hyödyntäminen ei vähennä lainkaan suunnittelijan vastuuta laskentamallin, laskennan tulosten tai niiden perusteella luotavien suunnitelmien oikeellisuudesta. Algoritmi suorittaa ainoastaan täsmälleen ne toimenpiteet, jotka se on ohjelmoitu suorittamaan. Suunnittelijan vastuulla on siis syöttää algoritmille oikeat lähtötiedot oikeassa muodossa ja tarkastaa laskentamalli sekä laskennan tulos ja arvioida kriittisesti tulosten oikeellisuutta aivan samaan tapaan, kuin perinteisen suunnittelunkin yhteydessä. Algoritmivusteinen suunnittelun tarkoitus ei ole korvata rakennesuunnittelijaa, vaan vapauttaa suunnittelijan aikaa mekaanisen työn tekemisestä rakennesuunnittelun laadun kannalta olennaisempiin tehtäviin, joiden avulla saadaan tuotettua lisäarvoa asiakkaalle.

#### 6.4 Jatkotutkimus

Opinnäytetyö rajattiin koskemaan ainoastaan väestönsuojan rakennesuunnitteluprosessin alkuosaa. Rajaus tehtiin siten, että työssä luodun algoritmin avulla saadaan selvitettyä rakenteiden pääraudoitukset ja luotua selkeä raportti laskenta- ja mitoitus tuloksista. Näin ollen työn selkeä jatkokehityskohte olisi jatkaa väestönsuojan algoritmivusteista suunnitteluprosessia kuvion 28 mukaisesti raudoitusten täsmällisempään ja yksityiskohtaisempaan määrittelyyn, väestönsuojan ja sen raudoitusten parametriseen rakennemallintamiseen ja sitä kautta piirustustuotantoon saakka. Näin väestönsuojien rakennesuunnitteluun voitaisiin luoda algoritmisen suunnitteluprosessi, jonka avulla lähtötiedoista saataisiin luotua lähes valmis väestönsuojan rakennemalli ja raudoituspiirustukset. Samalla saataisiin myös entisestään parannettua algoritmivusteisen suunnitteluprosessin tehokkuutta verrattuna perinteisiin väestönsuojien suunnittelumenetelmiin.



KUVIO 28. Työssä kuvatun algoritmin jatkokehityskohteita



Edellä esitettyjä jatkokehitysideoita hyödyntäen saataisiin helposti tietoon myös tarkat väestönsuojan rakentamiseen vaadittavat betoni- ja teräsmäärät ja tätä kautta niiden materiaalikustannukset. Kun nämä määrä- ja kustannustiedot saataisiin algoritmiavusteisen prosessin tuloksena, olisi eri rakennepaksuuksien ja raudoitusratkaisuiden kustannusvaikutuksia erittäin helppo vertailla ja näin voitaisiin optimoida rakennepaksuuksia ja raudoituksia. Käytännössä pienehköjen ja geometrialtaan yksinkertaisten väestönsuojien rakennepaksuudet ja raudoitusmäärät määräytyvät lähes suoraan laeissa ja asetuksissa esitettyjen minimivaatimusten mukaan, joten niiden tapauksessa rakenteiden optimoinnilla ei saavutettaisi juuri mitään hyötyä. Toisaalta tällöinkin väestönsuojan materiaalikustannukset saataisiin selville nopeasti. Muodoltaan monimutkaisempien ja kooltaan suurempiin väestönsuojien tapauksessa, rakenteissa käytettävien materiaalien optimointi kustannusnäkökulmasta puolestaan voisi olla joissain yksittäisissä tapauksissa hyödyllistä.

Opinnäytetyön yhteydessä luodun algoritmin sisäisiä kehityskohteita on esitetty aiemmin tässä luvussa algoritmin toimivuuden arvioinnin yhteydessä. Olennaisimpia niistä ovat esimerkiksi monimutkaisempien rakennekokonaisuuksien laskennallisen käsittelyn kehittäminen, yksinkertaisemmän käyttöliittymän luominen työkalun hyödyntämisen helpottamiseksi sekä laskenta- ja mitoitustulosten raportointityylin selkeyttäminen ja raportin sisällön laajentaminen. Lisäksi koko algoritmiavusteinen prosessi voitaisiin laajentaa koskemaan myös S2-luokan paikallavalettuja teräsbetoniväestönsuojia, jolloin sen käyttömahdollisuudet laajenisivat entisestään.

## 7 YHTEENVETO

Kaiken kaikkiaan työn tulos oli hyvin odotetun kaltainen. Paikallavalettu väestönsuoja on kohteesta toiseen samankaltaisena toistuvana rakenteena toimiva sovelluskohde algoritmiavusteiselle suunnittelulle. Algoritmin luonti työn rajauksen puitteissa onnistui niin ikään hyvin, joskin algoritmi vaatii vielä laajempaa testausta ja jatkokehitystä esimerkiksi monimutkaisempien rakennekokonaisuuksien käsittelyn sekä raportointityylin osalta.

Paikallavaletun S1-luokan väestönsuojan suunnitteluprosessin parametrisoinnilla ei välttämättä saavuteta yksittäisen hankkeen näkökulmasta merkittävää ajallista säästöä. Työn tavoitteena oli kuitenkin tämän pienen osakokonaisuuden kautta kehittää algoritmiavusteisen suunnittelun menetelmiä ja algoritmiavusteista rakennesuunnitteluprosessia kohti tilannetta, jossa yhä suurempi osa mekaanisesta ja toisteisesta suunnittelutyöstä saadaan siirrettyä algoritmien suoritettavaksi. Yhdistämällä pieniin suunnittelukokonaisuuksiin käytettäviä moduuleja suuremmaksi algoritmiksi saadaan rakennesuunnitteluprosessia tehostettua moduuli moduulilta enemmän. Perinteistä kansansanontaa lainaten: *”pienistä pu-roista syntyy suuri joki”*.

Toisaalta ajallinen säästö ei ole ainoa lisäarvo, joka algoritmiavusteisella suunnitteluprosessilla väestönsuojien suunnittelun näkökulmasta saavutetaan. Ajallisen säästön lisäksi algoritmiavusteisen suunnittelun hyödyntäminen yhtenäistää laskentamallien luontitapaa väestönsuojien suunnittelussa ja helpottaa siten osaltaan suunnittelutyötä.

Algoritmiavusteisesta suunnittelusta ja algoritmeista puhuttaessa on vielä lopuksi olennaista korostaa, että algoritmit eivät suunnittele rakennesuunnittelijan puolesta, vaan niiden tarkoitus on helpottaa rakennesuunnittelijan työtä. Kaikki vastuu algoritmien avulla tuotettavista laskelmista ja suunnitelmista on myös algoritmiavusteisia suunnittelumenetelmiä hyödynnettäessä rakennesuunnittelijalla.

## LÄHTEET

A-Insinöörit. 2016. R-FEM koulutusaineisto. Luettu 20.03.2021. A-Insinöörien sisäinen verkko.

Davis, D., Burry, J. & Burry, M. 2011. Understanding Visual Scripts: Improving Collaboration through Modular Programming, *International Journal of Architectural Computing* 9 (4), 361-375

Dlupal Software. 2018. Singularities in Design of Reinforced Concrete Surfaces. Luettu 18.04.2021. <https://www.dlupal.com/en/support-and-learning/support/knowledge-base/001503>

Dlupal Software. 2020. RFEM 5 User Manual. Luettu 08.04.2021. <https://www.dlupal.com/en/downloads-and-information/documents/manuals>

Hirvikoski, M. 2019. Korkeiden rakennusten hankekehitysvaiheen stabiliteettimallin luonti algoritmiavusteisesti. Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma. Tampereen teknillinen yliopisto. Diplomityö.

Hänninen, R. 1987. Paikko-projekti: Paikallavalun kehittäminen koerakennuskohteessa. Espoo.

Ikävalko, J. 2017. RFEM laskenta- ja mitoitusohje teräsbetoni-laatoille. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Tampereen ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö

Karjalainen, P. 2018. Kantavien rakenteiden algoritmiavusteisen suunnitteluprosessin kehittäminen. Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma. Tampereen teknillinen yliopisto. Diplomityö.

Koskipää, K. 2020. Paikallavalettujen väestönsuojien mallinnuspohjaisen raudoitussuunnittelun tehostaminen. Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma. Tampereen teknillinen yliopisto. Diplomityö

Laine, P. 1993. Väestönsuojien rakentamisopas: K- ja teräsbetoninen S1-luokka. Tampere: Suomen Pelastusalan Keskusjärjestö Ry

Lalla, A. 2017. Kantavien rakenteiden parametrinen suunnittelu ja mallintaminen. Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma. Tampereen teknillinen yliopisto. Diplomityö.

Lappalainen, M. 2018. S1-luokan väestönsuojan mitoitus paikallavalurakenteena. Kandidaatintyö. Rakennustekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma. Tampereen teknillinen yliopisto. Kandidaatintyö

ModeLab. 2018. Grasshopper Primer, Third edition V3.3. Luettu 21.04.2021 <https://www.modelab.is/grasshopper-primer/>

Muutossäädös 28.12.2018/1378.

Pelastuslaki 29.4.2011/379.

Piitulainen, M. 2009. S1- ja K-luokan väestönsuojat 2009: suunnittelu ja rakentaminen. Helsinki: Suomen Pelastusalan Keskusjärjestö

Rajajärvi, P. 2016. Väestönsuojien rakentamisen historia ja käsikirja 1927-2016. 1.painos. Helsinki: Pekka Rajajärvi

RT 92-11173. S1-luokan teräsbetoniväestönsuoja. 2015. RT-kortisto. Rakennustieto Oy.

Romakkaniemi, P. 2019. Betonirakenteiden lävistysmitoitus. Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma Metropolia Ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö

Rombach, G.A. 2011. Finite-element Design of Concrete Structures: Practical problems and their solutions, Second edition. London: ICE Publishing.

SKOL. 2012. Rakentamismääräykset ja Eurokoodisuunnittelu. Luettu 5.2.2021. <https://skol.teknologiateollisuus.fi/sites/skol/files/Eurokoodit.pdf>

Sisäasiainministeriön asetus väestönsuojien teknisistä vaatimuksista ja väestönsuojien laitteiden kunnossapidosta 10.5.2011/506.

Suomen Betoniyhdistys ry. 2008. BY 210 Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus. Helsinki: Suomen Betonitieto Oy

Suomen Betoniyhdistys ry. 2014. BY 211 Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja - osa 2. Helsinki: BY -Koulutus Oy.

Suomen rakentamismääräyskokoelma B4. 2005. Betonirakenteet - ohjeet

SFS 1300. 2020. Betoniteräkset. Hitsattavien betoniterästen ja betoniteräsverkkojen vähimmäisvaatimukset. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Luettu 13.3.2021. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/fi/index.html.stx>

SFS-EN 1992-1-1+A1+AC. Eurokoodi 2: betonirakenteiden suunnittelu. osa 1-1: yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Luettu 18.4.2021. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/fi/index.html.stx>

Tanska, T. & Österlund, T. 2014. Algoritmit puurakenteissa: menetelmät, mahdollisuudet ja tuotanto. Arkkitehtuurin tiedekunta. Oulun yliopisto. Luettu 12.04.2021. <http://jultika.oulu.fi/files/isbn9789526204567.pdf>

Valtioneuvoston asetus väestönsuojan laitteista ja varusteista 409/2011

Valtioneuvoston asetus väestönsuojista 408/2011