

AALTO-YLIOPISTO
PERUSTIETEIDEN KORKEAKOULU
Systeemi- ja operaatiotutkimus

Erikoistyö
Mat-2.4108
8. kesäkuuta 2015

Väkijoukon käyttäytyminen katastrofitilanteissa

Ilmari Pärnänen
79249A

Ohjaaja: Harri Ehtamo
Valvoja: Harri Ehtamo

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

Sisältö

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Johdanto | 1 |
| 2 | Jalankulkijoiden käyttäytyminen | 2 |
| 2.1 | Love Parade -onnettomuus | 3 |
| 3 | Sosiaalisen voiman malli | 10 |
| 3.1 | FDS+Evac-ohjelmisto | 12 |
| 4 | Vastavirtaussimulaatiot FDS+Evac-ohjelmistolla | 13 |
| 5 | Johtopäätökset | 16 |
| | Viitteet | 21 |

1 Johdanto

Suuria yleisötapauhtumia järjestetään kaiken aikaa ja kaikkialla maailmassa. Massatapahtuman mielenkiinnon kohde vetää ihmisten lisäksi myös vaaroja puoleensa. Ihmistiheyden kasvaessa liikkuminen muuttuu hitaammaksi ja myös kommunikointiin tulee vaikeuksia. Epäonnistuneesta evakuoinnista voi seurata lukuisia loukkaantumisia tai jopa kuolemia. Tästä syystä on hyvin tärkeää suunnitella etukäteen toimintatavat mahdollisten onnettomuuksien varalle.

Katastrofia pakenevaa väkijoukkoa kutsutaan usein *panikoivaksi*, mutta paniikki on käsitteenä haasteellinen. Tarkkaa tieteellistä määritelmää sanalle paniikki ei ole pystytty antamaan. Mikäli paniikilla tarkoitetaan epärationaalisuutta, hulluuden kaltaista tilaa, kykenemättömyyttä toimia omaksi parhaaksi tai pelosta lamaantumista, ei se ole oikeanlainen termi kuvaamaan pakenevaa väkijoukkoa. Tässä erikoistyössä käytetään termejä *tavallinen* sekä *kilpailullinen evakuoituminen*, joista ensimmäisellä tarkoitetaan rauhallista poistumista jonoissa ja toisella taas poistumista, jossa jokainen haluaa olla ulkona ensimmäisenä.

Laskennallisten mallien kehittyminen mahdollistaa nykyisin entistä parempien turvallisuussimulointien tekemisen. Eräs johtavista evakuointimalleista on Helbingin kehittämä *sosiaalisen voiman malli*. Mallissa jalankulkijat ovat ikään kuin hiukkasia, jotka liikkuvat niihin vaikuttavien fyysikaalisten sekä sosiaalipsykologisten voimien vaikutuksesta. Liikchedintää voidaan kuvata differentiaaliyhtälöillä, ja monilla havaituilla ilmiöillä on analogia tilastollisen fysiikan hiukkasmodelleihin. [3] *FDS+Evac* on VTT:n kehittämä ohjelmisto, jossa väkijoukon liikkuminen perustuu sosiaalisen voiman malliin. Ohjelmiston pohjana on rakennusten tulipaloja simuloiva avoimen lähdekoodin Fire Dynamics Simulator (FDS) ohjelmisto. Sekä FDS että FDS+Evac ovat ladattavissa ilmaiseksi internetistä [1].

Tässä erikoistyössä tarkastellaan aluksi jalankulkijoiden käyttäytymistä eri tilanteissa ja analysoidaan vuonna 2010 Duisburgissa Love Parade -musiikkitapahtumassa sattunutta onnettomuutta, jossa väkijoukon ryntäyksestä seurasi 21 kuolemaa ja yli 500 loukkaantumista. Tämän jälkeen esitellään sosiaalisen voiman malli sekä FDS+Evac-ohjelmisto. Lopuksi näytetään FDS+Evac:lla tehtyjä simulaatioita ja esitetään johtopäätökset.

2 Jalankulkijoiden käyttäytyminen

Helbing et. al. teki artikkelissaan[4] kattavan kirjallisuuskatsauksen jalankulkija- ja evakuointitutkimukseen liittyen. Seuraavaksi esitellään artikkelissa tehty yhteenveto väkijoukon ilmiöistä normaaleissa tilanteissa sekä ilmiöistä evakuointitilanteissa.

Normaaleissa tilanteissa jalankulkija välttää kiertoteitä tai liikkumasta haluttua kävelysuuntaa vastakkaiseen suuntaan. Tämä käyttäytyminen on yleistä myös tapauksissa, joissa suora reitti määränpäähän on ruuhkainen. Joissain tilanteissa *nopein* reitti määränpäähän ei ole välttämättä sama kuin *lyhin* reitti. Näissä tilanteissa jalankulkijat valitsevat yleensä nopeimman reitin lyhimmän sijasta. Matkan pituuden lisäksi jalankulkijat huomioivat reitivalinnoissaan tekijöitä kuten reitin mukavuuden kävelylle. Näin ollen paras reitti kävellylle on sellainen, joka minimoi vaivan määränpäähän pääsemiseksi.

Jalankulkijoilla on yksilöllinen haluttu kävelyvauhti, joka vastaa kunkin yksilön näkemystä siitä, mikä kävelyvauhti on mukavin / vähiten energiaa kuluttavin. Kävelyvauhtiaan määriteltessään jalankulkija ottaa myös huomioon mahdollisen aikarajoitteen määränpäähän pääsemiseksi. Väkijoukossa haluttu kävelyvauhdit ovat normaalijakautuneita likimäärin keskiarvolla 1.34 m/s ja keskihajonnalla 0.26 m/s. Keskimääräiseen kävelyvauhtiin vaikuttavat kuitenkin myös monet väkijoukon sisäiset ja ulkoiset tekijät, kuten esimerkiksi jalankulkijoiden sukupuoli ja ikä, vuorokaudenaika, matkan tarkoitus sekä kävely-ympäristö.

Jalankulkijat välttävät kävellessään päätymistä tiettyä etäisyyttä lähemmäksi muita jalankulkijoita sekä kävelyaluetta rajoittavia seiniä ja muita esteitä. Mitä enemmän jalankulkijalla on kiire, sitä pienemmäksi hän kokee tarpeellisen muihin pidettävän etäisyyden. Haluttu etäisyys muihin pienenee myös väkijoukon tiheyden kasvaessa. Tietyt osat tarkasteltavasta alueesta voivat olla puoleensavetävämpiä kuin toiset, ja näillä alueilla jalankulkijoiden tiheys kasvaa. Kasvaneesta tiheydestä seuraa myös kävelyvauhtien keskihajonnan pieneneminen.

Jalankulkija määrittellään olevan *levossa*, kun hän esimerkiksi odottaa juna, istuu ruokalassa tai makaa rannalla. Levossa olevat jalankulkijat sijoittuvat tyypillisesti ympäri aluetta tasajakautuneille etäisyyksille toisistaan, mikäli henkilöillä ei ole minkäänlaisia yhteisiä tuttavuussuhteita keskenään. Toisensa tuntevat henkilöt muodostavat ryhmiä, ja ryhmä kokonaisuutena käyttäytyy samalla tavalla kuin yksittäinen jalankulkija. Ryhmien koot ovat

Poisson-jakautuneita.

Evakuointitilanteissa jalankulkijoiden käytös riippuu paljon uhkaavasta vaarasta. Traagisimpia tapauksia ovat ryntäystilanteet, joissa jalankulkijoita murskautuu tai tallautuu hengiltä. Hengenvaaran uhatessa tällainen käytös on kokonaisvaltaista, mutta valitettavasti tällaisia tapauksia on sattunut myös esimerkiksi ihmisten syöksyessä tavoittelemaan parhaita paikkoja pop-konsertissa.

Jalankulkijoilla on havaittu seuraavia ilmiöitä ryntäämisten yhteydessä:

- hermostuneisuutta ja liioiteltua toimintahalua
- pyrkimystä liikkua tavallista nopeammin
- työntämistä ja muuta fyysistä vuorovaikuttamista
- epäjärjestelmällistä liikehdintää, erityisesti pullonkaulojen kohdalla
- ruuhkia ja tukoksia uloskäyntien luona
- vaarallisia, jopa 4 500 N / m, paineita tukoksien kohdalla yhteenlasketujen fyysikaalisten vuorovaikutusten seurauksena
- pakenemisen hidastumista kaatuneiden ja loukkaantuneiden jalankulkijoiden muuttuessa “esteiksi”
- laumakäyttäytymistä
- tehottomuutta poistumisessa johtuen vaihtoehtoisten uloskäyntien huomiotta jättämisestä

2.1 Love Parade -onnettomuus

Love Parade oli vuosittainen elektronisen tanssimusiikin festivaali, joka järjestettiin ensimmäisen kerran Berliinissä vuonna 1989 ja sittemmin ympäri maailmaa. Ensimmäisen tapahtuman 150 osallistujasta tapahtuma laajeni nopeasti ensin tuhansiin osanottajiin ja lopulta yli miljoonaan. Viimeistä kertaa Love Parade järjestettiin 2010 Duisburgissa, ja festivaalin järjestäminen jatkossa päätettiin lopulta lopettaa kokonaan kyseisenä vuonna sattuneen suuren onnettomuuden vuoksi. Helbing ja Mukerji ovat analysoineet Love Parade 2010 -katastrofia artikkelissaan[7], ja tämä kappale perustuu kyseiseen artikkeliin.

Vuoden 2010 Love Parade festivaalialue sijaitsi Duisburgissa entisellä rautatien asemalla. Alueen pinta-ala oli noin 100 000 m². Aiemmin Berliinissä Love Parade oli järjestetty isolla avoimella alueella, mutta tällä kertaa festivaalialuetta rajasi idässä rautatiekiskot ja lännessä moottoritie. Tapahtumaan odotettiin yhteensä 1.4 miljoonaa osallistujaa, ja viranomaiset esittivätkin huolen sen johdosta, että alue olisi liian pieni tällaista kävijämäärää varten. Duisburgin kaupunki kuitenkin myönsi tapahtumalle järjestämisluvan sillä edellytyksellä, että alueella olisi koko ajan samanaikaisesti vain korkeintaan 250 000 osallistujaa.

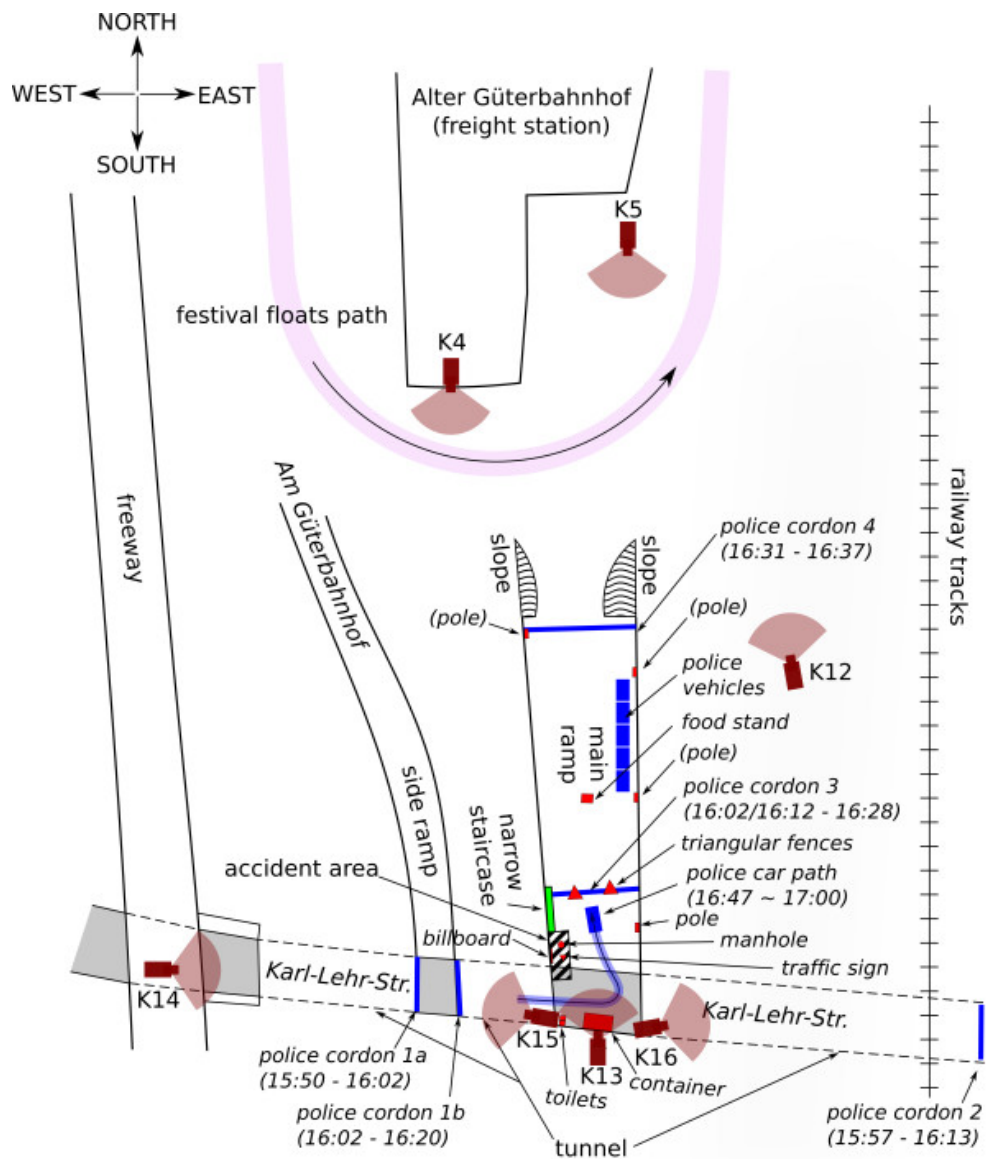
Selvitäkseen viranomaisten esittämistä turvallisuushaasteista Love Paraden järjestäjät päättivät rajata festivaalialueen aidoilla. Tästäkin huolimatta esitettiin huoli riittäisikö aitaaminenkaan täyttämään täysin esitettyjä turvallisuusvaatimuksia. Viranomaiset pelkäsivät, ettei tätä huolta otettaisi täysin huomioon tapahtuman lopullisessa hyväksymisessä. Duisburg oli nimetty Saksan “kulttuuripääkaupungiksi” kyseisenä vuonna ja kaupungin yleinen mielipide oli sen kannalla, että Love Parade -tapahtuman järjestäminen Duisburgissa olisi merkittävä tekijä houkuttelemaan ihmisiä vierailemaan kaupungissa ja tutustumaan sen kulttuuritarjontaan. Näin ollen päätettiin tilata asiantuntijalausunto huomattavalta väkijoukkoja tutkivilta tiedemieheltä. Annetussa lausunnossa todettiin, että hätätilanteessa osallistujat voitaisiin evakuoida festivaalialueelta riittävän hyvin. Jälkeenpäin tarkasteltuna lausunnossa ei kuitenkaan analysoitu yksityiskohtaisesti osallistujien sisään- ja ulospääsyä alueelta normaaleissa olosuhteissa.

Kuvassa 1 on esitetty yleiskatsaus festivaalialueesta. Kuvasta nähdään, että festivaalialueen ainoa sisäänkäynti oli Karl-Lehr-Straße-kadun tunnelin kautta, joka toimi myös alueen ainoana uloskäyntinä. Tunneli ja sitä vastaan kohtisuorassa oleva ramppi määrittelevät ylösalaisin olevan T-kirjaimen muotoisen geometrian sisään- ja ulosvirtauksille. Lännessä sijaitseva tavarasemalle johtanut sivuramppi (Am Güterbahnhof) oli osoitettu ylimääräiseksi poistumistieksi, jota ei kuitenkaan käytännössä juuri käytetty. Pienin läpimitta itä-länsi-suuntaisessa tunnelissa oli noin 20 metriä. Kohtisuorassa oleva ramppi oli 26 metriä leveä ja 130 metriä pitkä. Mikäli ihmisvirtaus kulki koko rampin leveydellä jatkuvasti arvioidulla maksiminopeudella 1.225 ihmistä / metri / sekunti, olisi hypoteettinen maksimivirtaus ramppia pitkin 114 660 ihmistä / tunti, ja ihmisten tiheys rampilla olisi 1.75 ihmistä / neliometri. Rampin todellinen kapasiteetti oli kuitenkin merkittävästi pienempi, sillä

1. jatkuva maksimivirtaus on jalankulkijoille epämiellyttävä sekä mahdollisesti epäturvallinen, joten maksimivirtaus ei ole hyvä peruste suunnittelulle.
2. vastavirtauksen odotetaan vähentävän kapasiteettia 6-14 %, jolloin hypoteettinen maksimivirtaus olisi noin 98 608 ihmistä / tunti.
3. 90 asteen käännöksen tunnelista ja tunneliin odotetaan vähentävän kapasiteettia.
4. ryhmissä käveleminen vähentää kapasiteettia.
5. alkoholin ja huumeiden vaikutuksella osallistujiin oletetaan olevan negatiivinen vaikutus kapasiteettiin.
6. merkittävä määrä kapasiteettia menetetään johtuen aidoista, ruokakioskeista ja ajoneuvoista rampin sivustoilla.

Taulukossa 1 on esitetty tapahtumajärjestelijöiden arviot ihmismassojen liikehdinnästä festivaalialueelle eri ajankohtina. Näihin arvioihin perustuen osallistujia odotettiin olevan alueella korkeintaan 235 000, mikä täytti annetun 250 000 osallistujan kapasiteettirajoituksen. Tarkasteltaessa tilannetta videotallenteista jälkepäin huomattiin todellisten ihmisvirtojen olleen vieläkin alhaisempia. Esimerkiksi välillä kello 14:00-15:00 sisäänvirtaus vaihteli välillä 280-600 henkilöä / minuutti ja ulosvirtaus välillä 6-80 henkilöä / minuutti. Vastaavasti välillä kello 15:00-15:40 sisäänvirtaus vaihteli välillä 450-750 henkilöä / minuutti ja ulosvirtaus välillä 40-250 henkilöä / minuutti. Tämä on 30-50 % vähemmän kuin arvioidut virtaukset, mikä tarkoittaa sitä että alueella oli yhtäaikaaisesti korkeintaan noin 175 000 osallistujaa.

Edelleen taulukkoon 1 viitaten välillä kello 17:00-18:00 järjestäjien arvioimat sisään- ja ulosvirtaukset 90 000 ja 55 000 henkilöä / tunti olivat niin suuria, että virtaukset ramppia pitkin olisivat vaatineet tarkoituksenmukaista kulunvalvontaa. Vaikka kuvassa 1 näkyvä lännessä ollut sivuramppi oli osoitettu ylimääräiseksi poistumistieksi ja tunnelin päihin oli sijoitettu virtauksia hidastamaan tarkistuspisteitä, kulunvalvonnasta luovuttiin ajoittain kokonaan johtuen sisäänvirtaavien osallistujien aiheuttamasta suuresta paineesta väkijoukkoon. Itse festivaalialue ei ollut missään vaiheessa tapahtumia liian täynnä. Kysymys kuuluukin: miten onnettomuus pääsi tapahtumaan tunnelin ja rampin muodostamalla ylösalaisin olevan T-kirjaimen muotoisella



Kuva 1: Havainnekuva Love Parade 2010 -festivaalialueesta ja kulkuteistä alueelle. Kuvassa on korostettu myös onnettomuuden kannalta merkittävät sijainnit ja ajankohdat. [7]

Taulukko 1: Festivaalijärjestäjien estimaatit osallistujien sisään- ja ulosvirtauksista alueella eri ajankohtina. [7]

| Aika | Odotettu sisäänvirtaus / tunti | Odotettu ulosvirtaus / tunti |
|-------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 14:00-15:00 | 55 000 | 10 000 |
| 15:00-16:00 | 55 000 | 50 000 |
| 16:00-17:00 | 55 000 | 45 000 |
| 17:00-18:00 | 90 000 | 55 000 |

alueella, vaikka virtaukset festivaalialueelle olivat pienempiä kuin taulukossa 1 esitetyt odotukset ja yli 3 000 poliisia oli alueella kulunvalvontatehtävissä.

Tapahtumien aikajana on esitetty taulukossa 2. Aikajana on lyhennelmä järjestäjien tapahtuman jälkeen toimittamasta raportista, ja saatavilla olevat videomateriaalit sekä muut julkiset lähteet tukevat raportin kerrontaa.

Taulukko 2: Festivaalijärjestäjien näkemys Love Parade 2010 -tapahtuman kulusta. [7]

| Aika | Tapahtuma |
|-------------|---|
| 12:02 | Festivaalialue avataan. Osallistujat voivat alkaa virrata alueelle sisään tunnelin länsi- ja itäpäässä olevien tarkastuspisteiden kautta. |
| 13:00 | Sisäänvirtausta vähennetään sulkemalla 10/16 tunnelin päissä olevista tarkastuspisteistä. |
| 13:45-14:15 | Ei erityisiä häiriöitä tai viiveitä sisääntuloalueen virtauksissa. |
| noin 14:00 | Love Parade alkaa virallisesti. |
| 14:15-14:30 | Ihmisten tiheys sisääntulorampin loppupäässä (festivaalialuetta kohti katsoen) kasvaa johtuen siellä liikkuvista musiikkirekoista. |
| 14:30-15:15 | Väkijoukon liikehinnästä vastaava henkilö pyrkii yhteyteen poliisin kanssa saadakseen lisäapua kulunvalvontaan. Poliisin kanssa yhteydenpidosta vastaavalla henkilöllä ei ole toimivaa radio- tai matkapuhelinta. |
| 14:30-15:06 | Osallistujien virtaus rampilla sekä tunnelin länsipäässä kasvaa. |

| | |
|-----------------|---|
| noin 15:00 | Osallistujien virtausta vähennetään sulkemalla niin monta tarkastuspistettä kuin mahdollista. |
| 15:12-15:34 | Poliiseilla tapahtuu työvuorojen vaihto. 5 poliisiautoa ajaa rampille. |
| 15:31 | Osallistujat huomaavat, että poliisi on jättänyt toisella puolella ramppia olevan aidan väliaikaisesti auki. Tästä johdun osallistujat alkavat virtaaman järjestäjien tarkoitusten vastaisesti festivaalialueelle myös reittiä aidan ulkopuolelta. Hetken kuluttua osallistujat alkavat ylittää myös rampin toisella puolella olevia aitoja. Aitojen tarkoitus oli estää osallistujia virtaamasta tunnelin sivuilla olevia jyrkkiä luiskia pitkin festivaalialueelle. |
| 15:50 | Ensimmäinen poliisiketju muodostetaan pysäyttämään sisään- ja ulosvirtaus tunnelin länsipäässä sivurampin edessä (kuva 1 cordon 1a). |
| 15:50-15:57 | Toinen poliisiketju sulkee virtaukset tunnelin itäpäässä (kuva 1 cordon 2). |
| noin 16:02 | Lännestä saapuu yhtäkkinen vahva ihmisvirtaus kohti festivaalialuetta, minkä takia ensimmäinen poliisiketju siirtyy tunnelissa sivurampin toiselle puolelle (kuva 1 cordon 1b). |
| alkaen 16:02 | Kolmas poliisiketju alkaa muodostua ja aloittaa sisään- ja ulosvirtauksien kontrolloinnin rampin keskiosassa, joka on myös aidoista johtuen rampin kapein kohta. Kontrollipaikasta tulee pullonkaula ja sen molemmille puolille alkaa muodostua jonoja. |
| noin 16:06 | Poliisiketjujen rajaaman alueen sisäpuolella on vain muutamia osallistujia. |
| noin 16:07 | Osallistujista muodostuu tukos tunnelin länsipäähän. |
| noin 16:09 | Samanlainen tukos muodostuu poliisien kontrollipaikan kohdalle ulospyrkivistä osallistujista. |
| 16:12-16:28 | Kolmannen poliisiketjun muodostus valmistuu (kuva 1 cordon 3). Kapean kontrollipisteen kohdalla pysäytetään sisään- ja ulosvirtaukset kokonaan. |
| noin 16:13 | Tunnelin toinen sivusta avataan sisääntuloväyläksi festivaalialueelle. Osallistujat kiipeävät aitojen yli. |

| | |
|------------------|---|
| noin 16:14 | Toinen poliisiketju tunnelin itäpäässä avautuu ja osallistujia alkaa virtaamaan sisään ramppia pitkin. |
| noin 16:17 | Festivaalialueelle yritetään ensimmäistä kertaa päästä rampin alkupäässä olevaa kapeaa portaikkoa pitkin. Jälkeenpäin kaksi järjestyksenvalvojaa sulkee kulun portaikkoon. |
| noin 16:21 | Ensimmäinen poliisiketju tunnelin länsipäässä hajoaa. Pitkään odottaneet osallistujat liikkuvat kohti ramppia ja kohtaavat siellä tiheän itäpäästä tulevan virran kohti festivaalialuetta. |
| 16:22 | Ensimmäiset ihmiset kiipeävät pylväisiin. |
| 16:22-16:24 | Kolmas poliisiketju pitää edelleen ramppia suljettuna samalla kun paine kasvaa suljettuun pullonkaulaan kasvaa molemmista suunnista. |
| 16:24-16:28 | Kolmas poliisiketju hajoaa. |
| noin 16:27 | Kapeaa portaikkoa käytetään jälleen festivaalialueelle pääsemiseksi. Joku kiipeää liikennemerkkin päälle. |
| 16:31-16:37 | Neljäs poliisiketju muodostetaan rampin loppupäähän. Samaan aikaan tiheys rampin alkupäässä kasvaa tasaisesti. |
| 16:40 jälkeen | Tilanne on muuttunut täysin hallitsemattomaksi. Yhä useampia osallistujia yrittää päästä festivaalialueelle kapeaa portaikkoa pitkin, kiipeämällä pylväisiin tai kulunvalvontahenkilökunnan konttien kattojen kautta. |

Lopputuloksena 21 ihmistä tukehtui kuoliaaksi ja yli 500 ihmistä loukkaantui. Katastrofi ei ollut seuraus mistään isosta yksittäisestä tekijästä, vaan onnettomuus oli monen pieleen menneen asian summa. Ensinnäkin festivaalialue itsessään oli liian pieni suhteessa odotettuun osallistujamäärään, ja tämä ongelma yritettiin ratkaista kulunvalvonnan avulla. Kun kuitenkin festivaalialue päästiin avaamaan vasta tunnin suunniteltua myöhemmin (suunnitelman mukaan alue piti avata osallistujille klo 11:00 alkaen) ja sisäänvirtaus jouduttiin joissain vaiheessa yllättäen pysäyttämään kokonaan, pääsi osallistujista muodostamaan niin isoja jonoja, että niitä oli käytännössä mahdoton hallita. Tukosten purkamiseksi pystytetyt poliisiketjut eivät onnistuneet tehtävässään. Virtauksen pysäyttäminen olisi saattanut toimia yhteen suuntaan virtaavan väkijoukon tapauksessa, mutta tilanne muuttui erittäin pahaksi, kun suuret virtaukset poliisiketjujen hajottua kohtasivat toisensa sen sijaan että eri suuntiin menevät virtaukset olisi ohjattu kulkemaan eri puolilla tun-

neliä toisiinsa törmäämättä.

3 Sosiaalisen voiman malli

Helbingin kehittämässä sosiaalisen voiman mallissa ihmisiä kuvataan agentteina, jotka liikkuvat jatkuvassa tilassa jatkuva-aikaisesti. Erilaisiin liikkumiseen vaikuttaviin tekijöihin suhtaudutaan kuin ne olisivat erilaisia ihmiseen vaikuttavia voimia. Näistä voimista osa on todellisia fysikaalisia voimia ja osa sosiaalipsykologisia ilmiöitä, jotka voidaan esittää samaan tapaan kuin todelliset voimat.

Alussa evakuoitavassa tilassa on yhteensä n agenttia. Jokaisella agentilla i on: massa m_i , haluttu kävelyvauhti v_i^0 ja haluttu kävelysuunta \mathbf{e}_i^0 . Agentin todellinen nopeus on \mathbf{v}_i ja agentilla on henkilökohtainen kiihdytysaika τ_i , joka kuvaa kuinka kauan agentilla kestää kiihdyttää todellisesta nopeudesta haluttuun nopeuteen. Tämän lisäksi agentit yrittävät välttää päätymistä liian lähelle kävelyreittiä rajoittavia esteitä, eli toisia agentteja j ja seiniä W . Tämä taipumus voidaan esittää "vuorovaikutusvoimina" \mathbf{f}_{ij} ja \mathbf{f}_{iW} . Näillä oletuksilla voidaan muodostaa agenteille liikeyhtälö:

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = m_i \frac{v_i^0 \mathbf{e}_i^0 - \mathbf{v}_i}{\tau_i} + \sum_{j(\neq i)} \mathbf{f}_{ij} + \sum_W \mathbf{f}_{iW} + \xi_i, \quad (1)$$

missä ξ_i on pieni henkilökohtainen satunnaisvoima. Tämän satunnaisvoiman on oltava mallissa, sillä ilman sitä agentit saattaisivat jäädä jumiin nokausten kohdatessaan, jos molempiin vaikuttavat kokonaisvoimat ovat täsmälleen yhtä suuret, mutta suunniltaan vastakkaiset. Agentin sijainti \mathbf{r}_i saadaan nopeudesta $\mathbf{v}_i = d\mathbf{r}_i/dt$.

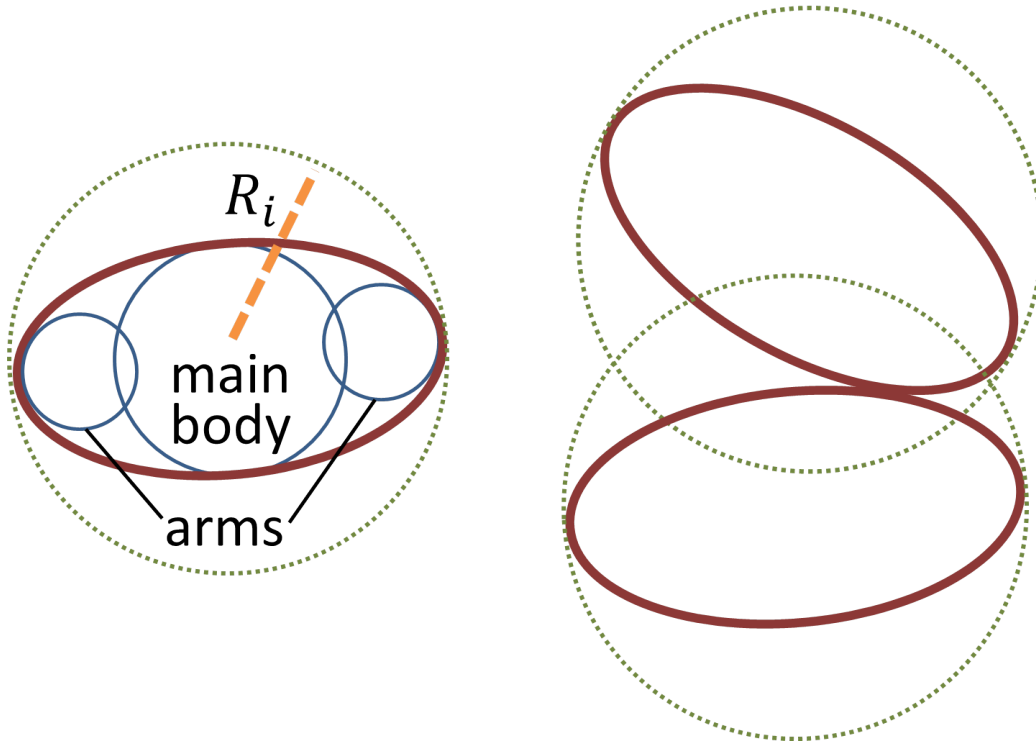
Voima \mathbf{f}_{ij} , joka saa agentit hylkimään toisiaan, muodostuu kolmesta osasta:

$$\mathbf{f}_{ij} = \mathbf{f}_{ij}^{\text{social}} + \mathbf{f}_{ij}^{\text{body}} + \mathbf{f}_{ij}^{\text{slid}}. \quad (2)$$

Sosiaalinen voima $\mathbf{f}_{ij}^{\text{social}}$ on vuorovaikutusvoimien psykologinen osa. Se voidaan kirjoittaa muodossa

$$\mathbf{f}_{ij}^{\text{social}} = A_i \exp[(R_{ij} - d_{ij})/B_i] \mathbf{n}_{ij}, \quad (3)$$

missä A_i ja B_i ovat vakioita, jotka kuvaavat sosiaalisen voiman voimakkuutta ja kantamaa, $R_{ij} - d_{ij} = R_i + R_j - \|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j\|$ on agenttien i ja j



Kuva 2: Vasemmalla puolella on esitetty jalankulkijaa kuvaavan agentin 2D-projektio. Oikealla puolella on esitetty tapaus, jossa kaksi agenttia päätyvät hyvin lähelle toisiaan. Tässä tapauksessa fyysinen hylkivä voima ja kitkavoima alkavat vaikuttaa agenteihin.

2D-projektioiden säteiden summa, kuten määritelty kuvassa 2, vähennettynä agenttien keskipisteiden välisellä etäisyydellä, ja $\mathbf{n}_{ij} = (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)/d_{ij}$ on agentista j agenttiin i osoittava normalisoitu vektori. Jokaisen agentin 2D-projektion ajatellaan muodostuvan kolmesta ympyrästä, joista keskellä oleva iso ympyrä kuvaa jalkoja, päätä sekä torsoa, ja pienet ympyrät sivuilla käsi-
varsia [8].

Mallissa kaksi agenttia määritellään koskettavan toisiaan, jos $R_{ij} - d_{ij} \geq 0$. Vaikka ensiajattelemalta tuntuu oudolta, että kyseinen erotus voisi saada positiivisia arvoja, niin kuvassa 2 on esitetty tapaus, jossa näin tapahtuu. Kun agentit ovat niin lähellä toisiaan että joutuvat kosketuksiin, vuorovaikutusvoiman kaksi muuta osaa alkavat vaikuttaa. “Fyysinen hylkivä voima” ja “kitkavoima” voidaan kirjoittaa muodossa

$$\mathbf{f}_{ij}^{\text{body}} = kg(R_{ij} - d_{ij})\mathbf{n}_{ij} \quad (4)$$

$$\mathbf{f}_{ij}^{\text{slid}} = \kappa g(R_{ij} - d_{ij})\Delta v_{ji}^t \mathbf{t}_{ij}, \quad (5)$$

missä k ja κ ovat suuria vakioita, $\mathbf{t}_{ij} = (-n_{ij}^2, n_{ij}^1)$ on toisiaan lähellä olevien agenttien i ja j välinen tangentsuunta, ja $\Delta v_{ji}^t = (\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i) \cdot \mathbf{t}_{ij}$ on nopeuksien ero tangentsuunnassa. Funktio $g(x)$ määrittää voimien suuruudet niin, että voimat eivät vaikuta silloin kun agentit eivät kosketa toisiaan; $g(x) = x$, jos $R_{ij} - d_{ij} \geq 0$, muuten $g(x) = 0$. Toisin kuin $\mathbf{f}_{ij}^{\text{social}}$ nämä kaksi voimaa ovat todellisia fysikaalisia voimia.

Agentin i vuorovaikutukset seinien W kanssa ovat mallissa analogisia vuorovaikutuksiin muiden agenttien j kanssa. Näin ollen seiniä hylkivä voima voidaan kirjoittaa muodossa

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_{iW} = \{ & A_i \exp[(R_i - d_{iW})/B_i] + kg(R_i - d_{iW})\} \mathbf{n}_{ij} \\ & - \kappa g(R_i - d_{iW})(\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{t}_{iW}) \mathbf{t}_{iW}. \end{aligned} \quad (6)$$

Tässä kappaleessa esitetty sosiaalisen voiman malli on hyvä lähtökohta väkijoukon dynamiikan kuvaamiselle, ja sitä voidaan myös parantaa lisäominaisuuksilla. Esimerkiksi yhtälöön (3) voidaan lisätä termi, joka säätelee sosiaalisen voiman $\mathbf{f}_{ij}^{\text{social}}$ suuruutta niin, että agentin i edessä olevat jalankulkijat aiheuttavat voimakkaamman vaikutuksen kuin samalla etäisyydellä agentin i takana olevat jalankulkijat [4]. Malliin voidaan lisätä myös joitakin puoleensavetäviä voimia simuloimaan ihmisten taipumusta liikkua esimerkiksi perheenjäsenistä tai ystävistä koostuvassa ryhmässä. Sosiaalisista voimista voidaan tehdä myös aikariippuvaisia [2]. Helbingin sosiaalisen voiman mallilla tehdyillä simulaatioilla on kuvattu monia väkijoukon evakuoinnin ilmiöitä. Malli antaa tulkinna esimerkiksi sille, miksi kapeassa käytävässä samaan suuntaan e^0 liikkuvat jalankulkijat ovat taipuvaisia liikkumaan jonoissa. Toinen esimerkki on tapaus, missä kahdesta vierekkäisestä kapeasta ovesta kulkee suurempi ihmisvirtaus kuin yhdestä ovesta, vaikka yksittäinen ovi olisi hieman leveämpi kuin kapeat ovet yhteensä [4].

3.1 FDS+Evac-ohjelmisto

Fire dynamics simulator (FDS) on kolmiulotteiseen virtauslaskentaan perustuva palosimulointiohjelma. FDS on kirjoitettu Fortran 90 -ohjelmointikielellä.

Ohjelmisto ratkaisee numeerisesti Navierin–Stokesin yhtälöt käyttäen LES (Large-Eddy Simulation) -simulointimenetelmää [9]. FDS soveltuu matalanopeuksisen lämpölähtöisen virtauksen simulointiin painotusalueenaan tulipaloista johtuvien savun ja lämmön siirtyminen. Smokeview on FDS-ohjelman yhteyteen kehitetty visualisointiohjelma, joka näyttää FDS-simulaatiot animaatioina. FDS- ja Smokeview-ohjelman ensimmäiset viralliset versiot julkaistiin vuonna 2000 Yhdysvaltojen kauppaministeriön alaisuudessa toimivan National Institute of Standards and Technology (NIST) -viraston toimesta [1].

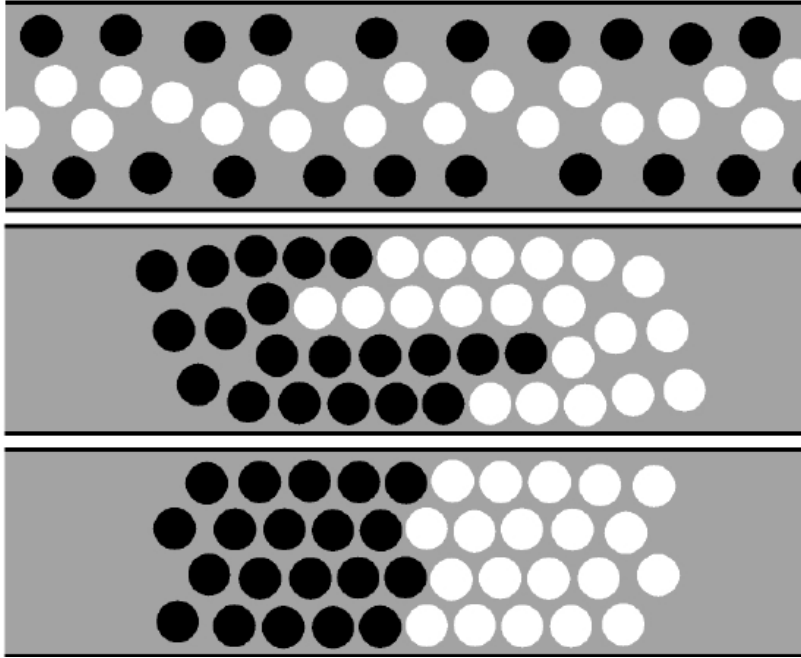
VTT aloitti pian ohjelman julkaisun jälkeen yhteistyön ohjelman kehittämisessä. Tämän seurauksena FDS-ohjelmistoon liitettiin moduuli poistumis- simulointia varten, ja vuodesta 2007 alkaen tätä kokonaisuutta on kutsuttu nimellä FDS+Evac, jossa evakuoituminen tapahtuu Helbingin sosiaalisen voiman mallilla. Evakuointimoduulin sisältävissä versioissa tulipalo- ja poistumissimuloinnit voidaan tehdä joko erikseen tai yhtä aikaa. Jälkimmäisessä tapauksessa ohjelma ottaa huomioon esimerkiksi näkyvyyden huononemisen tai myrkyllisten kaasujen hengittämisen vaikutukset evakuoituvuihin ihmisiin. Kaikkein uusimmissa FDS+Evac-versioissa on myös mahdollista hyödyntää peliteoreettisia oppimismalleja, joilla simuloidaan päätöksentekoa evakuointitilanteessa.

4 Vastavirtaussimulaatiot FDS+Evac-ohjelmistolla

Tämän kappaleen simulaatiot on tehty Aalto-yliopiston Systeemanalyysin laboratorion ja VTT:n yhteisprojektissa kesällä 2012. Simulointiohjelmistona oli FDS+Evac.

Helbing osoitti artikkelissaan[6], että korkean ihmistiheyden tapauksessa sosiaalinen voima saa jalankulkijat liikkumaan *jonomuodostelmassa* niiden jalankulkijoiden kanssa, joilla on sama haluttu kävelysuunta e^0 . Tämä ilmiö on havaittavissa joka päivä esimerkiksi kauppakeskuksissa, kun ruuhka-aikaan kassalle pyrkivät ihmiset kävelevät jonossa kohti kassaa muiden tilassa olevien kävellessä ruuhkassa satunnaisesti kaikkiin suuntiin.

Helbing esitti tätäkin kiinnostavamman ilmiön myöhemmässä artikkelissaan[5], joka liittyy sosiaalisen voiman mallin henkilökohtaiseen satunnaisvoimaan ξ_i . Parametrin ξ suuruudella, jota kutsutaan myös kohinan suuruudeksi, on ana-

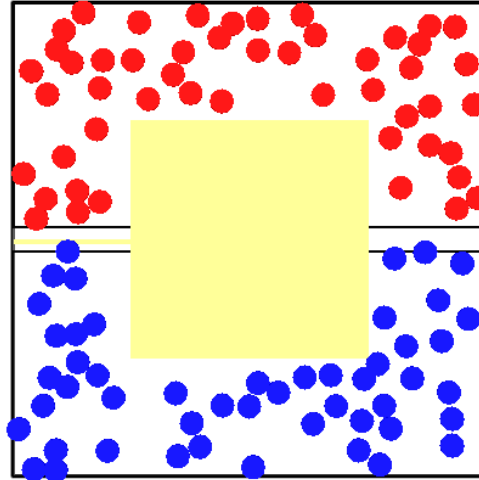


Kuva 3: Havainnekuva Freezing by Heating -ilmiöstä. [5]

loginen tulkinta lämpötilan kanssa, kun tiivistä ryhmää jalankulkijoita mallinnetaan hiukkasina virtaussysteemissä. Kohinan kasvattaminen saa jalankulkijan liikkumaan satunnaisemmin määränpäähän suuntaavan optimaalisen liikeratansa ympärillä, ja tämä voidaan tulkita jalankulkijan hermostuneisuuden kasvamiseksi. Tilanteesta tekee mielenkiintoisen se, että korkea arvo parametrille ξ tuhoaa jonomuodostelman, ja agentit jumiutuvat “kiiteiseen” rakenteeseen. Yleensä hiukkassysteemeissä lämpötilan kasvattaminen aiheuttaa nestemäisessä hiukkassysteemissä “kaasuuntumisen”, kun nyt siirtyminen tapahtui nestemäisestä “kiinteäksi”. Parametrin ξ suuruuden ja lämpötilan analogiasta johtuen tätä havaittua ilmiötä kutsutaan englanniksi termillä *Freezing by Heating*.

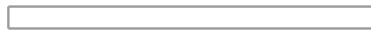
Kuvassa 3 on havainnollistettu Freezing by Heating -ilmiötä. Mustat agentit liikkuvat kuvan kapeassa käytävässä vasemmalta oikealle ja valkoiset agentit virtaavat vastakkaiseen suuntaan. Käytävän molemmissa päissä pätevät *periodiset reunaehdot* mikä tarkoittaa että jommastakummasta reunasta ulos astuva agentti astuu samanaikaisesti sisään toisesta päästä. Kun agentteihin vaikuttaa pieni henkilökohtainen satunnaisvoima (ylin kuva), agentit kulke-

Smokeview 5.6.3 - Dec 27 2010



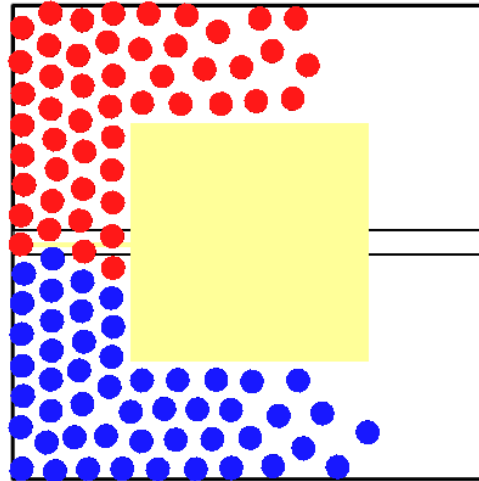
mesh: 1

Frame: 0
Time: -0.5



(a) Alkutilanne

Smokeview 5.6.3 - Dec 27 2010



mesh: 1

Frame: 23
Time: 11.0



(b) Lopputilanne.

Kuva 4: Vastavirtauskoe neliögeometriassa. Punaiset agentit kiertävät estettä vastapäivään ja siniset agentit myötäpäivään. Freezing by Heating -kiderakenne muodostuu odotetusti.

vat vastakkaisiin suuntiin tasaisesti jonoissa. Kun satunnaisen voiman suuruutta lisätään, jumiutuvat agentit (kaksi muuta kuvaa) ja muodostuu symmetrinen kiderakenne, jossa agentit vain värähtelevät paikoillaan eivätkä pääse enää liikkumaan toistensa ohi.

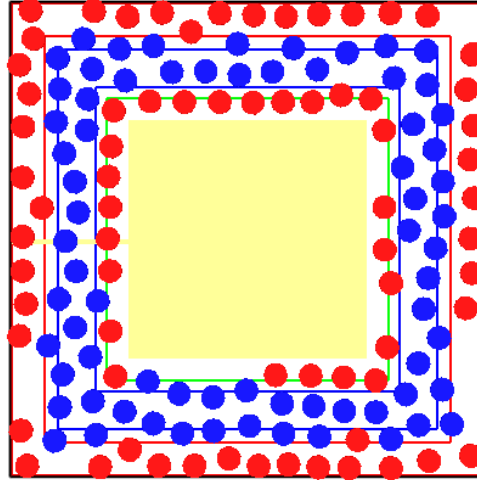
Simulaatioissa kokeiltiin voitaisiinko periodiset reunaehdot korvata neliönmuotoisella geometrialla, jossa agentit kiertävät neliönmuotoista estettä eri suuntiin. Haluttujen kävelysuuntien sijaan agenteilla on haluttu pyörimissuunta suhteessa keskustassa olevaan esteeseen. Kuvan 4 simulaatiossa onnistutaan saamaan odotettu Freezing by Heating -kiderakenne. Tämän jälkeen agentit asetettiin jonomuodostelmaan, ja katsottiin jatkuuko virtaus jonomuodostelmassa, kun henkilökohtainen satunnaisvoima asetettiin pieneksi. Tämä simulaatio on esitetty kuvassa 5. Tällä kertaa odotettua tulosta ei saatu, vaan pienenkin satunnaisvoiman tapauksessa agentit päätyivät ajan myötä Freezing by Heating -kiderakenteeseen.

Simulaatioiden perusteella todetaan, ettei periodisia reunaehtoja käytävägeometriassa voi suoraan korvata kiertävällä neliögeometrialla niin, että jononmuodostus- ja Freezing by Heating -ilmiöt säilyvät samantyyppisinä. Tämä johtuu siitä, että kulmissa agenteilla on enemmän tilaa liikkua, joten ne pääsevät usein ohittamaan toisiaan ja asettuvat lopulta symmetriseen asemaan, jossa vastakkaiset voimat kumoavat toisensa, ja aiheutuu jumiutuminen. Kokeiltiin vielä kuvassa 6 esitettyä koeasetelmaa, jossa tila täytettiin niin monella agentilla kuin mahdollista ettei nurkkiin jäisi ylimääräistä tilaa ja henkilökohtainen satunnaisvoima asetettiin pieneksi. Lopulta kiderakenne syntyi tässäkin tapauksessa, kun agentit vähitellen vaihtoivat jonoista toisiin. Aluksi syntyi paljon pieniä paikallisia jumiutumisia ja lopulta liike pysähtyi kokonaan.

5 Johtopäätökset

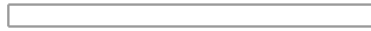
Viime vuosien evakuointitutkimusten myötä on saatu runsaasti lisätietoa väkijoukolle tyypillisistä käyttäytymisilmiöistä. Paljon on kuitenkin vielä tehtävää, jotta Love Parade 2010 -tyyppiset onnettomuudet vältetään tulevaisuudessa. Tämän festivaalin tapauksessa usealla osa-alueella muodostui monia pieniä ongelmia, jotka yksittäin eivät olisi olleet kokonaisuudelle merkittäviä, mutta lopulta kerrannaisvaikutukset tekivät tilanteesta täysin hallitsemattoman. Tragedia oli niin merkittävä, että festivaalin järjestäminen päätettiin lopettaa kokonaan.

Smokeview 5.6.3 - Dec 27 2010



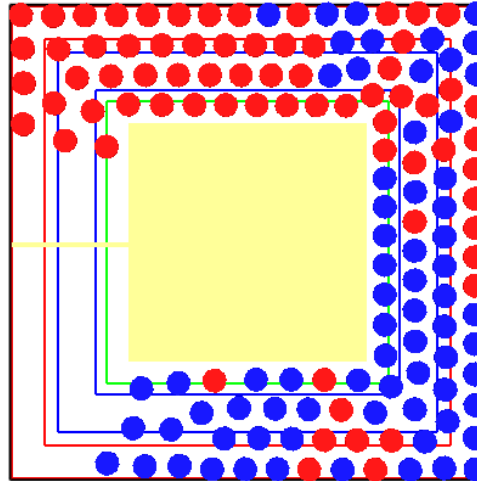
mesh: 1

Frame: 5
Time: 0.00



(a) Alkutilanne

Smokeview 5.6.3 - Dec 27 2010



mesh: 1

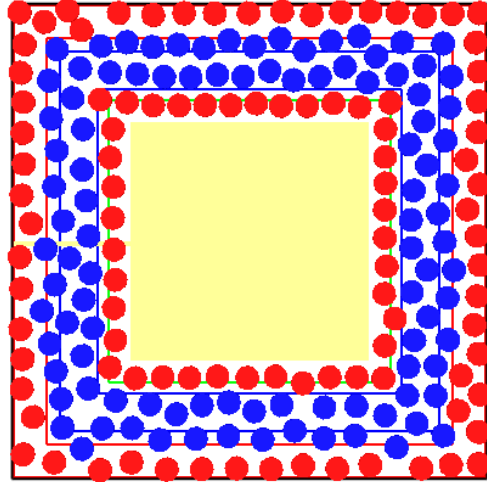
Frame: 1263
Time: 127.85



(b) Lopputilanne.

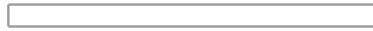
Kuva 5: Vastavirtauskoe neliögeometriassa pienellä henkilökohtaisella satunnaisvoimalla. Odotettua jonomuodostelmaa ei synny, vaan agentit päätyvät lopulta Freezing by Heating -kiderakenteeseen.

Smokeview 5.6.3 - Dec 27 2010



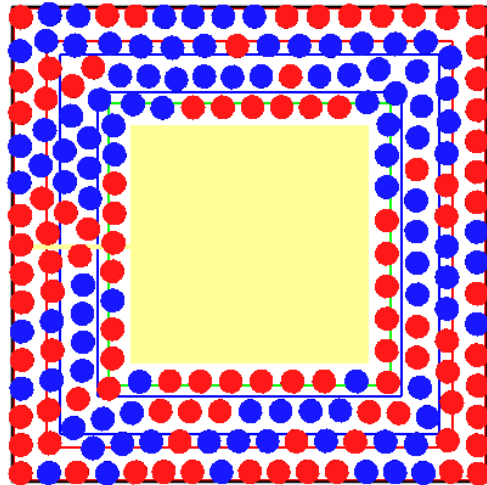
mesh: 1

Frame: 2
Time: -0.30



(a) Alkutilanne

Smokeview 5.6.3 - Dec 27 2010



mesh: 1

Frame: 1304
Time: 129.95



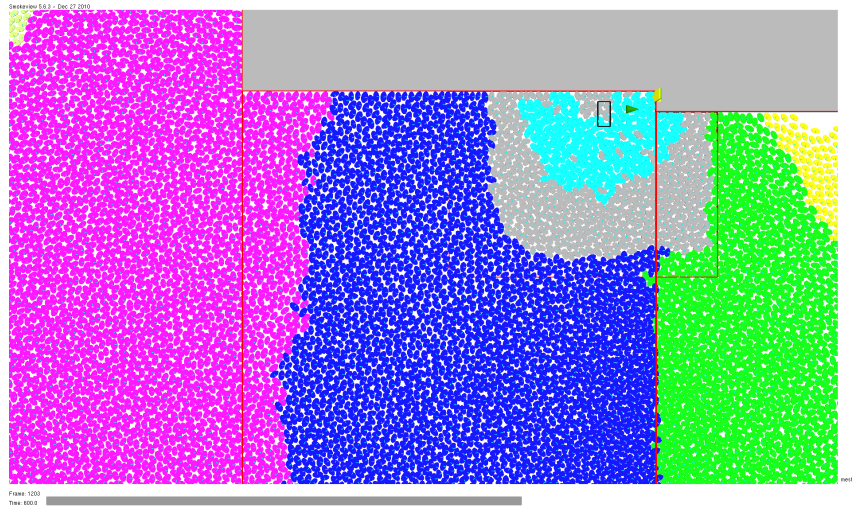
(b) Lopputilanne.

Kuva 6: Vastavirtauskoe neliögeometriassa niin monella agentilla kuin tilaan vain mahtuu. Lopulta Freezing by Heating -kiderakenne syntyy tässäkin tapauksessa.

Tulevaisuudessa isoja tapahtumia järjestettäessä on hyvä ottaa oppia Love Paraden tapahtumista. Seuraavaksi on esitetty listana muutama ehdotus, joiden avulla turvallisuusjärjestelyistä voi tehdä robustimman ongelmien suhteen, ja jos ei estää niin ainakin pienentää ongelmien vaikutusta.

- Tapahtumapaikkaa valittaessa on otettava huomioon odotettu osallistujamäärä.
- Kulunvalvonta pitää järjestää hyvin (esimerkiksi erisuuntaisten ihmisvirtojen ei pitäisi kohdata samalla reitillä).
- Järjestelyt pitää aloittaa ajoissa ja valmistelut suorittaa huolella.
- Viranomaisten esittämiin turvallisuusshuoliin on suhtauduttava vakavasti.
- Ongelmatilanteisiin on tehtävä valmistautumissuunnitelmat etukäteen.
- Turvallisuushenkilökuntaa on oltava tarpeeksi.
- Esteiden asettamista suurten ihmisvirtausten alueelle pitää välttää (esimerkiksi ruokakioskit ja ajoneuvot).
- Kommunikointi järjestäjien välillä on toimittava jatkuvasti.
- Vaihtoehtoisia kulkureittejä on käytettävä tehokkaasti.
- Turvallisuudesta vastaavien ihmisten ei pitäisi vaihtaa työvuoroja samalla kun kulunvalvonnassa on akuutteja ongelmia.
- Mikäli jokin kulkusuunta suljetaan, ihmisvirtaus pitäisi ohjata kulkemaan sen ajaksi vaihtoehtoista reittiä pitkin.
- Ihmisten rauhoittamiseksi tapahtumien kulusta pitäisi tiedottaa ongelmatilanteiden aikana (esimerkiksi kovaäänisillä).

Sosiaalisen voiman mallin pohjalta toimiva FDS+Evac -ohjelmisto soveltuu hyvin väkijoukon evakuoitumisen simulointiin. Ohjelmistolla voidaan ottaa huomioon niin tulipaloista johtuvat seikat kuin myös ihmisten käyttäytymisen vaikutus. FDS+Evac ei ole vielä suinkaan tullut kehityksensä päähän, sillä joitain ilmiöitä, kuten jononmuodostus ja Freezing by Heating, ei pystytä saamaan simuloinneissa näkyviin erilaisilla geometrioilla. Näistä epäkohdista



Kuva 7: FDS+Evac-ohelmistolla tehty simulaatio Love Parade 2010 -onnettomuudesta. Eri väreillä on kuvattu erilaisia haluttuja kävelysuuntia. Kuvan 1 kapea portaikko on osoitettu keltaisella ovelle ja vihreällä nuolella. Turkoosit agentit ovat ryntäyksen johdosta kaatuneita jalankulkijoita. Simulaatio ei vastaa täysin tapahtunutta tilannetta.

pitää päästä vielä eroon ohjelmiston tulevien versioiden myötä, jotta Love Parade -onnettomuuden kaltaisia suuria kokonaisuuksia simuloitaessa (kuva 7) saadaan varmasti realistisia tuloksia.

Viitteet

- [1] Fire dynamics simulator (fds) and smokeview (smv) - google project hosting. <https://code.google.com/p/fds-smv/> (haettu 3.6.2015), April 28th, 2015.
- [2] HELBING, D. Traffic and related self-driven many-particle systems. *Reviews of modern physics* 73, 4 (2001), 1067.
- [3] HELBING, D., FARKAS, I., AND VICSEK, T. Simulating dynamical features of escape panic. *Nature* 407, 6803 (2000), 487–490.

- [4] HELBING, D., FARKAS, I. J., MOLNAR, P., AND VICSEK, T. Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations. *Pedestrian and evacuation dynamics 21* (2002), 21–58.
- [5] HELBING, D., FARKAS, I. J., AND VICSEK, T. Freezing by heating in a driven mesoscopic system. *Physical review letters 84*, 6 (2000), 1240.
- [6] HELBING, D., AND MOLNAR, P. Self-organization phenomena in pedestrian crowds. *arXiv preprint cond-mat/9806152* (1998).
- [7] HELBING, D., AND MUKERJI, P. Crowd disasters as systemic failures: analysis of the love parade disaster. *EPJ Data Science 1*, 1 (2012), 1–40.
- [8] HELIÖVAARA, S., KORHONEN, T., HOSTIKKA, S., AND EHTAMO, H. Counterflow model for agent-based simulation of crowd dynamics. *Building and Environment 48* (2012), 89–100.
- [9] MCGRATTAN, K., HOSTIKKA, S., FLOYD, J., MELL, W., AND MCDERMOTT, R. Fire dynamics simulator, technical reference guide, volume 1: Mathematical model. *NIST Special Publication 1018* (2013).