

Opinnäytetyö (AMK)

Tieto- ja viestintäteknikan koulutus

2018

Lassi Niinikorpi

SAVUN SIMULOINTI VIRTUAALITODELLISUUS- SOVELLUKSESSA

– Case: VirPA

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Tieto- ja viestintäteknikka / Peliteknologia

2018| 38

Ohjaaja: Yliopettaja Mika Luimula, dos.

Lassi Niinikorpi

SAVUN SIMULOINTI VIRTUAALITODELLISUUSSOVELUKSESSA

- Case: VirPA

Tämän opinnäytetyön aiheena on numeeriseen virtausdynamiikkaan perustuvan simulaatiosovelluksen soveltaminen paloturvallisuutta käsittelevässä virtuaalitodellisuussovelluksessa. Opinnäytetyössä tarkastellaan nykYTEKNIKALLA kehitettyjä virtuaalitodellisuusteknologioita ja niiden käyttökohteita. Nämä teknologiat pääsääntöisesti käyttävät virtuaalitodellisuuslaseja, jotka hyödyntävät ihmisen aisteja paremmin kuin perinteiset menetöt. Tietokoneita ja simulaatiosovelluksia apuna käyttäen voidaan tehdä realistisia simulaatioita, joilla voidaan parantaa esimerkiksi rakennuksien turvallisuutta.

Opinnäytetyössä käydään läpi, miten Fire Dynamics Simulatoria käyttäen on tehty simulaatioita, ja miten niiden tuloksia on hyödynnetty sovelluksessa. Fire Dynamics Simulator on National Institute of Standards and Technologiesin valmistama simulaatiosovellus, joka on kehitetty savun simuloimista varten. Näiden simulaatioiden tulokset muutetaan taulukoiksi, joiden avulla pelimoottori ohjaa savua pelissä. Realistinen savun käyttäytyminen on tärkeää tämänkaltaisissa sovelluksissa, sillä savu on suurin yksittäinen vaaratekijä tulipaloissa.

Simulaatioita tehdessä tuloksia täytyy arvioida kriittisesti. Tulosten arvioinnissa käytettiin apuna ammattilaisten mielipidettä laadun takaamiseksi. Ilman riittävää tietämystä aiheesta kriittinen arviointi on haasteellista. Tuloksena saatiin käyttötarkoitukseen nähden tarpeeksi realistiset simulaatiot ja niiden tulokset siirrettiin onnistuneesti sovelluksen käyttöön.

ASIASANAT:

virtuaalitodellisuus, virtausdynamiikka, Fire Dynamics Simulator, simulaatio

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Information Technology / Game Technology

2018 | 38

Supervisor: Principal Lecturer Mika Luimula, Adj.Prof.

Lassi Niinikorpi

SIMULATING SMOKE IN A VIRTUAL REALITY APPLICATION

- Case: VirPA

The subject of this thesis was to research and use computational fluid dynamics in a fire safety application in virtual reality. The thesis goes through modern virtual reality technologies and what uses virtual reality has in different industries. These technologies use virtual reality headsets that uses users senses more versatile than traditional methods. The thesis examines fluid dynamics in theoretical and experimental aspects and how computational fluid dynamics can be used in advance to prevent risks in buildings.

The thesis goes through how to make simulations using the Fire Dynamics Simulator and how those results are used in the application. Fire Dynamics Simulator is developed by National Institute of Standards and Technology and it is made to simulate smoke and other low speed flows. The results of the simulations are converted in to charts that the game-engine uses to control the smoke in the application. Realistic smoke is one of the key elements in this kind of application because smoke is the most dangerous thing in fires.

The results of these simulations need to be evaluated critically. A group of specialists were interviewed to ensure good quality for the simulations. Without proper knowledge about the subject critical evaluating can be challenging. The results from the simulations were realistic enough for their purpose and they were implemented successfully to the end-product.

KEYWORDS:

virtual reality, fluid dynamics, Fire Dynamics Simulator, simulation

SISÄLTÖ

SANASTO	5
1 JOHDANTO	6
2 VIRTUAALITODELLISUUS	7
2.1 Käyttökohteet	7
2.2 Välineistö	10
3 VIRTAUSDYNAMIIKKA	15
3.1 Teoreettinen lähestymistapa	15
3.2 Kokeellinen lähestymistapa	16
4 NUMEERINEN VIRTAUSDYNAMIIKKA	17
4.1 Fire Dynamics Simulator ja Smokeview	17
4.2 Autodesk CFD	22
4.3 FloVENT	22
5 PALOTURVALLISUUSSOVELLUS	23
5.1 VirPA	23
5.2 Työkalut	23
5.3 Simulaatiot	25
6 MITTAUSTULOKSET	30
6.1 Tulosten arviointi	30
6.2 Mittaustulosten siirtäminen Unityyn	31
7 JOHTOPÄÄTÖKSET	34
LÄHTEET	36

SANASTO

CFD	Computational Fluid Dynamics eli numeerinen virtausdynamiikka.
Collider	Unityssä käytettävä peliobjektin komponentti, jonka avulla voidaan seurata törmäyksiä tai sitä, että osuuko esimerkiksi pelaaja tietylle alueelle.
Fluidi	Yleisnimitys väliaineille, joissa rakenneosat voivat liikkua vapaasti toistensa suhteen ja jotka noudattavat Bernoullin lakia. Fluideja ovat pääasiassa nesteet, kaasut ja plasmata. (Wikisanakirja 2018.)
Input	Syöttötiedot.
Output	Ulostulo.
ppm	Parts per million on suhdeyksikkö, joka ilmaisee, kuinka monta miljoonasosaa jokin on jostakin. Esimerkiksi 10 000 ppm = 1 %. (Wikipedia 2018c.)

1 JOHDANTO

Virtuaalitodellisuus on yleistynyt teknologia niin viihde- kuin hyötykäytössä. Virtuaalitodellisuuden käyttökohteista suurin osa on vielä viihdekäytössä, mutta sitä hyödynnetään paljon myös hyötypeleissä ja muualla teollisuudessa.

Opinnäytetyön tavoitteena on simuloida savun käyttäytymistä virtuaalitodellisuudessa. Tarkoituksena on numeerisen virtausdynamiikan sovellutuksia hyödyntäen kehittää toimiva ratkaisu siihen, miten savu käyttäytyy tietyssä ympäristössä. Opinnäytetyössä tehtävä projekti on osa paloturvallisuussovellusta, jonka avulla on tarkoitus tutkia miten ihmiset käyttäytyvät tulipalon sattuessa ja voidaanko virtuaalitodellisuutta käyttää paloturvallisuuden kehittämisessä hyödyksi. Toimeksiantajana projektissa toimii Turku Game Lab, joka on Turun ammattikorkeakoulun ja Turun yliopiston yhteydessä toimiva yhteislaboratorio. Turku Game Lab auttaa opiskelijoita verkostoitumaan ja kehittämään pelejä uusimpia teknologioita hyödyntäen. Turun ammattikorkeakoulu on saanut rahoitusta Palosuojelurahastolta projektia varten.

Valmistuva paloturvallisuussovellus on tarkoitettu viranomaisten käyttöön tukemaan pelastustoimen turvallisuusviestintää kansalaisille. Tuotteen kehittämisellä on yhteiskunnallinen tarve, sillä pelastustoimen turvallisuusviestinnän strategiassa todetaan, että turvallisuuskulttuuri on jokaisen vastuulla ja sitä on kehitettävä. Turvallisuusviestinnän strategian missio on hyvä turvallisuuskulttuuri, joka saavutetaan vaikuttamalla ihmisten turvallisuusasenteisiin, -tietoihin ja -taitoihin. Nämä taidot saadaan, kun toimitaan yhdessä viranomaisten, järjestöjen, yhteisöjen ja asukkaiden kanssa. (Pelastustoimen turvallisuusviestinnän strategia 2012.) Näissä asioissa Suomessakin on paljon parannettavaa, sillä Suomessa kuolee tulipalojen takia huomattavan suuri määrä ihmisiä verrattuna muuhun Länsi-Eurooppaan. Suomessa kuoli vuosina 1998–2010 noin 90 henkilöä vuosittain tulipaloissa. Näistä noin 80 % oli tapaturmaisia ja yleisin kuolinsyy oli häämyrkytys. (Pelastustoimi 2018.) Näiden syiden takia kaikki tutkimus, joka voidaan tehdä palokuolemien ehkäisyksi ja paloturvallisuuden parantamiseksi, on erityisen tärkeää.

Jotta savun simuloinnista saadaan mahdollisimman realistista, sen kehityksen tueksi tarkastellaan nykyisiä virtuaalitodellisuudessa käytettävää laitteistoa sekä niiden käyttökohteita. Opinnäytetyö tutkii virtausdynamiikan matemaattisia ja fysikaalisia ominaisuuksia ja pyrkii selvittämään parhaimman tavan toteuttaa savun käyttäytyminen.

2 VIRTUAALITODELLISUUS

Virtuaalitodellisuus on tietokoneen luoma todellisuus, joka käyttää hyväkseen esimerkiksi näkö-, tunto- ja tasapainoaistia laajemmin kuin perinteiset menetöt. Yleisimmät teknologiat käyttävät apunaan virtuaalitodellisuuteen suunniteltuja laseja, joiden avulla yritetään saavuttaa mahdollisimman realistinen kokemus. (Virtual Reality Society 2017d.) Tämän lisäksi käyttäjällä yleensä on perinteinen ohjain tai virtuaalitodellisuuteen suunnitellut ohjaimet. Virtuaalitodellisuuteen suunnitellut ohjaimet ovat käyttäjän molemmissa käsissä ja esimerkiksi värisevät pelaajan koskettaessa esineitä luodakseen vaikutelman siitä, että pelaaja olisi oikeasti virtuaalimaailmassa.

Virtuaalitodellisuus soveltuu hyvin esimerkiksi kouluttamaan ihmisiä tilanteissa, jotka olisivat oikeassa maailmassa liian kalliita tai turvallisuuden takia liian vaarallisia toteuttaa (Unimersiv 2017). Poistumista savun keskeltä hätätilanteessa on vaikea tai jopa mahdoton harjoitella todellisessa tilanteessa. Siksi virtuaalitodellisuudella voidaan ajatella olevan mahdollisuuksia savun vaarojen havainnollistamisessa. Virtuaalitodellisuus on myös monissa tilanteissa kustannustehokkaampi ja helpommin liikuteltavissa oleva vaihtoehto perinteisille harjoituksille monilla aloilla.

On kuitenkin huomattavaa, ettei virtuaalitodellisuus sovi jokaiselle käyttäjälle. Virtuaalitodellisuus aiheuttaa osalle käyttäjistä pahoinvointia tai huimausta. (Takagi & Tanaka 2004.) Oireet ovat joillain jopa niin voimakkaita, etteivät he pysty käyttämään virtuaalitodellisuuteen suunniteltuja virtuaalitodellisuuslaseja. Ongelmana on myös se, ettei virtuaalitodellisuudella pystytä aina tuottamaan tarpeeksi tarkkaa kuvaa realistisia harjoituksia varten. Tämä johtuu yleensä liian alhaisesta resoluutiosta, minkä vuoksi esimerkiksi lukeminen on virtuaalitodellisuudessa hankalaa epäselvän tekstin vuoksi. Se rajoittaa virtuaalitodellisuuden käyttöä skenaarioissa, joissa on tärkeää nähdä pienetkin yksityiskohdat esimerkiksi lentokoneen ohjaamossa.

2.1 Käyttökohteet

Alun perin viihdekäyttöön tarkoitettua virtuaalitodellisuutta on alettu käyttämään myös työtyötyössä (Virtual Reality Society 2017a). Vaikka virtuaalitodellisuutta on kehitetty vuosikymmeniä, se on ollut kuluttajien keskuudessa saatavilla vasta muutaman vuoden. Nykyiset kuluttajille suunnatut teknologiat kuten esimerkiksi HTC Vive tai Oculus Rift

mahdollistavat tarpeeksi realistisen ympäristön moniin eri tarkoituksiin. Seuraavissa kappaleissa esitellään joitakin virtuaalitodellisuuden käyttökohteita.

Virtuaalitodellisuuden eniten käytetyin muoto on edelleen viihdekäytössä. Sitä hyödynnetään esimerkiksi peleissä, videoissa ja sosiaalisessa verkostoitumisessa. Vaikka virtuaalitodellisuus on ollut kuluttajien keskuudessa useamman vuoden, se ei ole noussut niin suureen suosioon kuin monet ovat odottaneet. Virtuaalitodellisuuspelejä on kehitetty vähän verrattuna muihin peleihin ja nämä pelit ovat yleensä esittelyversioita isommasta konseptista, esittelyjä virtuaalitodellisuuden mahdollisuuksista tai pelattavissa lyhyessä ajassa alusta loppuun. Tämä johtuu siitä, että virtuaalitodellisuuteen mahdollistava välineistö on vielä monille kuluttajille liian kallista (Rosenberg 2018).

Virtuaalitodellisuus on otettu käyttöön eri aselajeissa (Virtual Reality Society 2017c). Pääasiassa virtuaalitodellisuutta hyödynnetään simuloimaan erilaisia tilanteita ja harjoittelemaan niistä selviytymistä. Tämä pitää sisällään harjoituksia aina lentosimulaatioista taistelusimulointeihin asti. Kuvassa 1 on esitetty, miten sotilas harjoittelee laskuvarjon käyttöä virtuaalitodellisuudessa. Virtuaalitodellisuus tarjoaa hyvät mahdollisuudet toteuttaa näitä harjoituksia, sillä harjoittelu virtuaalitodellisuudessa on huomattavasti turvallisempaa kuin oikeassa elämässä ja harjoituksia voidaan järjestää pienemmissä tiloissa. (ThinkMobiles 2018.)



Kuva 1. Sotilas harjoittelee laskuvarjon käyttöä virtuaalitodellisuudessa. (Wikimedia 2018.)

Terveydenhuollossa virtuaalitodellisuutta voidaan käyttää monin eri tavoin. Sitä voidaan hyödyntää niin opetuksessa kuin hoitokeinonakin. Opetuksessa virtuaalitodellisuuden avulla voidaan näyttää opiskelijoille oikeita leikkaustilanteita huomattavasti helpommin. Virtuaalitodellisuuden avulla voidaan myös harjoitella itse leikkauksia turvallisesti, mutta kuitenkin realistisissa olosuhteissa. (Virtual Reality Society 2017b.) Tähän tarpeeseen on kehitetty Osso VR -virtuaalitodellisuusalausta, jonka avulla voidaan harjoitella leikkausten suorittamista (Osso VR 2018). Virtuaalitodellisuus on tärkeää myös hoitomuotona. Kivunlievityksessä virtuaalitodellisuuden on koettu toimivan hyvin. Kivunlievitys perustuu siihen, että kun käyttäjä näkee olevansa erilaisessa ympäristössä, hän ei enää keskity siihen mitä oikeassa maailmassa tapahtuu, eikä reagoi kipuun niin voimakkaasti. (Karaman 2016.)

Virtuaalitodellisuutta käytetään hyödyksi myös paloturvallisuudessa. Sitä hyödynnetään rakennuksien suunnittelussa sekä pelastajien ja muiden ihmisten kouluttamisessa. Virtuaalitodellisuuden avulla voidaan vähentää tehokkaasti pelastajille koulutuksessa aiheutuneita kuolemia, joita tapahtui esimerkiksi USA:ssa 108 vuosina 2001–2010. Tämä oli 11,3 % kaikista palveluksessa olevien pelastajien kuolemista pois lukien he, jotka kuolivat World Trade Centerillä. (National Fire Protection Association 2018.) Virtuaalitodellisuuden käyttäminen on myös kustannustehokkaampaa ja sen avulla voidaan harjoitella monipuolisempia skenaarioita (Borgman 2017).

Virtuaalitodellisuuden mahdollisuudet paloturvallisuudessa ovat houkutelleet monia uusia yrityksiä markkinoille. Jotkut näistä yrityksistä tarjoavat asiakkaiden toiveiden ja tarpeiden mukaan räätälöityjä sovelluksia. Esimerkiksi yritys nimeltä RiVR tarjoaa edellä mainitun kaltaisia palveluja asiakkailleen. RiVR:n tavoitteena on tuottaa asiakkailleen 100-kertaa realistisempia, mutta vain murto-osan maksavia tuotteita verrattuna perinteisiin harjoitusmetodeihin. RiVR käyttää hyödykseen ympäristön skannausta, jonka avulla voidaan helposti siirtää oikean elämän ympäristöjä virtuaalitodellisuuteen. (RiVR 2017.)

Monet paloturvallisuutta opettavat sovellukset ovat kuitenkin samankaltaisia ja paikoitellen epärealistisia. Monet näistä sovelluksista keskittyvät siihen, miten käyttäytyä esimerkiksi kotona tai työpaikalla tulipalon sattuessa. Nämä kuitenkin jäävät usein puutteelliseksi savun käyttäytymisen, siitä oireilun, lämpötilan tai realistisen ulkoasun suhteen, sillä kyseisissä sovelluksissa ei ole tehty tarpeeksi taustatutkimusta, jonka tämänkaltaiset sovellukset vaatisivat. Esimerkiksi eLearning Studiosin kehittämä Fire Safety Training opettaa hyvin, miten laukaista hälytys tai mihin pitää soittaa, mutta ei opeta savun tai tulen vaarallisuutta, vaikka kyseisessä sovelluksessa liekit ovat suuret ja savua on paljon.

(eLearning Studios 2017.) Näistä syistä paloturvallisuutta opettavat sovellukset vaatisivat enemmän taustatutkimusta ennen niiden kehittämistä, sillä erityisesti viranomaiskäyttöön tarkoitetun virtuaalitodellisuussovelluksen tulisi olla mahdollisimman realistinen.

2.2 Välineistö

Vaikka virtuaalitodellisuuteen mahdollistava teknologia on ollut kuluttajilla vasta vähän aikaa saatavilla, monet kehittäjät ovat tehneet omat versionsa kyseisistä laitteista. Virtuaalitodellisuuslaitteistojen lisäksi käyttäjä tarvitsee tehokkaan tietokoneen tai pelikonsolin, jotta hän pystyy näitä laitteita käyttämään. Seuraavissa kappaleissa esitellään yleisimpiä virtuaalitodellisuuslaitteistoja.

HTC Vive on HTC:n ja Valven yhteistyössä suunnittelema virtuaalitodellisuusjärjestelmä, joka julkaistiin 5.4.2016 (Steam 2018). Sen hinta Suomessa on n. 700 €. Vive (HTC Vive) on mahdollista hankkia viihdekäytön lisäksi myös ammattilais- tai yrityskäyttöön.

Vivessä on kaksi 3,6":n AMOLED-näyttöä, joissa on resoluutiona 1 080 × 1 200 per silmä eli resoluutio on yhteensä 2 160 × 1 200. Viven ruudun virkistystaajuus on 90 Hz:ä ja näkökenttä 110°:tta. Viven toiminta perustuu majakoihin ja laseissa oleviin antureihin, jotka mittaavat lasien sekä ohjainten sijainteja. Vivessä on kaksi langatonta virtuaalitodellisuuteen suunniteltua ohjainta, joita käyttäjä pitää käsissään ja nämä vastaavat käyttäjän käsiä virtuaalimaailmassa. Viveä voidaan käyttää istualtaan tai seisaaltaan. Se tukee myös room-scalea. Sen avulla pelaajalle voidaan määrittää alue, jossa hän voi liikkua vapaasti oikeassa maailmassa. Hänen pelihahmonsa liikkeet vastaavat oikean maailman liikkeitä, mikä tuo realismia kokemukseen. Tämä alue voi parhaimmillaan olla jopa 5 m kulmasta kulmaan mitattuna. (Vive 2018a.) HTC on kehittänyt myös adapterin, jonka avulla on mahdollista käyttää Viveä langattomasti eli Viveä ei tarvitse kytkeä johdoilla tietokoneeseen. Tämä käyttää hyödykseen Intelin WiGig-teknologiaa, jonka kerrotaan antavan lähes viiveettömän kokemuksen, joka on ensisijaisen tärkeää virtuaalitodellisuudessa. Langattomuus tukee enintään 6 m × 6 m aluetta ja jopa kolme pelaajaa voi käyttää samaa aluetta. (Vive 2018c.)

HTC on julkaissut Vivestä myös Vive Pro -mallin. Pro-mallissa on 3,5":n AMOLED näytöt joiden resoluutio on 1 440 × 1 600, yhteensä 2 880 × 1 600 eli huomattavasti enemmän

kuin tavallisessa Vivessä. Vive Pro:ssa on myös integroidut kuulokkeet. (Vive 2018b.) Pro-mallin hinta on Suomessa noin 900 €. Ohjaimet ja majakat tulee ostaa erikseen.

Oculus Rift on 28.3.2016 julkaistu Oculus VR:n kehittämä virtuaalitodellisuusympäristö. Vuonna 2014 Facebook osti Oculus VR:n 2 miljardin dollarin hinnalla. (Welch 2014.) Oculus Riftin hinta Suomessa on noin 480 € ja tähän hintaan kuuluu virtuaalitodellisuuslasit, kaksi virtuaalitodellisuuteen suunniteltua ohjainta ja kaksi liikkeentunnistinta.

Riftissä (Oculus Rift) on Pentile OLED -näytöt, joissa on Viven tapaan 90 Hz:n virkistystaajuus, 1 080 × 1 200 resoluutio ja 110°:n katselukulma. Rift oli alun perin suunniteltu vain istualtaan pelattavaksi käyttäen apunaan tavanomaista peliohjainta. Myöhemmin sille kehitettiin virtuaalitodellisuuteen suunnitellut langattomat ohjaimet sekä liikkeentunnistimet. Riftin ohjaimissa on sormille omat anturit, joiden avulla pelaaja pystyy käyttämään sormiensa liikettä hyväksi peleissä ja sovelluksissa. (Oculus 2018c.)

Oculus Riftin lisäksi on kehitetty myös Oculus Go sekä Gear VR. Molemmat ovat itsenäisiä systeemejä ja toimivat langattomasti. Oculus Go on itsenäinen järjestelmä, jonka kanssa pelaaja voi Riftin tapaan käyttää erilaisia sovelluksia. Sen hinta on noin 350 € ja mukana tulee virtuaalitodellisuuslasit sekä ohjain. (Oculus 2018b.) Gear VR on Samsungin mobiililaitteille tarkoitettu alusta. Laseihin kytketään Samsungin älypuhelin, joka toimii tässä tapauksessa laitteen ytimenä. (Oculus 2018a.) Gear VR -laitteella käytetään kyseiselle alustalle suunniteltuja pelejä ja sovelluksia. Gear VR maksaa noin 100 €, mutta tämän lisäksi käyttäjällä täytyy olla Samsung Galaxy S6 tai uudempi Galaxy-tuoteperheen puhelin.

Playstation VR on Sony'n kehittämä VR-laitteisto Playstation 4 -konsoleille. Playstation VR julkaistiin 13.10.2016 ja sitä on myyty yli 3 miljoonaa kappaletta. Playstation VR:n virtuaalilasien hinta on noin 300 €. Näiden lisäksi käyttäjä tarvitsee Playstation Cameran ja halutessaan kaksi Playstation Move -ohjainta, jotka lisäävät immersiota huomattavasti. Playstation VR on yhteensopiva kaikkien Playstation 4 -konsolien kanssa.

Playstation VR käyttää vain yhtä 1 920 × 1 080 resoluution OLED-näyttöä, joka on kokoa 5,7" ja sen virkistystaajuus on parhaimmillaan 120 Hz. Playstation VR:n liikkeentunnistus perustuu laseissa oleviin valoihin. Playstation Camera seuraa näitä valoja, ja sen perusteella määrittelee, missä asennossa pelaaja on. (Playstation 2018.) Tämän metodin huonona puolena on se, että kirkkaassa valaistuksessa tai kirkasta taustaa vasten liikkeentunnistuksessa saattaa aiheutua häiriöitä, koska kamera ei tunnista lasien valoja kirkkaan ympäristön seasta.

Varjo on vuonna 2016 perustettu suomalainen yritys, joka on kehittänyt oman Varjo-nimisen virtuaalitodellisuuslaitteistonsa. Laseista ei ole vielä mahdollista saada kaupallista versiota, mutta testiversioiden saaminen on mahdollista. Tarkkaa tietoa lasien lopullisesta hinnasta ei ole tiedossa, mutta kehittäjien mukaan hinta tulee olemaan alle 10 000 €. (Varjo 2018b.) Varjon kaupallisen version on tarkoitus tulla myyntiin vuoden 2018 loppupuolella.

Varjo eroaa muista kaupallisesti tarjolla olevista laitteista, sillä siihen on kehitetty uudenlainen Bionic Display -näyttö. Tämän teknologian sanotaan mahdollistavan sama resoluutio kuin silmässä. (Varjo 2018a.) Bionic Displayn toiminta perustuu siihen, että se seuraa silmien liikettä ja parantaa resoluutiota niissä kohdissa, joihin silmä oikeassakin elämässä tarkentaisi, ja saa aikaan huomattavasti tarkemman kuvan. Resoluutio ja sen parantaminen ovat tärkeimpiä asioita, kun puhutaan kuinka hyviä eri valmistajien teknologiat ovat keskenään. Esimerkiksi lentäjien kouluttamisessa on ollut ongelmana se, ettei ohjaamon pienistä painikkeista tai teksteistä saa tarpeeksi hyvin selvää. Kuvassa 2 on vertailtu Varjon ja Oculus CV1:n läpi kuvattuja kuvia samasta autosta. Varjossa on käytetty Bionic Displayta, ja kuvasta voidaan havaita, että Varjon läpi kuvattu kuva on huomattavasti selkeämpi kuin Oculus Riftissä. Varjon beta prototyypissä on $1\,440 \times 1\,600$ resoluution kontekstinäyttö, jossa kuvan virkistystaajuus on 90 Hz, ja Bionic Display, jonka resoluutio on $1\,920 \times 1\,080$ ja kuvan virkistystaajuus 60 Hz. Varjon silmien seuranta toimii 100 Hz:n taajuudella eli se mittaa silmien liikettä 100 kertaa sekunnissa. (Varjo 2018b.)



Kuva 2. Ylemmässä kuvassa Varjon läpi kuvattu auto ja alemmassa Oculus CV1:n läpi kuvattu auto. (Varjo 2018c.)

Taulukko 1. Tunnetuimpien virtuaalitodellisuuslaitteiden eroavaisuuksia.

	HTC Vive	Oculus Rift	Playstation VR	Varjo (Beta)
Hinta (Verkkokauppa.com 1.10.2018)	699,90 €	549,90 €	299,90 €	Vain yhteistyö käyt- töön
Julkaistu	5.4.2016	28.3.2016	13.10.2016	2017
Alusta	PC	PC	PS4	PC
Virtuaalitodellisuus ohjaimet	Sisältyy pakkaykseen	Sisältyy pakkaukseen	Ostettava erikseen	Ostettava erikseen
Näytön resoluutio	2160 × 1200	2160 × 1200	1920 × 1080	2880 × 1600
Näkökentän leveys asteina	110	110	100	Ei tiedossa
Käyttötapa	Seisten huoneen kokoisella alueella tai istualtaan	Seisten huoneen kokoisella alueella tai istualtaan	Seisten pienellä alueella tai istualtaan	Seisten tai istualtaan

Taulukossa 1 on esitetty em. virtuaalitodellisuuslaitteistot ja niiden eroavaisuuksia. Taulukosta voidaan havaita, että Playstation VR on näistä huomattavasti halvin vaihtoehto. On kuitenkin huomattava, ettei Playstation VR -lasien mukana tule virtuaalitodellisuuteen suunniteltuja ohjaimia, mikä nostaa laitteiston todellista hintaa ja se on ainoa laitteisto, joka ei ole PC-alustalle. Sovellusten suunnitteluvaiheessa kehittäjien täytyy ottaa huomioon laitteistojen eroavaisuudet ja valita paras vaihtoehto. Esimerkiksi käytetäänkö sovellusta seisten tai istuen vaikuttaa laitteiston valintaan.

3 VIRTAUSDYNAMIIKKA

Virtausdynamiiikka on virtausmekaniikan alahaara, joka tutkii nesteiden ja kaasujen eli fluidien virtauksia (Dictionary 2018). Virtausdynamiiikan voi jakaa kahteen alahaaraan: aerodynamiikkaan, joka tutkii ilman ja muiden kaasujen liikettä, ja hydrodynamiikkaan, joka keskittyy nesteiden liikkeisiin. Virtausdynamiiikkaa voidaan tutkia ja lähestyä usealla eri tavalla, täysin teoreettisesti tai käyttäen hyväksi kokeellisia metodeja. (McDonough 2009, 5–6.)

3.1 Teoreettinen lähestymistapa

Virtausdynamiiikkaa voidaan tutkia täysin teoreettisesti käyttäen hyväksi ainoastaan matematiikkaa. Yhtälöitä, jotka kuvastavat fluidien liikettä, kutsutaan Navier-Stokesin yhtälöiksi. Navier-Stokesin yhtälöt ovat tasapainoyhtälöitä, jotka perustuvat Sir Isaac Newtonin toiseen lakiin. (Comsol 2018.) Newtonin toisen lain mukaan kappaleeseen kohdistuva voima F riippuu massasta m ja kiihtyvyydestä a seuraavasti:

$$F = ma.$$

Navier-Stokesin yhtälöt ovat differentiaaliyhtälöitä, jotka voidaan esittää koordinaatisto- tai vektorimuodossa. (White 2011, 238.) Ne ovat erittäin haastavia ratkaistavaksi, vaikka ilmiöt, joita niillä kuvataan, ovat yksinkertaisia jokapäiväisiä ilmiöitä, kuten tuuli tai veden virtaus. Tästä syystä Navier-Stokesin turbulenssia kuvastavien yhtälöiden ratkaiseminen on listattu Clay Mathematics Instituten seitsemän ratkaisemattoman ongelman joukkoon. Ratkaisemisesta on luvattu miljoonan dollarin palkkio. (Clay Mathematics Institute 2018.)

Virtauksia voidaan myös mallintaa ilman Navier-Stokesin yhtälöitä. Yleensä puhtaasti matemaattisessa analysoinnissa virtausta kuvastavat yhtälöt ovat yksinkertaistettuja, sillä Navier-Stokesin yhtälöiden muodostaminen sekä ratkaiseminen on hyvin haastavaa. Yksinkertaistetuilla yhtälöillä voidaan arvioida esimerkiksi, kuinka nopeasti savu täyttää huoneen. Nämä saattavat antaa suhteellisen tarkkoja arvioita spesifeissä tilanteissa, mutta laajempiin ja monimutkaisiin tutkimuksiin niitä ei juurikaan voida hyödyntää. Kaavalla

$$t = \frac{3}{2} * \frac{\rho}{C_m Q_c^{1/3}} * A_r \left(\frac{1}{z^{2/3}} - \frac{1}{H_r^{2/3}} \right)$$

voidaan ennustaa, miten savu täyttää huoneen, jonka tasaisen katon korkeus on H_r ja lämmöntuotto on tasaista. (Yamaguchi & Tanaka 2005.) Tässä yhtälössä nähdään, ettei huomioon oteta mitään ulkopuolisia häiriöitä esimerkiksi lämpötilan muutoksia tai sen säteilyä ja kulkeutumista rakenteisiin, jotka oikeassa tilanteessa saattaisivat vaikuttaa savun käyttäytymiseen. Kaavassa otetaan huomioon ainoastaan aika t , savun tiheys ρ , tupruttamiskerroin C_m , palon lämmöntuotto Q_c , katon pinta-ala A_r , savumassan alapinnan korkeus z ja huoneen korkeus H_r .

3.2 Kokeellinen lähestymistapa

Virtausdynamiikkaa voidaan tutkia myös kokeellisesti. Jo esiajoista lähtien ihmiset ovat tutkineet kokeellisesti nesteiden ja kaasujen ominaisuuksia. Vaikka kyseessä ei olekaan koejärjestelyiltään tieteellinen tulos, kastelujärjestelmistä tai nuolista voidaan päätellä, että esiaikojen ihmisellä oli jonkinlainen ymmärrys virtauksesta. He pystyivät esimerkiksi päättelemään, minkä mallisessa objektissa on vähiten ilmanvastusta. (Dooge 2003.) Myöhemmin fyysikkonakin tunnettu Arkhimedes tutki kappaleiden kellumista. Hän kehitti lain, jonka mukaan fluidiin upotettuun kappaleeseen kohdistuu ylöspäin suunnattu voima, jonka suuruus on kappaleen syrjäyttävän fluidin paino. Arkhimedeen laissa F_A riippuu muista suureista seuraavasti:

$$F_A = m_{\text{fluidi}} * g,$$

jossa ylöspäin kohdistuva voima, m_{fluidi} on syrjäytetty massa ja g on maan vetovoimasta aiheutuva kiihtyvyys, joka on noin $9,81 \text{ m/s}^2$.

Nykypäivän teknologialla virtausten kokeellinen testaaminen on mennyt entistä kehittyneempään suuntaan. Esimerkiksi tuulitunneleilla saadaan hyvin tarkkaa kuvaa, miten ilmanvastus vaikuttaa objektiin. Näiden tulosten avulla voidaan parantaa esineiden aerodynamiikkaa, tehden niistä entistä turvallisempia ja energiatehokkaampia. (Wild 2018.)

4 NUMEERINEN VIRTAUSDYNAMIIKKA

Numeerinen virtausdynamiiikka eli CFD (Computational Fluid Dynamics) on virtausmekaniikan osa-alue, jossa matematiikkaa ja tietokoneita apuna käyttäen tutkitaan ja simuloitaan fluidien käytöstä. Huippunopeiden tietokoneiden avulla ratkaistaan Navier-Stokesin yhtälöitä ja voidaan mallintaa hyvinkin monimutkaisia tilanteita. (CFD Online 2013.) Ilman CFD:tä virtausten mallintaminen on haasteellista ja sen takia CFD:tä käytetään hyödyksi monissa eri sovelluksissa.

Simulaattorit ovat yleinen CFD:n käyttökohde. Simulaattoreita hyödynnetään mallintamaan oikeita elämän tilanteita tietokoneita apuna käyttäen. Nykyään löytyy helposti ilmaisiaakin CFD-simulaattoreita, jotka toimivat selaimissa ja tekevät simulaatiot pilvipalvelimilla. Ammattilaiskäyttöön suunnitellut simulaattorit ovat maksullisia ja ne suorittavat simulaatiot yhtä tai useampaa tietokonetta käyttäen. Yrityskäyttöön tarkoitetut simulaattorit maksavat tuhansia euroja vuodessa, mutta saattavat silti säästää rahaa, jos niiden avulla voidaan suunnitella esimerkiksi huoneen ilmanvaihto etukäteen toimivaksi, eikä rakentamisen jälkeen tarvitse tehdä korjaustoimenpiteitä. Tarkkojen simulaatioiden avulla voidaan ennaltaehkäistä riskejä jo suunnitteluvaiheessa. (Kuzmin 2018.)

4.1 Fire Dynamics Simulator ja Smokeview

Fire Dynamics Simulator on National Institute of Standards and Technologyn kehittämä ilmainen savun simulointiin tarkoitettu sovellus. FDS:ää (Fire Dynamics Simulator) voidaan käyttää myös simuloimaan turbulensseja sekä akustiikkaa. Sovellus käyttää matemaattista mallia nimeltä large eddy simulation. (NIST 2018.) Large eddy simulationissa ei oteta huomioon pienimpiä yksiköitä, sillä nämä ovat raskaimpia laskettavia. Tämän takia large eddy simulation on yleisesti käytössä oleva malli virtausten mallintamiseen. Tarkempia tuloksia saataisiin direct numerical solutionilla, mutta sen käyttäminen on liian raskasta. (Zhiyin 2015.)

FDS on konsolissa toimiva sovellus, jossa ei ole oletuksena minkäänlaista graafista käyttöliittymää. Simulaatioita varten on määritettävä input-tiedosto, joka pitää sisällään simulaatioissa käytettävät raja-arvot. Raja-arvoissa määritetään kaikki olennaiset muuttujat, jotka vaikuttavat simulaation kulkuun esimerkiksi minkälaisessa ympäristössä palo tapahtuu, mikä on palon lähde, kuinka kauan palo kestää tai mikä on palon lämmöntuotto.

Ohjelmakoodissa 1 on esitetty yksinkertainen input-tiedosto, joka pitää sisällään olennaisia raja-arvoja, joita lähes jokaisessa simulaatiossa on oltava.

Ohjelmakoodi 1. Fire Dynamics Simulatorissa käytettävä input-tiedosto.

```
&HEAD CHID = 'room', TITLE='room fire model' /

&MESH IJK=40,40,24, XB=0,4,0,4,0,2.4 /

&TIME T_END=900 /
&REAC SOOT_YIELD=0.01,FUEL='PROPANE' /

&OBST XB=1,3,1,3,0,1 /

&SURF ID='fire', HRRPUA=125 /
&VENT XB=1,3,1,3,1,1, SURF_ID='fire' /

&VENT MB='XMIN' ,SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='XMAX' ,SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMIN' ,SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMAX' ,SURF_ID='OPEN' /

&SLCF PBX=2.0, QUANTITY='TEMPERATURE' /
```

FDS:ssä komentojen eteen laitetaan &-merkki ja loppuun /-merkki, jotka määrittävät komentojen pituuden. Ohjelmakoodin 1 alussa on määritelty simulaation nimi HEAD CHID -komennolla, joka esimerkiksi määrittää sen minkä nimisiä output-tiedostoja simulaatio tuottaa. Osa tämän simulaation output-tiedostosta on esitetty taulukossa 2. Tämän jälkeen TITLE-komennolla on määritetty simulaatiolle otsikko, joka yleensä kuvastaa simulaatiota.

Seuraavaksi simulaatiolle on määritelty laskentaruudukon tarkkuus ja suuruus. CFD-simulaatiossa tarkasteltavat alueet jaetaan aina tietynkokoisiin ruutuihin, joissa laskenta tapahtuu. Mitä tiheämpi ruudukko ja pienemmät ruudut, sitä tarkempia tuloksia saadaan, mutta sen raskaampi simulaatiosta tulee. Simulaatioita tehdessä täytyy kuitenkin ottaa huomioon simulaation käyttötarkoitus. Tarkempi ruudukko ei välttämättä anna huomattavasti parempaa lopputulosta, mutta saattaa viedä paljon enemmän aikaa. Simulaatioissa täytyy siis löytää tasapaino tarkkuuden ja simulaation laskemiseen kulutettavan ajan välillä. MESH-komennon IJK-osiolla määritetään ruudukon tarkkuus ja XB-osiolla ruudukon koko ja sijainti. Määritettäessä sijainti FDS:ssä käytetään yleensä koordinaattimuotoa, jossa käytetään kuutta numeroa. Jokaiselle akselille on kaksi arvoa, joista

ensimmäinen määrittää mistä kyseinen objekti lähtee ja seuraava mihin se loppuu. Ohjelmakoodissa 1 laskentaruudukko on määritetty lähtemään kaikkien akselien nollapisteestä. Lopetuspisteet ovat leveyden ja syvyyden suhteen 4:ssä ja korkeuden 2,4:ssä eli ruudun koko on 4 m × 4 m × 2,4 m. Ruudun tarkkuus määritellään niin, että jokainen numero kuvastaa kuinka monta ruutua on jokaista akselia kohden. Koska ruutuja on määritetty kymmenkertaisesti sen suuruutta kohden, yhden ruudun koko on 0,1 m × 0,1 m × 0,1 m.

TIME-komennolla on määritetty, kuinka kauan simulaatiota lasketaan reaaliaikaa. Tässä simulaatiossa lasketaan 900 s oikeaa aikaa. REAC-komennolla määritetään palamiseen liittyviä tekijöitä. Tässä simulaatiossa on määritetty ainoastaan, kuinka paljon polttoaineen massasta muuttuu noeksi SOOT_YIELD-komennolla ja polttoaineen tyyppi FUEL-komennolla.

Seuraavaksi simulaatioon on laitettu yksi 2 m × 2 m × 1 m kokoinen laatikko OBST-komennolla, jolla määritetään kaikki seinät, katot, huonekalut jne. joita simuloitavissa huoneissa tai rakennuksissa halutaan käyttää. SURF-komennolla voidaan määrittää erilaisille pinnoille erilaisia ominaisuuksia. Tässä tilanteessa sille on määritetty nimi fire ID-komennolla ja lämmöntuoton määrä HRRPUA, (Heat Release Rate Per Unit Area) joka tarkoittaa kuinka paljon lämpöä tuotetaan kW/s neliometriä kohden.

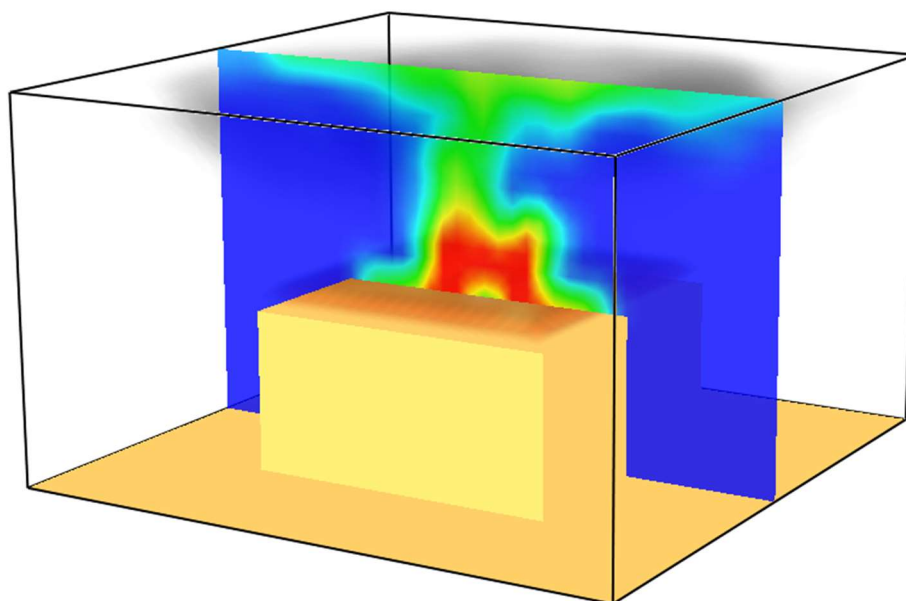
VENT-komennolla määritetään alueita, joissa tapahtuu reaktioita. Palamisen lisäksi sen avulla voidaan määrittää esimerkiksi ilmastointikanavia tai sprinklereitä. Tässä tapauksessa tapahtuu kuitenkin palamista, sillä tämän alueen SURF_ID:ksi on määritetty fire, mikä vastaa edellä määritettyä palamista. Koska palamisalueen koko on 4 m² ja lämmöntuotto neliometriä kohden on 125 kW/s, todellinen lämmöntuotto kyseisellä alueella on 500 kW/s. Tämän jälkeen on VENT-komentoa käyttäen määritetty laskentaruudun reunaehdot. Reunaehdoissa on määritetty, että x- ja y-akselien minimi- ja maksimiarvot jätetään avoimiksi eli savu pääsee valumaan niistä ulos, jossa FDS:n ei tarvitse enää laskea niiden liikettä.

Lopuksi on määritetty yksi mittaava elementti SLCF-komennolla, joka mittaa lämpötilaa. Näiden avulla simulaatioon voidaan lisätä eri suureita mittaavia viipaleita, jotka mittaavat ja näyttävät kyseisen suureen arvon sille määritellyssä koordinaatiston paikassa. Viipaleiden paikan voi määrittää eri tavalla kuin esimerkiksi esteiden paikat. Tässä tapauksessa on käytetty PBX-muotoa, jossa määritellään mihin x-akselin kohtaan se on sijoitettu.

Taulukko 2. Osa edellä mainitun esimerkkisimulaation output-tiedostosta.

Column1	Column2	Column3
s	kW	kW
Time	HRR	Q_RADI
0,00E+00	0,00E+00	-1,10E-05
9,26E-01	2,69E+02	-9,75E+01
1,82E+00	4,60E+02	-1,44E+02
2,72E+00	4,89E+02	-1,35E+02
3,61E+00	4,65E+02	-1,29E+02
4,51E+00	5,09E+02	-1,39E+02
5,41E+00	5,02E+02	-1,38E+02
6,32E+00	5,01E+02	-1,37E+02
7,21E+00	5,00E+02	-1,37E+02
8,10E+00	5,10E+02	-1,41E+02
9,01E+00	5,06E+02	-1,40E+02

FDS:ssä tehdyt simulaatiot voidaan visualisoida Smokeview:ssa. Smokeview on NIST:in kehittämä sovellus, joka tulee FDS:n mukana. (NIST 2018.) Smokeview'ta voidaan käyttää simulaatioiden aikana ja sen jälkeen. Sillä on helppo tarkistaa, toimivatko input-tiedostossa määritellyt reunaehdot halutulla tavalla. Kuvassa 3 on esitetty edellinen esimerkkisimulaatio Smokeview:ssa. Kuvassa nähdään, miten propaani palaa laatikon päällä ja levittää savua. Kuvassa nähdään myös viipale, joka mittaa kyseisen kohdan lämpötilaa.



Kuva 3. Edellä mainittu esimerkksimulaatio Smokeview'ssa.

FDS:n vahvuksina ei voida pitää käyttäjäystävällisyyttä, vaikka se onkin monipuolinen ja kohtalaisen helppokäyttöinen. FDS ei myöskään tue vinoja pintoja, mikä hankaloittaa joidenkin rakennuksien mallintamista. Sovelluksella on hyvin pieni yhteisö, josta saisi neuvoja sovelluksen käyttöä varten. Sovelluksen mukana tulee hyvinkin tarkka yli 300-sivuinen ohjekirja, mutta siitä tiedon löytäminen on paikoitellen hankalaa. Hiemankaan monimutkaisempien simulaatioiden tekeminen vaatii virtausdynamiikan ja kemian hallitsemisesta, sillä simulaatioihin voi määrittää kaiken aina polttoaineen kemiallisesta koostumuksesta seinien koostumuksiin asti.

Fire Dynamic Simulatoria varten on tehty muutamia kolmannen osapuolen lisäosia ja sovelluksia helpottamaan sen käyttöä. Yksi näistä on BlenderFDS, joka korvaa lähes täysin FDS:n oman tekstipohjaisen käyttöliittymän. Se on ilmainen avoimen lähdekoodin lisäosa Blender-mallinnustyökalulle. BlenderFDS:n avulla Blenderissä voidaan muokata haluttu malli, lisätä mittauspisteet ja siirtää tämä tieto tiedostoksi, jota FDS osaa lukea. (BlenderFDS 2018.) Maksullisena lisäosana FDS:ään voi hankkia Thunderhead Engineeringin luoman PyroSim-sovelluksen. PyroSim korvaa myös FDS:n käyttöliittymän omalla graafisella käyttöliittymällään, jonka avulla simulaatioiden luonti on helpompaa.

PyroSimin vahvuutena voidaan pitää myös sitä, että se tukee Autocadilla tehtyjä malleja. (PyrosSim 2018.)

4.2 Autodesk CFD

Autodesk CFD on Autodeskin luoma CFD-sovellus. Autodesk CFD on maksullinen sovellus ja tarkoitettu ammattilaiskäyttöön. Autodesk CFD:stä on saatavilla kahta eri versiota: premiumia ja ultimatea. Sovelluksen hinta on noin 9 000–11 000 \$ vuodessa. (Novedge 2018.) Autodesk CFD:ssä on graafinen käyttöliittymä ja sillä voidaan toteuttaa niin neste- kuin ilmasimulaatioita. Sen vahvuuksiin kuuluu myös pilvessä suoritettava simulointi. Tämä on eduksi, sillä pilvessä suoritettu simulaatio ei rasita tietokonetta niin paljon kuin, jos se suoritettaisiin vain yhtä tietokonetta käyttäen. (Autodesk 2018.)

4.3 FloVENT

FloVENT on Mentorin kehittämä maksullinen CFD-simulaattori. FloVENT on tarkoitettu ammattilaiskäyttöön ja se on suunniteltu tekemään simulaatioita realistisista kohteista. Sen avulla voidaan tehdä arvioita ennalta millainen huoneiden ilmanlaatu tulee olemaan, miten laboratorioden ilmankierto toimii tai miten ilma kiertää rakennuksien ympärillä. FloVENTin käyttöliittymä on suunniteltu mahdollisimman helpoksi, jotta työn tekeminen olisi nopeampaa ja helpompaa. (Mentor 2018.)

5 PALOTURVALLISUUSSOVELLUS

Opinnäytetyössä tehtävän projektin päämääränä oli tuottaa realistista dataa savun käyttäytymisestä ja saada siirrettyä tämä informaatio Unity-pelimoottorille. Työ toteutettiin Turun ammattikorkeakoulun Palosuojelurahaston projektia VirPAA varten.

5.1 VirPA

VirPA on Turun ammattikorkeakoulun Palosuojelurahaston projekti, jonka tarkoitus on tutkia, voiko virtuaalitodellisuutta käyttää paloturvallisuusviestinnän välineenä. Projektissa on tarkoitus valmistaa sovellus, jossa tutkitaan ihmisten käyttäytymistä palotilanteissa ja selvitetään, voiko tämänkaltaista sovellusta käyttää paloturvallisuuden parantamisessa hyödyksi.

Projektin keskeisin asia on virtuaalitodellisuus ja sen hyväksikäyttö. Virtuaalitodellisuus tarjoaa hyvät mahdollisuudet paloturvallisuussovelluksen tekemiseen, sillä sen avulla voidaan kuvastaa palotilanne kaikkein realistisimmin. Projektissa päädyttiin käyttämään HTC Vive -virtuaalitodellisuuslaitteistoa, sillä kehittäjillä oli siitä eniten kokemusta, ja Vive Pro -mallissa on suurin resoluutio tämän hetkisistä kaupallisista virtuaalitodellisuuslaeista.

Koska projektissa haluttiin panostaa realismiin, savun käyttäytyminen ja sen vaarallisuuden tutkiminen ja mallintaminen olivat tärkeässä roolissa. Savun käyttäytyminen ja erityisesti sen vaarallisuus on muissa vastaavissa sovelluksissa jätetty huomioimatta, mikä antoi VirPALLE hyvät mahdollisuudet erottua muista sovelluksista. VirPAssa ei haluttu antaa pelaajalle tietoa siitä, että tässä tutkitaan hänen käytöstä palon sattuessa. VirPAssa pelaajalle kerrotaan hänen tulleen työhaastatteluun, minkä aikana palohälytys alkaa soida ja tämän hetken jälkeen aletaan tutkimaan pelaajan toimintaa. Tämän tavan toivottiin antavan todenmukaisempaa tietoa ihmisten käyttäytymisestä.

5.2 Työkalut

Savun simulointiin päädyttiin käyttämään Fire Dynamics Simulator -sovellusta. Alun perin projektissa oli tarkoitus laskea itse savun liikkeitä. Projektia varten tutkittiin

yksinkertaistettuja yhtälöitä savun liikkeen kuvaamiseksi sekä konsultoitiin virtausdynamiikan asiantuntijaa. Myöhemmin todettiin, etteivät yksinkertaistetut yhtälöt vastanneet projektin tarpeita ja vaativien yhtälöiden ratkaiseminen todettiin mahdottomaksi projektin suunnittelussa aikataulussa, joten simulointiin tarkoitettu työkalu oli tarpeen. Fire Dynamics Simulator toimi tarkoitukseen hyvin, koska se tarjoaa monipuoliset mahdollisuudet muokata eri simulaatioita, sen avulla voidaan tuottaa paljon informaatiota helposti luettavassa muodossa ja sen käyttö on ilmaista.

FDS:n kanssa käytettiin Smokeview-sovellusta, joka visualisoi Fire Dynamics Simulatorissa tehdyt simulaatiot. Se asentuu oletuksena, kun FDS asennetaan, joten sen hankkiminen oli helppoa. Smokeview on Fire Dynamics Simulatorin tapaan monipuolinen ja sitä voidaan käyttää simulaatioiden aikana, joten on helppo tarkistaa tunnistaako Fire Dynamics Simulator annetut raja-arvot oikein ja eteneekö simulaatio halutulla tavalla.

Mallien tuominen FDS:ään toteutettiin 3D-mallinnusohjelma Blenderiin saatavalla ilmaisella lisäosalla nimeltä BlenderFDS. Se korvasi lähes täysin Fire Dynamics Simulatorin alkuperäisen tekstipohjaisen käyttöliittymän ja näin ollen helpotti ja nopeutti työn tekemistä huomattavasti. On kuitenkin huomattavaa, että BlenderFDS:n käyttö vaatii tietämystä FDS:n ja Blenderin käyttämisestä.

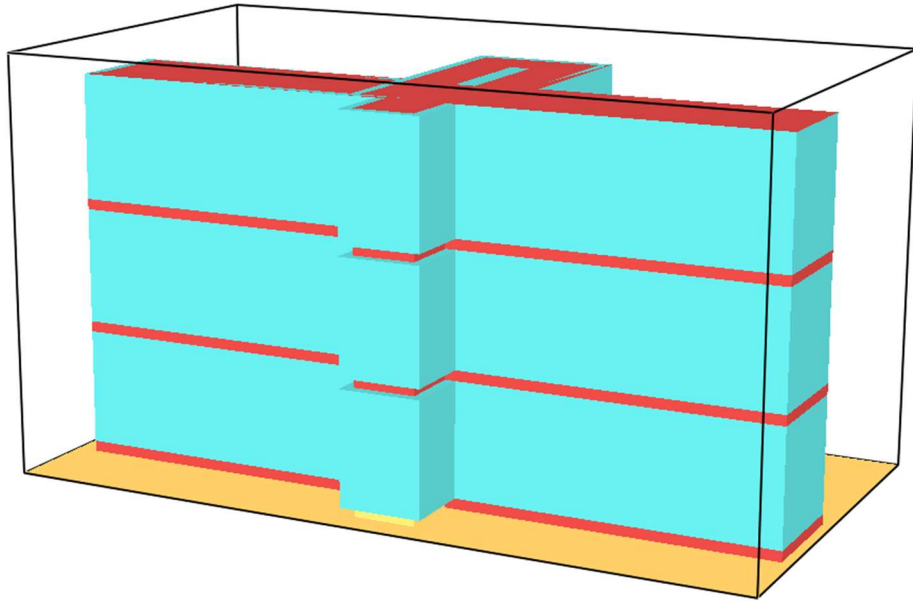
Projektissa päädyttiin käyttämään Unity-pelimoottoria, joka on Unity Technologiesin kehittämä järjestelmäriippumaton pelimoottori. Se julkaistiin kesäkuussa 2005 ja tuote on siitä lähtien kehittynyt ja saanut päivityksiä. Se tukee 27 eri alustaa konsoli-, tietokone- ja mobiililaitteilla. (Unity 2018.) Unity sisältää kaiken tarpeellisen pelien ja prototyyppien kehitystä varten. Siihen päädyttiin, sillä siitä oli kehittäjillä eniten kokemusta ja se on ilmainen tiettyjen rajojen sisällä, jotka eivät tässä projektissa ylittyneet.

Projektinhallintaan käytettiin Trello-nimistä verkkosivustoa. Trello on virtuaalinen ilmoitustaulu, jonka avulla pystytään jakamaan kehittäjille tehtäviä sekä pitämään kirjaa, mitä on tehty ja mitä on vielä tekemättä. Trellossa tehtäviä jaetaan tekemällä kortteja, joihin lisätään tehtävän nimi sekä tehtävän tekijät. Jokaiselle tehtävälle voidaan myös määrittää alatehtäviä. Valmiit tehtävät voidaan joko siirtää omaan pinoonsa tai jättää paikoilleen. Trelloa voidaan käyttää monella eri tavalla. Yhdelle taululle voidaan rajata alueita jokaiselle ajanjaksolle tai sitten jokaista ajanjaksoa varten voidaan tehdä kokonaan uusi taulu. Tässä projektissa jokaista viikkoa kohden tehtiin uusi taulu. Jokaisella viikolla tehtävät, jotka eivät olleet vielä valmiita siirrettiin uudelle taululle ja tehdyt tehtävät jätettiin sen viikon taululle, jolla ne oli saatu valmiiksi.

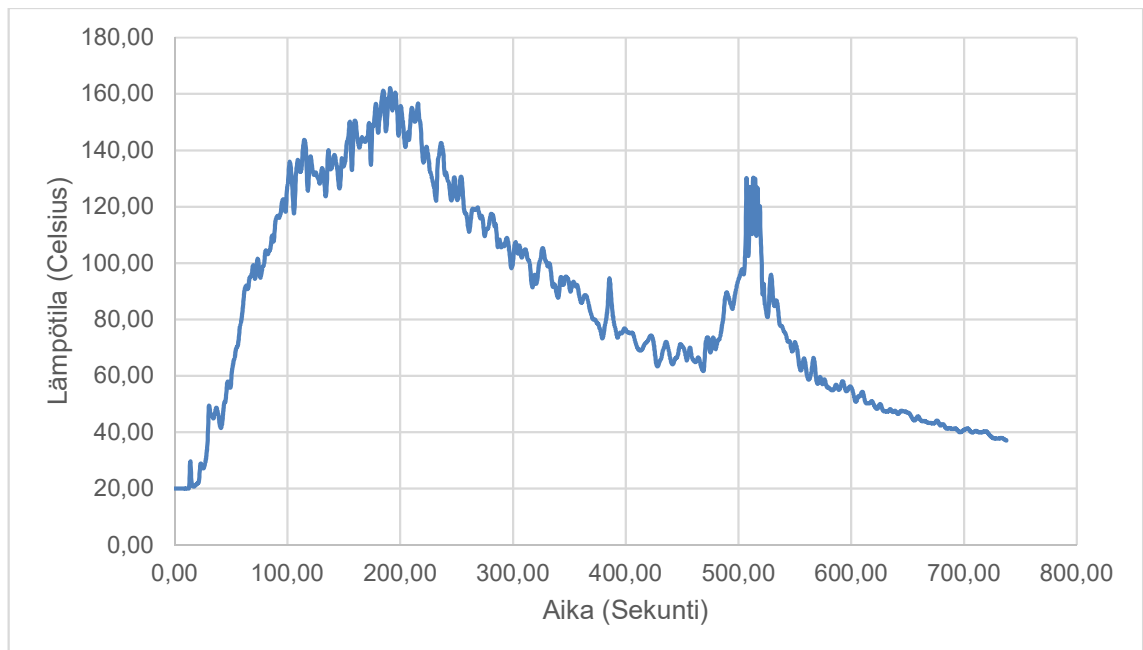
5.3 Simulaatiot

Projekti toteutettiin tekemällä simulaatioita Fire Dynamics Simulatoria käyttäen. Ennen kyseisen ohjelmiston löytämistä oli tarkoitus laskea käsin savun käyttäytyminen. Tämä kuitenkin todettiin mahdottomaksi tehtäväksi annetun aikarajan puitteissa. Simulaatiot olivat aluksi yksinkertaisia, mutta loppua kohden olosuhteet pyrittiin muuttamaan mahdollisimman realistisiksi.

Ensimmäiset simulaatiot tehtiin graafikkotiimin tuottamaan porraskäytävän 3D-malliin, jossa on kaksi huonetta jokaisessa kerroksessa (Kuva 4). Näiden simulaatioiden tarkoitus oli tutkia savun käyttäytymistä portaikossa sekä hahmotella kuinka suuresta tulipalosta voisi olla kyse. Simulaatiossa palon lähteenä käytettiin kalustettua aulatilaa, jossa olisi neljä sohvaa, neljä tuolia ja kaksi pöytää. Sen sijaan, että olisi simuloitu huonekalujen palamista, käytettiin polttoaineena kuitenkin propaania, koska sen simuloiminen oli tässä vaiheessa projektia yksinkertaisempaa. Yhteenlaskettuna näiden kalusteiden lämpöenergian tuotto olisi noin 6804 kW/s. (Kim & Lilley 2000.) Kuviosta 1, jossa vaakakselissa on aika sekunteina ja pystyakselissa on lämpötila celsiusasteina, nähdään, että simulaatiossa käytetty palo oli sovelluksen tarkoitukseen liian suuri. Lämpötila nousee jo reilun kolmen minuutin kohdalla yli 150 °C:seen, joka hengitettynä on ihmiselle tappava lämpötila, eikä pelaaja mitenkään voisi selvitä tilanteesta.



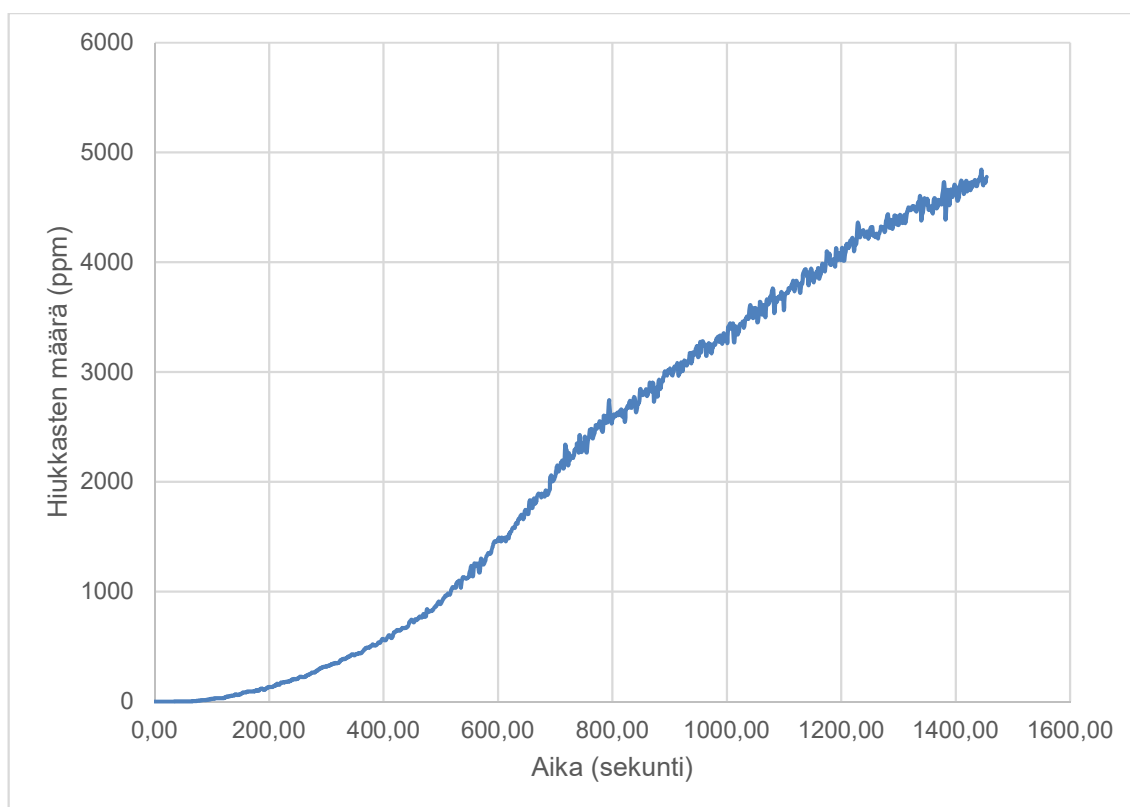
Kuva 4. Portaikkomalli Smokeview'ssa.



Kuvio 1. Portaikko mallin lämpötila ajan funktiona toisen kerroksen vasemmasta siivestä mitattuna.

Seuraavissa simuloinneissa palon lähde vaihdettiin sähköpaloksi. Tarkoitus oli jäljitellä palvelinhuoneesta alkunsa saanutta paloa. Polttoaineeksi vaihdettiin neopreeni, jota

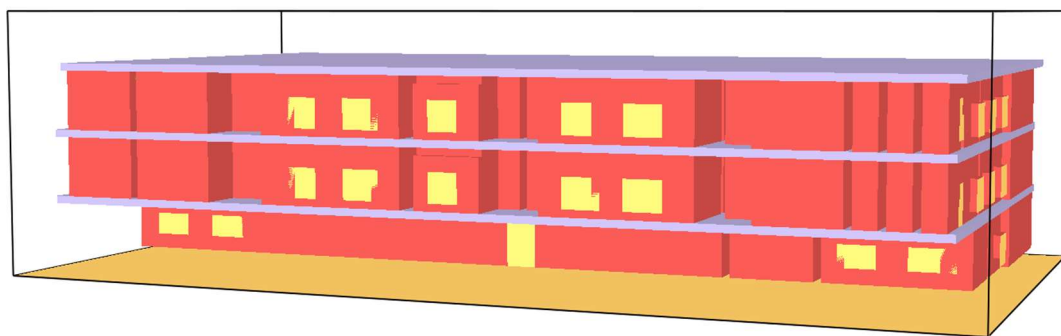
käytetään johtojen suojuksissa. Simulaatiossa käytettiin neopreenin kaavaa $C_3H_{4,5}Cl_{0,5}$. Tämä informaatio saatiin toisesta sähköpaloa tutkivasta simulaatiosta. (Github 2018.) Toisesta simulaatiosta saatu kaava oli hyvin lähellä kloropreeniä, C_4H_5Cl , josta neopreeni valmistetaan, joten sen oletettiin olevan realistinen arvo. (Wikipedia 2018b.) Ympäristön ilma sekä palamistuotteet pyrittiin määrittämään mahdollisimman realistisiksi. Nämä simulaatiot tuottivat parempaa tulosta, sillä niissä lämpötila sekä savun leviäminen olivat maltillisempia ja sopivat paremmin sovelluksen käyttöön. Hään vähäinen pitoisuus kuitenkin arvelutti. Hään pitoisuus on esitetty kuviossa 2, jossa hään pitoisuus on pysty- ja aika vaaka-akselissa. Häkä on mitattu palohuoneessa hyvin läheltä paloa. Noin 600 s oikeaa aikaa kaikki huoneet olivat savun peitossa, mutta hään pitoisuus oli vain 1500 ppm. Tämä pitoisuus aiheuttaa päänsärkyä, tiheämpää sykettä ja huonovointisuutta 20 min:n aikana ja kuoleman alle 2 h:ssa. (Wikipedia 2018a.) Kuitenkin yhdistettynä lämpötilan nousuun sekä muihin vaarallisiin molekyyleihin ilmassa, vaatisi tilanne nopeaa poistumista.



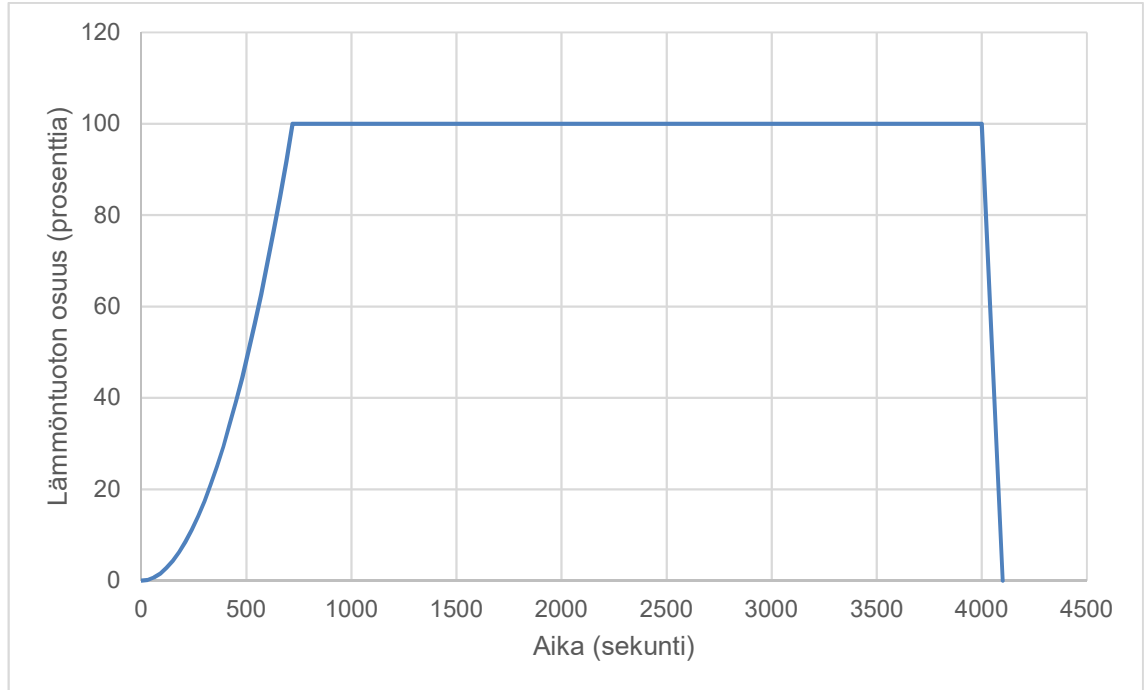
Kuvio 2. Hään määrä palohuoneesta mitattuna.

Viimeisimmät simulaatiot tehtiin lopulliseen malliin rakennuksesta, joka tulisi myös sovelluksen käyttöön (Kuva 5). Rakennuksen pinta-ala oli noin 4150 m². Koska rakennus

oli huomattavasti suurempi kuin aikaisemmin, tehtiin myös palosta hieman suurempi. Lopullisen palon koko oli 2 900 kW/s neliometriä kohden. Palon lähteen koko oli 0,5625 m², joten todellinen palon lämmöntuotto oli 1 631,25 kW/s. Palo kasvoi ajan funktiona ja se on esitetty kuviossa 3, jossa vaaka-akselissa on aika sekunteina ja pystyakselissa on lämmöntuoton osuus kokonaislämmöntuotosta prosentteina. Esimerkiksi ajan hetkellä 500 s lämpöä tuotetaan 50 % sen maksimista eli 1631,25 kW:sta/s. Tällä hetkellä lämmöntuotto oli siis noin 815,6 kW/s. Lämmöntuotto laitettiin muuttumaan ajan funktiona, sillä savun leviäminen oli tasaisempaa ja realistisempaa. Simulaatiossa käytettiin 0,45 m × 0,45 m × 0,45 m laskentaruudukkoa. Näin suuressa mallissa tämä kuitenkin aiheutti pieniä komplikaatioita. Epätarkempi laskentaruudukko aiheutti mallissa vääristymiä, jotka olivat tässä tapauksessa reikiä, sillä kaikki seinät eivät siirtyneet alkuperäisestä mallista Fire Dynamics Simulatorin tunnistettavaksi. Tämän ei kuitenkaan todettu vaikuttavan savun leviämiseen. Rakennuksesta olisi joka tapauksessa päästävää savua ulos, sillä täysin ilmatiivis rakennus aiheuttaisi rakennukseen liian suuren paineen ja liian suuren nopeuden hiukkasille, eikä FDS pysty laskemaan liian suurilla nopeuksilla. On myös huomattavaa, etteivät oikeatkaan rakennukset ole täysin ilmatiiviitä. Simulaation laskeminen kesti noin 19,5 h ja tässä ajassa saatiin laskettua 38 min savun leviämistä.



Kuva 5. Lopullisen rakennuksen malli Smokeview:ssä.

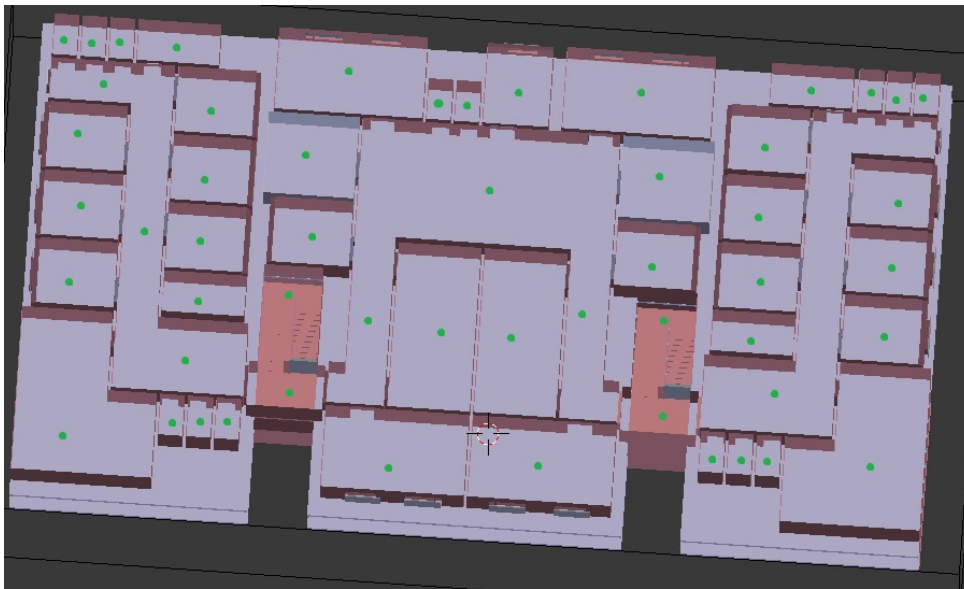


Kuvio 3. Palon kasvaminen ajan funktiona.

6 MITTAUSTULOKSET

6.1 Tulosten arviointi

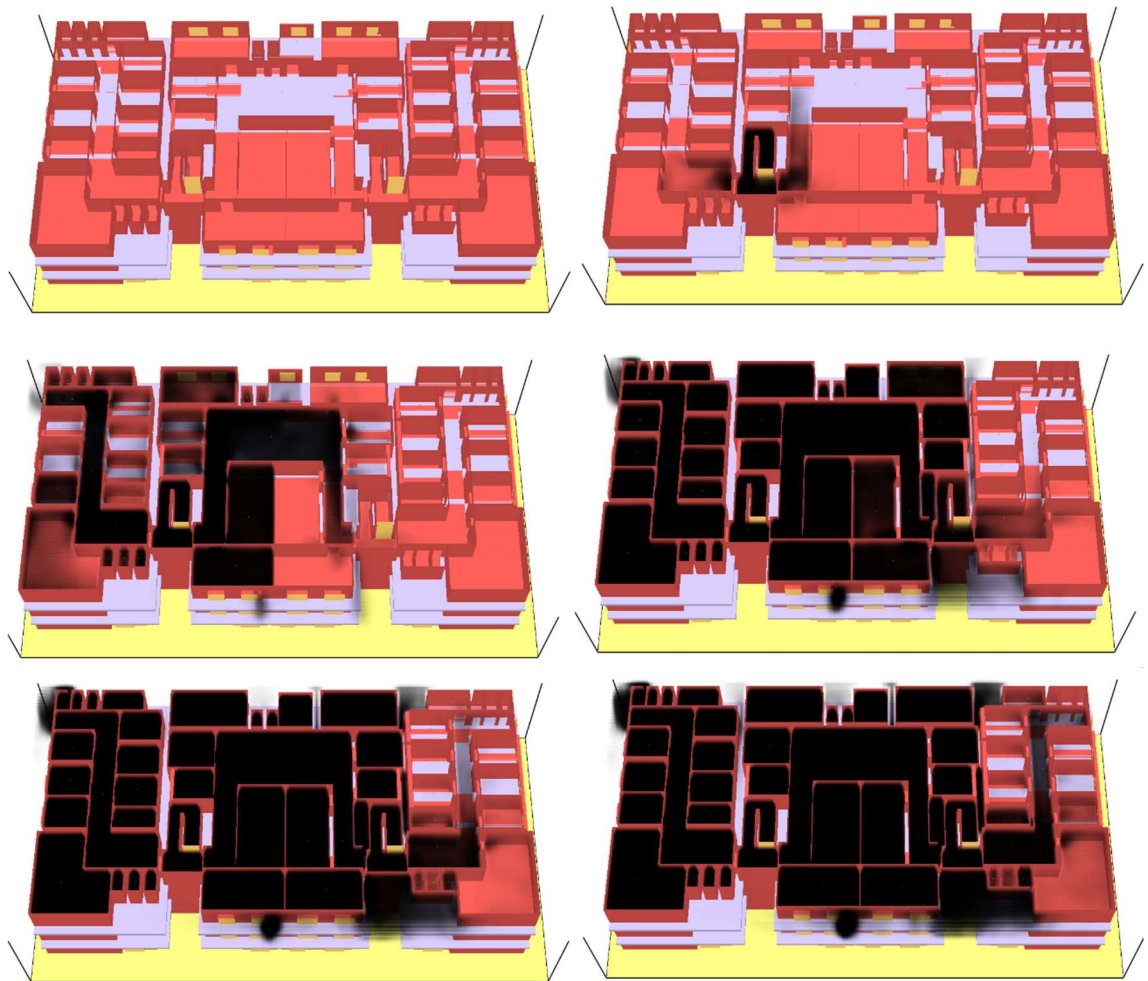
Simulaatioista saatiin kerättyä paljon dataa. Viimeisimmissä mittauksissa jokaisesta huoneesta sekä käytäviltä mitattiin kolmea eri arvoa koko mittausten ajan (Kuva 6). Mitattavat arvot olivat näkyvyys, lämpötila sekä hänn määrä. Mittapistet olivat noin 3,2 m:n korkeudella lattiasta mitattuna ja huoneiden korkeus oli noin 3,6 m. Jokainen näistä arvoista mitattiin 0,5 s:n välein, jotta dataa olisi riittävästi.



Kuva 6. Mittauspisteet rakennuksen kolmannessa kerroksessa.

Monien muuttujien vuoksi tulosten todennäköisyyden arvioiminen on hankalaa. Siksi tuotteen valmistusvaiheessa pyydettiin pelastustoimen asiantuntija-arviota savun virtauksen todennäköisyydestä. Tämän asiantuntija-arvion perusteella esitettiin seuraavaa: kokonaisuudessaan simulaatiot olivat tarpeeksi realistisia käyttökohteeseen nähden. Savun leviäminen, jonka takia simulaatioita alun perin tehtiin, todettiin asiantuntija-arvioiden perusteella realistisiksi ja lopullisen version tulokset on esitetty kuvassa 7. Kuvan 7 kuvat ovat ajanhetkiltä 200 s, 400 s, 600 s, 800 s, 1 000 s ja 1 200 s. Lämpötilojen alhaisuus sekä palamistuotteen materiaalin valinta saivat kritiikkiä, sillä neopreeni on harvinainen tuote ja palvelinhuoneiden palot ovat myös harvinaisia. Näiden ei kuitenkaan todettu vähentävän realismia liiaksi, sillä alkuparametrien mukaan käyttäytyvä palo

voisi olla täysin mahdollinen. On kuitenkin huomattavaa, ettei tätä simulaatiota voida pitää yleisenä esimerkkinä tulipaloista. Simulaatioissa olisi ollut hyvä mitata myös hapen määrää, sillä vaarallista ei ole ainoastaan hään paljous vaan myös hapen vähäisyys. (Nenonen & Paloluoma 2018.)



Kuva 7. Savun leviäminen rakennuksen kolmannessa kerroksessa Smokeview'ssä esitettynä.

6.2 Mittaustulosten siirtäminen Unityyn

Koska reaaliaikaisen simulaation tekeminen pelin aikana olisi sovellukselle liian raskas, savun päätettiin kulkevan aina ennalta määrättyä reittiä. Savun kulkua varten Unityyn oli määritetty hierarkiallinen pistereitti, mitä pitkin savu leviäisi. Jokaiselle pisteelle

määriteltiin oma taulukkotiedostonsa (Taulukko 3), jossa olisi sitä pistettä vastaavat lämpötilan, näkyvyyden ja hään arvot jokaisena ajan hetkenä.

Taulukko 3. Esimerkki savua ohjaavasta taulukosta.

0,20.01,30,
0,20.01,30,
0,20.01,30,
0,20.01,30,
0,20.01,30,
0,20.01,30,
0,20.01,29.84,
0,20.01,29.43,
0,20.01,29.04,
0,20.01,28.65,
0,20.01,28.24,
0,20.01,27.81,
0,20.01,27.43,
0,20.01,27.07,
0,20.01,26.73,
0,20.01,26.38,
0,20.01,26.02,
0,20.01,25.68,

Taulukkotiedoston arvot ohjaavat partikkeliefektiä, jonka avulla savu luotiin Unityssä. Partikkeliefektin lisäksi rakennuksessa leviää collider, joka on Unityssä käytettävä objektin komponentti, jonka avulla voidaan seurata törmäyksiä tai sitä onko pelaaja jonkun alueen sisällä vai ei. Tässä tilanteessa colliderin avulla seurattiin, onko pelaaja savussa vai ei. Vaikka simulaatio on mitattu niin, että kaikki ovet ovat auki voi niitä silti pelissä myös sulkea. Jokaisen erillisen skenaarion simuloiminen ja siirtäminen Unityyn olisi ollut liian työläs prosessi, joten yksinkertaistukset olivat tarpeen. Oven sulkeuduttua hidastetaan savun liikkumista kyseiseen huoneeseen, joka luo efektin siitä, ettei savu leviäisi.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia, miten numeerisen virtausdynamiikan sovellutuksia hyödyntäen voidaan kehittää toimiva ratkaisu siihen, miten savu käyttäytyy tietynlaisessa ympäristössä. Opinnäytetyössä tutkittiin nykyistä virtuaalitodellisuusteknologiaa ja virtausdynamiikan toimintaa.

Tutkimuksessa oli tarkoitus löytää keino realistisen savun mallintamiseksi paloturvallisuussovellukselle. Sovellus kehitettiin Unity-pelimoottorille, jonka rajoitukset oli otettava myös huomioon. Tutkimisen ja asiantuntijan konsultoinnin jälkeen tutkimuksessa päädyttiin käyttämään Fire Dynamics Simulator -simulaattoria. Tutkimuksen tavoitteisiin päästiin, sillä FDS:n avulla pystyttiin laskemaan savun käyttäytyminen tarpeeksi tarkasti käyttökohteeseen nähden. Lopputuloksena oli pelastusviranomaistenkin mielestä melko realistinen kuva palvelinhuoneen tulipalosta. Tulevissa virtausdynamiikkaan liittyvissä projekteissa olisi FDS vakavasti harkittavissa mukaan otettavaksi sovellukseksi.

Virtausdynamiikan monimutkaisuuden vuoksi sen syvempi ymmärtäminen olisi kuitenkin ollut tarpeen. Vähäinen tieto johti siihen, että tuloksissa piti vain luottaa simulaattorin antamiin arvoihin. Projektissa olisi myös ollut hyötyä muista fysiikan ja kemian osa-alueiden osaamisesta esimerkiksi lämmönjohtavuuden tai palamisreaktioiden syvemmästä osaamisesta. Näitä asioita ei kuitenkaan aikarajojen puitteissa ollut mahdollista käydä läpi ja hyödyntämään projektissa.

Projektilla onnistuttiin simuloimaan palon leviämistä suhteellisen realistisesti, vaikkei mukaan voitu ottaa kaikkia elementtejä, joita oikeassa elämässä tapahtuisi. Lopputuloksessa ei oteta huomioon savun virtaussuunnan muutosta ovien tai ikkunoiden avaamisesta, eikä rakennuksen ilmastoinnin vaikutusta savun kulkuun. Jatkokehitystä ajatellen näitä asioita olisi hyvä tutkia lisää. Virtausdynamiikkaa ja FDS:ää olisi hyvä tutkia pienemmässä ympäristössä varsinkin, jos aiheet eivät ole entuudestaan tuttuja. Lisätutkimusta olisi myös hyvä tehdä Unityn puolella. Unitylle kehitetty oma CFD-lisäohjelma helpottaisi tämänkaltaisten sovelluksien tekoa huomattavasti.

Opinnäytetyön tuloksia voidaan hyödyntää kehitettäessä virtuaalitodellisuuden ympäristöjä, joihin tarvitaan virtausdynamiikkaan perustuvia elementtejä. Savun virtausdynamiikkaan perehtyminen ja sen mahdollisimman realistinen esittäminen osoittaa aikuiselle

pelaajalle, miten tulipalossa liekkien ja kuumuuden sijaan savu ja palavat kaasut voivat olla kohtalokkaita.

LÄHTEET

Autodesk 2018. Autodesk CFD Features. Viitattu: 1.9.2018. <https://www.autodesk.com/products/cfd/features>.

BlenderFDS 2018. BlenderFDS. Viitattu 22.9.2018. <http://firetools.github.io/blenderfds/>.

Borgman, N. 2017. Virtual Reality revolutionerar räddningstjänstarbetet. Viitattu: 22.9.2018. <https://www.brandsakert.se/2017/0405/virtual-reality-revolutionerar-r%C3%A4ddningstj%C3%A4nstarbetet>.

CFD Online 2013. Fluid dynamics. Viitattu: 9.9.2018. https://www.cfd-online.com/Wiki/Fluid_dynamics.

Clay Mathematics Institute 2018. Navier-Stokes Equation. Viitattu: 23.9.2018. <http://www.clay-math.org/millennium-problems/navier%E2%80%93stokes-equation>.

Comsol 2018. Navier-Stokes Equations. Viitattu 22.9.2017. <https://www.comsol.com/multiphysics/navier-stokes-equations>.

Dictionary 2018. Fluid dynamics. Viitattu 22.9.2018. <https://www.dictionary.com/browse/fluid-dynamics>.

Dooge, J. 2004. Background to modern hydrology. Viitattu: 23.8.2018. http://hydrologie.org/red-books/a286/iahs_286_0003.pdf.

eLearning Studios 2018. Fire Safety VR Training. Viitattu: 13.9.2018. <https://www.youtube.com/watch?v=akq57Ggzf-E>.

Mentor 2018. FloVENT Applications. Viitattu: 1.9.2018. <https://www.mentor.com/products/mechanical/flovent/applications>.

GitHub 2018. Main_Control_Room_No_Purge_v6.fds. Viitattu: 27.8.2018. https://github.com/fire-models/fds/blob/master/Utilities/Training/NRC_EPRI/FDS_Input_Files/Main_Control_Room_No_Purge_v6.fds.

Karaman, D. 2016. Virtual Reality and Pain Management. Viitattu: 20.8.2018. http://www.ijhsr.org/IJHSR_Vol.6_Issue.12_Dec2016/42.pdf.

Kim, H. & Lilley, D. 2000. Heat Release Rates of Burning Items in Fires. Reston, USA: AIAA.

Kuzmin, D. Introduction to Computational Fluid Dynamics. Viitattu: 9.9.2018. <http://www.matematik.uni-dortmund.de/~kuzmin/cfdintro/lecture1.pdf>.

McDonough, J. 2009. Lectures in elementary fluid dynamics: Physics, Mathematics and Applications. Kentucky, USA: University of Kentucky. Saatavissa myös: <http://web.engr.uky.edu/~acfd/me330-lctrs.pdf>.

National Fire Protection Association 2018. US firefighter deaths related to training 2001 to 2010. Viitattu: 20.8.2018. <https://www.nfpa.org/News-and-Research/Fire-statistics-and-reports/Fire-statistics/The-fire-service/Fatalities-and-injuries/US-firefighter-deaths-related-to-training-2001-to-2010>.

Nenonen & Paloluoma 2018. Haastattelu. Varsinais-Suomen pelastuslaitoksen koulutuspäällikkö Petri Nenosta ja palopäällikkö Pasi Paloluomaa haastatteli 6.9.2018 Lassi Niinikorpi.

NIST 2018. FDS-SMV. Viitattu: 9.9.2018. <https://pages.nist.gov/fds-smv/>.

- Novedge 2018. CFD Premium 2019 Viitattu: 1.9.2018. <https://novedge.com/products/14496?ITS=OPTTBL>.
- Oculus 2018a. Gear VR Viitattu 22.9.2018. <https://www.oculus.com/gear-vr/>.
- Oculus 2018b. Go. Viitattu 22.9.2018. <https://www.oculus.com/go/>.
- Oculus 2018c. Rift. Viitattu 22.9.2018. <https://www.oculus.com/rift/#oui-csl-rift-games=mages-tale>.
- Osso VR 2018. Osso VR. Viitattu 22.9.2018. <http://ossovr.com/>.
- Pelastustoimi 2012. Pelastustoimen turvallisuusviestinnän strategia. Viitattu: 27.8.2018. http://www.pelastustoimi.fi/download/41800_pelastustoimen-turvallisuusviestinnan-strategia-22-5-2012.pdf?c0016d310f5bd488.
- Pelastustoimi 2018. Palokuolemat. Viitattu: 27.8.2018. <http://www.pelastustoimi.fi/turvatietao/ehkaise-palon-syttyminen/tulipalon-vaarallisuus/palokuolemat>.
- Playstation 2018. Playstation VR. Viitattu: 22.8.2018. <https://www.playstation.com/fi-fi/explore/playstation-vr/>.
- PyroSim 2018. Features. Viitattu 22.9.2018. <https://www.thunderheadeng.com/pyrosim/pyrosim-features/>.
- RiVR 2017. RiVR. Viitattu 5.10.2018. <https://www.rivr.uk/>.
- Rosenberg, A. 2018. Virtual reality's moment looks to be over in gaming, at least for now. Viitattu: 22.9.2018. <https://mashable.com/2018/01/24/virtual-reality-gaming-loser-gdc-2018-survey/?eu-rope=true#fl8J9.nnl5q5>.
- Steam 2018. Steam Store. Viitattu: 22.8.2018. https://store.steampowered.com/search/?snr=1_4_4__12&term=htc+vive.
- Takagi, H. & Tanaka, N. 2004. Virtual Environment Design of Managing Both Presence and Virtual Reality Sickness. Viitattu: 22.9.2018. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jpa/23/6/23_6_313/_pdf.
- ThinkMobiles 2018. Virtual Reality in Military. Viitattu: 27.8.2018. <https://thinkmobiles.com/blog/virtual-reality-military/>.
- Unity 2018. Features. Viitattu: 20.8.2018. <https://unity3d.com/unity/features/multiplatform>.
- Unimersiv 2017. What is Virtual Reality Training and What Are Its Advantages? Viitattu: 22.9.2018. <https://unimersiv.com/vr-training/>.
- Varjo 2018a. Bionic-Display. Viitattu 31.8.2018. <https://varjo.com/bionic-display/>.
- Varjo 2018b. Early-Access. Viitattu 31.8.2018. <https://varjo.com/early-access/>.
- Varjo 2018c. Media. Viitattu 31.8.2018. <https://varjo.com/media/>.
- Virtual reality society 2017a. How did virtual reality begin? Viitattu: 20.8.2018. <https://www.vrs.org.uk/virtual-reality/beginning.html>.
- Virtual reality society 2017b. Virtual Reality in Healthcare. Viitattu: 23.9.2018. <https://www.vrs.org.uk/virtual-reality-healthcare/>.
- Virtual reality society 2017c. Virtual Reality in the Military. Viitattu: 20.8.2018. <https://www.vrs.org.uk/virtual-reality-military/>.

- Virtual reality Society 2017d. What is Virtual Reality? Viitattu: 22.9.2018. <https://www.vrs.org.uk/virtual-reality/what-is-virtual-reality.html>.
- Vive 2018a. Products Vive. Viitattu: 22.8.2018. <https://www.vive.com/eu/product/#vive-spec>.
- Vive 2018b. Products Vive-Pro. Viitattu: 22.8.2018. <https://www.vive.com/us/product/vive-pro/>.
- Vive 2018c. Wireless adapter. Viitattu: 22.8.2018. <https://www.vive.com/us/wireless-adapter/>.
- Welch, C. 2014. Facebook buying Oculus VR for \$2 billion. Viitattu: 22.8.2018. <https://www.theverge.com/2014/3/25/5547456/facebook-buying-oculus-for-2-billion>.
- White, F. 2011. Fluid Mechanics. 7. New York, USA: McGraw-Hill. Saatavissa myös: <https://hell-careers.files.wordpress.com/2016/01/fluid-mechanics-seventh-edition-by-frank-m-white.pdf>.
- Wikimedia 2018. VR-Helm. Viitattu: 13.9.2018. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:VR-Helm.jpg>.
- Wikipedia 2018a. Carbon monoxide poisoning. Viitattu: 12.8.2018. https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_monoxide_poisoning.
- Wikipedia 2018b. Kloropreeni. Viitattu: 15.8.2018. <https://fi.wikipedia.org/wiki/Kloropreeni>.
- Wikipedia 2018c. ppm. Viitattu: 27.8.2018. <https://fi.wikipedia.org/wiki/Ppm>.
- Wikisanakirja 2018. fluidi. Viitattu: 27.8.2018. <https://fi.wiktionary.org/wiki/fluidi>.
- Wild, F. 2018. What Are Wind Tunnels? Viitattu: 9.9.2018. <https://www.nasa.gov/audience/forstudents/k-4/stories/nasa-knows/what-are-wind-tunnels-k4.html>.
- Yamaguchi, J. & Tanaka, T. 2005. Simple Equations for Predicting Smoke Filling Time in Fire Rooms with Irregular Ceilings. Viitattu: 12.8.2018. https://www.jstage.jst.go.jp/article/fst/24/4/24_4_165/_pdf/-char/en.
- Zhiyin, Y. 2015. Large-eddy simulation: Past, present and the future. Viitattu: 9.9.2018. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1000936114002064>.