Linus Vanas

Kalajoen 2021 metsäpalon mallintaminen stokastisella soluautomaatilla

Tietotekniikan pro gradu -tutkielma

16. toukokuuta 2023

Jyväskylän yliopisto

Informaatioteknologian tiedekunta

Tekijä: Linus Vanas

Yhteystiedot: `linus@vanas.fi`

Ohjaajat: Ilkka Pölönen ja Anna-Maria Raita-Hakola

Työn nimi: Kalajoen 2021 metsäpalon mallintaminen stokastisella soluautomaatilla

Title in English: Modeling the 2021 Kalajoki forest fire with a stochastic cellular automaton

Työ: Pro gradu -tutkielma

Opintosuunta: Sovellettu matematiikka ja laskennalliset tieteet

Sivumäärä: 36+8

Tiivistelmä: Maastopalojen aiheuttamien vahinkojen minimoimiseksi rajallinen sammutusresurssi täytyy kohdistaa oikein. Tässä tutkielmassa tuotettiin metsäpalojen leviämistä ennustava stokastinen soluautomaattimalli, joka hyödyntää suomalaista avointa dataa. Mallilla simuloitiin Kalajoen 2021 metsäpalon kulkua kohtuullisin tuloksin. Mallilla on potentiaalia paremman, suomalaista avointa dataa hyödyntävän, maastopalomallin kehityksen lähtökohdaksi.

Avainsanat: maastopalot, metsäpalot, soluautomaatit, mallintaminen

Abstract: To minimize damage caused by wildfires, the limited firefighting resources must be used correctly. In this thesis, a stochastic cellular automaton model for predicting the spread of forest fires using Finnish open data was produced. The model was used to simulate the Kalajoki 2021 forest fire with moderate results. The model has potential as a basis for a better wildfire model using Finnish open data.

Keywords: wildfires, forest fires, cellular automata, modelling

Kuviot

Kuvio 1. Von Neumannin ja Mooren naapurustot. 6
Kuvio 2. Puustisen (2022) kuva *”Palorintaman leviäminen keskiviikkona 28.7.2021”* 11
Kuvio 3. Visualisaatio Luonnonvarakeskuksen (2021) datasta. 12
Kuvio 4. Kuvankaappaus soluautomattisovelluksen käyttöliittymästä. 16
Kuvio 5. Muutama askel tuotetun soluautomaatin toimintaa. 19
Kuvio 6. Simuloidun palon leviämistodennäköisyydet. 21
Kuvio 7. Simuloidun palon todennäköinen kulku. 22
Kuvio 8. Solujen tilat ensimmäisessä ajossa 30 aika-askeleen välein. 33
Kuvio 9. Solujen tilat toisessa ajossa 30 aika-askeleen välein. 34
Kuvio 10. Solujen tilat kolmannessa ajossa 30 aika-askeleen välein. 34
Kuvio 11. Solujen tilat neljännessä ajossa 30 aika-askeleen välein. 35
Kuvio 12. Solujen tilat viidennnessä ajossa 30 aika-askeleen välein. 36
Kuvio 13. Solujen tilat kuudennnessa ajossa 30 aika-askeleen välein. 36
Kuvio 14. Solujen tilat seitsemännnessä ajossa 30 aika-askeleen välein. 37
Kuvio 15. Solujen tilat kahdeksannessa ajossa 30 aika-askeleen välein. 38
Kuvio 16. Solujen tilat yhdeksännessä ajossa 30 aika-askeleen välein. 39
Kuvio 17. Solujen tilat kymmenennessä ajossa 30 aika-askeleen välein. 40

Taulukot

Taulukko 1. Simuloinnissa käytetyt yksikkötodennäköisyydet. 19

Sisällys

1 JOHDANTO 1

2 TULEN KÄYTTÄYTYMINEN MAASTOPALOISSA 3

3 MAASTOPALOJEN LEVIÄMISEN MALLINTAMINEN 5
3.1 Soluautomaattimallit 5
3.1.1 Deterministiset soluautomaattimallit 6
3.1.2 Stokastiset soluautomaattimallit 7
3.2 Huygensin periaatetta soveltavat mallit 8

4 AINEISTO 10
4.1 Kalajoen Raution metsäpalo 2021 10
4.2 Monilähteinen valtakunnan metsien inventointi 12

5 TUOTETTU MALLI 14
5.1 Lähtökohdat ja oletukset 14
5.2 Mallin toteutus ja toimintaperiaatteet 15

6 SIMULOINTI JA TULOKSET 20

7 POHDINTA 23
7.1 Mallin arviointi 23
7.2 Tutkimuskysymyksiin vastaaminen 25
7.3 Kehitysehdotuksia ja jatkotutkimusaiheita 26

8 JOHTOPÄÄTÖKSET 28

LÄHTEET 29

LIITTEET 33
A Kaikkien simulointiajojen tulokset 33

1 Johdanto

Metsä- ja maastopalot ovat maailmanlaajuisesti kasvava ongelma. Ne aiheuttavat vuosittain valtavaa tuhoa niin luonnolle, omaisuudelle kuin ihmisten terveydellekin vaatien myös ihmishenkiä. Jotta syttynyt maastopalo saadaan rajattua ja lopulta sammutettua mahdollisimman tehokkaasti, täytyy rajalliset sammutusresurssit kohdentaa oikein. Tätä kohdentamista varten palon leviämissuuntaa ja -vauhtia pitää pystyä ennakoimaan.

Aiheen merkittävyys huomioiden ei ole yllättävää, että maastopalojen mallintamisesta löytyy runsaasti tutkimusta. Kirjallisuuskartoituksia aiheesta ei kuitenkaan juurikaan löytynyt. Papadopoulos ja Pavlidou (2011) ja Ghodrat ym. (2023) ovat tarkastelleen lähinnä käyttövalmiita ohjelmistoja. Suomeen kohdistetusti aihetta näyttää tutkineen lähinnä Kolstela (2020) pro gradu -tutkielmassaan.

Tässä tutkielmassa on selvitetty, kuinka aiheesta tehtyä maailmanlaajuista tutkimusta saadaan sovellettua Suomen oloihin, ja kuinka Suomessa julkisesti saatavilla olevaa avointa dataa voidaan hyödyntää maastopalojen mallinnuksessa. Erityisesti on tarkasteltu kesän 2021 Kalajoen Raution metsäpaloa. Tutkimus tehtiin osana Maanmittauslaitoksen (2022) FireMan-hanketta.

Tutkielman päätutkimuskysymys on: Miten stokastista soluautomaattia voidaan hyödyntää suomalaisten metsäpalojen mallinntamisessa? Hypoteesi on, että stokastinen soluautomaatti toimii hyvin myös suomalaisten metsäpalojen mallinuksessa. Alikysymyksiä ovat:

- Miten avoimesti saatavilla oleva tausta-aineisto muunnetaan siirtymätodennäköisyyksiksi?
- Kuinka huomioida tausta-aineistoon pohjautuvaan ympäristöön palosta aiheutuvat muutokset siirtymätodennäköisyyksissä?
- Kuinka soluautomaatti toteutetaan niin, että se voidaan helposti yleistää myös muihin kuin nyt tutkittavaan paloon?

Tutkielma toteutettiin konstruktiivisena tutkimuksena, jossa tutkijan aiemmin luomaa metsäpaloja mallintavaa stokastista soluautomaattia kehitettiin edelleen. Soluautomaatti on luonnollinen valinta mallinnusmenetelmäksi, sillä myös tutkimuksessa käytetty Luonnonvarakeskuksen (2021) aineisto on ruudukkopohjaista. Soluautomaattia kehitettiinkin hyödyntämään tätä sekä Ilmatieteen laitoksen (n.d.) aineistoa. Lopuksi malli sovitettiin niin, että se vastaa mahdollisimman hyvin Puustisen (2022) kuvausta Kalajoen metsäpalon etenemisestä 28.7.2021.

Tämän johdannon jälkeen, luvussa 2, on kerrottu perusteita tulen käyttäytymisestä ja esitelty yksinkertaisia maastopalon leviämisnopeuden malleja. Varsinaisia leviämismalleja on esitelty luvussa 3, ja tutkimuksessa käytetystä aineistosta puolestaan kerrotaan tarkemmin luvussa 4. Tutkimuksessa tuotetun mallin periaatteet esitellään luvussa 5, ja sillä tuotetut tulokset luvussa 6. Mallin arviointi ja vastaukset tutkimuskysymyksiin koottu lukuun 7, jossa esitetään myös jatkotutkimusaiheita. Lopulta luvussa 8 esitetään yhteenveto ja johtopäätöksiä tutkimuksesta.

2 Tulen käyttäytyminen maastopaloissa

Palaminen vaatii happea, palavaa ainetta ja riittävän lämpötilan. Maastopalojen tapauksessa happea on käytännössä rajattomasti ja potentiaalista palavaa ainettakin ainakin paikoitellen runsaasti, joten viimeinen syttymiseen tarvittava tekijä on lämpötila. Kuten Lindberg, Heikkilä ja Vanha-Majamaa (2011) toteavat, Suomen metsissä syttymiseen tarvittavan lämpötilan saavuttaminen vaatii aina ulkoisen energianlähteen. Tällainen voi olla esimerkiksi salama tai ihmisen aiheuttama kipinä.

Palamisessa vapautuva lämpöenergia voi lämmittää myös ympäristön paloaineksia syttymispisteeseen aiheuttaen ketjureaktion, ja palo lähtee leviämään. Lämpöenergia voi siirtyä kolmella tavalla: johtumalla, säteilemällä ja kulkeutumalla. Lindberg, Heikkilä ja Vanha-Majamaa (2011) kertovat säteilyn olevan pääsyy metsäpalojen leviämiseen, kun taas johtumisen merkitys jää vähäiseksi.

Väliin jäävä lämpöenergian kulkeutumien on kuitenkin ehkä mielenkiintoisin siirtymätapa, sillä siihen vaikuttaa ulkoinen tekijä, tuuli. Kulkeutumiseen sisältyvät paitsi lämmenneen ilman liikkuminen, myös tuulen mukana lentävät palavat heitteet. Heitteet voivat luoda erillisiä palopesäkkeitä varsin kauas ne luoneesta palorintamasta.

Palon leviämisnopeuteen vaikuttavia tekijöitä ovat kasvillisuuden eli polttoaineen palo-ominaisuudet, maastonmuodot, sekä sääolosuhteet kuten tuuli ja ilmankosteus. On myös huomattava, että palo ei välttämättä leviä kaikkeen alueen kasvillisuuteen. Esimerkiksi metsissä maan tasossa leviävä palo ei välttämättä leviä ylös puita latvapaloksi.

Maastopalojen käyttäytymistä on pyritty mallintamaan ja ennustamaan jo ennen täysimittaisia leviämismalleja. Rothermel (1972) on kehittänyt sittemmin paljon käytetyn matemaattisen mallin maastopalojen leviämisnopeuden ja intensiteetin laskemiseen. Kokeellisesti luotu malli soveltuu Rothermelin (1972) mukaan vain vakiintuneiden, yhtenäisissä maan tasolla olevissa polttoainekerroksissa leviävien palojen, eikä siis esimerkiksi latvapalojen, mallintamiseen. Polttoainekerroksen tiheys ja korkeus ovat mallissa säädettäviä parametreja.

Rothermelin (1972) malli vaatii lisäksi tietoa esimerkiksi polttoaineen lämpöarvosta. Sen sijaan varsinaisia palo-ominaisuuksia se ei tarvitse. Rothermelin (1972) malli ottaa huomioon myös tuulen sekä rinteen vaikutuksen palon leviämisnopeuteen. Tuulen kuljettamia palavia heitteitä se ei kuitenkaan mallinna.

Heitteet ovat McArthurin mukaan (1967) poikkeuksellisen tärkeässä roolissa eukalyptusmetsien palojen leviämisessä. Hänen kokeellisesti kehittämänsä palovaaramittari huomiokin sekä heitteet että latvapalot. Mittarin arvon laskemiseen McArthur (1967) käyttää ilman lämpötilaa ja kosteutta, tuulen voimakkuutta sekä viimeisimmän sateen ajankohtaa ja sademäärää. Vaikka mittari on kehitetty nimenomaan eukalyptusmetsien perusteella, on sitä, tai yhtälöitä, jotka Noble, Gill ja Bary (1980) sen perusteella esittivät, hyödynnetty myös muunlaisten metsien palojen mallintamisessa.

3 Maastopalojen leviämisen mallintaminen

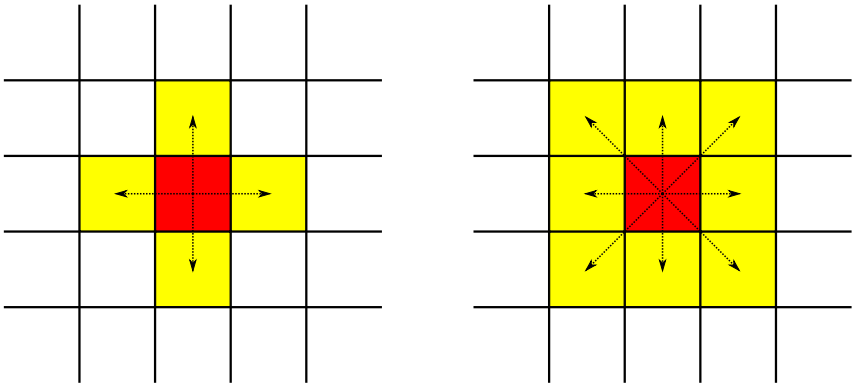
Kuten mainittua, tarve maastopalojen ja niiden leviämisen ennustamiselle on maailmanlaajuinen ja vanha. Niinpä ei ole yllättävää, että erilaisia maastopalomalleja ja niihin liittyvää tutkimusta on runsaasti. Papadopoulos ja Pavlidou (2011) käsittelevät 23:a ja Ghodrat ym. (2023) neljäätoista maastopalojen simulointiin tarkoitettua ohjelmistoa. Näissä on toki runsaasti päällekkäisyyttä, mutta samalla myös molempien ulkopuolelle jää runsaasti eri tutkimuksissa esiteltyjä malleja.

Ghodratin ym. (2023) mukaan yleisimmät tavat mallintaa maastopaloja ovat erilaiset soluautomaatit sekä Huygensin periaattetta soveltavat mallit. Tässä tutkielmassa ja luvussa keskitytään lähinnä soluautomaatteihin, mutta luvun lopussa käsitellään myös niiden pääkilpailijaa eli Huygensin periaatetta soveltavia malleja.

3.1 Soluautomaattimallit

Perinteisimmillään soluautomaatissa on neliönmuotoisten solujen ruudukko, jossa kukin solu vuorovaikuttaa jollain tavalla joko neljän (von Neumannin naapurusto) tai kahdeksan (Mooren naapurusto) lähimmän naapurisolujensa kanssa. Näitä kahta naapurustotyyppiä on havainnollistettu kuviossa 1. Naapuruston ei kuitenkaan tarvitse olla kumpikaan edellä mainituista, vaan se voi olla myös suurempi.

Maastopaloja mallintaessa soluautomaatin soluilla on yleensä ainakin kolme tilaa, jotka myös Ghodrat ym. (2023) tunnistavat: (toistaiseksi) palamaton, (juuri nyt) palava ja (loppuun) palanut. Joissakin toteutuksissa esiintyy erikseen myös neljäs tila soluille, jotka eivät voi syttyä, esimerkiksi koska ne ovat vesialueita tai niillä ei muuten ole kasvillisuutta. Solujen vuorovaikutus ilmenee yleensä palavan solun mahdollisuutena sytyttää naapurisolujaan.



Kuvio 1. Von Neumannin (vasemmalla) ja Mooren (oikealla) naapurustot. Tarkasteltava soluatomaatin solu (punaisella) vuorovaikuttaa vain naapurustonsa solujen (keltaisella) kanssa. Maastopaloja mallintaessa vuorovaikutus tarkoittaa yleensä tarkasteltavan palavan solun mahdollisuutta sytyttää naapurisolujaan.

Näin yleisen määritelmän alle mahtuu tietenkin monenlaisia malleja. Esimerkiksi puolet ohjelmistoista, jotka Ghodrat ym. (2023) luettelevat, ovat ”rasteripohjaisia” eli ainakin jossain mielessä soluautomaatteja. Ghodrat ym. (2023) mainitsevat rasteripohjaisten mallien eduiksi pienemmät laskennalliset vaatimukset ja paremman soveltuvuuden heterogeenisiin olosuhteisiin kuin Huygensin periaatetta soveltavilla malleilla.

Soluautomaattimallit voidaan jakaa karkeasti kahteen luokkaan sen mukaan, määräytyykö solujen syttyminen jonkin täysin deterministisen säännön perusteella vai hyödynnetäänkö siinä satunnaisuutta. Näitä deterministisiä ja stokastisia malleja käsitellään seuraavaksi tarkemmin erikseen.

3.1.1 Deterministiset soluautomaattimallit

IGNITE (Green, Tridgell ja Gill 1990) ja FireStation (Lopes, Cruz ja Viegas 2002), ovat kaksi jokseenkin samanlaiseen deterministiseen soluautomaattimalliin pohjautuvaa mallinnusjärjestelmää. Molempien malli palon leviämisnopeudelle käyttää rinteen jyrkkyyttä, joitain polttoaineen ominaisuuksia sekä tuulen nopeutta. Merkittävänä erona on kuitenkin, että Green, Tridgell ja Gill (1990) käyttävät palon leviämisnopeudelle McArthurin (1967) mu-

kaista laskutapaa ja yhtälöitä, jotka Noble, Gill ja Bary (1980) ovat sen pohjalta kehittäneet, kun taas Lopes, Cruz ja Viegas (2002) käyttävät semi-empiiristä mallia, joka pohjautuu Rothermelin (1972) malliin.

Palon varsinaisen leviämisen mallintamiseen sekä Green, Tridgell ja Gill (1990) että Lopes, Cruz ja Viegas (2002) käyttävät samakaltaista sääntöä: palavan solun jokaiselle naapureille lasketaan leviämisnopeuden perusteella syttymishetki. Kun simuloitu aika on askellettu tähän hetkeen ja uusi solu syttyy, tarkastellaan vuorostaan sen naapureita.

Ghisu ym. (2015) käyttävät Rothermelin (1972) mallin mukaista leviämisnopeutta hieman eri tavalla. Heidän mallissaan palon etenemä matka kuhunkin kahdeksaan mahdolliseen suuntaan tallennetaan soluihin, ja sitä kasvatetaan aika-askeleittain. Kun palon johonkin suuntaan etenemä matka ylittää etäisyyden samassa suunnassa olevaan naapurisoluun, naapurisolu syttyy.

Soluautomaattien merkittävämpiä heikkouksia ovat vääristymät, jotka maaston tarkastelu diskreetteinä neliöinä aiheuttaa palojen muotoon. Yksinkertaisimmillaan, tasaisessa maastossa, jossa myös paloainekset ovat jakautuneet tasaisesti ja tuulen suunta ja voimakkuus ovat vakiota niin ajan kuin paikankin suhteen, maastopalot leviävät ellipsin muodossa. Tärkeimpänä kontribuutionaan Ghisu ym. (2015) sisällyttävät yhtälöihinsä korjaustermejä, joilla palon muotoa muokataan vastaaman paremmin todellisuutta.

3.1.2 Stokastiset soluautomaattimallit

Stokastiset soluautomaatit hyödyntävät jollain tavalla satunnaisuutta. Koska samasta lähtöasetelmasta voidaan tällöin saada hyvin erilaisia lopputuloksia, ajetaan stokastisia malleja yleensä monta kertaa. Ajokertojen tulokset yhdistämällä voidaan arvioida esimerkiksi yksittäisten solujen palamistodennäköisyyttä.

Yksinkertaisimmillaan stokastisuus voi tarkoittaa sitä, että solujen siirtymät tilasta toiseen tapahtuvat aika-askeleen aikana tietyllä todennäköisyydellä. Esimerkiksi malli, jonka Almeida ja Macau (2011) ovat kehittäneet on hyvin pelkistetty: se olettaa olosuhteiden olevan

tuulettomat ja maaston tasaista, ja soluissa joko on tai ei ole kasvillisuutta. Mallin soluilla on siten täsmälleen neljä mahdollista tilaa (palamaton, palava, palanut, palokelvoton), ja mallin toiminnan määräävät täysin kolme todennäköisyyttä:

1. todennäköisyys, että solussa ei ole kasvillisuutta
2. todennäköisyys, että palava solu palaa loppuun aika-askeleen aikana ja
3. todennäköisyys, että palava solu sytyttää naapurisolunsa aika-askeleen aikana

Myös Alexandridis ym. (2008), sekä heidän malliinsa pohjaten Russo ym. (2014) ja Freire ja DaCamara (2019) käyttävät malleissaan samoja neljää solujen perustilaa, kun taas Trucchia ym. (2020) sen sijaan käyttävät PROPAGATOR-mallissaan vain kolmea perustilaa (palamaton, palava, palanut). Yhteistä näille neljälle mallille on se, että solujen sammumisen osalta niissä ei käytetä satunnaisuutta, vaan solut palavat aina vain yhden aika-askeleen verran.

Naapurisolujen syttymistodennäköisyydet ovat näissä malleissa puolestaan monimutkaisempia kuin vakiotodennäköisyys, jota Almeida ja Macau (2011) käyttävät. Niin Alexandridis ym. (2008), Russo ym. (2014), Freire ja DaCamara (2019) kuin myös Trucchia ym. (2020) laskevat syttymisstodennäköisyydet perustuen mm. kasvillisuuteen, maastonmuotoihin ja sääolosuhteisiin.

Malli, jonka Mastorakos ym. (2022) ovat kehittäneet on puolestaan hyvin erilainen. Vakiosuuruisen naapuruston sijasta Mastorakos ym. (2022) simuloivat kuumien palokaasujen ja heitteiden liikettä ilmavirtojen partikkeleiden satunnaiskululla. Heidän mallissaan solut, joihin tällaiset partikkelit osuvat, syttyvät viiveen jälkeen ja alkavat itsekin lähettämään partikkeleja.

3.2 Huygensin periaatetta soveltavat mallit

Aaltoliikkeen etenemisen selittämiseen käytetään niin kutsuttua Huygensin periaatetta. Sen mukaan jokaisena ajanhetkenä jokainen aaltorintaman piste voidaan ajatella uuden pallomaisen alkeisaallon lähteenä. Anderson ym. (1982) soveltivat mahdollisesti ensimmäisinä vastaavaa periaatetta palorintamiin.

Pistemäisenä alkanut palo leviää tasalaatuisissa olosuhteissa ellipsin muodossa. Anderson ym. (1982) esittävät, että jokainen palorintaman piste voidaan ajatella uuden elliptisen palon lähtöpisteenä ja osoittavat, että olosuhteiden pysyessä tasalaatuisina tällä ei ole vaikutusta palon muotoon. Aivan yksinkertaisimpia tapauksia lukuunottamatta, kun olosuhteet eivät pysy tasalaatuisina, Anderson ym. (1982) turvautuvat mallin diskretisointiin, jossa aika etenee askeleittain, ja jossa jokaisella aika-askeleella Huygensin periaatetta sovelletaan vain äärelliseen määrään palorintaman pisteitä.

Huygensin periaatetta on sittemmin sovellettu laajemminkin maastopalojen mallintamisessa, ja se vaikuttaakin olevan päävaihtoehto soluautomaattimalleille, joihin pääeduksi soluautomaatteihin verrattuna Ghodrat ym. (2023) mainitsee paremman tarkkuuden. Esimerkkejä periaatetta käyttävistä malleista ovat Kolstelan (2020) käyttämä Prometheus (Tymstra ym. 2010) sekä FarSite (Finney 2004), jonka Papadopoulos ja Pavlidou (2011) arvioivat tarkimmaksi käsittelemistään 23 metsäpalosimulaattorista.

4 Aineisto

Tärkeimmät tutkimuksessa käytetyt aineistot olivat Puustisen (2022) raportti kesällä 2021 Kalajoen Rautiolla 227 hehtaarin alueen polttaneesta metsäpalosta ja Luonnonvarakeskuksen (2021) vuoden 2019 monilähteisen valtakunnan metsien inventoinnin kartta-aineisto. Näitä kahta aineistoa esitellään tässä luvussa tarkemmin. Niiden lisäksi tutkimuksessa hyödynnettiin Ilmatieteen laitoksen (n.d.) tuulennopeustietoja Ylivieskan lentokentältä 28.7.2021.

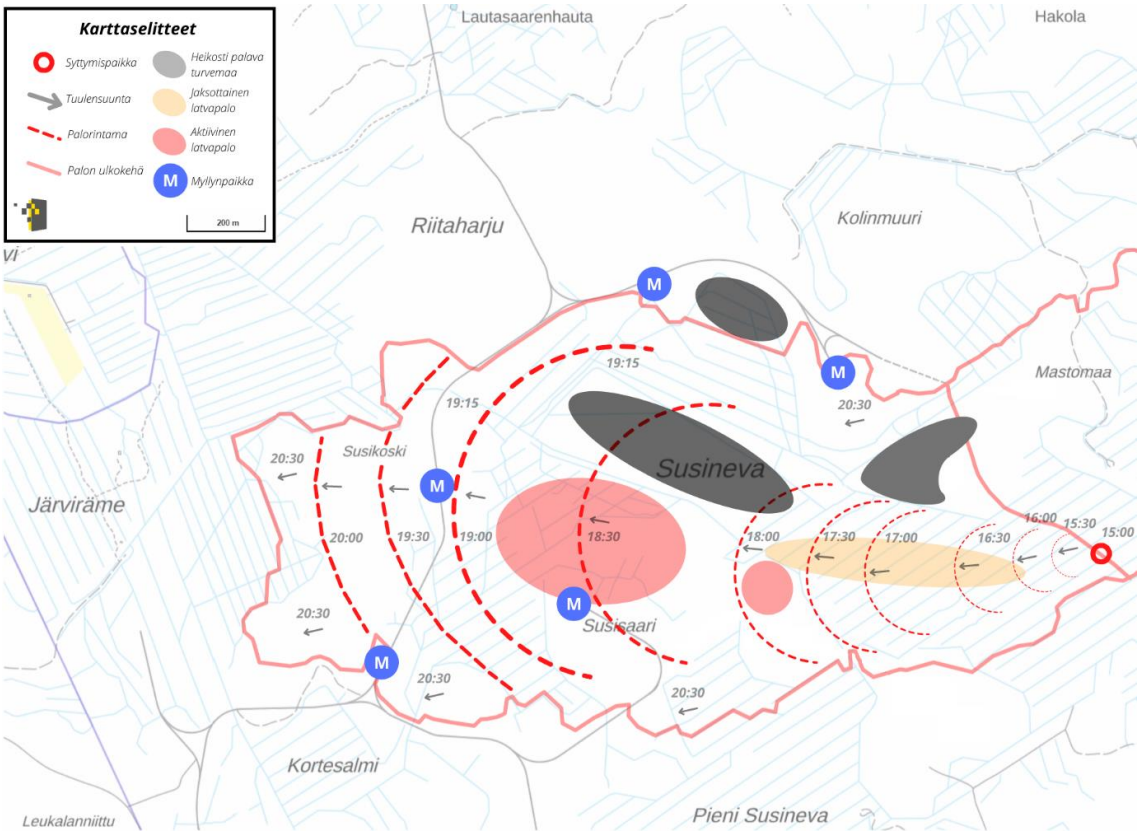
4.1 Kalajoen Raution metsäpalo 2021

Puustinen (2022) tarkastelee Kalajoen 2021 metsäpaloa kahtena palona, joista *"ensimmäinen syttyi tuulivoimatyömaalla 26.7. arviolta klo 13:30 aikoihin."* Tämä ensimmäinen palo saatiin Puustisen (2022) mukaan rajattua 27.7 aamuyöstä tulen levittyä 60 hehtaarin alueelle. Sen jälkeen tilanne pysyi hänen mukaansa rauhallisena 28.7. iltapäivään asti, vaikka palon uudelleensyttymisen uhka oli koko ajan olemassa.

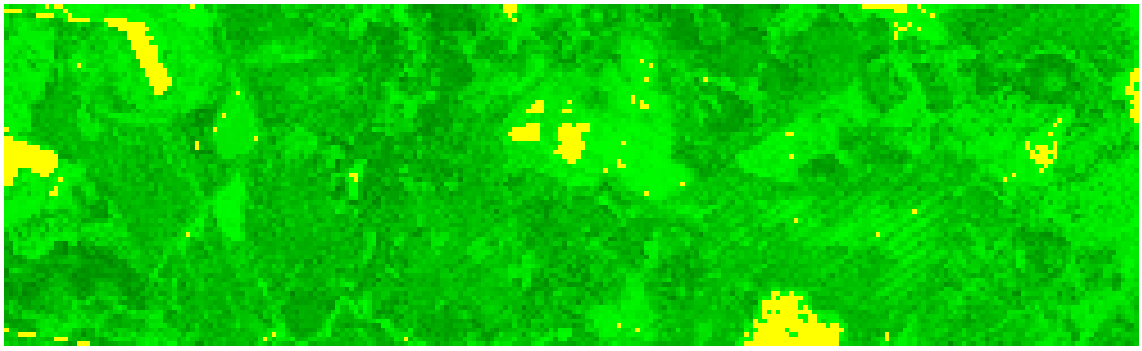
Palon uudelleensyttymisen, eli toisen palon alun, Puustinen (2022) sijoittaa 28.7. klo klo 14–15 välille. Aina 29.7 noin klo 9 asti palo oli Puustisen (2022) luonnehdinnan mukaisesti *"erittäin kriittisessä vaiheessa"*, jonka jälkeen se on ilmeisesti saatu jonkinlaiseen hallintaan. Palon rauhoittumisen Puustinen (2022) kertoo kuitenkin tapahtuneen vasta 30.7.

Puustinen (2022) kuvaa raportissaan kattavammin paitsi palon etenemistä, myös mm. paloolosuhteita. Hänen mukaansa sää oli helteinen ja palolle otollinen aina 30.7. alkaneisiin sateisiin saakka. Tuuli oli hänen mukaansa keskimäärin heikkoa, mutta puuskaista, ja sen vaikutusta palon leviämissuuntaan korostivat paloalueen vähäiset korkeuserot.

Kuvioon 2 on lainattu Puustisen (2022) raportin kuva palon leviämisestä 28.7. Tässä tutkimuksessa päädyttiin mallintamaan juuri tätä vaihetta Kalajoen palosta.



Kuvio 2. Puustisen (2022) kuva *"Palorintaman leviäminen keskiviikkona 28.7.2021 klo 15.00–20.00."*



Kuvio 3. Visualisaatio Luonnonvarakeskuksen (2021) datasta, männyn neulasten biomassa Kalajoen 2021 paloalueella. Tummanvihreillä alueilla on vaaleita enemmän biomassaa. Täysin neulasettomat ruudut, kuten MVMI-aineistosta pois rajatut metsättömät alueet, on väritetty keltaisella.

4.2 Monilähteinen valtakunnan metsien inventointi

Luonnonvarakeskuksen (2021) monilähteisen valtakunnan metsien inventoinnin (MVMI) kartta-aineisto sisältää rasterimuotoista dataa Suomen metsistä. Aineistossa on eroteltuna mm. kuusien, mäntyjen ja lehtipuiden eri osien biomassatiheyksiä. Kuviossa 3 on esimerkiksi visualisoitu männyn neulasten biomassadataa Kalajoen paloalueelta.

Mäkisara, Katila ja Peräsaari (2022) kertovat MVMI-aineiston perustuvan kenttätyönä tehtyyn valtakunnan metsien inventointiin, joka on muulla datalla täydentämällä jaettu pienemmille pinta-alayksiköille. Mäkisara, Katila ja Peräsaari (2022) toteavat näin saatujen tulosten osoittautuneen hyödyllisiksi, vaikka pinta-alayksiköitä pienentäessä tulosten tarkkuuskin pienenee. Täydet kenttäinventointikierrokset tehdään heidän mukaansa usean vuoden ajalle jaksotettuna, minkä vuoksi MVMI:n tuottamiseksi aineistoa yhdistetään usealta vuodelta. Vuoden 2019 MVMI:n tuottamiseen käytetyt inventoinnit ovat heidän mukaansa vuosilta 2015–2019 ja pohjois-Lapin osalta jopa vanhempia.

Mäkisara, Katila ja Peräsaari (2022) nimeävät tärkeimmäksi täydentävän, inventointeja tarkempiresoluutioisemman, datan lähteeksi satelliittikuvat. Yhdeksi satelliittikuvien haasteista Mäkisara, Katila ja Peräsaari (2022) mainitsevat sen, että pilvettömien kuvien saaminen ko-

ko maasta samalta vuodelta ei välttämättä ole mahdollista. Kuitenkin vuoden 2019 osalta Mäkisara, Katila ja Peräsaari (2022) toteavat, että vanhempaa, vuoden 2018 satelliittikuvaa ei tarvittu kuin pienelle alueelle Keski-Suomessa.

Mäkisara, Katila ja Peräsaari (2022) kertovat edelleen, että satelliittikuvien tulkinnassa hyödynnetään digitaalista korkeusmallia, jonka ansiosta pystytään ottamaan huomioon auringonvalon kulman vaikutus satelliittikuviin. Inventoinnin tulosten kohdistaminen pienemmille ruuduille satelliittikuvan perusteella tapahtuu heidän mukaansa käyttämällä paranneltua k:n lähimmän naapurin menetelmää, jota Tomppo ja Halme (2004) esittelevät tarkemmin.

5 Tuotettu malli

Tutkimuksen aikana kehitettiin edelleen tutkijan aiemmin luomaa yksinkertaista metsäpalomallia. Tämän luvun aluksi avataan kehitystyön lähtökohtia ja tehtyjä oletuksia. Näiden jälkeen esitellään mallin varsinaista toteutusta ja sen toimintaperiaatteita.

5.1 Lähtökohdat ja oletukset

Tutkimuksessa tuotettu malli hyödyntää Luonnonvarakeskuksen (2021) ja Ilmatieteen laitoksen (n.d.) avointa dataa sekä Puustisen (2022) selostusta Kalajoen 2021 palon etenemisestä. Koska Luonnonvarakeskuksen (2021) data on annettu 16 m $\times$ 16 m ruuduille, on soluautomaatti tämän kokoisilla soluilla luonnollinen valinta mallinnusmenetelmäksi.

Koska Luonnonvarakeskus (2021) tarjoaa yksityiskohtaista tietoa vain puustosta, on malli rajoitettu tarkastelemaan vain latvapaloja. Elävät neulaset ovat ainoa latvuskerroksen paloaines, jolle Lindberg, Heikkilä ja Vanha-Majamaa (2011) arvioivat suuren merkityksen. Luonnonvarakeskuksen (2021) datasta mallin käyttöön on valittiin siten mäntyjen, kuusien ja kokonaisuuden huomioimiseksi myös lehtipuiden lehvästöjen biomassa. Luonnonvarakeskus (2021) tarjoaa biomassadatan ruutukohtaisina tiheyksinä yksikössä $10\frac{\text{kg}}{\text{ha}}$. Mallissa suuremman biomassamäärän oletetaan vain kasvattavan solujen syttymisherkkyyttä ja paloaikaa.

Tuulen oletetaan olevan koko simulointialueella sama, kuin Ylivieskan lentokentällä, joka on lähin mittausasema, josta Ilmatieteen laitos (n.d.) tarjoaa tuulitietoa. Tuulen puuskaisuutta ei huomioida, vaan tuulen oletetaan muuttuvan lineaarisesti datapisteiden välillä.

Paloalueen maasto oletetaan täysin tasaiseksi, eli malli ei huomio maastonmuotojen vaikutusta palon leviämiseen. Oletus on perusteltu, sillä Kalajoen paloalue on todellisuudessakin varsin tasaista, ja Puustinen (2022) arvioi että maastonmuotojen vaikutus palon leviämiseen oli vähäistä. Maaston vaikutusten mallintaminen olisi tässä tapauksessa ollut siis mallin turhaa monimutkaistamista.

Tuulen, maaston, ja biomassatiheyksien pieniä vaihteluita voidaan jossain määrin mallintaa myös satunnaisuudella. Koska lisäksi kasvillisuudesta ja erityisesti sen palo-ominaisuuksista tiedetään vähemmän kuin yleensä deterministisiä malleja käytettäessä, on malli perusteltua toteuttaa stokastisena.

5.2 Mallin toteutus ja toimintaperiaatteet

Malli toteutettiin Python-ohjelmana, joka käyttää NumPy:a (Harris ym. 2020) taulukkojen käsittelyyn ja PyQt5:ttä (Riverbank Computing, n.d.) kuvien (rasterimuotoisen datan) käsittelyyn ja graafisen käyttöliittymän esittämiseen. Simuloinneissa käytetty ohjelma on yleisesti saatavilla (Vanas 2023) ja sen graafinen käyttöliittymä on esitetty kuviossa 4.

Mallin varhaiseen kehitykseen vaikuttivat etenkin Almeida ja Macau (2011), Freire ja DaCamara (2019), Russo ym. (2014) ja Ghisu ym. (2015), joiden kehittämiä malleja on esitelty luvussa 3.1. Tämän jälkeen sitä on muutettu hyödyntämään Luonnonvarakeskuksen (2021) kasvillisuusdata ja Ilmatieteen laitoksen (n.d.) tuulidataa sekä sovitettu kuvion 2 mukaiseen Kalajoen palon etenemiseen 28.7.2021.

Mallin soluilla on kolme mahdollista perustilaa: (toistaiseksi) palamaton, palava, ja palanut. Perustilan lisäksi soluihin on tallennettu mäntyjen, kuusten ja lehtipuiden biomassatiheydet Luonnonvarakeskuksen (2021) datasta. Erillinen perustila soluille, jotka eivät voi palaa, ei ole tarpeen, sillä kasvillisuudettomat solut eivät voi mallin mukaisesti muutenkaan syttyä.

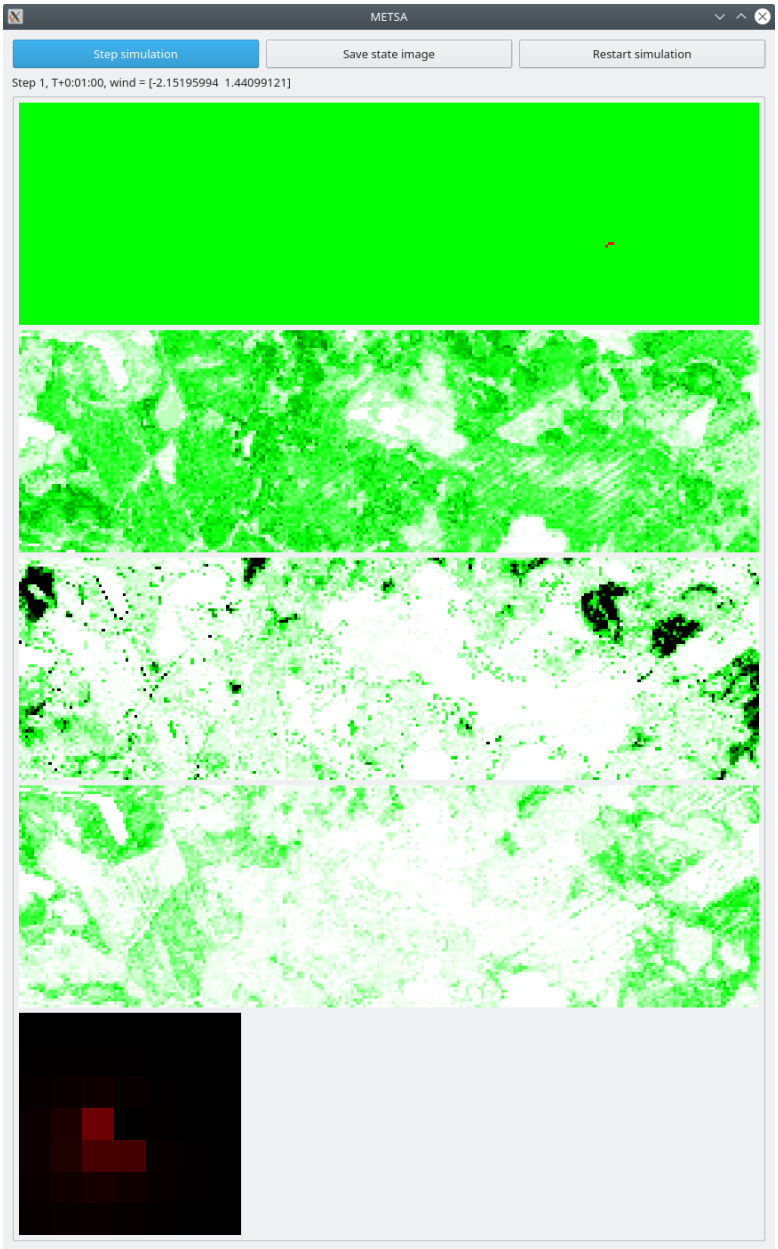
Soluautomaatin toiminta etenee aika-askeleittain. Jokaisen aika-askeleen aikana

1. palaville soluille arvotaan, jatkaako solu palamista vielä seuraavallakin aika-askeleella ja
2. jokaisen palavan solun jokaiselle palamattomalle naapurille arvotaan, syttyykö naapuri seuraavalle aika-askeleelle.

Palavan solun todennäköisyys jatkaa palamista aika-askeleen yli lasketaan yhtälöllä

$$P(C(c,\Delta t)) = 1 - \left(\sum_{v \in V} \left(1 - P(C(U_v,1))^{B(c,v)} \right) \right)^{\Delta t}, \tag{5.1}$$

missä



Kuvio 4. Kuvankaappaus soluautomattisovelluksen käyttöliittymästä. Heti toimintonappien alla on kerrottu kuluneiden aika-askeleiden määrä, sitä vastaava kulunut simuloitu aika sekä senhetkinen tuulivektori. Näiden alapuolella on visualisaatio solujen perustilasta, jossa värit ovat kuten kuviossa 5. Tätä seuraavat visualisaatiot mäntyjen, kuusten ja lehtipuiden lehvästöjen solukohtaisista biomassatiheyksistä. Näissä värit kulkevat biomassan kasvaessa tyhjien solujen valkoisesta vihreän kautta mustaan. Viimeisenä on visualisaatio suunnan vaikutuksesta palavan solun mahdollisuuteen sytyttää naapureitaan. Tässä palava solu on keskellä, ja sitä ympäröivät solut ovat sitä kirkkaamman punaisia, mitä todennäköisemmin ne syttyvät.

- c on palava solu,
- Δt on aika-askeleen pituus,
- $P(C(c,\Delta t))$ on todennäköisyys sille, että palava solu c jatkaa palamista aika-askeleen Δt ajan,
- V on kasvillisuustyyppien joukko,
- $P(C(U_v,1))$ on todennäköisyys sille, että yhden yksikön verran tyypin v biomassaa sisältävä palava solu U_v jatkaa palamista sekunnin ajan ja
- $B(c,v)$ on solun c sisältämä tyypin v biomassan määrä.

Yhtälössä oletetaan, että jokaisella biomassayksiköllä on muista riippumaton mahdollisuus sammua. Koko solu sammuu vain, jos ne kaikki sammuvat saman aika-askeleen aikana.

Palavan solun todennäköisyys sytyttää tietty naapurisolunsa aika-askeleen aikana puolestaan lasketaan hieman monimutkaisemmalla yhtälöllä

$$P\left(I\left(c,n,w,\Delta t\right)\right) = 1 - \left(\sum_{v\in V}\left(1 - P\left(I_1\left(U_v,1\right)\right)^{B(n,v)}\right)\right)^{N(c,n,w)\Delta t}, \tag{5.2}$$

missä

- c on palava solu,
- n on mahdollisesti syttyvä naapurisolu,
- Δt on aika-askeleen pituus,
- $P(I(c,n,\Delta t))$ on todennäköisyys sille, että palava solu c sytyttää naapurisolunsa n tuulen ollessa vektorin w mukainen aika-askeleen Δt aikana,
- V on kasvillisuustyyppien joukko,
- $P(I_1(U_v,1)$ on todennäköisyys sille, että yhden yksikön verran tyypin v biomassaa sisältävä palava solu U_v syttyy sekunnin aikana, kun tasan yksi sen lähimmistä naapureista palaa,
- $B(c,v)$ on solun c sisältämä tyypin v biomassan määrä ja
- $N(c,n,w)$ on yhtälön (5.3) mukaan laskettu, solujen c ja n välisestä etäisyydestä ja suunnasta, sekä tuulivektorista w riippuva luku.

Tässä oletetaan, että kullakin biomassayksiköllä on muista riippumaton mahdollisuus syttyä. Solun todennäköisyys syttyä on siten todennäköisyys sille, että ainakin yksi näistä yksiköistä syttyy. Syttymistodennäköisyyteen vaikuttavat myös tuuli ja sekä etäisyys sytyttävästä solusta. Solun lopullinen syttymistodennäköisyys syntyy kaikkien sen naapuruston palavien solujen yhteisvaikutuksena, sillä jokaisella niistä on muista riippumaton todennäköisyys sytyttää se.

Yhtälössä (5.2) esiintyvän funktion N toimintaa kuvaa yhtälö

$$N(c,n,w) = \frac{b^{(n-c)\cdot w}}{\|n-c\|^2}, \tag{5.3}$$

missä

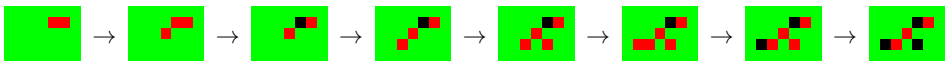
- c on palava solu paikkavektoriksi tulkittuna,
- n on mahdollisesti syttyvä solu paikkavektoriksi tulkittuna,
- w on tuulivektori ja
- b on säädettävä kantaluku.

Koska funktion N saamat arvot ovat samat kaikille soluille c ja niihin suhteessa samassa paikassa oleville naapurisoluille, riittää sen arvot laskea vain kerran aika-askeleessa.

Kalajoen palon simulointia varten päädyttiin käyttämään minuutin aika-askelta ja 7×7 (3-säteistä) naapurustoa. Yksikkötodennäköisyydet $P(C(U_v,1))$ ja $P(I_1(U_v,1)$ samoin kuin tuulen vaikutuksen laskentaan käytetty kantaluku b etsittiin käsityönä kokeilemalla. Arvot pyrittiin asettamaan niin, että palot eivät satunnaista siemenlukua käytettäessä yleensä sammu heti alkuunsa ja tuulen vaikutus on jokseenkin oikean suuruinen ja suuntainen. Näiden ehtojen puitteissa simuloitua paloa pyrittiin hidastamaan, jotta se ei leviäisi todellista paloa nopeammin. Valitut yksikkötodennäköisyydet on esitetty talukossa 1. Tuulen vaikutuksen kantaluvuksi valittiin $b = 1,2$. Kuviossa 5 on esitetty muutama ensimmäinen aika-askel soluautomaatin toimintaa näillä parametreilla.

Puulaji	$P(C(U_v,1))$	$P(I_1(U_v,1)$
Kuusi	$3,50 \cdot 10^{-4}$	$1,50 \cdot 10^{-6}$
Mänty	$3,50 \cdot 10^{-4}$	$1,50 \cdot 10^{-6}$
Lehtipuut	$1,00 \cdot 10^{-4}$	$0,75 \cdot 10^{-6}$

Taulukko 1. Simuloinnissa käytetyt yksikkötodennäköisyydet.

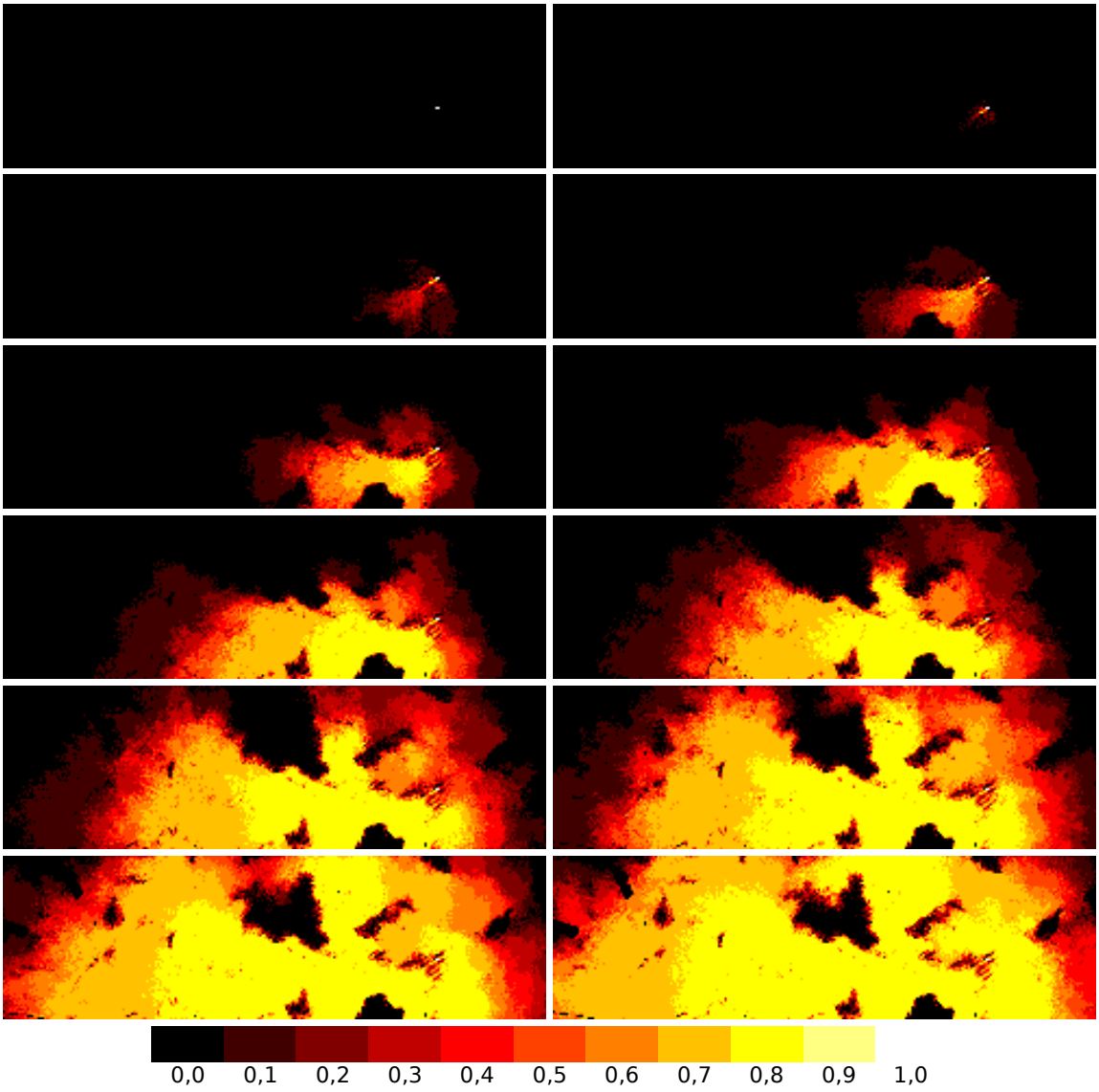


Kuvio 5. Muutama askel tuotetun soluautomaatin toimintaa. Palamattomat solut on esitetty vihreinä, palavat punaisina ja loppuun palaneet mustina.

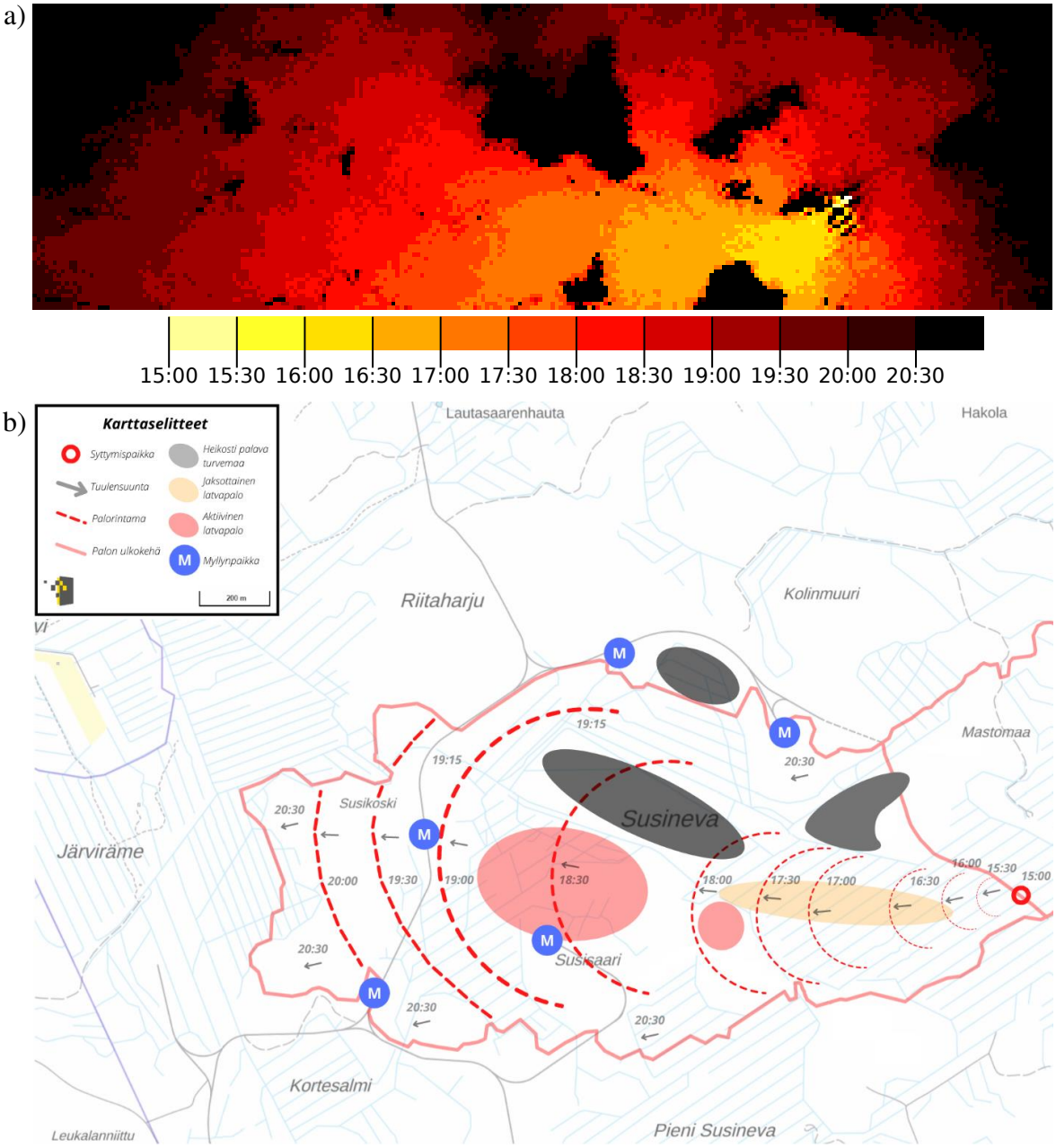
6 Simulointi ja tulokset

Analysoitavien tuloksien tuottamiseksi soluautomaattia ajettiin kiinnitetyllä siemenluvulla tallentaen solujen tilat 30 aika-askeleen välein. Kahta alkuunsa sammunutta simuloitua paloa lukuun ottamatta simulaation annettiin kulkea 330 aika-askeleen verran, jonka jälkeen se aloitettiin alusta satunnaislukugeneraattoria alustamatta. Tällä tavoin yhdellä siemenluvulla tuotettiin yhteensä kymmenen erillistä simulointiajoa. Ajoilla mallinnettiin kuvion 2 tavoin 5 h 30 min ajanajaksoa 28.7.2021 klo 15.00–20.30, josta tilaotokset tallennettiin 30 min välein.

Kaikkien kymmenen simulaatioajon kaikki tilaotokset on sisällytetty liitteeseen A. Kuviossa 6 on esitetty näistä lasketut todennäköisyydet sille, että palo on levinnyt kuhunkin soluun tiettyyn hetkeen mennessä. Valitsemalla kutakin ajanhetkeä kohden ne solut, joihin palo on levinnyt vähintään puolella ajokerroista, saadaan palon todennäköinen kulku, joka on esitetty kuviossa 7.



Kuvio 6. Simuloidun palon todennäköisyys olla levinnyt kuhunkin soluun 30 aika-askeleen (eli 30 simuloidun minuutin) välein järjestyksessä vasemmalta oikealle, ylhäältä alas. Väreillä on ilmaistu kunkin solun todennäköisyys olla palava tai loppuun palanut kullakin ajanhetkellä.



Kuvio 7. Simuloidun palon todennäköinen kulku (a) ja vertailua varten toistettu kuvio 2 (b, Puustinen 2022). Kuvassa a on väreillä ilmaistu hetki, johon mennessä palo on levinnyt kuhunkin soluun vähintään puolella ajokerroista. Palon syttymispaikka kuvan oikealla puolella on väriltään valkoinen ja kaikissa simulaatioajoissa palamatta jääneet alueet mustia.

7 Pohdinta

Tässä tutkimuksessa on tuotettu stokastinen soluautomaatti metsäpalojen mallintamiseen, ja sillä on tuotettu Kalajoen 2021 todellisen palon kanssa vertailtavissa olevia tuloksia. Tässä luvussa arvioidaan mallin toimivuutta, vastataan tutkimuskysymyksiin ja esitetään jatkotutkimusaiheita.

7.1 Mallin arviointi

Verratessa kuviossa 7 esitettyjä todellisen palon etenemistä sekä mallin antamaa ennustetta, voidaan todeta, että malli ennustaa kohtuullisen hyvin palon alkuvaiheita. Kuten oikea palokin, mallin ennustama palo leviää aluksi hitaasti, mutta leviämisnopeus kasvaa ajan myötä. Mallin ennustama palo ohittaa kuitenkin nopeasti todellisen palon. Erityisesti simuloitu palo ylittää simulointialueen, ja siten myös todellisen paloalueen, etelässä hyvin nopeasti. Mallin mukainen palon etenemissuuntakaan ei siis täysin vastaa todellisuutta.

Tuloksia arvioitaessa on muistettava, että tuotettu malli mallintaa oikeastaan vain latvapaloja, sillä ainoa sen huomioima kasvillisuus on puiden lehvästö. Tarkasteltu todellinen palo levisi suurimmaksi osaksi maantasossa ja vain osan ajasta latvapalona. Puustisen (2022) mukaan palon aggressiivinen vaihe oli klo 17.30–19.00. Tarkasteltaessa kuviota 7 vain klo 19.00 edeltäviltä osilta, näyttää mallin ennuste hieman paremmalta.

Ero mallin ennustamassa ja todellisessa leviämissuunnassa selittynee ainakin osittain sillä, että mallissa on käytetty koko alueelle samaa, lähes 30 km päässä Ylivieskan lentokentällä mitattua tuulitietoa. Käytetty tuulivektori eronnee siten todellisista palo-olosuhteista ainakin jonkin verran.

Mallin ja tulosten yleistettävyyttä heikentää se, että malli on sovitettu ja tarkistettu yhdellä ja samalla palolla. Tässä vähäisenä lieventävänä tekijänä on se, että siemenlukua ei kiinnitetty ennen lopullisia ajoja, joten sovitus on tehty käyttäen satunnaisia siemenlukuja. Sovitus tuskin on siltikään täydellinen, sillä se on tehty käsin.

Mikään malli ei tietenkään voi ennustaa maastopalojen kaltaista monimutkaista ilmiötä täydellisesti, mutta kirjallisuudessa esiintyy selkeästi parempia tuloksia. Alexandridis ym. (2008) pääsivät mallillaan hyvin lähelle todellisen palon paloaikaa, kokonaispinta-alaa sekä muotoa. Heidän mallinsa ennusti in 11,3 h kestoista ja 5,4 km^2 laajuista paloa, kun vastaava todellinen palo poltti 5,9 km^2 11 tunnissa.

Myös Trucchia ym. (2020) saivat PROPAGATOR-mallillaan pääosin todellisia paloalueita mukailevia ennusteita, mutta mallinnettu palo jäi usein ainakin hiukan vajaaksi palon loppupäästä tai muista paloalueen kärjistä. Vain yhdessä viidestä palosta, jota Trucchia ym. (2020) mallinsivat, PROPAGATOR tuotti selvästi todellista suuremman paloalueen.

Mastorakos ym. (2022) saivat FireSPIN-mallillaan ennusteen, joka muodoltaan vastasi hyvin todellisen palon korkea-intensiteettistä aluetta ylittäen kuitenkin sen pinta-alan. Koko paloalueesta, jota Mastorakos ym. (2022) mallinsivat, FireSPIN:in ennuste jäi kuitenkin selvästi vajaaksi. Samalla FireSPIN-mallilla myös Efstathiou ym. (2023) saivat todellista paloa pienemmän paloalueen. Efstathiou ym. (2023) ovat kuitenkin varsin tyytyväisiä ennusteensa muotoon isoimman poikkeaman selittyessä sillä, että simuloitu palo ei ollut ylittänyt tietä. Myös tässä mallinnuksessa todellisen paloalueen kärjet jäivät usein saavuttamatta.

Myös Kolstela (2020) sai simulaatioistaan todellista pienemmät paloalat, ainakin kun sammutustoimet huomioitiin. Ilman sammutustoimia mallintavia rajoitteita myös Freire ja DaCamara (2019) saavat todellisen paloalueen selvästi ylittävän ennusteen.

Ainakin edellä mainituissa tapauksissa on siis tyypillisempää, että mallit ennustavat liian pieniä kuin liian suuria paloalueita. Poikkeuksia ovat tapaukset, joissa tehtyjä palontorjuntatoimia ei huomioida. Palontorjunnan mallinnuksen puute voi osittain selittää tämänkin tutkimuksen mallin todellista nopeampaa etenemistä, joskaan Puustisen (2022) paloa ei saatu hallintaan kuin vasta useita tunteja tarkastellun ajanjakson jälkeen.

Ei ole aivan selvää, onko palon leviämisnopeus parempi ennustaa liian pieneksi vai liian suureksi, sillä niin yli- kuin alireagointikin voivat johtaa rajallisen sammutusresurssin väärään kohdistamiseen. Ennustukset ovat tietenkin aina sitä hyödyllisempiä, mitä tarkempia ne ovat, mutta vain jos ne saadaan hyvissä ajoin. Maastopalomallinnus tulee siten aina olemaan kompromissi tarkkuuden, suorituskyvyn ja datan saatavuuden välillä.

7.2 Tutkimuskysymyksiin vastaaminen

Tutkielman päätutkimuskysymys oli: Miten stokastista soluautomaattia voidaan hyödyntää suomalaisten metsäpalojen mallintamisessa? Tutkimuksen aikana kehitettiin malli, joka ennustaa kohtuullisesti Kalajoen kesän 2021 maastopalon toisen vaiheen alkuvaiheita. Hypoteesia, että stokastinen soluautomaatti toimii hyvin myös suomalaisten metsäpalojen mallinnuksessa, ei voi täysin hyväksyä korkeintaan kohtuullisia tuloksia tuottavan mallin perusteella. Hypoteesin hylkäykseenkään ei kuitenkaan ole syytä, sillä mallissa on jäljellä vielä paljon kehityspotentiaalia.

Alitutkimuskysymyksiä olivat:

- Miten avoimesti saatavilla oleva tausta-aineisto muunnetaan siirtymätodennäköisyyksiksi?

  Tuotettu malli hyödyntää Luonnonvarakeskuksen (2021) sekä Ilmatieteen laitoksen (n.d.) avointa dataa siirtymätodennäköisyyksien laskennassa. Siirtymätodennäköisyyksien laskutapa on esitetty luvussa 5 ja erityisesti yhtälöissä (5.2) ja (5.3). Vaikka yhtälöt ovat yksinkertaistuksia, on niillä ja käsin sovitetuilla yksikkötodennäköisyyksillä saatu jo kohtuullisia tuloksia.

- Kuinka huomioida tausta-aineistoon pohjautuvaan ympäristöön palosta aiheutuvat muutokset siirtymätodennäköisyyksissä?

  Eräässä kehitysvaiheessa malli simuloi biomassan vähenemistä palavissa soluissa, ja päätti solujen sammumisesta jäljellä olevan biomassan perusteella. Tästä kuitenkin luovuttiin mallin yksinkertaistamiseksi. Kuten luvussa 7.3 esitetään, malliin olisi kuitenkin edelleen mahdollista lisätä tämän ja muiden solukohtaisten muuttujien hyödyntäminen.

- Kuinka soluautomaatti toteutetaan niin, että se voidaan helposti yleistää myös muihin kuin nyt tutkittavaan paloon?

Mallin luvussa 5.2 kuvatut toimintaperiaatteet soveltuvat ainakin teoriassa myös muiden palojen mallintamiseen. Vaikka malli on sovitettu Kalajoen 2021 paloihin, on vastaavaa avointa dataa saatavilla koko Suomesta ja eri ajankohdilta. Dataa vaihtamalla mallia voisi siis soveltaa muihin paloihin jo nyt, tosin oletukset esimerkiksi maaston tasaisuudesta eivät välttämättä päde. Luvussa 7.3 on esitetty toimenpiteitä, joilla mallin yleistettävyyttä voitaisiin entisestään parantaa.

7.3 Kehitysehdotuksia ja jatkotutkimusaiheita

Kuten mainittua, mallissa on vielä paljon kehittämisen varaa. Tärkein, mutta luultavasti myös helpoin, kehitystoimenpide mallin yleistettävyyden kannalta lienee maastonmuotojen huomioon ottaminen. Hankalampaa, mutta lähes yhtä tärkeää, olisi käytetyn paloainesdatan parantaminen. Luonnonvarakeskuksen (n.d.) MVMI-datassa on tarkkaa tietoa vain puista, mutta kasvupaikkatyypin perusteella lienee mahdollista tehdä ainakin jonkinlaisia arvioita myös muun kasvillisuuden palokäyttäytymisestä. Tarkemmatkin tiedot muusta kasvillisuudesta olisivat tietenkin mallin kannalta hyödyllisempiä.

Ilmatieteen laitokselta (n.d.) on käytettyjen tuulen nopeuksien lisäksi saatavilla muutakin säädataa, jota malli voisi hyödyntää. Esimerkiksi ilman lämpötila ja kosteus voitaisiin huomioida syttymistodennäköisyyksissä. Tarpeeksi lyhyellä aika-askeleen pituudella voisi onnistua myös tuulenpuuskien simulointi. Tuuleen voisi arpoa vaihtelua kuitenkin niin, että keskinopeus ja suurin puuskanopeus toteutuvat kuten datassa. Joissakin malleissa huomioidaan jopa tuulen vaihtelu tarkasteltavan alueen sisällä. Tämä ominaisuus voisi olla hyödyllinen etenkin suuria paloja mallintaessa, mutta vaatii tietenkin joko yksityiskohtaisempaa dataa tai omaa tuulen mallinnusta mm. maastonmuodot huomioiden.

Joiltain osin mallin jatkokehityksessä on myös tehtävä valintoja. Päätös pitää kasvillisuusdata jatkossakin vakiona mahdollistaisi toteutuksen optimointia, sillä kehityksen aikana ajatuksena oli, että simuloitu palo voisi myös muuttaa ympäristöään. Esimerkiksi palavien solujen naapurien kuivumista voisi mallintaa niin, että niiden syttymistodennäköisyys kasvaa ajan myötä. Jos solussa olevan biomassan määrää vähennettäisiin sen palaessa, olisi mahdollista

jopa sallia solujen sammua ennen polttoaineen loppumista ja syttyä myöhemmin uudelleen. Näihin ilmiöihin vaikuttaisi solussa olevan palon intensiteetti. Kaiken tämän toteuttaminen vaatisi kuitenkin varsin syvällistä ymmärrystä palojen ja polttoaineiden käyttäytymisestä.

On myös mahdollista, että mallin perusyhtälöitä kannattaisi muokata esimerkiksi palorintaman muodon parantamiseksi. Olivatpa tehtävät parannukset mitä tahansa, on mallin säätämistä ja validointia varten tarpeen tarkastella useampia todellisia paloja. Tällöin tulisi myös tarkastella mahdollisuutta tehdä mallin sovittamien automaattisesti. Erityisen mielenkiintoista olisi mallintaa samoja paloja eri menetelmillä, jotta tulokset olisivat suoraan vertailtavissa.

Mallintamisen itsensä lisäksi aiheesta olisi tarpeen tehdä enemmän kokoavaa tutkimusta. Maastopalojen mallintamisesta on valtavasti tutkimusta, mutta kattavaa kirjallisuuskatsausta aiheesta ei ole löytynyt. Papadopoulos ja Pavlidou (2011) ja Ghodrat ym. (2023) käyvät kyllä läpi lukuisia simulaatio-ohjelmistoja, mutta molempien katsausten ulkopuolelle jää valtavasti tutkimusta, jota ei ainakaan toistaiseksi ole tuotteistettu. Kunnollinen kirjallisuuskartoitus auttaisi myös tunnistamaan, missä suurimmat aukot maastopalojen mallintamista koskevassa tutkimuksessa ovat.

8 Johtopäätökset

Metsä- ja maastopalojen määrien ja kokojen kasvaessa maailmanlaajuisesti, myös tarve niiden käyttäytymisen ennustamiselle kasvaa jatkuvasti. Jotta palojen aiheuttamat vahingot voidaan minimoida, täytyy rajallinen sammutusresurssi kohdistaa oikein. Mm. tätä kohdistusta varten on maailmalla kehitetty runsaasti erilaisia maastopalojen leviämismalleja, mutta Suomessa asiaa ei ole juurikaan tutkittu.

Tässä tutkielmassa selvitettiin konstruktiivisen tutkimuksen keinoin sitä, kuinka kansainvälistä tutkimusta ja suomalaista avointa dataa voidaan soveltaa maastopalojen käyttäytymisen ennustamisessa Suomen olosuhteissa. Tutkimuksessa tuotettu konstruktio oli avointa dataa hyödyntävä metsäpalojen leviämistä ennustava stokastinen soluautomaattimalli, joka säädettiin jäljittelemään Kalajoen Raution metsäpalon kulkua 28.7.2021.

Tehtyjen simulointien perusteella mallin ennustukset poikkeavat palon todellisesta kulusta selvästi ennustetun palon levitessä todellista nopeammin. Poikkeama ei ole kuitenkaan niin suuri, että mallia tulisi pitää täysin hyödyttömänä. Tutkielmassa on esitetty myös keinoja, joilla mallia olisi luultavasti mahdollista parantaa.

Malli on siis todennäköisesti liian epätarkka sellaisenaan käytettäväksi tositilanteessa, eli ennustamaan käynnissä olevan palon leviämistä päätöksenteon tueksi. Se tarjoaa kuitenkin lähtökohdan paremman, suomalaista avointa dataa hyödyntävän, maastopalomallin kehitykseen.

Lähteet

Alexandridis, A., D. Vakalis, C.I. Siettos ja G.V. Bafas. 2008. “A cellular automata model for forest fire spread prediction: The case of the wildfire that swept through Spetses Island in 1990”. *Applied Mathematics and Computation* 204 (1): 191–201. ISSN: 0096-3003. https://doi.org/10.1016/j.amc.2008.06.046.

Almeida, Rodolfo Maduro, ja Elbert E. N. Macau. 2011. “Stochastic cellular automata model for wildland fire spread dynamics”. *Journal of Physics: Conference Series* 285:012038. https://doi.org/10.1088/1742-6596/285/1/012038.

Anderson, D. H., E. A. Catchpole, N. J. De Mestre ja T. Parkes. 1982. “Modelling the spread of grass fires”. *The ANZIAM Journal* 23 (4): 451–466. https://doi.org/10.1017/S0334270000000394.

Efstathiou, Georgios, Savvas Gkantonas, Andrea Giusti, Epaminondas Mastorakos, C. Michael Foale ja Rhonda R. Foale. 2023. “Simulation of the December 2021 Marshall fire with a hybrid stochastic Lagrangian–cellular automata model”. *Fire Safety Journal,* 103795. ISSN: 0379-7112. https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103795.

Finney, Mark A. 2004. *FARSITE: Fire Area Simulator — Model Development and Evaluation.* Research Paper RMRS-RP-4 Revised. Rocky Mountain Research Station, Forest Service, United States Department of Agriculture. https://doi.org/10.2737/rmrs-rp-4.

Freire, J. G., ja C. C. DaCamara. 2019. “Using cellular automata to simulate wildfire propagation and to assist in fire management”. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 19 (1): 169–179. https://doi.org/10.5194/nhess-19-169-2019.

Ghisu, Tiziano, Bachisio Arca, Grazia Pellizzaro ja Pierpaolo Duce. 2015. “An Improved Cellular Automata for Wildfire Spread”. International Conference On Computational Science, ICCS 2015, *Procedia Computer Science* 51:2287–2296. ISSN: 1877-0509. https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.05.388.

Ghodrat, Maryam, Farshad Shakeriaski, Sayyed Aboozar Fanaee ja Albert Simeoni. 2023. "Software-Based Simulations of Wildfire Spread and Wind-Fire Interaction". *Fire* 6 (1). ISSN: 2571-6255. https://doi.org/10.3390/fire6010012.

Green, David G., Andrew Tridgell ja A.Malcolm Gill. 1990. "Interactive simulation of bushfires in heterogeneous fuels". *Mathematical and Computer Modelling* 13 (12): 57–66. ISSN: 0895-7177. https://doi.org/10.1016/0895-7177(90)90099-9.

Harris, Charles R., K. Jarrod Millman, Stéfan J. van der Walt, Ralf Gommers, Pauli Virtanen, David Cournapeau, Eric Wieser ym. 2020. "Array programming with NumPy". *Nature* 585 (7825): 357–362. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2.

Ilmatieteen laitos. n.d. "Tuulen nopeus Ylivieskan lentokentällä 28.7.2021". Viitattu 22. maaliskuuta 2023. https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus.

Kolstela, Joonas. 2020. "Metsäpalon leviämisen mallintaminen Suomessa". Tutkielma, Itä-Suomen yliopisto. https://erepo.uef.fi/handle/123456789/22919.

Lindberg, Henrik, Timo V. Heikkilä ja Ilkka Vanha-Majamaa. 2011. *Suomen metsien paloainekset - kohti parempaa tulen hallintaa.* Metsäntutkimuslaitos. ISBN: 978-951-40-2294-4. http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-40-2294-4.

Lopes, A.M.G., M.G. Cruz ja D.X. Viegas. 2002. "FireStation — an integrated software system for the numerical simulation of fire spread on complex topography". *Environmental Modelling & Software* 17 (3): 269–285. ISSN: 1364-8152. https://doi.org/10.1016/S1364-8152(01)00072-X.

Luonnonvarakeskus. 2021. *Monilähteisen valtakunnan metsien inventoinnin (MVMI) karttaaineisto 2019.* https://kartta.luke.fi/.

Maanmittauslaitos. 2022. "Robottidroonit avuksi metsäpalojen havaitsemiseen ja torjuntaan", viitattu 14. lokakuuta 2022. https://www.maanmittauslaitos.fi/ajankohtaista/robottidroonit-avuksi-metsapalojen-havaitsemiseen-ja-torjuntaan.

Mastorakos, Epaminondas, Savvas Gkantonas, Georgios Efstathiou ja Andrea Giusti. 2022. "A hybrid stochastic Lagrangian – cellular automata framework for modelling fire propagation in inhomogeneous terrains". *Proceedings of the Combustion Institute,* ISSN: 1540-7489. https://doi.org/h10.1016/j.proci.2022.07.240.

McArthur, A. G. 1967. *Fire behaviour in eucalypt forests.* Forestry and Timber Bureau Leaflet 107. Australia: Department of National Development. https://vgls.sdp.sirsidynix.net.au/client/search/asset/1299701/0.

Mäkisara, Kai, Matti Katila ja Jouni Peräsaari. 2022. *The Multi-Source National Forest Inventory of Finland — methods and results 2017 and 2019.* Natural resources and bioeconomy studies, 90/2022. Luonnonvarakeskus. ISBN: 978-952-380-538-5. http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-538-5.

Noble, I. R., A. M. Gill ja G. A. V. Bary. 1980. "McArthur's fire-danger meters expressed as equations". *Australian Journal of Ecology* 5 (2): 201–203. https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.1980.tb01243.x.

Papadopoulos, George D., ja Fotini-Niovi Pavlidou. 2011. "A Comparative Review on Wildfire Simulators". *IEEE Systems Journal* 5 (2): 233–243. https://doi.org/10.1109/JSYST.2011.2125230.

Puustinen, Alisa, toimittanut. 2022. *Kalajoen Raution metsäpalo 2021. Kokemuksia ja oppeja metsäpalo-osaamisen kehittämiseen.* Pelastusopiston julkaisu, D-sarja 3/2022. Pelastusopisto. http://info.smedu.fi/kirjasto/Sarja_D/D3_2022.pdf.

Riverbank Computing. n.d. "What is PyQt?" Viitattu 2. toukokuuta 2023. https://www.riverbankcomputing.com/software/pyqt/.

Rothermel, Richard C. 1972. *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels.* Research Paper INT-115. Intermountain Forest ja Range Experiment Station, Forest Service, United States Department of Agriculture. https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/32533.

Russo, L., P. Russo, D. Vakalis ja C. Siettos. 2014. “Detecting Weak Points of Wildland Fire Spread: A Cellular Automata Model Risk Assessment Simulation Approach”. *Chemical Engineering Transactions* 36:253–258. https://doi.org/10.3303/CET1436043.

Tomppo, Erkki, ja Merja Halme. 2004. “Using coarse scale forest variables as ancillary information and weighting of variables in k-NN estimation: a genetic algorithm approach”. *Remote Sensing of Environment* 92 (1): 1–20. ISSN: 0034-4257. https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.04.003.

Trucchia, Andrea, Mirko D’Andrea, Francesco Baghino, Paolo Fiorucci, Luca Ferraris, Dario Negro, Andrea Gollini ja Massimiliano Severino. 2020. “PROPAGATOR: An Operational Cellular-Automata Based Wildfire Simulator”. *Fire* 3 (3). ISSN: 2571-6255. https://doi.org/10.3390/fire3030026.

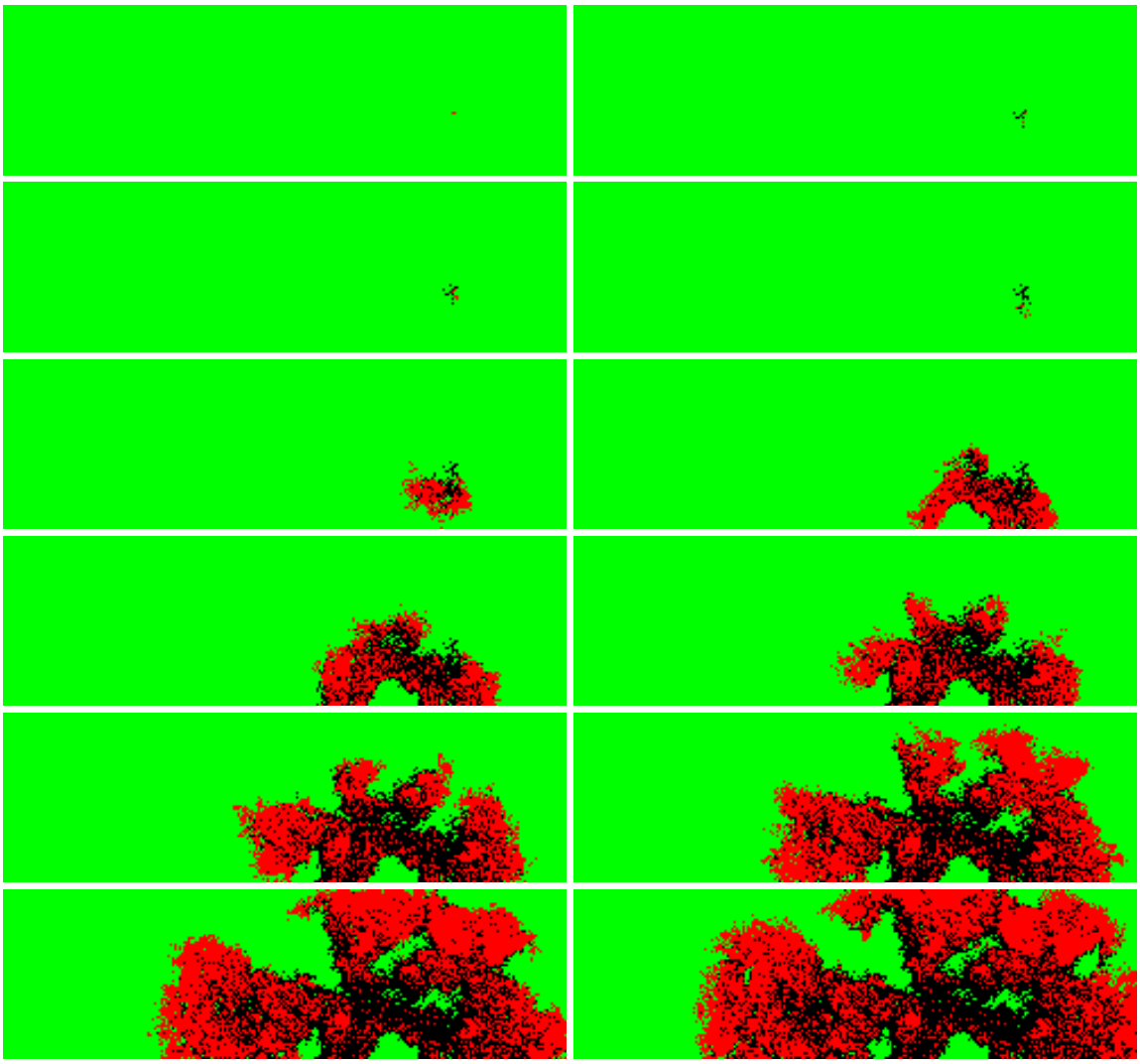
Tymstra, C., R. W. Bryce, B. M. Wotton, S. W. Taylor ja O. B. Armitage. 2010. *Development and Structure of Prometheus: the Canadian Wildland Fire Growth Simulation Model.* Information Report NOR-X-417. Northern Forestry Centre, Canadian Forest Service. https://spyd.com/fgm.ca/Prometheus_Information_Report_NOR-X-417_2010.pdf.

Vanas, Linus. 2023. *METSA.* Versio a548b9493f5acffb04cc2be8ca47a03acb54a386. https://gitlab.jyu.fi/hsi/fireman/metsa/-/tree/a548b9493f5acffb04cc2be8ca47a03acb54a386.

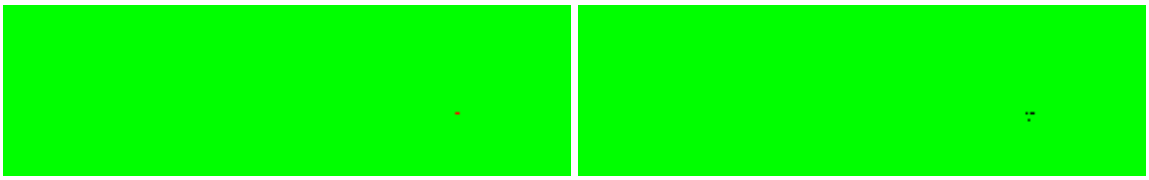
Liitteet

A Kaikkien simulointiajojen tulokset

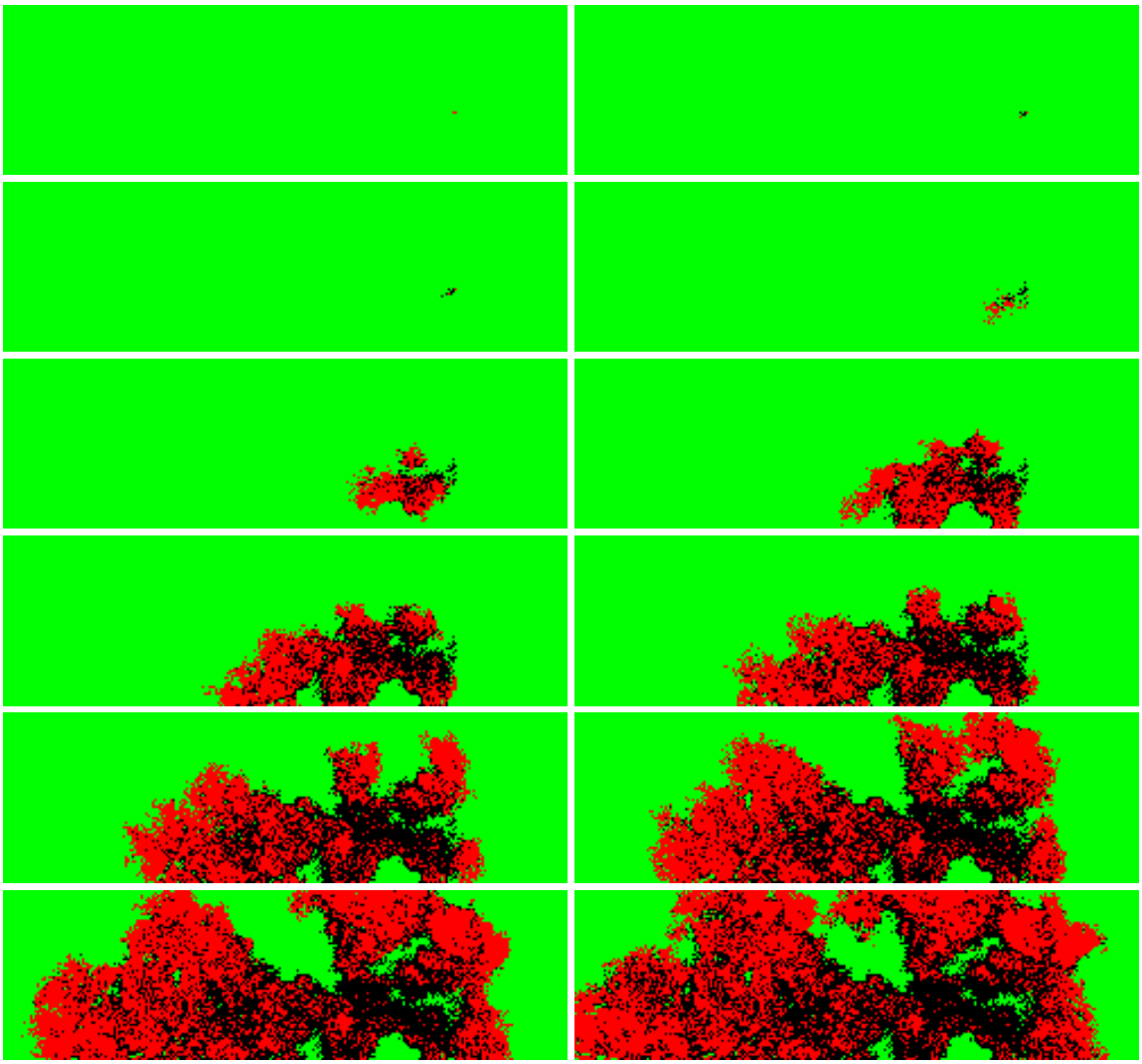
Kuvioissa 8–17 on esitetty jokaisesta kymmenestä simulointiajosta tallennetut tilaotteet. Otteiden järjestys kussakin kuviossa on kuten kuviossa 6 ja värit niissä ovat kuten kuviossa 5. Kuviot 9 ja 13 ovat muita pienempiä, sillä palo sammui näillä ajokerroilla lähes heti.



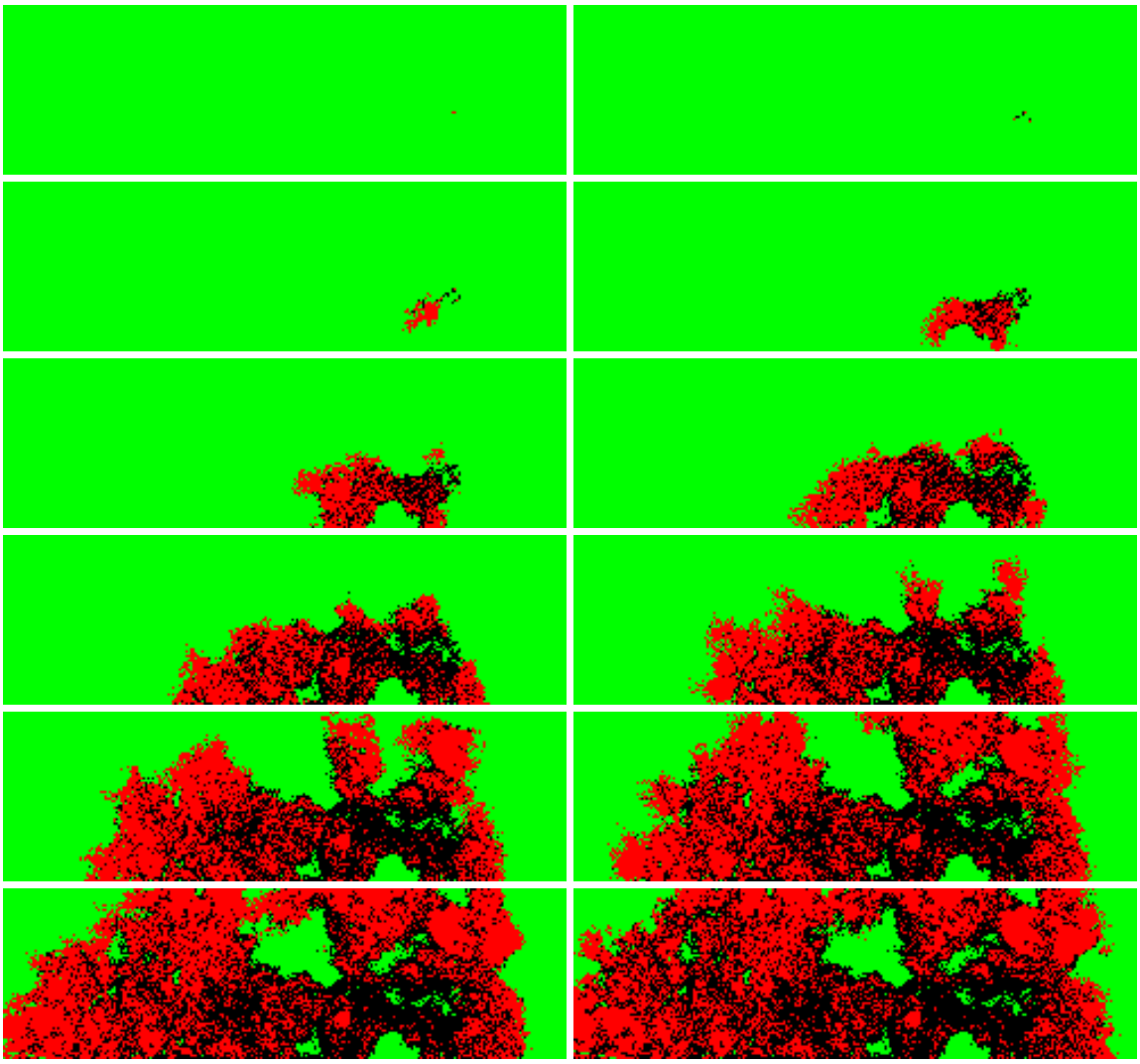
Kuvio 8. Solujen tilat ensimmäisessä ajossa 30 aika-askeleen välein.



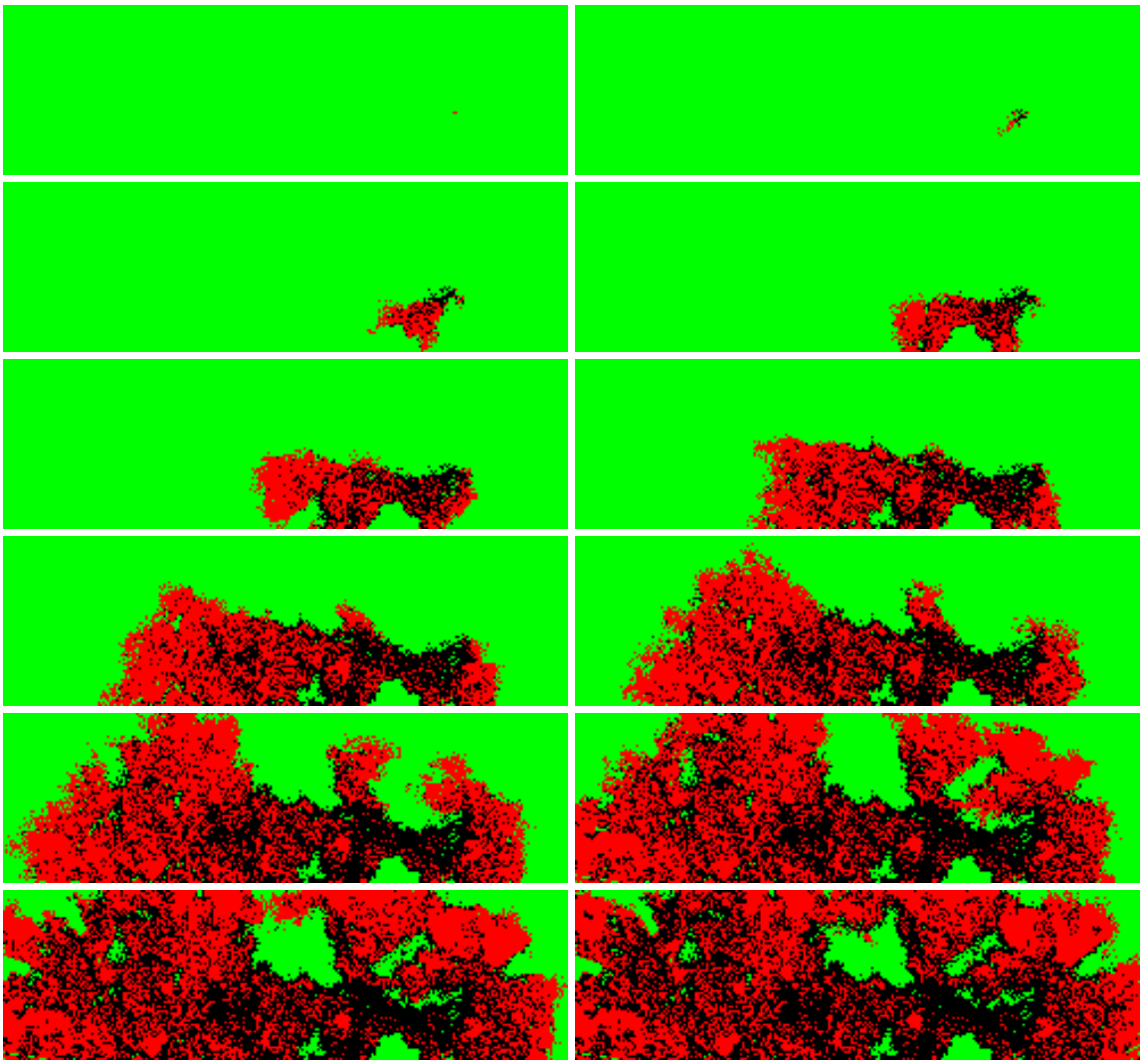
Kuvio 9. Solujen tilat toisessa ajossa 30 aika-askeleen välein.



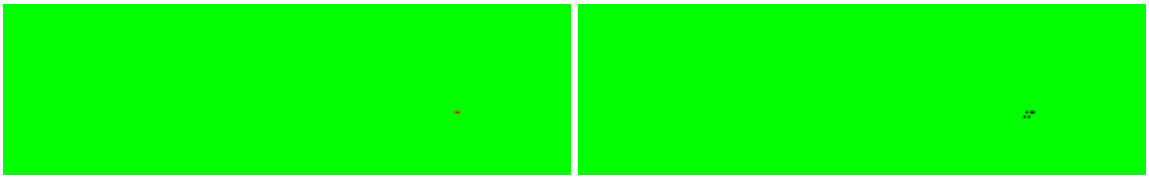
Kuvio 10. Solujen tilat kolmannessa ajossa 30 aika-askeleen välein.



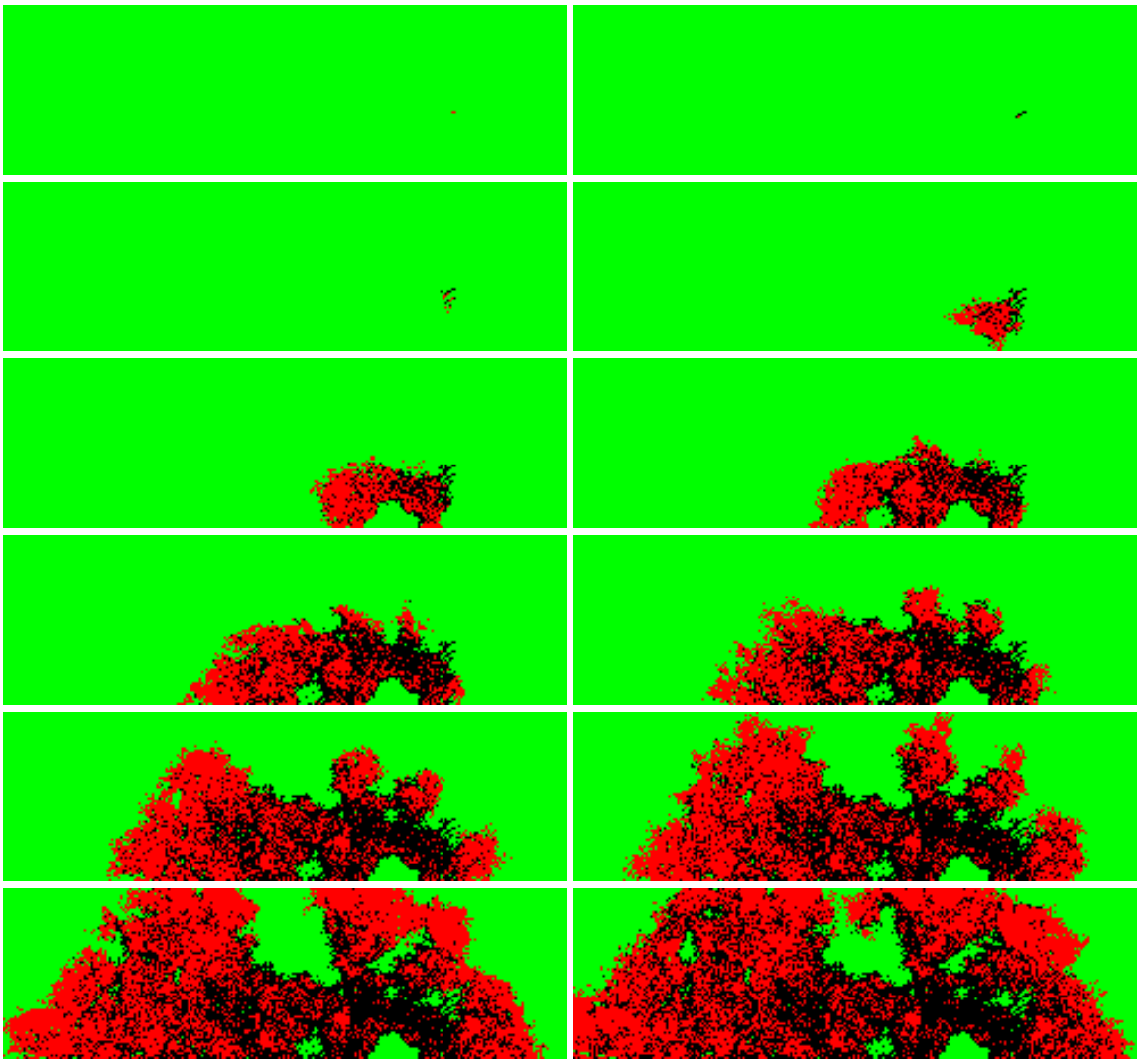
Kuvio 11. Solujen tilat neljännessä ajossa 30 aika-askeleen välein.



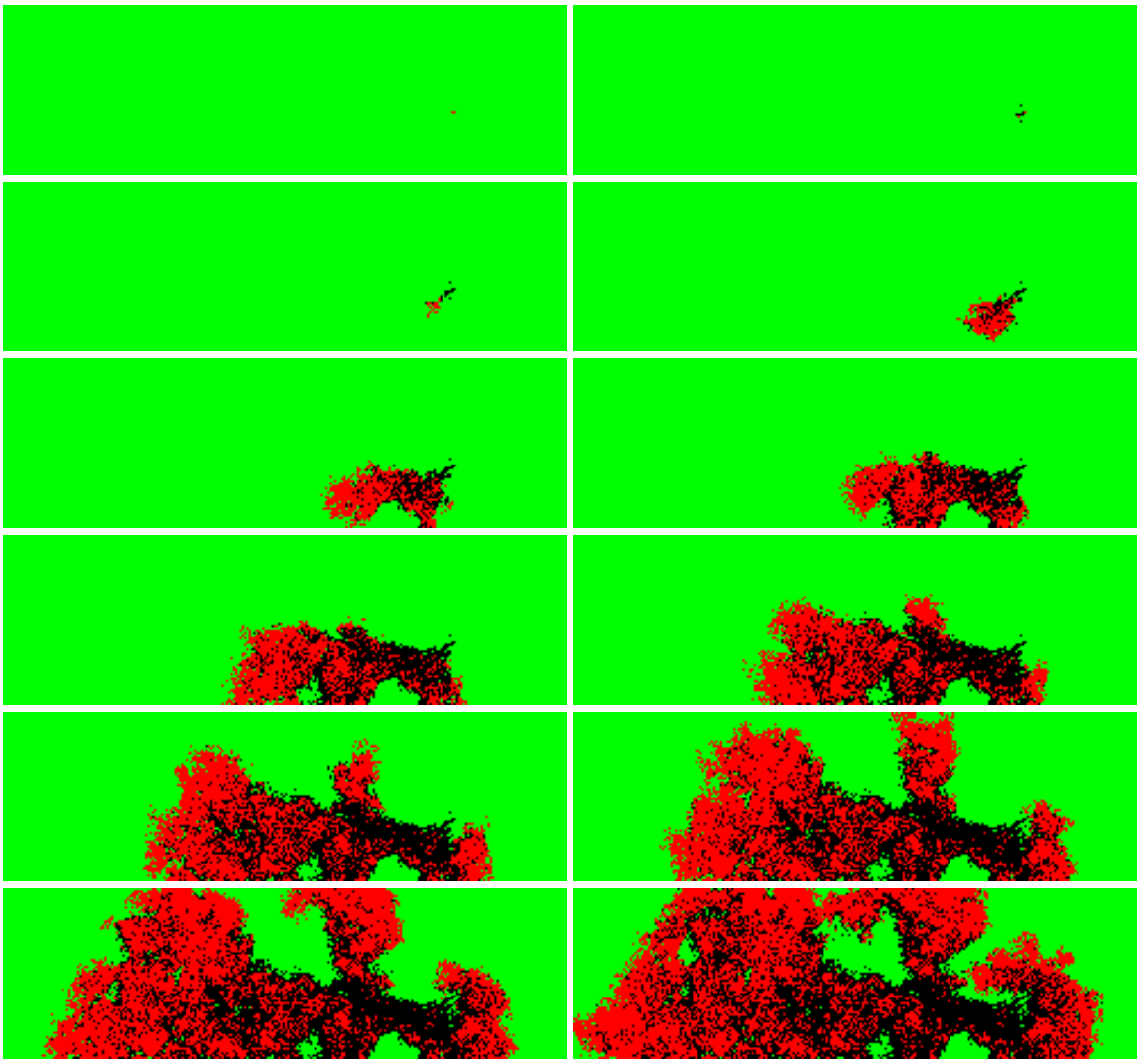
Kuvio 12. Solujen tilat viidennnessä ajossa 30 aika-askeleen välein.



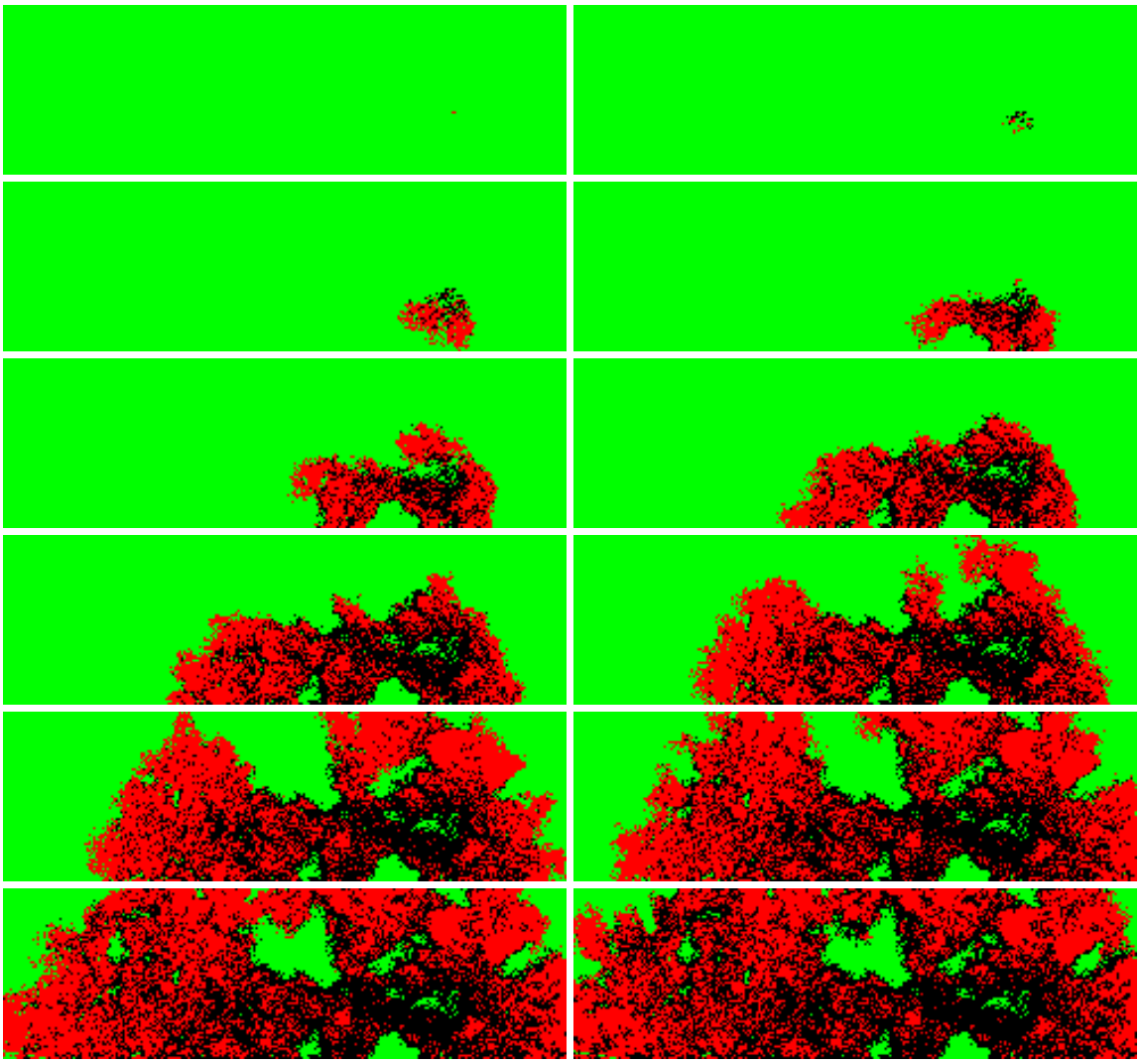
Kuvio 13. Solujen tilat kuudennnessa ajossa 30 aika-askeleen välein.



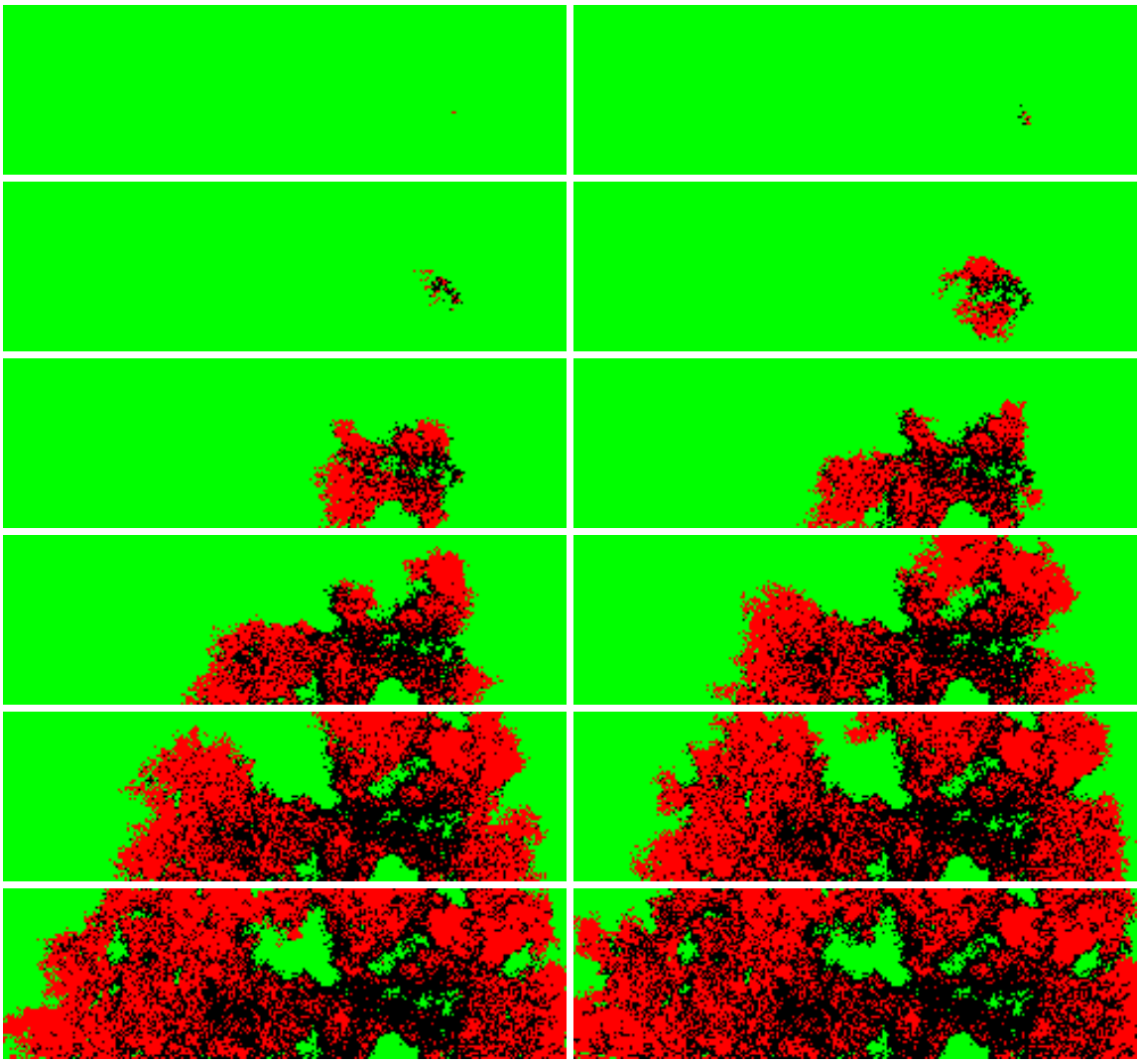
Kuvio 14. Solujen tilat seitsemännnessä ajossa 30 aika-askeleen välein.



Kuvio 15. Solujen tilat kahdeksannessa ajossa 30 aika-askeleen välein.



Kuvio 16. Solujen tilat yhdeksännessä ajossa 30 aika-askeleen välein.



Kuvio 17. Solujen tilat kymmenennessä ajossa 30 aika-askeleen välein.