

**Mika Lammi**

**Maaston proseduraalisen generoinnin menetelmät  
videopeleissä ja niiden kontrolloitavuus**

Tietotekniikan kandidaatintutkielma

18. maaliskuuta 2022

Jyväskylän yliopisto

Informaatioteknologian tiedekunta

**Tekijä:** Mika Lammi

**Yhteystiedot:** mika.j.lammi@student.jyu.fi

**Ohjaaja:** Timo Tiihonen

**Työn nimi:** Maaston proseduraalisen generoinnin menetelmät videopeleissä ja niiden kontrolloitavuus

**Title in English:** Methods for procedural terrain generation in videogames and their controllability

**Työ:** Kandidaatintutkielma

**Opintosuunta:** Tietotekniikka

**Sivumäärä:** 20+0

**Tiivistelmä:** Pelimaailmojen proseduraalinen luonti vähentää sisällön tuottamiseen kuluvia kustannuksia. Tutkielmassa käydään läpi videopeleissä käytettyjä proseduraalisia maastonluontimenetelmiä ja arvioidaan niiden kontrolloitavuutta. Menetelmien hyvä ohjattavuus on tärkeää, jotta maaston piirteet voidaan asettaa halutunlaisiksi intuitiivisella tavalla. Erityisesti agenttipohjaiset menetelmät osoittautuvat hyviksi ohjattavuudeltaan. Jatkotutkimuksia proseduraalisten menetelmien kontrolloitavuudesta kaivataan.

**Avainsanat:** proseduraalinen generointi, synteettinen, luonti, maasto, kontrolloitavuus, videopelit, pelimaailma, korkeuskartat, kandidaatin tutkielma

**Abstract:** Procedurally generating virtual game worlds can lower the cost of content production. This thesis surveys different procedural terrain generation methods and aims to evaluate their controllability. Good controllability of these methods is important so that designers can define features of the produced terrain in an intuitive way. This thesis concludes that especially agent based methods have good controllability. Further research that addresses the controllability of procedural content generation methods would be beneficial.

**Keywords:** procedural generation, synthetic, terrain, control, video games, game world, heightmaps, Bachelor's Theses

## Sisällys

1	JOHDANTO .....	1
2	MAASTON GENEROINNIN KESKEISET MÄÄRITELMÄT JA TAVOITTEET ..	3
3	FRAKTAALISET MENETELMÄT .....	6
4	SIMULAATIOMENETELMÄT .....	9
	4.1 Geomorfologiset simulaatiot.....	9
	4.2 Ekosysteemisimulaatiot .....	10
5	AGENTTIPOHJAISET MENETELMÄT .....	12
6	HAKUPERUSTAISET MENETELMÄT .....	13
7	YHTEENVETO.....	15
	LÄHTEET .....	16

# 1 Johdanto

Pelisisällön tuottamisesta on tullut pullonkaula pelituotannon budjetissa, koska sen tuottamiseen vaaditaan korkealaatuisissa peleissä satoja artisteja ja suunnittelijoita, joiden palkkaaminen on kallista (Hendrikx ym. 2013, s. 2). Proseduraalinen sisällön luonti on eräs keino vähentää sisällön tuottamisen kustannuksia. Sen hyötynä on data-amplifikaatio, eli pienellä määrällä syötettyjä parametreja voidaan luoda suuri määrä sisältöä, ja lisäksi massamuistin tarve vähenee, jos sisällö tuotetaan ohjelmallisesti muistiin vain silloin kuin sitä tarvitsee (Smelik ym. 2014, s. 31). Jos luominen tapahtuu reaaliajassa, on mahdollista tehdä myös loputtomasti jatkuvia pelimaailmoja (Togelius ym. 2010, s. 2).

Tässä tutkielmassa kartoitetaan proseduraaliseen maaston luomiseen yleisesti käytettyjä menetelmiä videopeleissä ja arvioidaan niiden kontrolloitavuutta. Kontrolloitavuudella (tai ohjattavuudella) tarkoitetaan sitä, miten proseduraalisen sisällön ominaisuuksia pystytään ohjailemaan syötteiden avulla. Kontrolloitavien ja tehokkaiden algoritmien suunnittelu proseduraalisessa maaston luonnissa on edelleen ajankohtainen kysymys tietokonegraafikan aihealueella (Cordonnier ym. 2016, s. 1). Pelinkehityksessä luontimenetelmien hyvä ohjattavuus parametrein on tärkeää pelin toimivuuden takaamiseksi. Esimerkiksi strategiapeleissä tulee taata, että vastapuolen pelaajat eivät aloita liian läheltä toisiaan, jotta peli ei päättyisi ensi minuuteilla, ja seikkailupeleissä tulee taata, ettei pelaaja joudu heti pelin alussa tekemisiin pelin vaikeimpien vihollisten kanssa, jotka on tarkoitettu kohdattavan vasta pelin lopussa. Nämä pelinkehittäjien asettamat säännöt voidaan huomioida erilaisilla algoritmeilla, ja ne tulee ottaa huomioon proseduraalisen maaston luonnissa, jotta pelaajan pelikokemus olisi pelinkehittäjien tarkoituksen mukainen.

Tutkielmassa proseduraalista luontia tarkastellaan luonnollisten näköisten ulkoilmamaa-  
stojen näkökulmasta, joiden toteutukseen käytetään korkeuskarttoja. Korkeuskarttaa voidaan mieltää pelimaailman "runkona", joka määrittää pelattavuuteen liittyviä tärkeitä ominaisuuksia kuten maaston läpikuljettavuutta ja jonka päälle kaikki muut peliasetit lisätään. Ne ovat yleisin tapa ilmaista maaston muotoja videopeleissä (Valencia-Rosado ja Starostenko 2019, s. 64). Muiden peliasettien, kuten kasvillisuuden tai kaupunkien, proseduraalista luontia ei tässä tutkielmassa käydä läpi, koska niiden proseduraalinen luonti on kokonainen oma ai-

healueensa. Vesistöjen ja merien proseduraaliseen luontiin tutkielmassa ei myöskään oteta kantaa, mutta hyvin usein peleissä vesistöt luodaan yksinkertaisesti asettamalla vedenpinta tietylle korkeudelle globaalisti koko maastossa.

Tuotetun maaston realistisuutta ja menetelmien suorituskykyä arvioidaan myös osana kirjallisuuskartoitusta lyhyesti. Menetelmien suorituskykyjen vertaileminen on kuitenkin haastavaa, koska suoritusajkoja ei aina raportoida tutkimuksissa, ne riippuvat tutkimuksessa käytetystä laitteistosta, tuotetun maaston koosta ja yksityiskohtaisuudesta ja koska tutkimuksissa käytetään myös erilaisia renderöintimenetelmiä, jotka voivat vaihdella nopeuksiltaan (Valencia-Rosado ja Starostenko 2019, s. 59).

Tutkielmassa käydään ensin läpi proseduraaliseen maaston luontiin liittyviä tärkeitä määritteitä ja sitä, millaisia tavoitteita ja vaatimuksia proseduraalisesti luodulle maastolle asetetaan videopeleissä. Tämän jälkeen käydään läpi erilaisia yleisesti käytettyjä menetelmiä: fraktaaliset menetelmät, simulaatiomenetelmät, agenttipohjaiset menetelmät ja hakuperustaiset menetelmät. Menetelmistä käydään läpi niiden toiminnallisuutta ja kontrolloitavuutta, jonka jälkeen yhteenvedossa käydään läpi eri menetelmien kontrolloitavuudesta saadut johtopäätökset.

## 2 Maaston generoinnin keskeiset määritelmät ja tavoitteet

Proseduraalisella sisällön luonnilla tarkoitetaan tekniikoita, joilla luodaan (semi)automaattisesti halutunlaista sisältöä annettujen parametrien avulla (Smelik ym. 2014, s. 31). Proseduraalinen maaston luonti (prosedural terrain generation, PTG) on PCG:n alaluokka, mikä keskittyy maaston pinnanmuotojen proseduraaliseen luontiin.

Yleisin tapa ilmaista maanpinnan muotoja videopeleissä on korkeuskartta (heightmap tai height field) (Valencia-Rosado ja Starostenko 2019, s. 64) ja suurin osa tutkimuksissa käytetyistä menetelmistä käyttää sitä maaston muotojen esittämiseen. Korkeuskartta on kaksiulotteinen taulu lukuja, jonka luvut kuvaavat maan absoluuttista korkeutta tietyssä kartan pisteessä. Korkeuskartta on kuin tekstuuri, jonka pikselit ilmaisevat värisävyjen sijaan korkeutta, ja tämän takia proseduraalisessa maaston luonnissa ja proseduraalisessa tekstuuriin luonnissa voidaan käyttää samoja menetelmiä (Ebert ym. 2002, s. 489). Korkeuskartan haittapuolena on, ettei niiden avulla pystytä esittämään luolastoja tai ulkonemia (Ebert ym. 2002, s. 493). Muista maaston esitystavoista voi lukea lisää esimerkiksi lähteestä Smelik ym. (2014).

Videopeleihin tarvittavan maastoon liittyy erilaisia vaatimuksia kuin esimerkiksi simulaatioissa, elokuvissa ja animaatioissa käytettyyn maastoon. Simulaatioissa maaston realismi on tärkeässä roolissa, kun taas elokuvissa ja animaatioissa riittää, että virtuaalinen maasto on esteettistä kameran kuvakulmasta. Videopeleissä maaston tulee olla läpikuljettavaa, koska pelaajalla tulee yleensä olla vähintään yksi reitti, jota pitkin hän pystyy etenemään pelissä (Valencia-Rosado ja Starostenko 2019, s. 51). Pelien tavoitteena on saada aikaan mielekäs kokemus pelaajille, mutta nykyisellä tietämyksellä ei voida sanoa täsmällisesti, minkälainen sisältö koetaan mielekkäänä tai hauskana, ja aiheesta tarvitaan lisätutkimuksia (Togelius ym. 2010, s. 6). Doran ja Parberry (2010) mielestä proseduraalisesti luodulla maaston tulisi olla tarpeeksi vaihtelevaa siten, ettei pelaaja voi päätellä, mitä nurkan takana odottaa, jotta pelaajan mielenkiinto peliin säilyisi. Lisäksi sen tulisi noudattaa pelinkehittäjien määrittämää rakennetta. Tarinallisissa roolipeleissä pelimaailman rakenne on yleensä jäykkä, eli pelin tarina ja tapahtumat tapahtuvat tarkassa aikajärjestyksessä. Matthews ja Malloy (2011) antavat esimerkin tarinallisen pelin kulusta, jossa pelaaja aloittaa kylässä A, josta hänen pitää matkustaa kylään B, josta hän löytää avaimen luolaan C. Heidän mielestään kohteiden

A, B ja C tulee olla kävelymatkan päässä toisistaan, jotta pelaaja voi edetä pelissä loogisesti ja eksymättä reitiltään. Selviytymispeleissä pelimaailman rakenne taas voi olla hyvinkin joustava, ja pelaaja voi liikkua ja tutkia maastoa haluamassaan järjestyksessä.

Proseduraalisten luontimenetelmien kontrolloitavuus kuvastaa kuinka luodun maaston piirteisiin pystytään vaikuttamaan parametrien avulla. Yksinkertaisimmillaan parametrina käytetään vain pseudosatunnaisen luonnin siemenlukua, mutta parametrina voi olla myös esimerkiksi moniulotteinen vektori, jonka reaaliarvot toimivat parametreina ja määrittävät luodun sisällön ominaisuudet (Togelius ym. 2010, s. 3). Sketsimenetelmissä taas parametrina syötetään suunnittelijoiden piirtämä luonnos, jonka pohjalta sisältö luodaan ohjelmallisesti. On tärkeää, että luontia pystytään kontrolloimaan hyvin, jotta pelinkehittäjät pystyvät määrittämään minkälainen pelikokemus pelaajalle syntyy. Doran ja Parberry (2010) mukaan on parempi, jos kontrolloiminen tapahtuu intuitiivisesti maaston ominaisuuksiin pohjautuen, jolloin myös artistit ja suunnittelijat pystyvät ohjailemaan luotavan maaston piirteitä ilman matemaattista ymmärrystä.

Tutkielmassa käydään läpi yleisesti käytettyjä proseduraalisia maaston luonnin menetelmiä videopeleissä ja arvioidaan niiden ominaispiirteitä, kuten kontrolloitavuutta, suorituskykyä ja niillä tuotetun maaston realistisuutta. Maastoa voidaan luoda proseduraalisesti monin eri tavoin, mutta ei olla saavutettu selvää konsensusta siitä, miten erilaiset luontimenetelmät luokitellaan (Togelius ym. 2010, s. 2). Valencia-Rosado ja Starostenko (2019) luokittelevat proseduraalisen luonnin menetelmät seuraaviin luokkiin: stokastiset menetelmät, simulaatiomenetelmät, oppimismenetelmät ja sketsimenetelmät. Fischer ym. (2020) taas luokittelevat menetelmät suurpiirteisesti synteettisiin menetelmiin, fysiikkaan perustuviin menetelmiin, sketsimenetelmiin ja esimerkkiin perustuviin menetelmiin. Toisaalta, Gènevaux ym. (2013) jaottelevat proseduraalisen maaston mallintamisen menetelmät proseduraalisiin menetelmiin, fysiikkaan perustuviin menetelmiin, esimerkkiin perustuviin menetelmiin ja sketsiperustaisiin menetelmiin. Tässä tutkielmassa keskitytään yleisimpiin käytettyihin menetelmiin, joita voidaan kontrolloida yksinkertaisten parametrien avulla, ja ne voidaan luokitella seuraavasti: fraktaaliset menetelmät, simulaatiomenetelmät, agenttipohjaiset menetelmät, esimerkkipohjaiset menetelmät ja hakuperustaiset menetelmät. Esimerkkipohjaisia menetelmiä ei tässä tutkielmassa käydä läpi niiden rajoittuneisuuden takia: Esimerkkipohjai-

sissa menetelmissä luotu maasto luodaan annettuun mallidatan pohjalta, joten tuotettu maasto on aina mallidatan kaltaista (Génevaux ym. 2013).



### 3 Fraktaaliset menetelmät

Eräs yleisesti esiintyvä ja tärkeä proseduraaliseen maaston luontiin liittyvä käsite on fraktaali. Fraktaaleista löytyy aihealueen tutkimuksista vain vähän tietoa, joten tutkielmassa pyritään määrittelemään fraktaalit tarkemmin. Benoit Mandelbrot (Mandelbrot 1982, s. 1 ja 9) keksi sanan "fraktaali" kuvaamaan epäsäännöllisiä ja pirstoutuneita muotoja, joita esiintyy monissa paikoissa luonnossa ja jotka perinteisessä euklidisessä geometriassa tulkittaisiin "muodottomiksi". Esimerkiksi vuorien, rantaviivojen, puiden ja pilvien muotoja voidaan hänen mukaansa tulkita luonnollisina fraktaaleina. Fraktaaleille tyypillinen piirre on itsesimilaarisuus ja dilaatiosymmetria: itsesimilaarisuus tarkoittaa, että fraktaali näyttävää samalta monessa mittakaavassa, ja dilaatiosymmetrialla tarkoitetaan, että kappale on "muuttumaton" suurentaessa ja pienentäessä (Ebert ym. 2002, s. 572–573). Luonnossa fraktaalit esiintyvät erityisesti satunnaisia fraktaaleina, joissa itsesimilaarisuus ei ole täsmällistä itsesimilaarisuutta, vaan tilastollista itsesimilaarisuutta, eli satunnainen käytös pysyy samana monessa eri mittakaavassa (Ebert ym. 2002, s.574–575). Fraktaaligeometria sopii luonnollisen maaston ohjelmalliseen luontiin, koska siinä yksinkertaisista yhtälöiden avulla voidaan luoda monia monimutkaisia muotoja, joita luonnossa tavataan (Ebert ym. 2002, s. 429 ja 431). Fraktaalien ja luonnollisen maaston samankaltaisuus ei pohjautu tieteelliseen perustaan, vaan niiden samankaltaisuus perustuu silmämääräiseen samankaltaisuuteen; Insinöörialoilla lopputulos on usein tärkeämpi kuin tieteellinen perusta (Ebert ym. 2002, s. 442–443). Fraktaaleista ja niiden käyttämisestä proseduraalisessa luonnossa voi lukea lisää esimerkiksi kirjoista Mandelbrot (1982) ja Ebert ym. (2002).

Fraktaaliset menetelmät käyttävät parametreja ja sääntöjä, jotka yrittävät jäljitellä luonnon "satunnaisuutta" ja joita voidaan käyttää rekursiivisesti. Fraktaaligeometria on erinomainen työkalu esittämään luonnossa tavattavia monimutkaisia muotoja yksinkertaisen matematiikan avulla (Ebert ym. 2002, s. 429). Fraktaaliset menetelmät ovat nopeita, mutta huonoja kontrolloitavuudeltaan, koska niissä tuotetun maaston ominaisuudet, kuten vuoristot ja järvet, asettuvat satunnaisiin paikkoihin maastossa (Valencia-Rosado ja Starostenko 2019, s. 59).

Yleisimpiä fraktaalisia maastonluonnin menetelmiä ovat kohinaan perustuvat menetelmät. Niitä on käytetty jo 1980-luvulta lähtien ja ne kuuluvat vanhimpiin ja käytetyimpiin proseduraalisen luonnin menetelmiin (Fischer ym. 2020, s. 2264). Proseduraalinen kohina on tehokas työkalu luomaan muotoja, jotka eivät näennäisesti noudata mitään säännöllisyyttä (Lagae ym. 2010, s. 2). Kohinalla tarkoitetaan yhteen taajuuteen kaistarajoitetun valkoisen kohinasignaalin approksimaatiota (Lagae ym. 2010, s. 2), ja kohinafunktioita, jotka luovat kohinaa erilaisilla menetelmillä. Kohinaa tuottavien algoritmien suorituskyky on erinomainen, ja proseduraalinen kohina voidaan yleensä laskea itsenäisesti jokaisessa pisteessä, joten kohinan laskemiseen voidaan hyödyntää hyvin myös rinnakkaislaskentaa (Smelik ym. 2014; Lagae ym. 2010, s. 33, s. 1). Se, että jokainen maaston pisteen korkeus voidaan laskea itsenäisesti, mahdollistaa myös äärettömän suurien maailmojen luomisen, koska jokaista kartan pistettä ei tarvitse laskea etukäteen yhdellä kerralla.

Hilakohinat (lattice noises) ovat suosituin tapa muodostaa kohinaa ja ne tuottavat yleensä laadukasta kohinaa. Ne luovat kohinaa interpoloimalla tasaisesti jaotelluista (pseudo)satunnaisista kokonaislukupisteistä muodostettua hilaa. Hilakohinat voidaan jaotellaan vielä arvokohinoihin, (hila)gradienttikohinoihin sekä arvogradienttikohinoihin (Lagae ym. 2010; Ebert ym. 2002, s. 4). Interpolointimenetelmänä hilakohinoissa käytetään yleensä kolmannen asteen interpolaatiota, jotta kohinan arvot vaihtuisivat aaltomaisen tasaisesti. Ken Perlinin luoma Perlin-kohina on tunnetuimpia kohina-funktioita, jonka Ken Perlin loi Tron (1982)-elokuvaan luonnollisen näköisen tekstuuriin ja pintojen ohjelmalliseen luomiseen, ja josta hänelle myönnettiin vuonna 1996 Yhdysvaltain elokuva-akatemian teknisen saavutuksen Oscar-palkinto. Perlin-kohina on yksinkertainen ja nopea, ja se on edelleen suuressa suosiossa tietokonegraafikassa (Lagae ym. 2010, s. 4). Nykyään yleisesti käytössä olevista kohinafunktioista voi lukea lisää esimerkiksi lähteestä Lagae ym. (2010).

Proseduraalista kohinaa voidaan hyödyntää maaston luonnin lisäksi tekstuuriin, kuten pilvien, aaltojen, tornadojen ja rakettien juovien, synteettisessä luonnissa (Lagae ym. 2010, s. 1). Kohinaa pystytään luomaan yksi-, kaksi-, kolmi- tai neliulotteisena, ja sitä pystytään animoimaan, jos yksi ulottuvuudesta kuvataan aikana (Smelik ym. 2014; Lagae ym. 2010, s. 33, s. 3).

Kaikki kohinafunktioit eivät itsessään tuota fraktaalista kohinaa, mutta ne saadaan tuottamaan sitä lisäämällä useita oktaaveja kohinataajuuksia yhteen (Ebert ym. 2002, s. 432–433). Musiikissa oktaavi on sävelkorkeuden intervalli, joka vastaa taajuuden kaksinkertaistamista, ja lähes aina on toivottavaa, että kohinataajuudet ovat oktaavin välein toisiinsa nähden (Ebert ym. 2002, s. 585). Oktaavien määrä kuvaa kuinka monessa mittakaavassa fraktaali on itsesimilaarinen eli skaalautuva, toisin sanoen kuinka monessa mittakaavassa fraktaalissa on yksityiskohtia (Ebert ym. 2002, s. 584). Yleensä edellytetään kohinan olevan vähintään kolmella tasolla skaalautuvaa, jotta sitä kutsuttaisiin fraktaaliseksi kohinaksi (Ebert ym. 2002, s. 433). Hyvä kohinafunktio saa arvonsa väliltä  $[-1,1]$ , se on luonteeltaan stationaarista ja isotrooppista, se on kaistarajoitettu siten, että sen maksimitaajuus on noin yksi, ja sen pseudosatunnaisuuden jakso on tarpeeksi iso, jotta siinä ei olisi havaittavaa toisteisuutta (Ebert ym. 2002, s. 68).

Kohinafunktioiden käyttämiseen proseduraalisessa maaston luonnissa liittyy erinäisiä haasteita. Kohinafunktioiden ongelmana on niiden epäintuitiivinen kontrolloiminen kohinan parametrien avulla (Fischer ym. 2020, s. 2264). Lisäksi niiden ongelmana on myös se, että ne voivat tuottaa näkyviä artefakteja; Esimerkiksi Perlin-kohina ei ole täysin isotrooppista, sillä siinä pysty- ja vaakasuunnassa vierekkäin olevien hilapisteiden etäisyys on pienempi kuin diagonaalisesti vierekkäin olevien hilapisteiden etäisyys (Ebert ym. 2002, s. 180). Gradienttikohinat saavat arvon nolla jokaisessa hilan pisteessä, ja tämä aiheuttaa joskus epätoivottua näkyvää ristikkokuviota kohinassa (Ebert ym. 2002, s. 77). Kohinan ongelma on myös se, että sillä tuotettu maasto on yleensä homogeenista, vaikka todellisuudessa kaikki luonnollinen maasto on heterogeenista suuressa mittakaavassa (Ebert ym. 2002, s. 498). Toisaalta homogeeninen maasto voidaan muokata heterogeeniseksi esimerkiksi signaalinkäsittelysuodattimilla säätämällä maaston korkeuksia paikoittain (Smelik ym. 2014, s. 33), tai multifraktaalien avulla. Multifraktaalit ovat fraktaaleja, joiden pinnan rosoisuutta määrittävä fraktaalidimensio vaihtelee alueittain. Heterogeenista maastoa voidaan tuottaa myös laatoittamalla (tiling) maasto, esimerkiksi jakamalla se solumaisiin alueisiin voronoi-diagrammien avulla ja asettamalla eri luontiparametrit alueille (Valencia-Rosado ja Starostenko 2019, s. 60).

## 4 Simulaatiomenetelmät

Simulaatiomenetelmät pyrkivät jäljittelemään luonnossa tapahtuvia ilmiöitä maaston luonnissa. Simulaatiomenetelmät voidaan jakaa geomorfologisiin simulaatioihin ja ekosysteemi-simulaatioihin (Valencia-Rosado ja Starostenko 2019, s. 60). Simulaatiomenetelmät voivat joko luoda satunnaista maastoa itsessään, tai muokata jo olemassaolevaa maastoa realistisemmaksi (Rose ja Bakaoukas 2016, s. 2). On hyvä huomioida, että tutkimuksissa tuotetun sisällön realistisuuden arvioiminen perustuu yleensä yksittäisten ihmisten arvioihin eikä tarkkaan tieteelliseen perustaan. Myös agenttipohjaiset menetelmät luetaan joskus simulaatiomenetelmiin, mutta tässä tutkielmassa ne käsitellään omana lukunaan, koska agenttien toiminta ei perustu geomorfologisiin tai ekologisiin tapahtumiin (Valencia-Rosado ja Starostenko 2019, s. 61).

### 4.1 Geomorfologiset simulaatiot

Vaikka fraktaalien avulla saadaan luotua esimerkiksi realistisen näköisiä vuoristoja, niissä ei olla huomioitu eroosion jälkiä, kuten taluksia tai ojaverkostoja (Ebert ym. 2002, s. 495). Eroosio on jättänyt jälkensä kaikkeen luonnonmukaiseen maastoon, poissulkien tuoreen vulkaanisen toiminnan tai tuoreet meteoriittien törmäyksissä syntyneet kraatterit (Ebert ym. 2002, s. 498). Eroosiota voidaan mallintaa geomorfologisten simulaatioiden avulla, jotka muokkaavat maastoa realistisemmän näköiseksi simuloimalla luonnossa tapahtuvaa eroosiota (Fischer ym. 2020; Cordonnier ym. 2016, s. 2264, s. 1).

Geomorfologisista simulaatioista yleisimmät ovat hydraulinen (hydraulic erosion) ja termaalinen eroosio (thermal erosion). Termaalinen eroosio vähentää äkkinäisiä muutoksia korkeudessa jakamalla maa-ainesta iteratiivisesti korkeista paikoista mataliin paikkoihin, kunnes maksimi stabiili kulma saavutetaan. Hydraulisen eroosion avulla simuloidaan kuinka vesi ja siihen liennut maa-aines liikkuvat veden virtausten mukana (Smelik ym. 2014, s. 33).

Génevaux ym. (2013) esittävät hydrologiaan perustuvan maaston mallintamisen tavan. Heidän mukaansa maaston morfologia perustuu pitkälti jokiverkostoihin, jotka jakavat maaston visuaalisesti selkeisiin rajattuihin alueisiin. Menetelmässä luotua maastoa pystytään kontrolloimaan luonnostelemalla maaston ja jokien kaltevuuskartat. Niiden avulla pystytään määrittämään tärkeimmät joen suut ja joet sekä vuoristojen ja mäkien paikat kartalla.

Suuressa mittakaavassa maaston muodot seuraavat pitkälti laattatektoniikasta ja eroosios-  
ta (Cordonnier ym. 2016, s. 1). Cordonnier ym. (2016) yhdistävät hydraulisen eroosion ja maankohoamisen simuloinnin toisiinsa luonnollisen näköisen maaston aikaansaamiseksi ja sen ansiosta luotu maasto on suuressakin mittakaavassa realistista. Menetelmässä parametri-  
na käytetään maankohoamis-karttaa, johon luonnostellaan kuinka nopeaa maankohoaminen on kartan eri alueilla. Sen avulla simuloidaan oikeaa mannerlaattojen aiheuttamaa maankohoamista, ja vuoristot nousevat kohtiin, joissa maankohoaminen on nopeaa. Maankohoami-  
sen kontrolloiminen mahdollistaa siis maaston suurien ominaisuuksien sijoittamisen halut-  
tuun paikkaan maastossa.

Eroosio toteutetaan yleensä globaalina operaationa koko maastolle. CPU:ssa suoritettujen eroosiosimulaatiot ovat hitaita ja vaativat satoja, ellei tuhansia, iteraatioita uskottavan näköisten maaston aikaansaamiseksi, mutta nykyään algoritmien nopeutta voidaan parantaa GPU:ta hyödyntämällä (Smelik ym. 2014; Rose ja Bakaoukas 2016, s. 33, s. 1).

## **4.2 Ekosysteemisimulaatiot**

Ekosysteemisimulaatiot muokkaavat jo olemassa olevaa maaperää simuloimalla esimerkiksi ilmaston ja kasvillisuuden vaikutuksia maaperään (Valencia-Rosado ja Starostenko 2019, s. 60). Kartta voidaan jakaa erilaisiin biomeihin, joissa maasto on muodostettu biomille ominaisten piirteiden, kuten ilmankosteuden ja lämpötilan, mukaan (Freiknecht ja Effelsberg 2017, s. 10). Fischer ym. (2020) jakaa maaston biomeihin yksinkertaisen ilmaston simulaation avulla.

Cordonnier ym. (2017) yhdistävät ekosysteemisimulaation ja geomorfologisen simulaation maaston luonnissa. Heidän mukaansa kasvillisuus ja eroosio vaikuttavat vastavuoroisesti toisiinsa, joten niiden vuorovaikutus tulee huomioida, jotta saadaan aikaan luonnollisen näköistä maastoa. Heidän menetelmänsä avulla pystytään simuloimaan maastossa tapahtuvia muutoksia vuosisatojen kuluessa. Menetelmässä huomioi koko kasvillisuuden kiertokulun aina itämisestä humukseen asti, ja menetelmä ottaa huomioon myös salamoinnin, tulipalot, maanvyörymät ja muut luonnonmullistukset. Maa jaetaan kerroksittain peruskallioon, jyväiseen materiaaliin, kuolleeseen kasvillisuuteen ja kasvillisuuteen. Menetelmää kontrolloidaan simulaation aikana piirtämällä sitä siveltimien avulla, tai muokkaamalla parametreja kuten esimerkiksi lämpötilaa tai salamoinnin todennäköisyyttä.

## 5 Agenttipohjaiset menetelmät

Agenttipohjaisissa proseduraalisissa menetelmissä maastoa luodaan ohjelmistoagenttien avulla. Russell, Norvig ja Davis (2010) määrittelee ohjelmistoagentit älykkäiksi "agenteiksi", jotka pystyvät havaitsemaan ympäristöönsä ja toimimaan siinä (Doran ja Parberry 2010, s. 4). Yleensä agentit jaotellaan rakentaviin ja tuhoaviin agenteihin (Valencia-Rosado ja Starostenko 2019, s. 61). Agenteilla on yleensä jokin tehtävä, kuten vuoristojen, rantaviivojen tai jokiverkostojen luominen (Doran ja Parberry 2010, s. 4) tai maaperän tasoittaminen (Valencia-Rosado ja Starostenko 2019, s. 61).

Doran ja Parberry (2010):n esittämässä agenttipohjaisessa menetelmässä agentit pystyvät havaitsemaan ja muokkaamaan maaston korkeutta jokaisessa kartan pisteessä, ja useat agentit pystyvät muokkaamaan maastoa asynkronisesti ja autonomisesti. Menetelmässä agentit työskentelevät kolmessa eri vaiheessa: rantaviiva-, maanmuodostus- ja eroosiovaiheissa. Rantaviiva-vaiheessa useat agentit luovat rantaviivat, eli rajan maa-alueiden ja vesistöjen välillä. Maanmuodostus-vaiheessa luodaan maaperän muodot ja viimeisessä vaiheessa muodostetaan joet simuloimalla eroosiota tietyissä kohdissa maastoa. Agentit voivat suorittaa syötetyn kiinteän määrän diskreettejä toimintoja, mikä rajoittaa agenttien elinaikaa. Jotkut agentit pystyvät luomaan uusia agenteja alaisikseen työtaakkansa jakamiseksi. Maaston ominaisuuksia voidaan kontrolloida kyseisessä menetelmässään muuttamalla agenttien määrää, työtehtävää tai sitä, kuinka monta diskreettiä toimintoa ne voivat suorittaa.

## 6 Hakuperustaiset menetelmät

Hakuperustaisissa (search-based) menetelmissä luodaan proseduraalisesti sisältökandidaateja, joiden laatua arvioidaan kelpoisuusfunktion (fitness function) palauttamalla kelpoisuusarvolla (fitness value), joka koostuu yhdestä tai useasta numeerisesta arvosta (Togelius ym. 2010, s. 4).

Hakuperustaisissa menetelmissä hakuperustana voidaan käyttää esimerkiksi evoluutioalgoritmeja (evolutionary algorithm, EA). Evoluutioalgoritmeissa populaatio, eli tuotetut sisältökandidaatit, säilytetään muistissa, ja jokaisen sukupolven huonoimmat sisältökandidaatit hylätään, ja uuden sukupolven sisältö tuotetaan mutatoimalla tai uudelleenjärjestämällä laadukasta sisältöä (Togelius ym. 2010, s. 4). Keskeinen kysymys evolutionaarisessa laskennassa on se, miten genotyyppi, eli EA:n käsittelemä data, kuvautuu kelpoisuusfunktion käsittelemäksi fenotyyppiä; ihanteellisessa tapauksessa pieni muutos genotyyppissä johtaisi pieneen muutokseen fenotyyppissä (Togelius ym. 2010, s. 4).

Hakuperustaisissa menetelmissä kelpoisuusfunktion toteutus riippuu paljon kehitettävän videopelin tarpeista. Suorassa kelpoisuusfunktiossa (direct fitness function) sisällöstä poimitaan tietyt ominaisuudet suoraan kelpoisuusarvoksi. Tällaisia ominaisuuksia voi olla esimerkiksi labyrintissä uloskäyntien lukumäärä, tai strategiapelissä resurssien sijainnit kartalla. Simulaatioon perustuvassa kelpoisuusfunktiossa (simulation-based fitness function) kelpoisuusfunktio perustuu siihen, että keinotekoinen agentti pelaa peliä tietyistä kohdista ja kelpoisuusarvoksi poimitaan havaintoja agentin pelikerrasta. Interaktiivisessa kelpoisuusfunktiossa (interactive fitness function) sisältöä arvioidaan reaaliajassa pelaajan pelatessa peliä, ja dataa kerätään pelikerroista joko explisiittisesti tai implisiittisesti. Eksplisiittisesti tietoa voidaan kerätä esimerkiksi kysymällä pelaajalta verbaalisesti hänen pelikokemuksestaan, ja implisiittisesti tietoa voidaan kerätä esimerkiksi tekemällä johtopäätöksiä pelaajan tekemistä valinnoista pelin aikana (Togelius ym. 2010, s. 6–7).



Hakuperustaisia menetelmiä voidaan kontrolloida kelpoisuusfunktion toiminnallisuuden kautta tai pohjana käytetyn proseduraalisen menetelmän parametreilla, joita ei olla määritelty tarkemmin. Ei ole varmaa, löydetäänkö tarpeeksi hyvää kelpoisuusarvoa koskaan, eikä algoritmile voida määrittää tarkkaa suoritusaikaa (Togelius ym. 2010, s. 7). Lisäksi on haastavaa suunnitella kelpoisuusfunktio, joka pystyisi arvioimaan pelin sisällön laatua tarpeeksi hyvin ja joka olisi myös laskennallisesti tehokas (Togelius ym. 2010, s. 9).

## 7 Yhteenveto

Tutkielmassa käytiin läpi seuraavat yleisesti käytetyt proseduraalisen maaston luonnin menetelmät: fraktaaliset menetelmät, simulaatiomenetelmät, agenttipohjaiset menetelmät ja hakuperustaiset menetelmät. Tutkielman päätavoitteena oli arvioida eri menetelmien kontrolloitavuutta. Lopputuloksena oli, että agenttipohjaiset menetelmät ovat erityisen hyviä kontrolloitavuudeltaan, koska agenttien paikkaa, määrää, elinaikaa ja työtehtäviä säätämällä voidaan intuitiivisesti sijoittaa maaston keskeiset ominaisuudet haluttuihin kohtiin kartalla. Simulaatiomenetelmissä kontrolloitavuus on taas vaihtelevaa ja riippuu käytetyistä algoritmeista. Joissakin simulaatiomenetelmissä pystytään kontrolloimaan maaston suuria ominaisuuksia ja niiden sijainteja helposti, esimerkiksi määrittämällä maaston kohoamisnopeus kartan pisteissä, kun taas jotkut niistä keskittyvät pelkästään eroosion mallintamiseen globaalina operaationa, jolloin niiden ohjattavuuteen ei pystytä ottamaan erityisesti kantaa. Hakuperustaisissa menetelmissä kontrolloitavuus tapahtuu kelpoisuusfunktiolla tai pohjana käytettyjen proseduraalisten luontimenetelmien parametrien avulla. Ei kuitenkaan ole takeita, että kelpoisuusfunktio löytäisi koskaan tarpeeksi hyvää sisältökandidaattia. Fraktaalisten menetelmät ovat algoritmisesti yksinkertaisimpia ja suoritusajaltaan nopeimpia, mutta niiden kontrolloiminen on vaikeaa, koska niissä maaston ominaisuudet sijoittuvat satunnaisiin paikkoihin maastossa. Toisaalta niillä tuotetun maaston ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa esimerkiksi signaalinkäsittelysuodattimilla.

Videopeleissä käytettävien proseduraalisen maaston luonnin menetelmien kontrolloitavuus on aihealue, joka kaipaisi jatkotutkimuksia. Erityisesti kaivattaisiin lisää tutkimuksia, joissa menetelmien kontrolloitavuus tai hyvin ohjattavien algoritmien kehittäminen on tutkimuksen pääaiheena. Lisäksi vain harvoissa tutkimuksissa käydään läpi, millaisia vaatimuksia videopelit oikeasti asettavat maastolle, ja miten ne pystytään huomioimaan käytetyissä luontimenetelmissä.

## Lähteet

Cordonnier, Guillaume, Jean Braun, Marie-Paule Cani, Bedrich Benes, Eric Galin, Adrien Peytavie ja Eric Guérin. 2016. “Large Scale Terrain Generation from Tectonic Uplift and Fluvial Erosion”. *Computer Graphics Forum* 35 (toukokuu): 165–175. <https://doi.org/10.1111/cgf.12820>.

Cordonnier, Guillaume, Eric Galin, James Gain, Bedrich Benes, Eric Guérin, Adrien Peytavie ja Marie-Paule Cani. 2017. “Authoring Landscapes by Combining Ecosystem and Terrain Erosion Simulation”. (New York, NY, USA) 36, numero 4 (heinäkuu). ISSN: 0730-0301. <https://doi.org/10.1145/3072959.3073667>. <https://doi.org/10.1145/3072959.3073667>.

Doran, Jonathon, ja Ian Parberry. 2010. “Controlled Procedural Terrain Generation Using Software Agents”. *Computational Intelligence and AI in Games, IEEE Transactions on* 2 (heinäkuu): 111–119. <https://doi.org/10.1109/TCIAIG.2010.2049020>.

Ebert, David, F.K. Musgrave, D. Peachey, Ken Perlin, Steve Worley, W.R. Mark ja John Hart. 2002. *Texturing and Modeling: A Procedural Approach: Third Edition*. 1–687. Joulukuu.

Fischer, R., P. Dittmann, R. Weller ja G. Zachmann. 2020. “AutoBiomes: Procedural Generation of Multi-biome Landscapes”. *The Visual computer* 36(10-12):2263–2272. <https://doi.org/10.1007/s00371-020-01920-7>.

Freiknecht, J., ja W. Effelsberg. 2017. “A Survey on the Procedural Generation of Virtual Worlds”. *Multimodal technologies and interaction* 1(4). <https://doi.org/10.3390/mti1040027>.

Génevaux, Jean-David, Éric Galin, Eric Guérin, Adrien Peytavie ja Bedrich Benes. 2013. “Terrain Generation Using Procedural Models Based on Hydrology”. *ACM Trans. Graph.* (New York, NY, USA) 32, numero 4 (heinäkuu). ISSN: 0730-0301. <https://doi.org/10.1145/2461912.2461996>. <https://doi.org/10.1145/2461912.2461996>.

Hendriks, M., S. Meijer, J. Van Der Velden ja A. Iosup. 2013. “Procedural Content Generation for Games: A Survey”. *ACM transactions on multimedia computing communications and applications* 9(1):1–22. <https://doi.org/10.1145/2422956.2422957>.

- Lagae, Ares, Sylvain Lefebvre, Rob Cook, Tony DeRose, George Drettakis, David S. Ebert, John P. Lewis, Ken Perlin ja Matthias Zwicker. 2010. “State of the Art in Procedural Noise Functions”. Teoksessa *EG 2010 - State of the Art Reports*, toimittanut Helwig Hauser ja Erik Reinhard. Norrköping, Sweden: Eurographics, Eurographics Association, toukokuu.
- Mandelbrot, Benoit B. 1982. *The Fractal Geometry of Nature*. Rev. ed. Toimittanut Benoit B. Mandelbrot. San Francisco : Freeman, cop. 1977. San Francisco, Calif.: Freeman.
- Matthews, Elizabeth A., ja Brian A. Malloy. 2011. “Procedural Generation of Story-driven Maps”. Teoksessa *2011 16th International Conference on Computer Games (CGAMES)*, 107–112. <https://doi.org/10.1109/CGAMES.2011.6000324>.
- Rose, Thomas J., ja Anastasios G. Bakaoukas. 2016. “Algorithms and Approaches for Procedural Terrain Generation - A Brief Review of Current Techniques”. Teoksessa *2016 8th International Conference on Games and Virtual Worlds for Serious Applications (VS-GAMES)*, 1–2. <https://doi.org/10.1109/VS-GAMES.2016.7590336>.
- Russell, Stuart J., Peter Norvig ja Ernest Davis. 2010. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Smelik, R. M., T. Tutenel, R. Bidarra ja B. Benes. 2014. “A Survey on Procedural Modelling for Virtual Worlds”. *Computer graphics forum* 33(6):31–50. <https://doi.org/10.1111/cgf.12276>.
- Togelius, Julian, Georgios Yannakakis, Kenneth Stanley ja Cameron Browne. 2010. “Search-Based Procedural Content Generation”, 141–150. Huhtikuu. ISBN: 978-3-642-12238-5. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-12239-2\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-642-12239-2_15).
- Valencia-Rosado, L. O., ja O. Starostenko. 2019. “Methods for Procedural Terrain Generation: A Review”. Teoksessa *Pattern Recognition*, 58–67. Cham: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-21077-9\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-21077-9_6).