

Mitä jos merenpinta nousisi kymmenen metriä?

Simulaatio Turun seudun väestöliikkeistä meren noustessa.

Harri Kemppainen
Pro gradu -tutkielma
Tekoälyn tutkinto-ohjelma
Tulevaisuuden teknologioiden laitos
Turun yliopisto
Heinäkuu 2020

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

TURUN YLIOPISTO

tulevaisuuden teknologioiden laitos / Luonnontieteiden ja tekniikan tiedekunta

KEMPPAINEN, HARRI: Työn otsikko

Pro gradu -tutkielma, 45 s.,

Tekoälyn tutkinto-ohjelma

Heinäkuu 2020

Ilmastonmuutos aiheuttaa merenpinnan nousua. Suomessa maanpinnan nousu kompensoi toistaiseksi merenpinnan nousun. Tulevaisuudessa voi kuitenkin olla toisin.

Tässä tutkimuksessa toteutetaan avoimen datan pohjalta simulaatio, jolla mallinnetaan merenpinnan nousua Varsinais-Suomessa Turun ympäristössä. Osana simulaatiota on muuttomalli, joka määrittää minne ihmiset muuttaisivat. Simulaatiolla tutkitaan ja arvioidaan mistä ja minne ihmiset muuttaisivat merenpinnan noustessa.

Merenpinnan nosto perustuu alueen kasvatus -algoritmiin. Muuttomallina on säteilymalli, josta toteutetaan kolme eri variaatiota.

Turun seudulla väestö on keskittynyt ranta-alueille ja tutkimuksessa käytetty kymmenen metrin merenpinnan nousu aiheuttaisi 55200, 18% muuttoliikkeen tarkastelualueella, jonka kokonaisväkiluku on 306556. Variaatiossa a muuttomatkat ovat lyhyitä ja 3900 hengen uudelleenmuutto nostaa muuttoliikkeen 19,3%. Variaatiossa b muuttomatkat ovat pidempiä ja uudelleenmuutto on 1800. Variaatio c:n uudelleenmuutto on enää 1300.

Uudelleenmuutto tarkoittaa muuttoa alueille, joissa esiintyy myöhemmin meren noustua pois muuttoa.

Simulaatio, avoin data, merenpinnan nousu, säteilymalli, alueen kasvatus -algoritmi

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Merenpinnan korkeus.....	4
2.1	Merenpinnan nousu ja pakotettu muutto	5
2.2	Maanpinnan nousu	6
3	Datalähteet ja datan valmistelu	8
3.1	Maanmittauslaitos	8
3.2	Tilastokeskus	10
3.3	Karttojen koordinaatisto	11
3.4	Aineistojen koordinaatit	12
3.5	Korkeusdatan ja maastokartan suhde toisiinsa	12
4	Simulaatio ja merenpinnan nousu	13
4.1	Merenpinnan nousu - alueen kasvatus -algoritmi.....	14
4.2	Reunan määrittely.....	15
4.3	Merenpinnan nousu ja alueen kasvaminen.....	16
4.4	Simulaation toteutus	16
4.5	Alueen kasvatus -algoritmin toteutus	17
4.6	Simulaation skaalautuminen.....	20
5	Muuttomalli.....	22
5.1	Säteilymalli.....	22
5.2	Säteilymallin toteutus	24
5.3	Variaatio a - muutto rasterista toiseen	26
5.4	Variaatio b - muutto kunnasta toiseen ja satunnainen sijoittelu	27
5.5	Variaatio c – muutto kunnasta toiseen ja väkilukujen mukaan satunnainen sijoittelu.....	27
6	Tulokset.....	28
6.1	Näkymiä dataan.....	28
6.1.1	Korkeusdata	28
6.1.2	Väestödata.....	29
6.2	Merenpinnan nousu ja pakotettu muutto	30

6.3	Variaatio a	32
6.4	Variaatio b	35
6.5	variaatio c	38
6.6	Uudelleenmuutto	40
6.7	Variaatioiden luonnehdinta	41
7	Yhteenveto	42
8	Lähteet.....	44

1 Johdanto

Ilmastonmuutos on nostanut maapallon keskilämpötilaa 0,85 asteella vuoteen 2012 mennessä (IPCC 2014, s2). Keskilämpötilan nousu jatkuu, ellei ihmiskunta saa pienennettyä hiilidioksidipäästöjä (IPCC Climate Change 2014, s8). Kohonneet lämpötilat vaikuttavat merenpinnan korkeuteen. Lämpiviä meri laajenee ja ainoa suunta laajeta on ylöspäin. Kohoavat lämpötilat sulattavat myös jäätiköitä. Sulamisvedet taas kasvattavat meriveden määrää. (IPCC 2014)

Merenpinta kohoaa 3.3mm vuodessa (NASA 2020). Suomessa maanpinta nousee edellisen jääkauden jäljiltä 3-9mm vuodessa (Poutanen). Toistaiseksi maannousu kumooa merenpinnan nousun Suomessa. Hallitustenvälinen ilmastonmuutospaneelin (The Intergovernmental Panel on Climate Change eli IPCC) pahimman skenaarion mukaan merenpinta nousisi vuosisadan loppuun mennessä 45-82cm (IPCC Climate Change 2014, s13), joka on samaa suuruusluokkaa kuin maannousu; alin maannousu Suomenlahdella itärajalla on 24cm 80 vuodessa ja ylin Merenkurkussa 72cm 80 vuodessa.

Mitä jos merenpinta nousisi kymmenen metriä? Silloin Suomessakin meri peittäisi laajoja alueita ja pakottaisi ihmiset muuttamaan rannikolla.

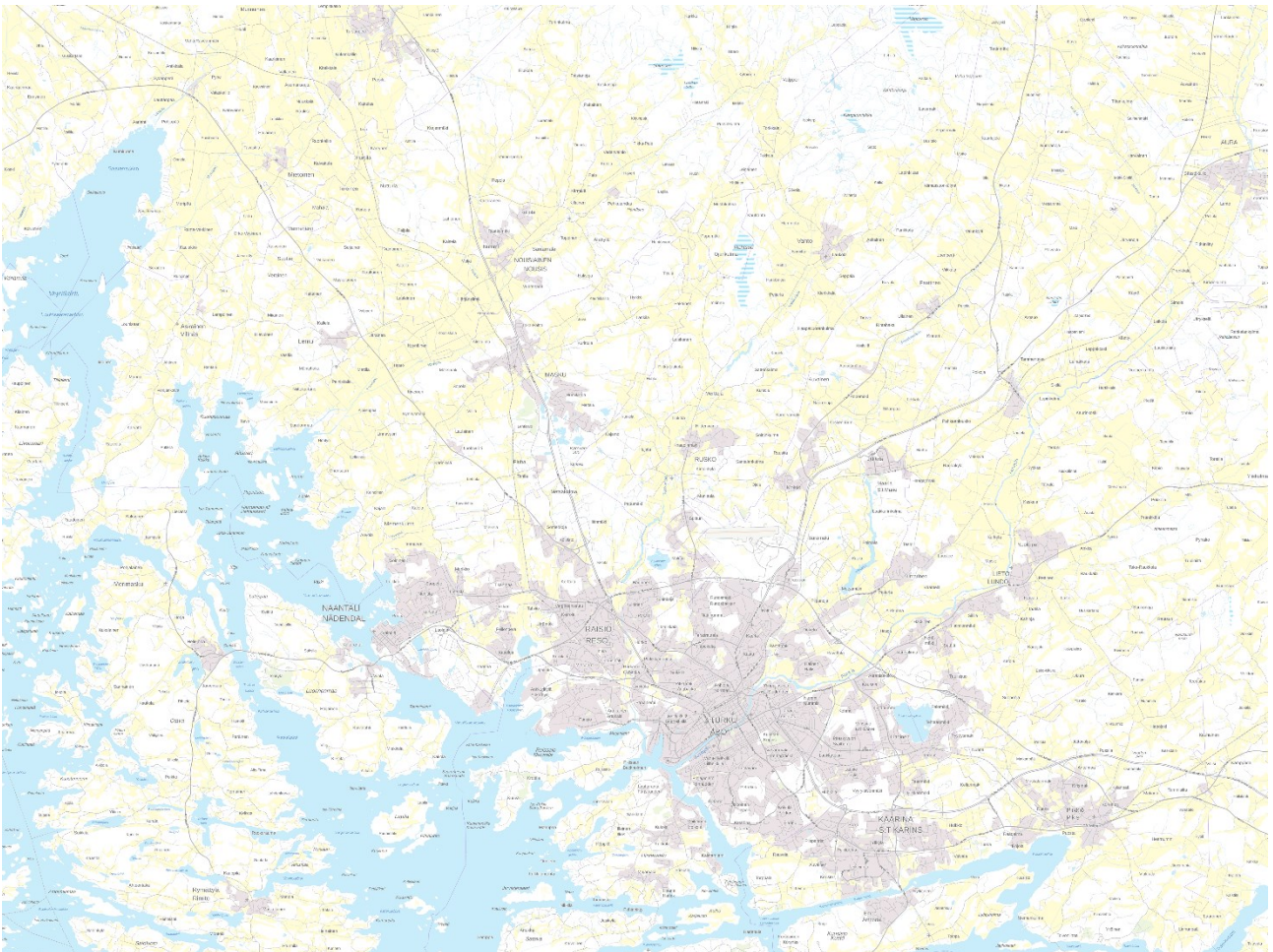
Tässä työssä tarkastellaan simulaation avulla mitkä alueet jäisivät 10m nousevan merenpinnan alle, paljonko ihmisiä joutuisi muuttamaan ja minne he muuttaisivat. Simulaatiossa tarkastellaan väkilukuja ja niiden muutoksia, olettaen että ihmiset voisivat käyttäytyä (joukkona) kuten simulaatio esittää. Tekstissä puhutaan sekä väkiluvun muutoksesta että ihmisten muuttamisesta. Niillä tarkoitetaan kuitenkin samaa asiaa.

Simulaatio muodostuu maanpinnan korkeusmallista, merenpinnan nousun mallintamisesta, väestön sijaintimallista ja muuttomallista. Korkeusmalli ja väestön sijaintimalli rakennetaan avoimen datan pohjalta. Muuttomalli saadaan maantieteen väestöliikkeiden tutkimuksesta. Merenpinnan nousua mallinnetaan korkeusmallia vasten, siten että kun merenkorkeus on suurempi kuin maanpinnan korkeus on maa jäänyt meren alle.

Simulaatiossa ei huomioida ajan kulumista. Se toisi simulaatioon lisää ulottuvuuksia ja lisää laskentaa ja mallinnettavaa. Suomesta saa korkeusdatan kahden ja kymmenen metrin tarkkuudella. Se tarkoittaa sitä, että maanpinta tai kartta jaetaan 2m*2m tai 10m*10m ruutuihin ja kullekin ruudulle annetaan maanpinnan korkeus. Tätä sanotaan rasteriksi. 2m rasterilla neliökilometrillä on 25000 rasteria ja

25000 datapistettä. 10m rasterilla niitä on 100*100 eli 10000. Jotta simulaatioon tarvittavat datamäärät pysyisivät kurissa, on tarkastelualue rajattu 36km*48km ja käytetään 10m korkeusrasteria.

Alueeksi valikoitui alue Turun ympäristöstä. Alueen vasen alakulma on Rymättylän keskustan vasemman puoleisella merialueella ja oikea yläkulma jää Auran keskustan yläpuolelle. Alueen valinta noudattaa avoimen datan (karttojen ja korkeusdatan) tiedosto- tai karttalehtijakoja. Tälläkin rajauksella korkeusmallissa on noin 17 miljoonaa datapistettä. Simulaation toteutuksessa piti siis kiinnittää huomiota algoritmien tehokkuuteen.



Kuva 1 Kartta tarkasteltavasta alueesta

Merenpintaa nostetaan metri kerrallaan ja simulaatio laskee kuinka moni ihminen joutuisi muuttamaan merennousun pakottamana. Muuttomallin perusteella arvioidaan, minne ihmiset muuttaisivat. Muuttoliikkeen perusteella päivitetään alueen kuntien väkiluku. Numeroiden lisäksi seurataan kartalla, miten meri levittäytyy sen noustessa.

Toisessa luvussa tarkastellaan mitä ilmastotutkimus on selvittänyt merenpinnan korkeuden vaihteluista ja onko kymmenen metrin merenpinnan nousu mahdollista. Kolmannessa luvussa

esitellään avoimen datan lähteet ja miten data on muokattu simulaatioon sopivaksi. Neljännessä luvussa esitellään miten merenpinnan nousu toteutetaan alueen kasvatus (region growth tai region growing) -algoritmeilla. Viidennessä luvussa esitellään muuttomalli. Kuudennessa luvussa käydään läpi simulaatiosta saatuja tuloksia ja seitsemännessä luvussa on yhteenveto.

2 Merenpinnan korkeus

Merenpinta on noussut 17-21 cm vuosien 1900 ja 2010 välillä (IPCC 2014). Pahimmassa IPCC:n skenaariossa merenpinta nousee sen lisäksi 45-82cm vuosisadan loppuun mennessä (IPCC 2014, s13). Tämän hetkinen merennousu on 3.3mm vuodessa (NASA 2020). Kahdeksassakymmenessä vuodessa siitä kertyy 26cm. Pahimman skenaarion mukaan vuoteen 2300 mennessä merenpinnan nousu voisi olla 92 – 359 cm ja vuoteen 2500 mennessä se voisi olla 151 - 663cm (IPCC 2013 s1191).

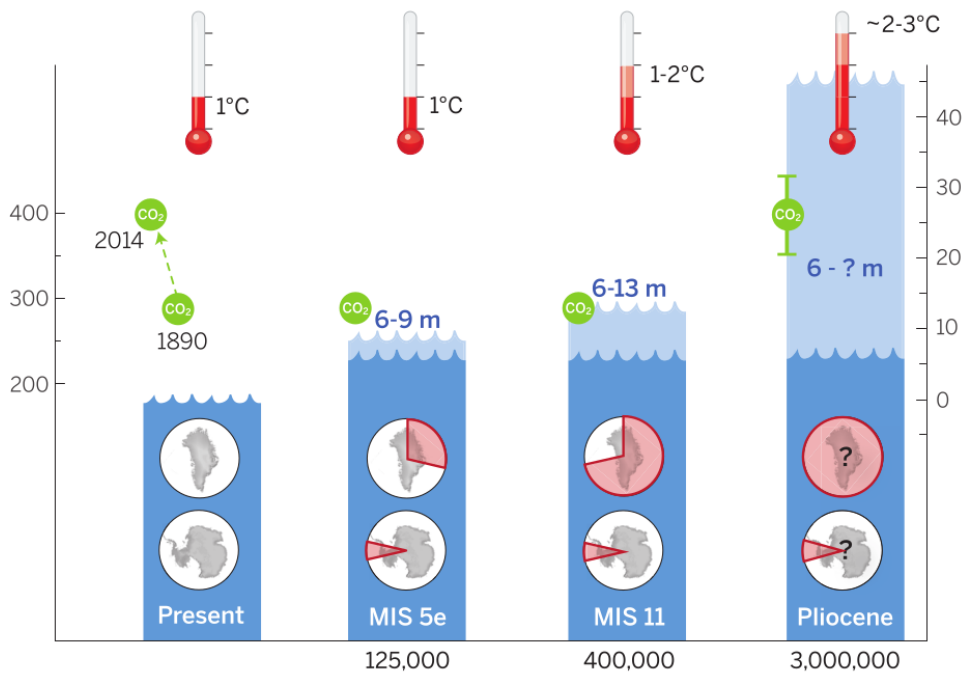
Elämme kvartaarikautta, nuorinta geologista aikaperiodia. Kvartaarikausi alkoi 2,6 miljoonaa vuotta sitten. Se on kylmä ilmastovaihe, jossa vuorottelevat pitkät kylmät glasiaalit ja lyhyet interglasiaalit, eli lämpimät ilmastovaiheet. Viimeisen 800 000 vuoden aikana kylmät ilmastovaiheet ovat kestäneet noin 90 000 vuotta ja lämpimät ilmastovaiheet noin 10 000 vuotta. (Lunkka 2008 s191).

Edellinen lämmin ilmastovaihe oli noin 125 000 vuotta sitten. Sitä kutsutaan Eem-interglasiaalijaksi ja geologisissa aineistoissa se identifioidaan happi-isotooppivaiheksi 5e (Marine Isotope Stage 5e eli MIS 5e). (Lunkka 2008 s223-224)

Ilmastonmuutoksen vaikutuksia arvioidaan aiempien lämpimien kausien perusteella (IPCC 2014). Kuvaan 2 (Dutton 2015) on koostettu tietoja kolmesta aiemmasta glasiaalien välisestä lämpimästä ilmastovaiheesta nykyajan lisäksi. Yhteistä kaikille ovat ilmaston korkeat hiilidioksiditasot ja kohonnut keskilämpötila. Huomattavaa on, että kuvassa 2 esiteltyjen interglasiaalien aikana merenpinta on ollut ainakin kuusi metriä nykyistä korkeammalla. Kuvan 2 toinen palkki on MIS 5e edellinen lämmin ilmastovaihe.

Aiempien lämpimien ilmastovaiheiden perusteella merenpinta voisi nousta kuusi metriä tai reilusti enemmänkin. IPCC:n pahimman skenaarion pidemmän välin ennusteet heijastelevat sitä. Tässä työssä ei yritetä arvioida todennäköisyyksiä huomattavalle merenpinnan nousulle tai miten nopeasti merenpinta voisi nousta. Riittää että se voisi olla mahdollista ja aiempien lämpimien kausien perusteella merenpinta voi nousta kuudesta yhdeksään metriä, ellei enemmänkin.

Merenpinnan nousun tarkastelu rajataan simulaatiossa kymmeneen metriin.



Kuva 2 Vasemman reunan asteikko on hiilidioksidin määrä ilmakehässä partikkeleina miljoonassa (PPM). Oikean reunan asteikko on globaali keskimerenpinnan korkeus (GMSL). Tummempi sininen kuvaa meriveden korkeuden alarajaa ja vaaleampi korkeuden vaihteluväliä. (Dutton 2015)

2.1 Merenpinnan nousu ja pakotettu muutto

Merenpinnan noustessa rannikolla asuvien ihmisten on pakko muuttaa merenkorkeuden ylittäessä kriittisen rajan asumisen kannalta. Merenpinnan korkeus vaihtelee sään mukaan. Turun seudulla meriveden ennätyskorkeus on 1,3m ja alin korkeus on -0,74m (Ilmatieteenlaitos 2020a). Ilmakehän lämpeneminen lämmittää meriä ja tuo äärimmäisiä sääilmiöitä useammin kuin ennen (IPCC 2014). On siis mahdollista, että meritulvatkin yleistyisivät.

Merenpinnan nousuun voidaan toki varautua vaikkapa tulvapadoilla. Turussa Aurajoki tuo omat hankaluutensa tulvapattoon. Ilmeiset paikat tulvapatolle olisi juuri alueilla jonne Aurajoen vesikin päätyy. Jokivesi pitäisi pumpata tulvapaton ohi. Merenpinnan alapuolella olevat alueet ovat alttiita sateiden aiheuttamille tulville. Vesi poistuu alueilta pumpaamalla tai haihtumalla.

Hankaluudet merenpinnan noususta alkavat jo ennen kuin merenpinta on noussut asumusten tasolle. Meritulvat nostavat vettä ajoittain. Merenpinnan nousu aiheuttaa myös eroosiota rannoille. Vaikka rakennukset olisivatkin korkeammalla kuin merenpinta, voi eroosio kuluttaa maata ja viedä rakennusten perustukset.

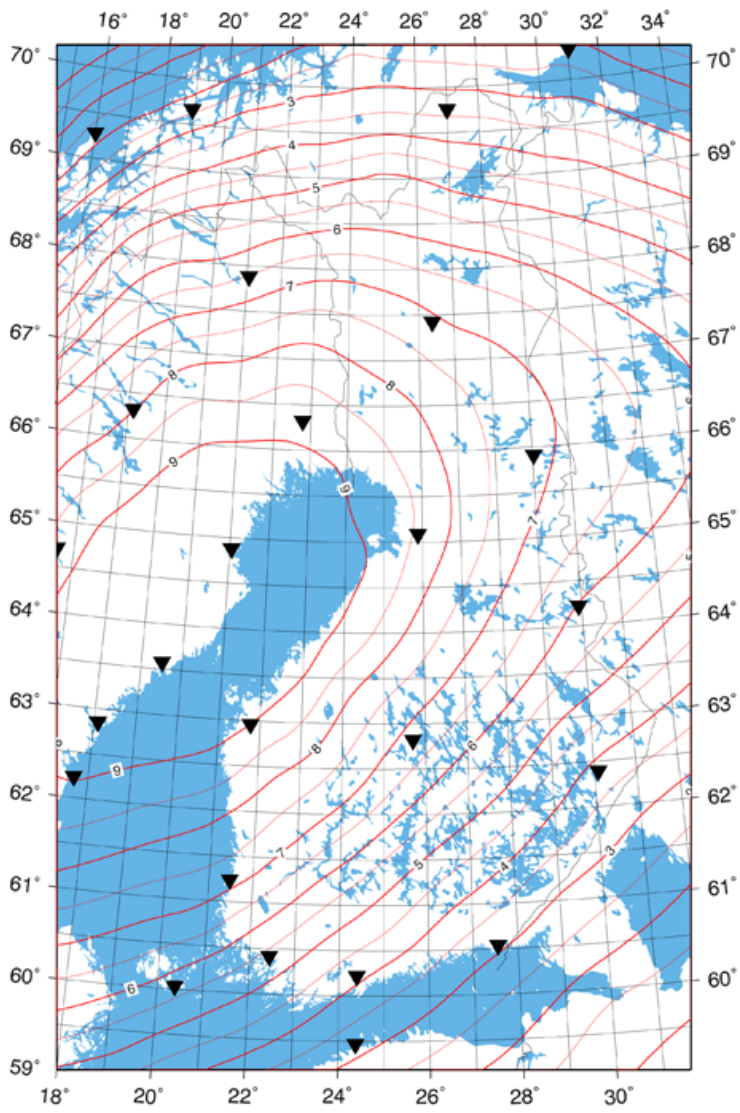
Simulaatioissa oletetaan, että ihmiset muuttavat, kun merenpinta nousee heidän asuinpaikkansa tasolle.

2.2 Maanpinnan nousu

Maanpinnan nousu on jatkunut Itämeren alueella viimeisestä jääkaudesta saakka. Yleisesti hyväksytyyn teorian mukaan massiivinen mannerjäätikö olisi painanut maankuoren lommolle ja jäätikön sulamisen jälkeen, kun paino on poistunut alueelta, maanpinta on noussut ja jatkaa yhä nousua. Voimakkainta maannousu on merenkurkun ja Perämeren alueella ja heikkenee siirryttäessä etelämmäs Itämeren alueella. Suomen itärajalalla maannousu on enää kolmen millimetriä vuodessa. (Poutanen)

Turku sijoittuu kuvan 3 (Poutanen) perusteella viiden ja kuuden millimetrin viivojen väliin suunnilleen puoleen väliin. Viiden millimetrin viiva seuraa Kemiön saaren reunaa Saloon ja kuuden millimetrin viiva kulkee Taivassalon ohi kaakon puolelta. Maan pinnan nousu Turussa on siis 5.5 millimetriä vuodessa. Simulaatiossa tarkkailtava alue jää näiden viiden ja kuuden millimetrin rajojen väliin.

Jos tarkastellaan maankorkeusmittauksia Turussa, on maanpinta noussut kuluneen viidentoista vuoden aikana 14 millimetriä (vuoden 2005 ja 2020 erotus N2000 järjestelmässä) – tulvahuippu on vuodelta 2005. Tämän perusteella maanpinta olisi noussut vähemmän kuin 5.5mm vuodessa. Ilmatieteenlaitos ilmoittaa merenpinnan korkeuden teoreettisena keskivetenä, jossa huomioidaan muitakin tekijöitä kuin maannousu ja ilmastonmuutoksen aiheuttama merenpinnan nousu. (Ilmatieteenlaitos 2020a)



Kuva 3 Maanpinnan nousu Itämeren alueella millimetriä vuodessa (Poutanen).

3 Datalähteet ja datan valmistelu

Kaikki käytetyt datalähteet ovat avointa dataa. Suomen hallinto on avannut karttoja ja tilastotietoa yleiseen ja vapaaseen käyttöön. Useat kunnatkin ovat avanneet dataansa. Dataa voidaan hakea ja lukea suoraan GIS-ohjelmilla (Geological Information System), mutta on myös rakennettu verkkoportaaletta, joista kuka tahansa voi etsiä ja ladata dataa. Karttoja saa kuvina eli rastereina ja tilastokeskukselta dataa saa Excel-tiedostoina tai CSV-tiedostoina (Comma Separated Values). Tämän työn yhteydessä on käytetty Pythonia data lukemiseen ja muokkaamiseen simulaatiolle sopivaksi.

Simulaation taustakuva perustuu maanmittauslaitoksen 1:50000 maastokarttarasteriin. Kartta on rasteri eli pikselin eri värit vastaavat jotain maaston ominaisuutta. Vesistöt on merkattu vaalean sinisellä, kun taas rakennukset, tiet ja paikannimet on merkitty mustalla.

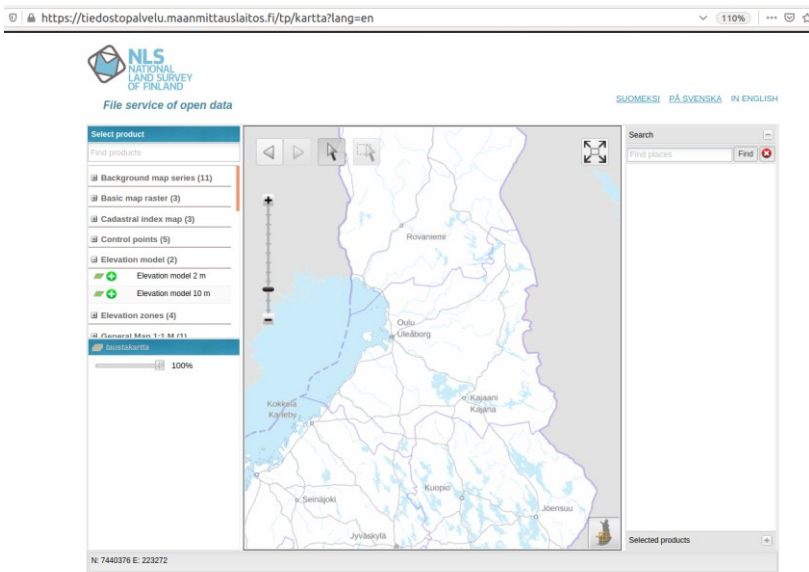
Korkeusdata on maanmittauslaitoksen 10m rasteri. Data ladataan karttalehtinä, joissa on 2400 vaakaja 1200 pystyrasteria. Yksi lehti kattaa siis 24 * 12 km alueen. Simulaatiossa käytetään karttalehtiä L3412, L3411, L3322, L3414, L3413 ja L3324. Karttalehtiä on kolme päällekkäin ja kaksi rinnakkain. Niiden peittämä alue on 48 * 36 km ja rastereiden määrä on 4800*3600 eli 17280000.

Väestökisterikeskus seuraa suomen väkilukua ja hallinnoi tietoja missä kukin asuu. Väkiluvun saa tilastokeskuksen portaalista 1km rasterina. Suomi jaetaan 1*1km ruutuihin ja kustakin ruudusta kerrotaan väkiluku. Jako on varsin karkea simulaation kannalta, kun korkeusdata on 10m rasterina. Avoimena datana ei ole kuitenkaan olemassa tarkempaa jaottelua.

3.1 Maanmittauslaitos

Taustakarta ja korkeusdata on haettu maanmittauslaitoksen portaalista <https://tiedostopalvelu.maanmittauslaitos.fi/tp/kartta?lang=fi>. Korkeusdata on kuvan 4 valikossa näkyvä ”Korkeusmalli 10m”. Taustakarttana on ”Maastokarttarasteri 1:50000”. Taustakartassa yhden pikselin tai rasterin kokoa ei varsinaisesti kerrottu. Laskemalla ja vertailemalla sitä korkeusdataan voi päätellä, että sen rasterin koko on 8m. Taustakarttaa muokattiin kuvankäsittelyohjelmalla 25% suuremmaksi eli rasterikokoon 10m. Koska taustakarttaa käytetään visualisointiin eikä laskentaan

muunnoksella ei ollut vaikutusta laskentaan tai simulaation tarkkuuteen.



Kuva 4. Maanmittauslaitoksen avoimen datan verkkoportaali

Korkeusrasterin karttalehtitiedoston rakenne on esitetty taulukossa 1. Ensimmäisellä rivillä on sarakkeiden määrä eli rastereiden määrä leveysuunnassa. Toisella rivillä on rivien määrä eli rastereiden määrä korkeussuunnassa. Kolmannelta ja neljänneltä riviltä löytyy karttalehden vasemman alakulman koordinaatit (llcorner - lower left corner). Viidennellä rivillä kerrotaan rasterin koko 10m. Kuudes rivi kertoo puuttuvan datan koodauksen. Varsinainen korkeusdata alkaa seitsemänneltä riviltä. Datarivejä on 1200 ja kullakin rivillä on 2400 desimaalilukua. Korkeus on esitetty metreinä kolmen desimaalin tarkkuudella. Kunkin datarivin alussa on yksi välilyönti.

<i>Ncols</i>	2400
<i>nrows</i>	1200
<i>xllcorner</i>	236000.000000000000
<i>yllcorner</i>	6702000.000000000000
<i>cellsize</i>	10.000000000000
<i>NODATA_value</i>	-9999.000
	24.645 24.751 24.657 24.760 24.483 25.137 25.025 24.584

Taulukko 1. Korkeusrasteri-tiedoston rakenne

Korkeusdatatiedostot luettiin Pythonilla numpy taulukoiksi siten että ensimmäiset kuusi riviä hylättiin. Varsinainen korkeusdata yhdistettiin isommaksi taulukoksi säilyttäen karttalehtien järjestys.

Korkeudet on esitetty kolmella desimaalilla. Koska simulaatiossa merenpinnan nosto on joko 10cm tai yksi metri, niin datan tarkkuuden voi muuntaa yhteen desimaaliin. Muunnos tapahtuu siten että 0m ja sitä pienemmät arvot saavat arvon 0m, kaikki 0m suuremmat arvot aina 0,1m saakka saa arvon 0.1m, 0,1m suuremmat arvot aina 0,2m saakka saa arvon 0,2m ja niin edelleen. Näin saatu kohdealueutta vastaava korkeusdatamatriisi tallennettiin CSV-tiedostoksi. Korkeusdata on siten sovitettu vastaamaan merenpinnan nostoja ja simulaatiota.

Korkeusdatasta tehtiin kuva skaalaamalla korkeus harmaasävyksi mustasta valkoiseen, siten että musta vastaa korkeutta 0 ja valkoinen maksimikorkeutta datassa. Pikseliarvoina ne ovat 0 mustalle ja 255 valkoiselle. Kuva siis vaalenee korkeuden noustessa. Taustakartan ja näin saadun korkeuskartan asetettiin päällekkäin kuvankäsittelyohjelmassa. Säättämällä kuvien läpinäkyvyyttä oli mahdollista varmentaa, että niissä oli sama alue ja sama mittakaava. Turun saariston ja meren muodot vastasivat toisiaan. Lisäksi alueen joet osuivat kohdilleen. Tämä varmisti, että korkeusdata vastasi karttapohjaa eikä korkeusdatan muodon tai mittakaavan osalta ollut tapahtunut virheitä.

3.2 Tilastokeskus

Tilastokeskuksesta saa väkiluvun avoimena datana 1km rasterilla. Tilastokeskuksella on oma portaali, josta hiirellä klikkailemalla voi nähdä 1*1km rasterin väkiluvut, mutta sieltä dataa ei saa tiedostona. Kysymällä asiakaspalvelusta sain linkin latauspalveluun, josta voi hakea koko datan csv-tiedostona. Taulukossa 2 on csv-tiedoston rakenne ja yksi tietuerivi.

```
FID,geom,objectid,kunta,grd_id,id_nro,xkoord,ykoord,vaesto,miehet,naiset,ika_0_14,ika_15_64,ika_65_vaki2017_1km.1,"POLYGON ((247000 6629000, 246000 6629000, 246000 6630000, 247000 6630000, 247000 6629000))",3751,322,1kmN6629E0246,19762,246000,6629000,1,-1,-1,-1,-1,-1
```

Taulukko 2. Väkiluku-tiedoston rakenne.

Ensimmäisellä rivillä on kenttien nimet ja toinen rivi on ensimmäinen tietue. Näistä kentistä käytettiin kunta, xcoord, ycoord ja väestö. Väestö kentässä on rasterin kokonaisväkiluku. Xcoord ja ycoord antavat rasterin vasemman alakulman koordinaatit. Ensimmäisessä tietueessa väkiluku on yksi ja muiden väkilukukenttien arvo -1 tarkoittaa että tietoa ei ole tai sitä ei haluta antaa, ettei sen avulla voida yksilöidä henkilöitä.

Kunta on kolminumeroinen koodi, jota käytetään eri valtionhallinnon järjestelmissä. Auran koodi on 019, kun Turun koodi on 853. Kuntakoodit antavat kunnat aakkosjärjestyksessä, joitain poikkeuksia lukuun ottamatta. Aakkosissa ensimmäinen kunta Akaa saa koodin 020, kun pienin koodinnumero 005 on Alajärvellä. (<https://www.tilastokeskus.fi/meta/luokitukset/kunta/001-2019/index.html>)

Tietueita on lähes 100000. Simulaatiossa käytetyt tietueet on valittu lyhyellä awk-skriptillä

```
{
  if ($12 >= 6702000 && $12 <= 6737000 && $11 >= 212000 && $11
  <= 259000)
    print $8, $11, $12, $13
}
```

Ohjelmakoodi 1. Awk-skripti tietueiden poimimiseksi väkiluku-tiedostosta.

Skripti käy tiedoston läpi rivi kerrallaan ja poimii rivit, joissa y-koordinaatti (kenttä 12) on välillä 6702000 ja 6737000 ja x-koordinaatti (kenttä 11) on välillä 212000 ja 259000. Näiltä riveiltä poimitaan kentät 8, 11, 12, 13 eli kunta, x-koordinaatti, y-koordinaatti ja väestö.

3.3 Karttojen koordinaatisto

Suomessa digitaalisissa aineistoissa käytetään yleensä ETRS-TM35FIN koordinaatistoa. Siinä koordinaatit esitetään etäisyytenä pituussuuntaisesta keskilinjasta sekä etäisyytenä päiväntasaajasta. Pituussuuntainen keskilinja on eurooppalaisen (ETRS) järjestelmän 35. kaista. Kaistan 35 keskilinja on sama kuin 27. pituuspiiri. Keskilinjän pituuskoordinaatti on 500000. Näin vältetään negatiiviset arvot keskilinja vasemmalla puolella. Kun keskilinja pituuskoordinaatiksi on valittu tarpeeksi suuri luku niin kaikki Suomen alueet saavat yhä positiivisen pituuskoordinaatin. 27. pituuspiiri kulkee Kotkasta Suomen halki pohjoiseen aika lailla halki Suomen ”pääläen”.

Turun tuomiokirkon tornin ETRS-TM35FIN koordinaatit ovat E 240363 N 6711115. Turun tuomiokirkolta on siis 6711km päiväntasaajalle ja 260km (500000m - 240363m) pituuspiirille 27. Koordinaatit esitetään metreinä. Tämä sopii yhteen maanmittauslaitoksen rasterikarttojen kanssa. Kun data esitetään 2*2m tai 10*10m rasterina, koordinaatit kullekin rasterille voidaan laskea kartan kulman kiinnepisteen ja rasterin sijainnin ja koon mukaan. Simulaatiossa koordinaatit ovat tarpeettomia, sillä laskenta tapahtuu rasterien pohjalta. Koordinaatisto liittyy kuitenkin eri data tyyppien sovittamiseen keskenään. Korkeusdatassa 10m rasterissa Turku osuu karttalehdelle L3324. Karttalehden vasemman alakulman koordinaatit ovat 236000 ja 6702000. Kun niitä vertaa Turun

tuomiokirkon koordinaatteihin niin tuomiokirkko on siitä vähän pohjoisessa ja idässä, kuten pitäisikin tässä tapauksessa olla.

3.4 Aineistojen koordinaatit

Korkeusdatassa ilmoitetaan tiedoston vasemman alakulman ETRS-TM35FIN koordinaatit. Lisäksi kerrotaan tiedostossa olevien rasterien määrä leveys- ja korkeussuunnassa sekä yhden ruudun tai rasterin koko 10m.

Väestödatassa kerrotaan ruudun sijainti useallakin tavalla. Skriptissä on käytetty vasemman alakulman ETRS-TM35FIN koordinaatteja. Taustana käytettävä maastokartta jaetaan png-kuvana eikä tiedostossa ei ole koordinaattitietoja. Latauksessa mukana tulevassa metadatassa on kuitenkin koordinaattitiedot.

3.5 Korkeusdatan ja maastokartan suhde toisiinsa

Korkeusdataa ja maastokartan merenpintaa keskenään verratessa (korkeusarvo ja kartan väri) korkeusdatasta nousi joitain pieniä alueita yli nollan metrin, kun maastokartta näytti merenpintaa. On mahdoton sanoa, onko kyse virheistä korkeusdatassa vai kenties niin pienistä luodoista, etteivät ne näy maastokartassa. Simulaation kannalta niillä ei ole merkitystä ja korkeusdataan niille kohdille on merkitty korkeudeksi tasan nolla metriä eli ne tulkitaan merenpinnaksi.

Vastaavasti maastokartassa rannikoilla on alueita, joiden väri on jotain muuta kuin aavan meren väri, mutta korkeusdata antaa korkeudeksi nolla metriä. Nämä paikat ovat joko rantoja, vesistöjen suita tai paikan nimiä, joissa käytetty väri on musta. Rannoilla värieron syynä lienee pikseliarvojen pyöristyminen meren ja maan pinnan värien välillä. Yhtenäisyyden ja alueen laajennus algoritmin takia, kaikkien näiden pikselien värien muutettiin samaksi kuin merellä.

4 Simulaatio ja merenpinnan nousu

Simulaation on toteutettu Processing3 ympäristössä (www.processing.org). Processing on luotu opetusympäristöksi, helpottamaan ohjelmoinnin opettelua kuvataiteilijoille ja opettamaan visuaalista ajattelua ohjelmoijille. Processing valittiin koska, sillä on helppo tehdä niin kaksi kuin kolmiulotteisiakin esityksiä. Ennen kaikkea esityksiä voi helposti muuttaa ajon aikana. Visuaalinen ohjelmointi on nopeaa ja sujuvaa, koska Processing tarjoa koko joukon apufunktioita, jotka tekevät kuvallisesta ohjelmoinnista helppoa. Processing perustuu Javaan, joten Javan luokkakirjastot on käytettävissä. Työssä hyödynnettiinkin Javan tietorakenteita.

Simulaation toiminnallisuus rakentuu merennousun ympärille. Kun merenpintaa nousee tai nostetaan, käydään läpi kaikki 17 miljoonaa korkeusrasteria ja katsotaan mitkä niistä jäävät merenpinnan alle. Sen pohjalta päivitetään meren osuus ja maanpinnan osuus. Rasterit käydään läpi yksi kerrallaan ja kun yksi niistä jää merenpinnan alle katsotaan minkä 1km väestörasterin alueelle se kuuluu. Kunkin väestörasterin osalta lasketaan montako 10*10m aluetta on menetetty. Koska ei tiedetä missä 1*1km alueella ihmiset asuvat oletetaan, että he ovat tasaisesti alueella. Silloin jos 10% alueesta menetetään, lähtee 10% jäljellä olevasta väestöstä merta pakoon. Aina kun ruutu jää meren alle vaihdetaan sen väri pohjakartassa.

Nousevan merenpinnan pakottamat ihmiset muuttavat toiseen 1*1km ruutuun kartalla. Muuttomalli kuvaa minne ihminen muuttaa. Tähän simulaatioon sopii parhaiten ns. säteilymalli. Säteilymalli esitellään luvussa 5.1.

Kaikkien ruutujen läpikäyminen joka kerta kun merenpinta nousee, tekee ohjelmasta hitaan. On kuitenkin mahdollista pienentää kerrallaan läpi käytävien rasterien määrää, muutenkin kuin pienentämällä tarkasteltavan alueen kokoa. Koneäön yhteydessä on kehitetty erilaisia algoritmeja reunojen ja alueiden tunnistamiseksi. Seuraavassa luvussa kerrotaan simulaatiossa käytettävästä alueen kasvatus (region growth tai region growing) algoritmista. Muuten simulaatio toimii samalla tavalla kuin jos kaikki korkeusrasterit käytäisiin läpi aina merenpinnan noustessa.

Korkeusdata on muutettu yhden desimaalin tarkkuuteen, koska laskentakin tehdään sillä tarkkuudella. Alueen suurin korkeus on 98,9m eli korkeusarvoja on 990. Siten voi karkeasti sanoa, että silmukan koko tipahtaa 17 miljoonasta tuhannesosaan eli 17 tuhanteen. Sen pitäisi nopeuttaa ohjelmaa huomattavasti. Aiemmin modernilla koneella merenpinnan nosto kesti noin sekunnin. Parannetulla algoritmilla se tapahtuu välittömästi.

4.1 Merenpinnan nousu - alueen kasvatus -algoritmi

Alueen kasvatus algoritmin ideana on aloittaa yhdestä tai useammasta pisteestä ja käydä läpi niiden viereisiä pikseleitä ja liittää ne mukaan alueeseen, jos ne täyttävät samankaltaisuusehdot. Naapureita lisätään alueeseen kunnes sopivia naapureita ei enää löydy Merenpinnan nousun yhteydessä ehto on suoraviivainen: ruudun korkeusarvo on pienempi kuin annettu merenpinnan korkeus. Algoritmi voidaan toteuttaa rekursiona tai listan avulla. (Albert 1995)

Rekursiona tarkistetaan kuuluuko annettu ruutu alueeseen vai ei. Jos se kuuluu, niin sen viereiset ruudut tarkistetaan kutsumalla funktiota rekursiivisesti. Ilman rekursiota ruutu lisätään jonoon. Jonosta otetaan ensimmäinen ruutu ja tarkistetaan sen naapurit, että kuuluuko ne alueeseen. Jos ei kuuluu, niin ne lisätään jonon loppuun. Näin jatketaan niin kauan kuin jonossa on ruutuja. Kummassakaan algoritmissa ei oteta alueen sisällä jo olevia ruutuja uudestaan käsittelyyn eikä jonoon lisää jo siellä olevaa ruutua. Se voidaan välttää tarkistamalla pohjakartan väri; jos se on jo meren sininen eli meren peittämä, se on jo aiemmin läpikäytyä aluetta eikä sitä oteta enää käsittelyyn. Seuraavassa listauksessa on jonoa käyttävän version pseudokoodi. Pseudokoodissa open tarkoittaa sitä, että kohde täyttää annetun ehdon eli kuuluu alueeseen eikä sitä ole käsitelty jo aiemmin.

Queue Point Fill

```
Procedure qfill(col,row) {
  if (col,row) is open → enqueue(col,row);
  fill(col,row);
  while queue is not empty {
    col,row = queue[begin];
    dequeue;
    if (col,row - 1) is open → enqueue(col,row - 1);
    fill(col,row - 1);
    if (col,row + 1) is open → enqueue(col,row + 1);
    fill(col,row + 1);
    if (col - 1,row) is open → enqueue(col - 1,row);
    fill(col - 1,row);
    if (col + 1,row) is open → enqueue(col + 1,row);
    fill(col + 1,row);
  }
}
```

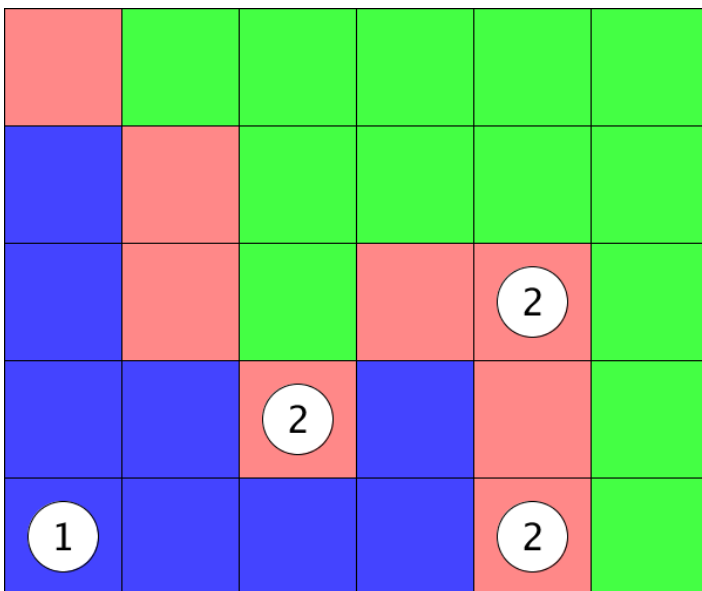
Ohjelmakoodi 2. Jonoa käyttävä alueen täyttö algoritmi (Albert 1995)

Alueen täyttö algoritmi ajetaan yleensä vain kerran. Simulaatiossa se ajetaan jokaisen merennoston jälkeen. Olisi toki mahdollista aloittaa alueen täyttö alusta, mutta sinä tapauksessa, jokainen merennosto kestäisi aina pidempään kuin edellinen, sillä läpi käytävien pikseleiden määrä kasvaa joka kerta. Se olisi toki kevyempi ratkaisu kuin kaikkien pikseleiden läpi käyminen jokaisen merennoston yhteydessä. On mahdollista laittaa talteen alueen reunat ja käyttää niitä lähtökohtana, kun merenpinta nousee seuraavan kerran. Silloin on luontevampaa käyttää jonon perustuvaa algoritmia, kun seuraavalla kierroksella lähtökohtana on edelliseltä kierroksella luotu jono alueen reunan pikseleistä.

4.2 Reunan määrittäminen

Kuvassa 5 on visualisoitu sinisellä alueeseen kuuluvat pikselit, vaaleanpunaisella reunan pikselit ja vihreällä alueeseen kuulumattomat pikselit. Reunan pikselitkin kuuluvat alueeseen, ne on vain merkitty eri värillä, että ne erottuisivat alueen pikseleistä.

Numerolla 1 merkattu pikseli on aluetta, mutta on kuvan reunalla. Olisi perusteltua sanoa, että sekin olisi reunaa. Tässä tapauksessa kuitenkin se kannattaa jättää pois, koska sen viereisistä pikseleistä ei löydy seuraavalla merennostolla pikseleitä, joita haluttaisiin tarkastella – nehan ovat jo aluetta tai ovat reunan ulkopuolella. Tämä pienentää merennoston silmukan verran.



Kuva 5. Alueen kasvatus -algoritmi ja eri alueet

Numerolla 2 on merkitty joitakin reunan pikseleitä. Kuvasta ja merkatuista pikseleistä käy selväksi, että reunan pikseleillä on vieressä alueeseen kuulumaton pikseli. Reuna muodostuu pikseleistä, jotka ovat aluetta ja niillä on lisäksi vähintään yksi pikseli naapurissa, joka ei kuulu alueeseen. Tässä

simulaatiossa naapureiksi käsitetään pikselin neljä vaaka- tai pystysuoraa naapuria. Aivan yhtä hyvin naapureina olisi voitu tarkastella kaikkia kahdeksaa pikselin ympärillä olevaa pikseliä.

4.3 Merenpinnan nousu ja alueen kasvaminen

Jos merenpinnan korkeutta verrataan kaikkiin korkeusrasterin pisteisiin on mahdollista, että korkeamman alueen takana oleville alaville alueille olisi muodostunut meri. Silloinhan testataan vain olisiko merenpinta korkeammalla kuin maanpinta. Kun aloitetaan yhdestä pisteestä, niin alueen kasvatusalgoritmi muodostaa yhtenäisen alueen. Silloin ei pääse muodostumaan alavammille alueille irrallisia osia merta.

Simulaatiossa käytetään neljää aloituspistettä, koska meri ei ole karttapohjassa yhtenäinen. Alueen kasvatus algoritmi pitää kuitenkin huolen, että kaikki uudet alueet ovat aina yhteydessä oikeaan merialueeseen.

Merialueiden kasvaessa ne saattavat yhdistyä. Yhdistyminen ei ole kuitenkaan ongelma sillä kaikille osa-alueille käytetään samaa tietorakennetta. Jono reunan pikseleitä ei muutu tietorakenteena siitä, että siellä on erillisiä reunan pätkiä. Niitä olisi joka tapauksessa saarten ympärillä. Eikä algoritmin toimintakaan siitä muutu.

4.4 Simulaation toteutus

Processing-ohjelman ytimenä on piirto-silmukka (`draw()`). Yleensä varsinainen toiminnallisuus toteutetaan `draw()`-funktiossa. Sitä toistetaan uudestaan ja uudestaan kunnes suoritus loppuu tai käyttäjä lopettaa suorituksen. Ympäristö pitää huolen `draw()`-funktion toistuvasta kutsusta.

Simulaation `setup()`-funktiossa ladataan tiedostot ja alustetaan käytetyt tietorakenteet. Tietorakenteiden muodostus on tehty siten että `reset`-komennolla voidaan aina palata alkutilaan.

`Draw()`-funktiossa siirretään pohjakartta oikeaan kohtaan, piirretään vasen ja oikea tietopaneli sekä kutsutaan merennousu funktiota tarpeen tullen. Hiiren ja näppäimistön tapahtumat käsitellään omissa funktioissaan.

Simulaatio pyörii korkeusdatan ympärillä. Kun merenpintaa nostetaan, ajetaan kierros alueen kasvatus -algoritmia. Alueen ehtona on, että merenpinnan korkeus on suurempi kuin maanpinnan korkeus. Tuloksena saadaan lista ruutuja, jotka meri on peittänyt tällä kierroksella. Kunkin väestöruudun alueelta lasketaan yhteen meren tällä kierroksella peittämät ruudut. Sen perusteella

arvioidaan kuinka moni asukas muuttaa pakoon nousevan meren edeltä. Koska väestödata on karkealla tasolla, on turha tehdä hienostunutta päättelyä koska meri pakottaa ihmisiä lähtemään. Tässä tapauksessa pakottava vaikutus on lineaarinen, kun merelle menetetään 10% ruudun maa-alasta 10% maa-alan asukkaista lähtee. Tässä simulaatiossa mukana olevan datan perusteella ei voi sen parempaa päättelyä tehdä, koska data ei kerro missä ihmiset tarkalleen asuvat ja koska meri oikeasti uhkaa heitä ja heidän asuntojaan. Pohjakartasta ei voi päätellä missä ihmiset asuisivat, koska rakennuksia ei ole edes merkitty karttaan.

Merenpinnan nousun perusteella saadaan siis kultakin neliökilometrin alueelta lähdössä olevien ihmisten määrä. Muuttomallin perusteella arvioidaan, minne ihmiset muuttaisivat. Sekä lähtöalueen että kohdealueen väestömäärää muutetaan sitten vastaavasti. Samalla kun merenpintaa nostetaan, muutetaan pohjakartan väri vastaamaan meren väriä. Se helpottaa seuraamaan mitkä alueet jäävät merenpinnan alle ja visualisoi karttalla menetettyä maata.

Simulaatio laskee merenpinnan nousun aiheuttamat muutokset alueen kuntien ja kaupunkien väkiluvussa sekä meren ja maan prosentuaalisen osuuden simulaation alueelta. Asutuskeskusten väkiluku perustuu 1*1km ruutujen antamaan välilukuun. Kukin ruuduista kuuluu vain yhteen kuntaan. Niin ei tietenkään ole todellisuudessa ja se aiheuttaa jonkinlaisen virheen kuntien väkilukuihin. Tälle ei voi oikeastaan yhtään mitään sillä ominaisuus on väestödatassa jo alun perin.

Simulaatiossa voidaan nostaa merenpintaa kerrallaan joko 10cm tai 1m. Tuloksissa merenpintaa on nostettu metri kerrallaan kymmeneen metriin saakka.

4.5 Alueen kasvatus -algoritmin toteutus

Algoritmi on toteutettu käyttäen jonoa ja taulukkoa. Työ-jono sisältää rasterit, joita ei ole vielä käsitelty, mutta jotka kuitenkin kuuluvat alueeseen. Kun se loppuu, on alue muodostettu. Taulukkoja käytetään rasterin tilan tarkastamiseen. Reuna-jonoon kerätään kaikki alueen reunalla olevat rasterit, eli rasterit, jotka kuuluvat alueeseen, mutta joilla on alueeseen kuulumaton rasteri jossain neljästä vieressä olevasta rastereista. Työ-jonosta poimitaan yksi rasteri kerrallaan ja tarkastetaan sen viereiset neljä rasteria. Jos naapurin rasteri ei kuulu alueeseen, eli siellä maanpinnan korkeus on suurempi kuin tämän hetkinen merenpinnan korkeus, rasterille ei tehdä mitään, mutta tämän hetkinen rasteri lisätään reuna-jonoon, ellei se jo ole siellä. Jos viereinen rasteri kuuluu alueeseen, se lisätään työ-jonoon, ellei se jo ole siellä.

Kaikki työ-jonoon päätyvät rasterit ovat meri-alueita. Ne ovat joko reunaa, josta haku aloitetaan tai uusia meren pinnan alle jääviä rastereita. Työ-jonosta poimittu rasteri lisätään uusimeri-jonoon, jos

se ei ole jo merialuetta tai jos se ei ollut edellisen meren noston reunaa. Edellisen kierroksen reuna oli jo huomioitu meren nousussa eikä niitä tietenkään saa laske mukaan kahdesti.

Rasterin tila tarkistetaan taulukosta. Taulukot ovat boolean arvoisia, joten niitä voi käyttää suoraan if()-testin arvona. Reuna-, uusimeri- ja työ-jonoilla on kaikilla vastaava taulukko, josta voi nopeasti tarkastaa onko rasteri jo jonossa vai ei. Taulukosta rasterin tarkastaminen on kiinteä aika $O(1)$ kun jonosta sen tarkastaminen kestäisi keskimäärin puolet jonon pituudesta, jos rasteri löytyy ja koko jonon pituus, jos sitä ei löydy. Jonosta etsimisen aikavaativuus on siten $O(n)$. Merenpinnan läpikäynti alkutilanteessa tuottaa reunan, jossa on noin 80 000 rasteria. Voidaan arvioida, että reunaan kuuluvalla rasterilla on kaksi alueeseen kuuluvaa naapuri, joten kukin reunan rastereista on tarkistettu kahdesti. Toisella kertaa olisi käyty läpi koko jono ja toisella kertaa, kun rasteri olisi jo jonossa käytäisiin läpi keskimäärin puolet jonosta. Jono kasvaa käytön myötä täyteen 80 000 rasterin mittaan, joten ensimmäinen testaus on summa 1-80 000 ja toinen testaus, kun rasteri on jo listassa on summa 1-40000 yhteensä näistä tulee $0.5*80000*80001 + 0.5*40000*40001$ eli noin neljä miljardia testausta kun taulukon avulla määrä on 160 000 testausta. Ero on huomattava ja sen huomaa ohjelman suoritusajassakin.

Taulukot toki ovat isoja. $4800*3600*1$ bitti eli noin kaksi megatavu per taulukko. Rasterin etsiminen jonosta on kuitenkin niin raskas operaatio verrattuna taulukosta tarkistamiseen, että muisti kannattaa käyttää.

Seuraavassa ohjelmalistauksessa on algoritmin alustus ja apufunktiot

```
void lisääReunaan(int coord) {
    if(coord < 0 || coord > mapW*mapH-1) return;
    if(raja[coord]) return;
    this.reuna.add(coord);
    raja[coord] = true;
}

//Lisää rasteri tyo-jonoon, jos se on 1)alueen sisällä, 2) ei ole jo osa
    meri-alueetta, 3) ei ole jo tyo-jonossa or 4) ei ole jo reuna-jonossa
    eikä 5) ole uusimeri-jonossa
void lisaatyohon(int lt) {
    if(lt < 0 || lt > mapW*mapH-1) {return;}
    if(meri[lt]) {return;}
    if(tyo_jono[lt]) {return;}
    if(raja[lt]) {return;}
    if(uusi_meri[lt]) return;
    tyojono.add(lt);
}
```

Ohjelmakoodi 3. Alueen kasvatus -algoritmiin liittyvät alustustoimet ja apufunktiot

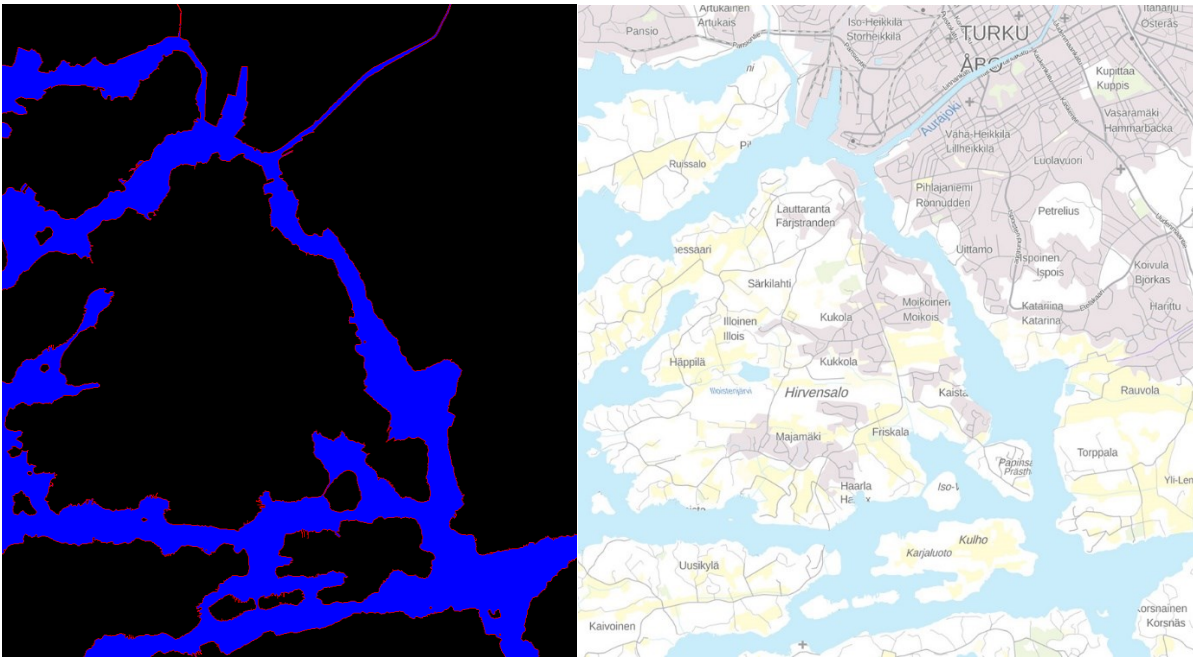
Tietorakenteita on yksinkertaistettu ilmaisemalla rasterin paikka yhdellä kokonaisluvulla. Kun pisteen koordinaatit ovat (x,y) voidaan se yksikäsitteisesti ilmaista luvulla $x + y \cdot \text{taulukonleveys}$. Tämä toimii kun kaikki taulukot ovat saman levyisiä ja korkuisia kuin tarkasteltava alue. Sama arvo saataisiin, jos taulukon rivit asetettaisiin järjestyksessä peräkkäin yhteen jonoon.

Aluksi algoritmissa asetetaan neljä aloituspistettä. Merialue on jakautunut valitulla kartta-alueella neljään osaan ja kullekin on oma aloituspisteensä. Pisteiden koordinaatit saatiin karttaa tarkastelemalla kuvankäsittelyohjelmassa.

```
//Luo lista aloituspisteitä.  
public LinkedList<Integer> aloitusLista() {  
    tyojono = new LinkedList<Integer>();  
    //Add starting points to region growth algorithm.  
    int cell = 3580 * mapW + 20; //Aloituspiste "avoimella merellä"  
    if(alueella(cell)) lisaatyohon(cell);  
    cell = 1000 * mapW + 200; //Aloituspiste Livonsaari  
    if(alueella(cell)) lisaatyohon(cell);  
    cell = 2440 * mapW + 1990; //Aloituspiste Raisionlahti  
    if(alueella(cell)) lisaatyohon(cell);  
    cell = 3580 * mapW + 4600; //Aloituspiste Hiirsalmi Kaarinassa  
    if(alueella(cell)) lisaatyohon(cell);  
    return tyojono;  
}
```

Ohjelmakoodi 4. Alueen kasvatus -algoritmiin aloitus-jono

Alkutilanteesta muodostetun bittikartan avulla saattoi varmistaa, että algoritmi löytää alueen niin kuin pitääkin ja että raja muodostuu oikein. Punainen esittää reunapikseleitä, sininen alueeseen kuuluvia pikseleitä ja musta alueeseen kuulumattomia pikseleitä. Osa bittikartasta on kuvassa 6 alla. Kuvan alareunasta näkee, että siellä ei ole punaisia rajapikseleitä muuta kuin oikeasti meren ja maan rajalla. Meren tai kuvan reunalla ei ole rajapikseleitä. Rajapikselit peittävät myös saarten ja mantereen rajat. Joet näkyvät myös selkeästi.



Kuva 6a Osa alueen kasvatus -algoritmin aloitustilanteesta bittikartasta. 6b sama alue pohjakartasta.

Aiemmin tekstissä mainittiin jo miten myöhemmät kierrokset meren nousua ja alueen kasvatusta toimivat. Kullakin kierroksella muodostuu uudet reuna- ja uusimeri-jonot. Reuna-jonoa käytetään seuraavalla kierroksella alueen kasvatuksen lähtökohtana. Uusimeri-jono taas pitää sisällään kaikki nousseen meren alle jääneet rasterit ja sen pohjalta lasketaan kuinka monta ihmistä joutuu muuttamaan nousevan meren myötä.

4.6 Simulaation skaalautuminen

Simulaation käynnistyminen kestää joitakin sekunteja; luettavat datamäärät ovat melko suuria ja niistä tehdään olioita ja tietorakenteita. Yksittäinen merennosto on nopea, välitön. Suurin silmukka kunkin merennoston yhteydessä on reunasta alkava merelle menetety alueen laskeminen. Silmukka ei ole suurempi kuin $a \cdot n$, missä n on korkeusrasterien määrä ja a on jokin vakio-termi. Muuttomalli on aikavaativuudeltaan $O(n^2)$ sillä kullekin lähtöpaikalle lasketaan arvo kaikille kohdepaikoille. Variaatio a tarkastelee muuttoa 1km rasterien tasolla ja silloin 10 000 neliökilometriä (korkeusdatan ja 1km rasterien suhde on 10000 : 1) on raja, jossa 1km rasterien määrä vaikuttaa enemmän laskennan nopeuteen kuin korkeusrasterien määrä. Variaatiot a ja b tarkastelee muuttoa kuntien suhteen eikä kuntia ole kuin 311 (Tilastokeskus, s413).

Suurin muistinkulutus tulee korkeusdatasta. Kutakin korkeusrasteria kohden on yksi liukuluku + viisi boolean arvoa ja lisäksi on samankokoinen RGB-kartta eli 3 tavua lisää. Liukuluvut esitetään yleensä neljällä tavulla. Tämän voi pyöristää kahdeksaan tavuun per korkeusrasteri. Muut tietorakenteet ovat

1km rasterin esityksiä ja siinä on neljä kertaluokkaa vähemmän tietoelementtejä kuin korkeusdatassa. Muut tietorakenteet mahtunevat tuohon pyöristykseen.

1 megatavu = $1024*1024$ tavua. Yhden neliökilometrin alueella on $100*100$ 10m korkeusrasteria ja kun yhtä korkeusrasteria kohden on 8 tavua niin yhteen megatavuun mahtuu 13 neliökilometriä ($1024*1024/8*100*100$). Suomen pinta-ala on 390 909 neliökilometriä (Tilastokeskus 2019, s456). Se vaatisi 30 gigatavua muistia keskusmuistia ja siihen lisäksi käyttöjärjestelmä ja Javan muistintarve.

Suomen pinta-ala on 226 kertaa suurempi kuin simulaation tarkastelualue ($390909/(36*48)$). Sen perusteella voisi arvioida että, jos tietokoneessa on tarpeeksi keskusmuistia 30 gigatavun datan pitämiseksi kerrallaan muistissa, simulaatio pyörisi hyvin.

Datan keruun voisi lähes kokonaan automatisoida, paitsi kuntien keskipisteet; niille ei ole löytynyt yrityksistä huolimatta hyvää tietolähdettä.

5 Muuttomalli

Muuttomalli (model of migration) kuvaa ihmisten muuttamista paikasta toiseen. Varhaisin malli on gravitaatiomalli (Zipf 1946). Sitä on sovellettu ihmisten muuton lisäksi tavaroiden kuljetukseen tai kaupungin sisäisiin puheluihin (Simini 2012).

Zipf (1946) esitti mallin muodossa $P_1 P_2 / D$, missä P_1 ja P_2 ovat yhteisöjä ja D on niiden välinen etäisyys. Kaava voidaan esittää myös muodossa (Simini 2012):

$$T_{ij} = \frac{m_i^\alpha n_j^\beta}{f(r_{ij})}$$

T_{ij} on alueelta i alueelle j lähtevien ihmisten määrä. m_i on lähde ja n_j kohde. Säädetävät eksponentit α ja β sekä estävä funktio $f(r_{ij})$ valitaan sovittamalla ne empiiriseen dataan (Simini 2012).

Tilastokeskuksella on avointa dataa muuttoliikkeistä kuntien välillä, mutta missä määrin se sopisi tilanteeseen, jossa ihmisten on pakko muuttaa. Suurin osa muutosta tällä hetkellä tapahtuu kohti suurempia keskuksia ja juuri niistä simulaatiossa ihmiset lähtevät pois.

Säteilymallin (Radiation Model) etu on, ettei siinä ole aiemman datan pohjalta määriteltäviä parametrejä.

5.1 Säteilymalli

$$\langle T_{ij} \rangle = T_i \frac{m_i n_j}{(m_i + s_{ij})(m_i + n_j + s_{ij})}$$

T_{ij} on alueelta i alueelle j lähtevien ihmisten määrä. T_i on alueelta i lähtevien ihmisten määrä. Alueen i ja j väkiluvut ovat m_i ja n_j . Viimeinen termeistä s_{ij} on väkiluku ympyrässä, jonka säde on alueiden i ja j etäisyys ja sen keskipisteenä on alueen i keskipiste. Tästä väkiluvusta vähennetään alueiden i ja j väkiluvut m_i ja n_j . (Simini 2012) Väkiluvut ovat jo tiedossa; lisäksi tarvitaan kuntien keskipisteet ja niiden väliset etäisyydet. Kuntien keskipisteet löytyvät wikipediasta, mutta virallisempaa lähdeä on

vaikea löytää. Parempi vaihtoehto on ottaa väkilukuaineiston ruudusta keskikohta ja käyttää sitä. Silloin muuttomalliin tulee lisää tarkkuutta: 1*1km ruutu on huomattavasti pienempi alue kuin kokonainen kaupunki tai kunta. Ja muutenkin muuttava ihminen pitää sijoittaa johonkin ruutuun hänen muutettuaan kunnan tai kaupungin alueelle. Kuntaa tai kaupunkia käyttäessä se pitäisi jotenkin määrittää.

Ympyröiden sisällä olevat väkimäärät on helppo laskea, kun väkilukuaineisto on jo ruutumaisessa muodossa. Kaavan antamat ympyrät ulottuvat myös tarkastelualueen ulkopuolelle. Väkiluvut voisi ottaa mukaan tarkastelualueelta ulkopuoleltakin ja jättää ne rasterit huomioimatta muuten simulaatiossa tai huomioida väkiluku vain tarkastelualueen sisällä. Muuttomalli vääristyy valitsee kumman tahansa vaihtoehdon, silloin Occamin partaveitsen mukaan valitaan yksinkertaisempi vaihtoehto ja lasketaan väkilukuja vain valitulta tarkastelualueelta.

Tämä muuttomalli valittiin osin koska sinä ei ole parametreja, jotka tarvitsisivat ennakkotietoja liikkumisesta. Merenpinnan nousu pakottaa tietyn määrän ihmisiä T_i muuttamaan. Alkuperäisessä artikkelissa malliin liittyi todennäköisyysfunktio, joka kokosi työpaikan hyödyt, mutta he myös osoittivat, että funktiolla ei ollut vaikutusta ihmisten liikkumiseen T_{ij} ja niin se voitiin jättää kaavasta pois (Simini 2012). Vapaat asuinpaikat muistuttavat avoimia työpaikkoja ja se pohjalta säteilymallia voi soveltaa antamaan muuttamiselle kohteen.

Oletus ei ole kuitenkaan täysin ongelmaton. Kun ihmisiä muuttaa nousevan meren alta kuntaan A, siellä olevat mahdolliset asuinpaikat vähenevät. Toisaalta kun väkilukua alueella kasvaa niin sinne muuttavien määrä kasvaa. Toki hätätilanteessa hyödynnettäisiin kaikenlaiset rakennukset asumiseen, joten helppojen ratkaisujen jälkeen siirryttäisiin hankalampiin vaihtoehtoihin, kuten varastorakennuksiin, tehdaskiinteistöihin tai piharakennuksiin. Ajan oloon rakennettaisiin lisää asuntoja kuten muunnettaisiin muita tiloja paremmin asumiseen sopiviksi. Simulaatiossa ei kuitenkaan ole ajan kulumista ja osin siksi voi olettaa, että väkimäärän kasvusta huolimatta asuinpaikkoja on aina tarjolla. Se tekisi simulaation monimutkaisemmaksi eikä saavutettava hyöty olisi merkittävä.

Simulaatiossa on mukana varsin pieni alue Suomea. Osa poismuuttoa kohdistuisi tarkastelualueen ulkopuolelle. Sitä voisi käsitellä yhtenä muu Suomi kohteena. Sille pitäisi silloin määrittellä väkiluku ja paikka. Väkiluvun mukaista painopistettä sanotaan Weberin pisteeksi (Piela 2019). Englannin kielisessä tutkimuksessa ei puhuta Weberin pisteestä vaan termi on 'Point of Minimum Aggregate Travel' (Kumler 1992). Kyseinen piste minimoi kaikkien kansalaisten yhteenlasketun matkan siihen. Tähän tarkoitukseen se sopii hyvin. Se oli vuonna 2019 Hauholla (Piela 2019).

Säteilymallin käyttäytymisen arvioimiseksi tehtiin testiajo. Testiajo toteutettiin taulukkolaskentaohjelmalla. Kuntien välisen ympyrän sisälle jäävien määrä arvioitiin, väkiluvut on oikeita ja kuntien keskipisteet on wikipediasta. Testiajon tarkoitus ei ollut ollakaan tarkka vaan antaa jonkinlainen kuva, että millaista muuttoliikettä on odotettavissa.

	Väkiluku	sijaintiX	sijaintiY	Etäisyys metriä	sij (arvio)	Lähtijöitä (Ti)	
Turku	186007	239756	6711075	0	0	500	1000
Aura	3489	258904	6731519	28011	117060	18	
Kaarina	32576	245130	6705768	7553	3000	769	
Lieto	17593	250564	6716479	12084	60000	160	
Masku	9522	231510	6725015	16196	75000	77	
Mynämäki	5070	226343	6737450	29590	115000	26	
Naantali	18001	226237	6713865	13804	65000	150	
Nousiainen	4645	230841	6728208	19314	80000	38	
Raisio	23391	234776	6715281	6518	2000	811	
Rusko	6262	238054	6721341	10406	40000	108	yht.
muu Suomi	5206444	371537	6779690	148574	120549	33	2189

*Taulukko 3: Säteilymallin testiajo. Kuntien keskustan sijainti on wikipediasta ja sij on arvioitu väkilukujen, sijainnin ja etäisyyksien perusteella. Laskentakaava solusta (harmaa pohja) $G3$ on $=\frac{B3^2 * B3 * B3}{(B3 + F3) * (B3 + F3 + B3^2)}$*

Muu Suomi ei suurimman väkiluvunkaan ansiosta houkutellettu paljoakaan tulijoita. Pelkoa sen vääristävästä vaikutuksesta ei tämän perusteella siis ole. Testiajo paljasti kuitenkin ongelman. Liikkuvien määrä on suurempi kuin lähtevien määrä, vaikka jätettäisiin pois Turusta Turkuun siirtyvät. Sen voi korjata skaalaamalla luvut vastaamaan lähtevien määrää. Lyhyet etäisyydet painottuvat selvästi, mutta tapahtuuko niin myös oikean datan kanssa. Koska testissä muuttomäärät muualle Suomeen ovat pieniä, jätetään se pois simulaatiosta.

Simulaatiossa pitää ottaa huomioon mahdollinen painottuminen lyhyisiin matkoihin. Ehkä alueet, joilta ihmiset joutuvat lähtemään pitää sulkea pois muuttokohteista. Silloin ihmiset muuttaisivat ainakin poispäin nousevasta merestä.

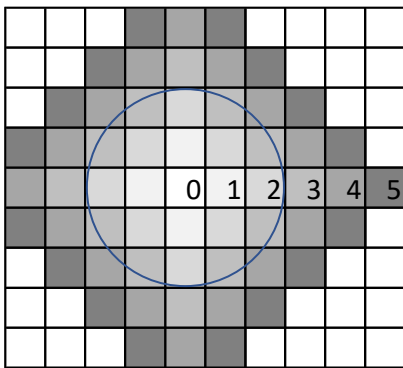
Väestödata on 1*1km ruutuina, joten on luontevaa käsitellä kutakin ruutua lähtöalueena ja kohdealueena. Ruutuja on noin 1700, joten niiden läpikäyminen muuttomallin laskennassa ei pitäisi olla laskennallisesti raskasta.

5.2 Säteilymallin toteutus

Säteilymallista toteutettiin kolme variaatiota. Variaatiossa a säteilymallia sovelletaan 1km rasteriin. Variaatiossa b säteilymallia sovelletaan kuntaan ja kuntaan muuttaneet sijoitellaan satunnaisesti kuntaan kuuluviin rastereihin. Variaatiossa c säteilymallia sovelletaan kuntaan ja kuntaan muuttaneet

sijoitetaan rastereihin satunnaisesti, mutta todennäköisyydet määräytyvät suoraan rastereiden väkiluvuista. Variaatioissa c säteilymallia on muokattu pienentämällä muuton todennäköisyyttä kuntiin, joissa on osinkin meren alle jääneitä 1km rastereita.

Etäisyytenä rasterista rasteriin säteilymallissa käytetään niin sanottua manhattan etäisyyttä (NIST 2019). Säteilymallissa tarvitaan väkiluku ympyrän sisällä, jonka säde on lähtöpaikan ja kohteen etäisyys ja keskipiste on lähtöpaikka. Perinteinen Euklidinen etäisyys antaisi tosiaan ympyrän. Sen sisälle jäävä väkimäärä rastereissa voisi laskea useallakin tavalla. Kuva 7 havainnollistaa asiaa. Ympyrän halkaisija on 2,5 ja kokonaan sen sisälle jää yhdeksän ruutua. Se peittää osin lisäksi kuuttatoista ruutua. Helpointa olisi todeta, että ruutu joko kuuluu summaan tai ei. Ympyrän tapauksessa pitäisi laskea jotenkin onko ruutu mukana tai ei. Toinen vaihtoehto olisi laskea paljonko ympyrä peittää ruutua ja suhteuttaa määrä ruudun väkilukuun. Käyttämällä manhattan etäisyyttä päästään eroon näistä ongelmista.



Kuva 7 Euklidinen vs Manhattan etäisyys

Manhattan etäisyyttä käyttäen etäisyydet ovat ruudukossa kokonaislukuja. Kullekin ruudulle voidaan laskea eksplisiittinen etäisyys kokonaislukuna. Kuvassa 7 on etäisyydet merkitty harmaiden asteilla nollasta viiteen. Ruudukkomuotoisen datan kanssa Manhattan etäisyys on selkeä ja suoraviivainen lisäksi sillä on tässä tapauksessa laskentaa helpottava ominaisuus.

8	1	8	10	4	10	6
1	10	7	0	4	7	0
3	4	6	5	9	8	1
9	10	8	6	4	0	5
5	2	9	9	5	8	5
1	3	1	2	0	7	2
4	6	8	8	7	5	6

Kuva 8 väkiluku-rasteri

Kuvassa 8 on kuvitteellinen väkiluku-rasteri. Numeroarvo on kussakin rasterissa asuvien ihmisten määrä. Manhattan etäisyyden sisälle jäävä kokonaisväkiluku on laskettu kuvaan 9, kun keskipiste on lähtörasteri. Koska Manhattan etäisyys on symmetrinen vaaka ja pysty akselin suhteen kokonaisväkiluku on myös symmetrinen. Kokonaisväkiluku voidaan laskea siis kerralla ja sen aikavaativuus on $O(n)$, sillä matriisi tarvitsee käydä läpi vain kerran tarvittavien summien laskemiseksi. Laskenta aloitetaan lähtörasterista ja edetään siitä naapureittain, muodostaen summa Manhattan etäisyydellä 1, Manhattan etäisyydellä 2 jne. Kunkin summan laskemisen jälkeen arvot voidaan sijoittaa taulukkoon. Summien laskeminen muistuttaa varsin paljon alueen kasvatus - algoritmia.

351	296	227	139	227	296	351
296	227	139	73	139	227	296
227	139	73	32	73	139	227
139	73	32	6	32	73	139
227	139	73	32	73	139	227
296	227	139	73	139	227	296
351	296	227	139	227	296	351

Kuva 9 Manhattan etäisyyden mukaan lasketut kokonaisväkiluvut

5.3 Variaatio a - muutto rasterista toiseen

Ihmisten muuttoa tarkastellaan 1km rasterien tasolla. Merenpinnan noustessa lasketaan rastereittain muuttajien määrä. Kun muuttajien määrät olivat tiedossa, laskettiin säteilymallin perusteella, mistä rasterista mihin rasteriin ihmiset muuttaisivat. Merenpintaa nostetaan 1m kerrallaan, kunnes merenpinnan korkeus on 10m. Kun rasteri on menettänyt maata merelle muuttoa ei enää kohdisteta siihen.

Muuton tarkastelu 1km rastereina on deterministinen. Siinä ei ole satunnaisuutta. Ohjelma etenee vaiheittain ja muutokset tapahtuvat samanaikaisesti toisiinsa vaikuttamatta. Muuttomäärät toistuvat ajokerrasta toiseen samoina.

5.4 Variaatio b - muutto kunnasta toiseen ja satunnainen sijoittelu

Kuten rasterista toiseen muutettaessa tässäkin tapauksessa merenpinnan nousun perusteella laskettiin 1km rasterista pois muuttavat. Heidät laskettiin yhteen kunnittain, jolloin saatiin kustakin kunnasta muuttavien määrät. Säteilymallilla laskettiin mistä kunnasta mihin kuntaan ihmiset muuttavat. Kun tiedettiin montako tulijaa kunnittain on, heidät sijoitettiin kunnan alueella oleviin 1km rastereihin. Kullekin muuttajalle arvottiin 1km rasteri kunnan alueelta, johon hänet sijoitettiin. Arvontaa ei kohdistettu rastereihin, jotka olivat menettäneet maata merelle. Satunnaisuuden myötä perättäiset simulaatioajat tuottivat erilaisia tuloksia.

Kunnan sijainti on määritelty kirkon mukaan. Turun sijainti on määritelty tuomiokirkon perusteella, muuten on käytetty kunnan keskustassa olevaa kirkkoa, jos kirkkoja on useampia.

5.5 Variaatio c – muutto kunnasta toiseen ja väkilukujen mukaan satunnainen sijoittelu

Variaatio c on alkuun kuin variaatio b; 1km rastereittain lasketut muuttajat lasketaan yhteen kunnittain. Säteilymalliin on lisätty kerroin, jolla pienennetään muuttoa maata merelle menettäneisiin kuntiin. Kuntaan sisään muuttavat sijoitetaan satunnaisesti kunnan alueella oleviin rastereihin niiden väkiluvun mukaan. Merenpintaa nostetaan 1m kerrallaan, kunnes merenpinnan korkeus on 10m. Kun rasteri on menettänyt maata merelle muuttoa ei enää kohdisteta siihen. Satunnaisuuden myötä perättäiset simulaatioajat tuottivat erilaisia tuloksia.

Säteilymallin kerroin on kunnan maata menettämättömät rasteri jaettuna kunnan alussa olleiden rasterien määrällä. Säteilymallin kertoimet löytyvät taulukosta 9. Kerroin pienentää muuttoa maata menettäneisiin kuntiin ja lopettaa sen kokonaan jos kaikki kunnan rasterit ovat menettäneet maata merelle. Pinta-alaltaan suuressa kunnassa muutos on hitaampaa ja sisämaan kunnissa muutosta ei tapahdu ollenkaan (simulaatiossa Aura ja Rusko).

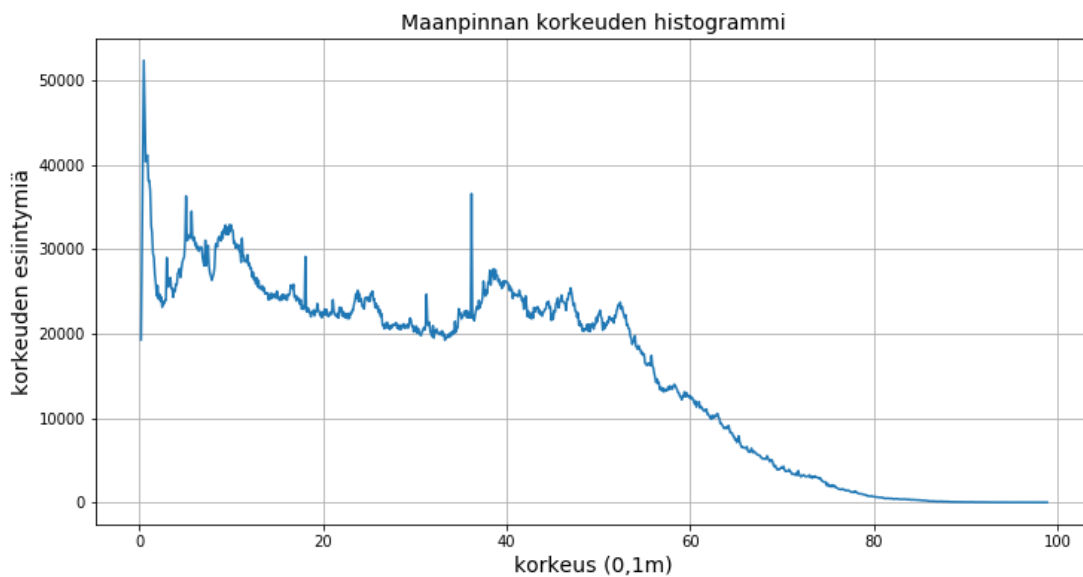
6 Tulokset

Tässä luvussa tutustutaan tarkemmin taustadataan ja katsotaan millaisia tuloksia simulaatioajat antoivat. Dataan tutustuminen ja analysointi on osa työskentelyä. Datan tunteminen ohjaa simulaation rakentamista. Se tuottaa myös tietoa, jonka pohjalta voi arvioida simulaation toiminnan oikeellisuutta. Se auttaa myös ymmärtämään simulaation tuloksia.

6.1 Näkymiä dataan

6.1.1 Korkeusdata

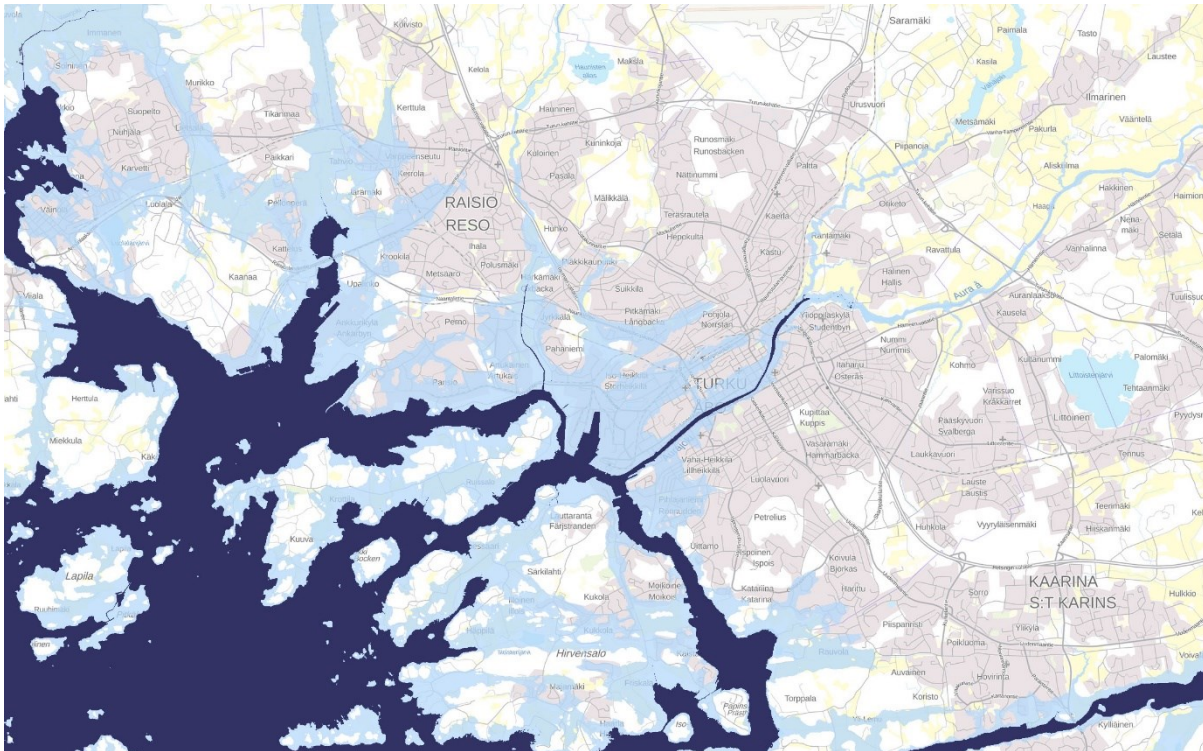
Kuvassa 10 on esitetty maanpinnan korkeuden histogrammi. Korkeudet ovat 0.1m tarkkuudella. Korkein piikki on 52404 0.5m korkeuden esiintymää. Kaaviosta puuttuu 0.0m, koska niitä on kaikkiaan 2196818 kappaletta. Sen ottaminen mukaan kaavioon olisi litistännyt muut arvot lähes yhtenäiseksi massaksi.



Kuva 10 Maanpinnan korkeuden histogrammi

Korkeusdatan perusteella voitiin laskea ja varmistaa että maan ja meren osuudet muuttuvat kuten pitää ja että uuden meren määrä on oikeaa suuruusluokkaa. Tarkkaa määrää uudelle merelle ei voi laskea, koska korkeampien alueiden taakse jää matalampia alueita ja siksi arvot eivät ole yksi yhteen. Suuruusluokka oli kuitenkin oikea. Tämän perusteella meren nosto alueen kasvatus -algoritmilla toimisi oikein.

Kartta kuvassa 11 esittää Turun ja Naantalin alueella meren alle jäävät alueet. Korkeusdata on esitetty kartan päälle laitettuna sinisenä värinä. Sekä Naantalin että Turun keskustassa on paljon alueita, jotka ovat alle kymmenen metrin korkeudella meren pinnasta ja kukkuloita, jotka nousevat yli kahdenkymmenen metrinkin korkeuteen. Tarkastelualueella on 2 972 821 rasteria, joiden korkeus on yli nolla metriä ja kymmeneen metriä tai alle.



Kuva 11 Kartta Turun ja Naantalin alueelta, kun merenpinta nousee 10m. Tumman sininen on alkuperäinen meri ja vaaleampi sininen ympärillä on meren alle jäävää aluetta.

6.1.2 Väestödata

Kunta	1km	väkiluku
Aura	66	3489
Kaarina	146	32576
Lieto	179	17593
Masku	159	9522
Mynämäki	98	5070
Naantali	212	18001
Nousiainen	117	4645
Raisio	48	23391
Rusko	103	6262
Turku	231	186007
Yhteensä	1359	306556

Taulukko 4 väestödata kunnittain

1km rastereita, joissa ei ole ollenkaan asukkaita on tarkastelualueella 269 kappaletta. Kunnittain rasterien määrä jakautuu taulukon 4 mukaan. Taulukoon on myös listattu kuntien väkiluvut rasterien pohjalta. Luvut eivät kaikin osin vastaa virallisia väkilukuja koska osa kunnista levittäytyy myös tarkastelualueen ulkopuolelle. Kuntien todelliset pinta-alat eroavat lisäksi datasta puuttuvien 269 rasterin takia, sillä niistä ei ole tietoa, mihin kuntaan ne kuuluvat.

Suurin väkiluku 8778 löytyy Turun keskustasta (katso kuva 12 oikea reuna) kuten myös 11 seuraavaksi suurintakin. 12. suurin arvo 3574 on Raisiossa ja 16. suurin 3215 Kaarinassa. Välissä olevat kolme ja seuraavat 16 ovat taas Turussa. Rasterien väkilukujen mediaani on 21 ja keskiarvo 225.

6.2 Merenpinnan nousu ja pakotettu muutto

Jo 10cm merenpinnan nousu pakottaa simulaatiossa 182 ihmistä muuttamaan. Se tuntuu yllättävältä, sillä eihän kukaan asu niin lähellä merta eikä niin lähellä merenpintaa. Simulaatiossa väestö tasoitetaan 1km rasteriin maanpinnalle tasaisesti, jolloin asumatonkin alava alue voi jo aiheuttaa muuttoa. Suurin muutto on 110 henkilöä ylioppilaskylän alueelta. Rasterissa asuu 2436 ihmistä. Kuvassa 12a on esitetty kyseinen rasteri siten että 0,1m maanpinnan korkeus on vihreällä ja 0.1-1m on punaisella.



Kuva 12a rasteri ylioppilaskylästä

Kuva 12b rasteri Turun keskustasta

Kuva 12c rasteri Hirvensalosta

Korkeusdatassa on siis 0.1m korkeus osalle Aurajokea ja simulaatio tulkitsee sen niin, että maata on menetetty merelle ja laskee sen pohjalta pakotettua muuttoa. Muutkin joet ovat samalla tavalla ongelmallisia.

Kuvaan 12b on otettu rasteri Turun keskustasta. Aurajoen rannassa olevat yksittäiset matalat rasterit ovat lienee pyörityksiä. Aivan kuten pohjakartassa oli värien reunoilla sekoittuneita pikseleitä niin korkeusdatassa voisi olla korkeamman jokipenkan ja Aurajoen välissä olevia pyörityneitä arvoja.

Rasterissa on 6064 asukasta ja silloin muutamankin rasterin menetys aiheuttaa muuttoa. 0,1m nousulla se on 5.

Kuvan 12c rasteri on Hirvensalon etelärannalta Haarlasta. Rasterissa on 808 asukasta. 0,1m merenpinnan nousulla menetetään 84. Muuttavien määrä on 9. Kuvassa näkyy vihreiden 0.1m korkeuksisten pikseleiden ja meren välissä valkeita pikseleitä. Korkeusdata ja kartta eivät tässä siis täysin vastaa toisiaan.

Data ei ole aivan siistiä eikä ongelmatonta, jolloin simulaatioon tulee pieniä epätarkkuuksia. On siis perusteltua tarkastella tuloksia korkeammalla tasolla. Merenpintaa nostetaan tuloksissa yksi metri kerrallaan ja muuttoa katsotaan kokonaisuutena, ellei esiin nousevan ilmiön selvittämiseksi tarvita yksityiskohtaisempaa tietoa.

	Korkeus	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	yhTEensä
Kunta													
Aura	määrä	66,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	%		0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
Kaarina	määrä	135,1	1,7	1,3	1,1	1,0	2,5	1,4	1,6	1,8	1,9	3,3	17,5
	%		1,2 %	1,0 %	0,8 %	0,7 %	1,8 %	1,0 %	1,2 %	1,3 %	1,4 %	2,5 %	13,0 %
Lieto	määrä	179,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,1	0,5
	%		0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,3 %
Masku	määrä	147,8	6,9	5,2	5,2	5,9	6,6	6,1	5,0	4,6	4,3	4,7	54,5
	%		4,7 %	3,5 %	3,5 %	4,0 %	4,5 %	4,1 %	3,4 %	3,1 %	2,9 %	3,2 %	36,9 %
Mynämäki	määrä	94,1	3,7	4,4	3,1	4,0	4,7	5,7	5,8	5,0	7,1	8,2	51,6
	%		3,9 %	4,7 %	3,3 %	4,2 %	5,0 %	6,1 %	6,2 %	5,3 %	7,5 %	8,7 %	54,9 %
Naantali	määrä	165,1	8,1	8,1	6,9	6,0	8,1	6,2	6,3	6,0	5,8	8,0	69,4
	%		4,9 %	4,9 %	4,2 %	3,6 %	4,9 %	3,7 %	3,8 %	3,7 %	3,5 %	4,8 %	42,0 %
Nousiainen	määrä	117,0	0,0	0,0	0,0	0,4	1,7	3,5	3,1	2,3	2,1	1,4	14,4
	%		0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,3 %	1,4 %	3,0 %	2,6 %	2,0 %	1,8 %	1,2 %	12,3 %
Raisio	määrä	47,1	0,8	0,7	0,5	1,2	1,2	1,1	1,0	1,2	1,3	1,3	10,4
	%		1,8 %	1,5 %	1,0 %	2,6 %	2,6 %	2,2 %	2,2 %	2,6 %	2,7 %	2,8 %	22,0 %
Rusko	määrä	103,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	%		0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
Turku	määrä	211,4	3,9	5,1	4,0	3,5	3,4	3,2	3,3	3,3	3,2	3,8	36,8
	%		1,9 %	2,4 %	1,9 %	1,7 %	1,6 %	1,5 %	1,6 %	1,6 %	1,5 %	1,8 %	17,4 %
tuntematon	määrä	1508,3	9,4	5,3	3,1	2,8	3,1	2,9	2,5	2,6	2,5	7,3	41,4
	%		0,6 %	0,3 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %	0,5 %	2,7 %
yhTEensä	määrä	2773,9	34,5	30,1	23,9	24,7	31,3	30,0	28,5	27,0	28,4	38,1	296,5
	%		1,2 %	1,1 %	0,9 %	0,9 %	1,1 %	1,1 %	1,0 %	1,0 %	1,0 %	1,4 %	10,7 %

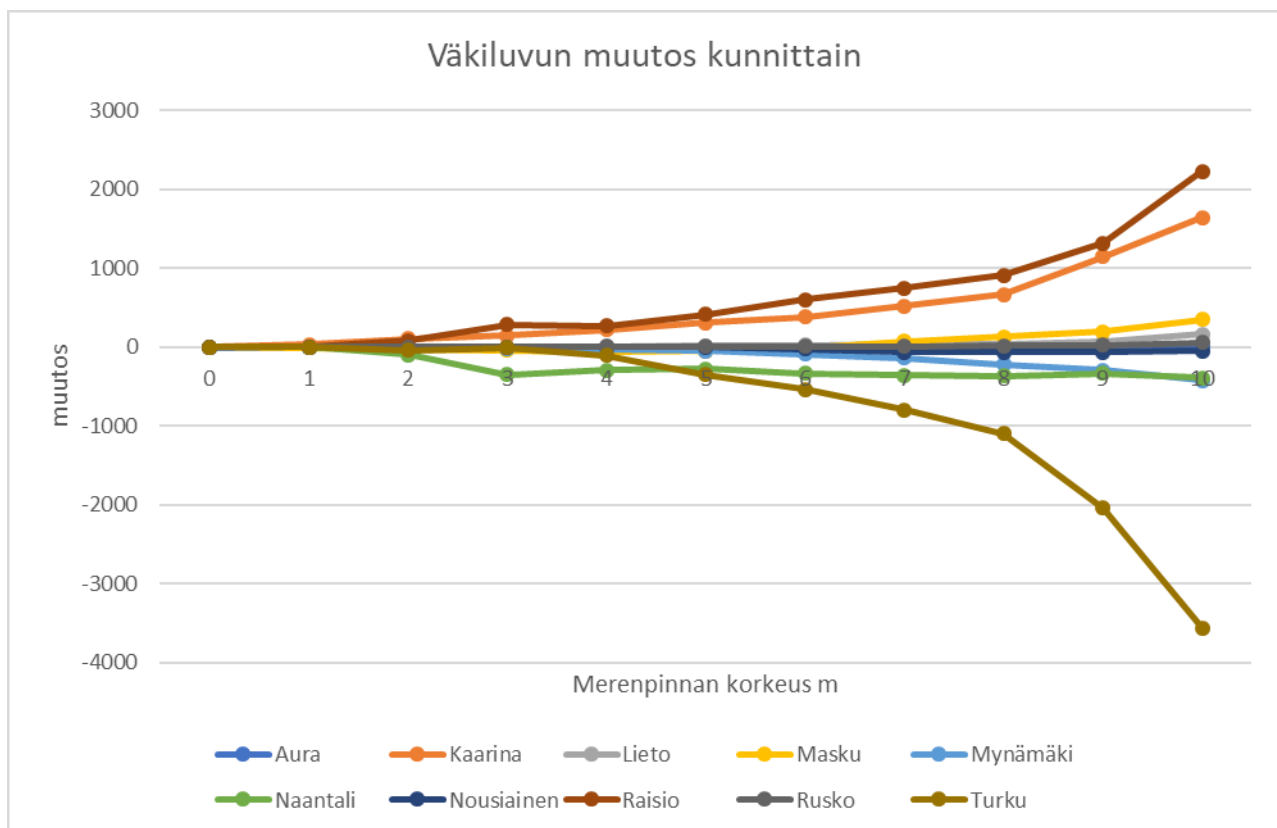
Taulukko 5 Merelle menetetty pinta-ala km²

Taulukossa 5 on koottuna montako neliökilometriä kukin kunta menettää merenpinnan noustessa metrin kerrallaan. Määrällisesti suurin menettäjä on Naantali ja prosentuaalisesti Mynämäki. Kuvassa 16 näkyy että Mynämäen edustalla on paljon alavaa aluetta, joka peittyy mereen ja siksi prosentti on niin suuri. Mynämäestä jää myös paljon tarkastelualueen ulkopuolelle.

6.3 Variaatio a

Tässä variaatiossa merenpinnan noustessa muutokset kuntien väkiluvuissa ovat pieniä. Kaaviossa (kuva 13) esitetään väkiluvun muutokset kunnittain. Turku menettää 3560 asukasta (-1,9% väkiluvusta), kun Raisio saa 2224 (+9,5%) ja Kaarina 1643 (+5%) asukasta. Pienin muutos on Aurassa, joka saa seitsemän asukasta (+0.2%) vasta kun merenpinta nousee yhdeksästä metristä kymmeneen metriin.

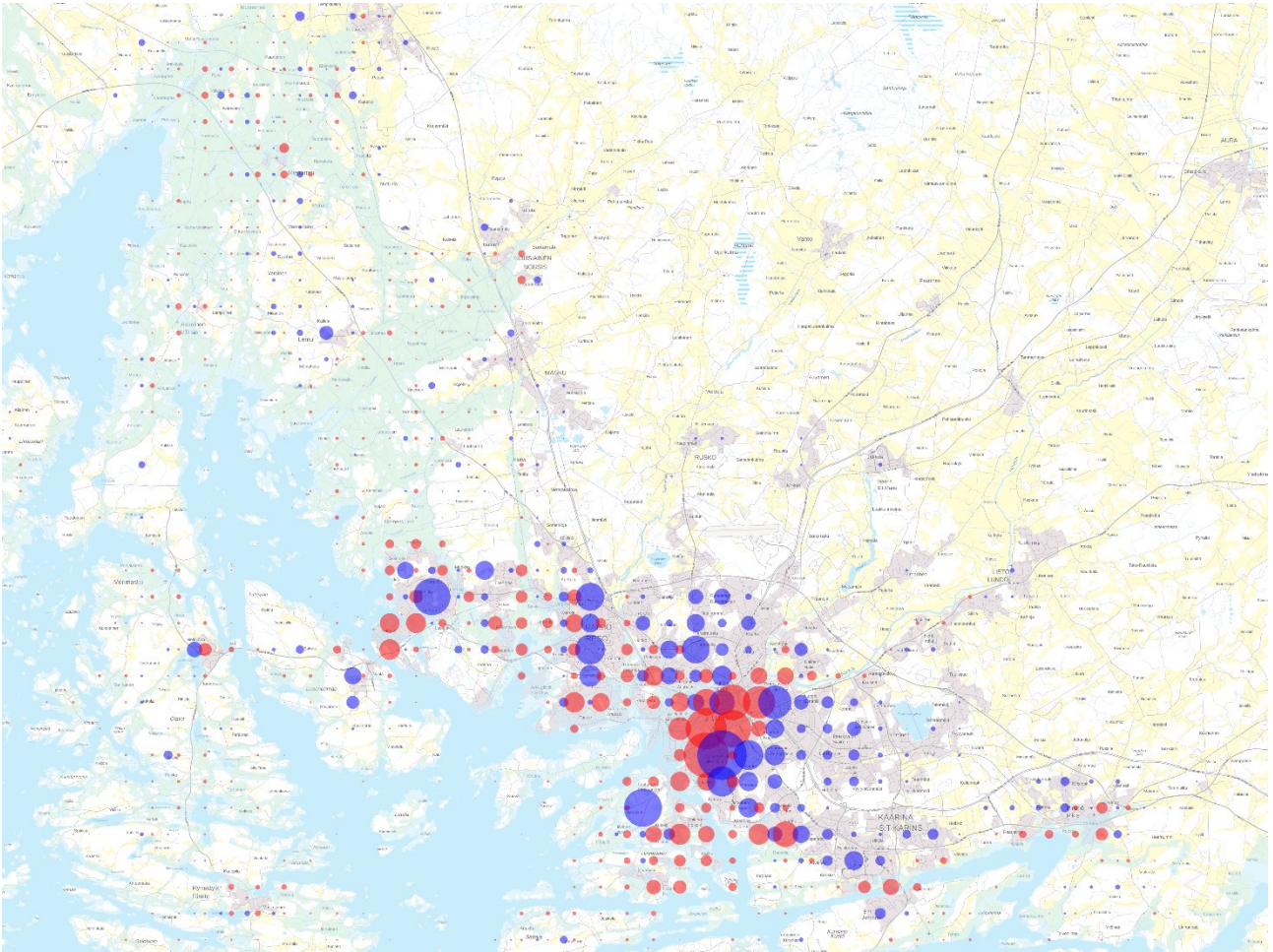
Väkilukujen muutos kymmenessä metrissä on yhteensä 8864 kun muuttaneita on kaikkiaan 59122. Muuttamisen täytyy tapahtua suurimmaksi osaksi kuntien sisällä ellei kunnista muuteta ristiin siten että muutot kumoavat toisensa eikä kuntien väkiluvut muutu



Kuva 15 Kaavion merenpinnan nousun vaikutuksista kuntien väkilukuun. Muutto tapahtuu rasterista rasteriin.

Kuvassa 16 on visualisoitu muuttoa esittämällä poisuuttajat punaisilla ympyröillä ja sisäänmuuttajat sinisillä ympyröillä. Ympyrän koko on suhteessa muuttajien määriin. Merelle menetetty alue näkyy kuvassa vihertävänä sävynä. Kuvasta löytyy joitakin rasteita, joissa on sekä tulijoita että lähtijöitä. Sisäänmuutto on tapahtunut ennen kuin kyseinen rasteri on menettänyt maata merelle. Suurin sisäänmuutto on 5612 ihmistä Vähä-Heikkilässä. Kuvan perusteella näyttäisi siltä, että muutto

tapahtuu ehkä läheisiin rastereihin. Suurimmat väestötiheydet Turun keskustassa yhdistettynä lyhyisiin muuttomatkoihin pitävät väestön Turun keskustassa tai Turun alueella.



Kuva 16 Muutto variaatiossa a. Siniset ympyrät kuvaavat sisäänmuuttoa ja punaiset poismuuttoa.

Taulukoon 6 on listattu muuttojen Manhattan etäisyys meren pinnan noustessa. Meren noustessa metrin kerrallaan on sarakkeissa muuttajien määrät eri etäisyyksillä. Meren pinnan noustessa esiintyy pidempiä muuttomatkoja, mutta muuttajien määrätkin kasvavat. Pelkästään tämän taulukon perusteella ei voi sanoa pitenevätkö muuttomatkat merenpinnan noustessa, vaikka määrät suurenevatkin.

Etäisyyden keskiarvo meren noustessa yhteen metriin on 2,1 kun meren noustessa yhdeksästä kymmeneen metriin keskiarvo on 3,1. Taulukossa 7 on taulukon 6 kymmenen ensimmäistä riviä prosentteina. Sen perusteella muuttoetäisyydet kasvavat merenpinnan noustessa. Kun meri nousee yhteen metriin 40% muutoista kohdistuu viereiseen rasteriin, vastaavasti meren noustessa yhdeksästä metristä kymmeneen metriin vain 18,9% muuttajista siirtyy viereiseen rasteriin.

		Merenpinnan korkeus m										
Manhattan etäisyys		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Kaikki yhteensä
1	1011	1232	1309	1715	2619	1766	1758	2321	1735	2202		17668
2	829	734	996	1494	1574	1396	1492	1656	1945	2789		14905
3	347	409	592	863	886	850	982	1043	1165	2070		9207
4	197	288	363	537	571	543	543	561	821	1362		5786
5	84	192	213	320	344	310	348	336	577	817		3541
6	36	145	147	206	231	214	219	216	394	564		2372
7	22	116	123	149	163	161	189	157	252	383		1715
8	12	84	87	101	125	100	118	106	146	304		1183
9	8	43	52	60	89	70	79	50	88	200		739
10	2	16	22	30	67	42	40	39	63	140		461
11		13	17	22	49	23	27	32	45	286		514
12		8	17	21	45	19	19	23	44	102		298
13		5	11	11	26	14	10	13	21	58		169
14		2	3	5	16	7	5	10	11	73		132
15			3	4	11	6	4	6	18	83		135
16			2	6	10	5	4	4	13	51		95
17				3	3	2	2	2	5	40		57
18				1	3	2	1	1	4	23		35
19				1	3				2	30		36
20					1				1	21		23
21										12		12
22									2	15		17
23									1	10		11
24										5		5
25										4		4
26										1		1
27										3		3
28										2		2
29										4		4
31										1		1
37										2		2
38										2		2
39										3		3
40										1		1
41										1		1
42										1		1
Kaikki yhteensä	2548	3287	3957	5549	6836	5530	5840	6576	7353	11665		59141

Taulukko 6 Muuton etäisyys meren noustessa

		Merenpinnan korkeus m									
etäisyys		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	39,7 %	37,5 %	33,1 %	30,9 %	38,3 %	31,9 %	30,1 %	35,3 %	23,6 %	18,9 %	
2	32,5 %	22,3 %	25,2 %	26,9 %	23,0 %	25,2 %	25,5 %	25,2 %	26,5 %	23,9 %	
3	13,6 %	12,4 %	15,0 %	15,6 %	13,0 %	15,4 %	16,8 %	15,9 %	15,8 %	17,7 %	
4	7,7 %	8,8 %	9,2 %	9,7 %	8,4 %	9,8 %	9,3 %	8,5 %	11,2 %	11,7 %	
5	3,3 %	5,8 %	5,4 %	5,8 %	5,0 %	5,6 %	6,0 %	5,1 %	7,8 %	7,0 %	
6	1,4 %	4,4 %	3,7 %	3,7 %	3,4 %	3,9 %	3,8 %	3,3 %	5,4 %	4,8 %	
7	0,9 %	3,5 %	3,1 %	2,7 %	2,4 %	2,9 %	3,2 %	2,4 %	3,4 %	3,3 %	
8	0,5 %	2,6 %	2,2 %	1,8 %	1,8 %	1,8 %	2,0 %	1,6 %	2,0 %	2,6 %	
9	0,3 %	1,3 %	1,3 %	1,1 %	1,3 %	1,3 %	1,4 %	0,8 %	1,2 %	1,7 %	
10	0,1 %	0,5 %	0,6 %	0,5 %	1,0 %	0,8 %	0,7 %	0,6 %	0,9 %	1,2 %	

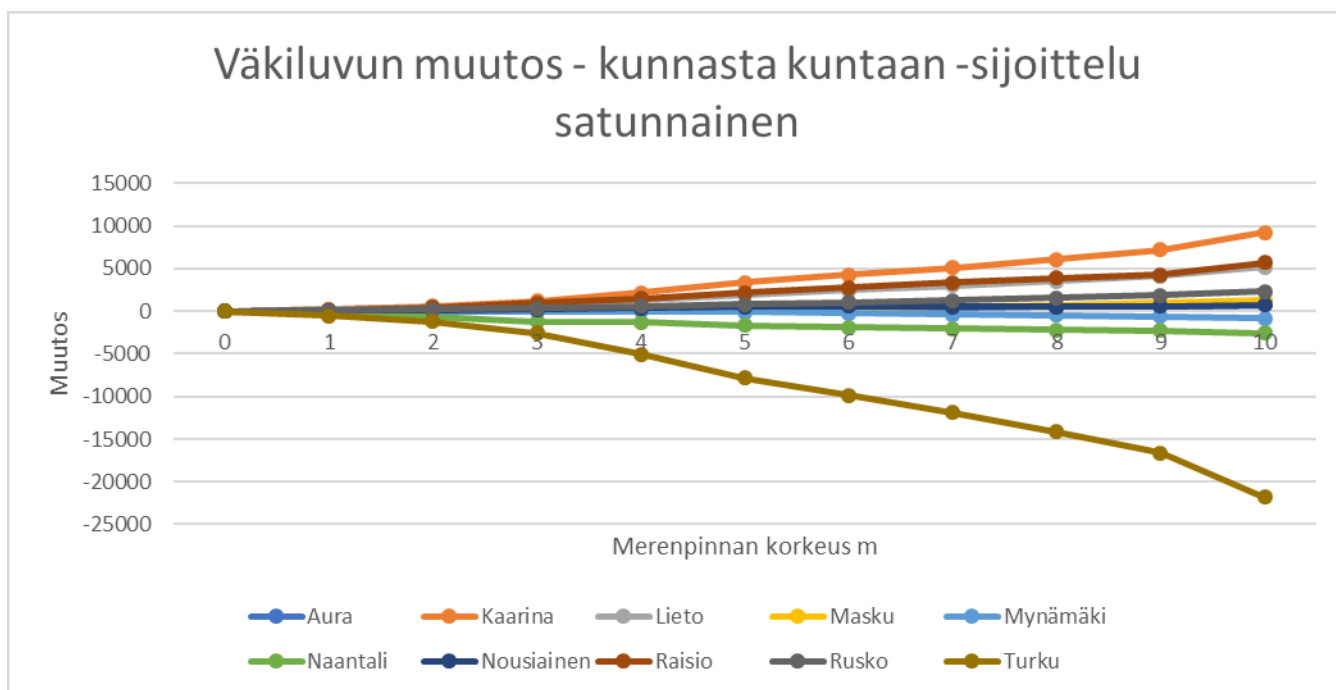
Taulukko 7 Muuton etäisyys meren noustessa prosentteina. Suhteelliset arvot on laskettu taulukon 6 arvoista.

Muuttomalli rasterista toiseen antoi varsin lyhyitä muuttoetäisyyksiä, eikä kuntien väkiluvut juurikaan muuttuneet, koska ihmiset muuttivat yleensä kunnan sisällä.

6.4 Variaatio b

Muuttoja on yhteensä noin 57050 kun merenpinta on noussut kymmenen metriä. Määrässä on pientä vaihtelua, koska muuttajan kohderasteri arvotaan ja jos se on rasteri, josta myöhemmin muutetaan pois se voi kasvattaa kokonaismuuton määrää. Kymmenellä ajolla keskiarvoksi saatiin 50756 ja keskihajonnaksi 26,6.

Muuttajia on noin 2000 vähemmän kuin variaatioissa a (59141) ja se johtuu juuri sijoittelusta. Rasterista rasteriin variaatioissa muuttoetäisyydet olivat pieniä, joten oli todennäköisempää, että muutto kohdistui rasteriin, josta joudutaan myöhemmin muuttamaan. Suurempi väkiluku rasterissa, suurentaa muuttajien määrää.



Kuva 17 Kaavion merenpinnan nousun vaikutuksista kuntien väkilukuun. Muutto tapahtuu kunnasta kuntaan ja sijoittelu rastereihin on satunnainen.

Väestöä menettäviä kuntia on kolme: Turku -21778 11,7% väkiluvusta, Naantali -2605 14,5% väkiluvusta ja Mynämäki -824 16,3% väkiluvusta. Määrällisesti eniten kasvavat Kaarina 9268 28,5% väkiluvusta, Raisio 5705 24,4% väkiluvusta ja Lieto 5139 29,2%. Auran väkiluku lisääntyi 711 hengellä, joka olisi 20,4% väkiluvusta.



Kuva 18 Merennousua ja muuttua visualisoiva kartta Mynämäen ja Nousiainen alueelta

Mynämäki on merenranta kunta, mutta sen keskusta ja asutus on pääosin kauempana. Kuvan 18 perusteella keskustan Manhattan etäisyys on 11 ruutua merestä (noin 10 km). Kuvassa 18 on visualisoitu Mynämäen aluetta ja merennousua. Tummempi vihreä on aluetta jonne meri nousisi, jos merenpinta nousisi 10m. Mynämäessä ja Nousiainenissa on matalaa maata ja meri nousisi useita kilometrejä sisämaahan.

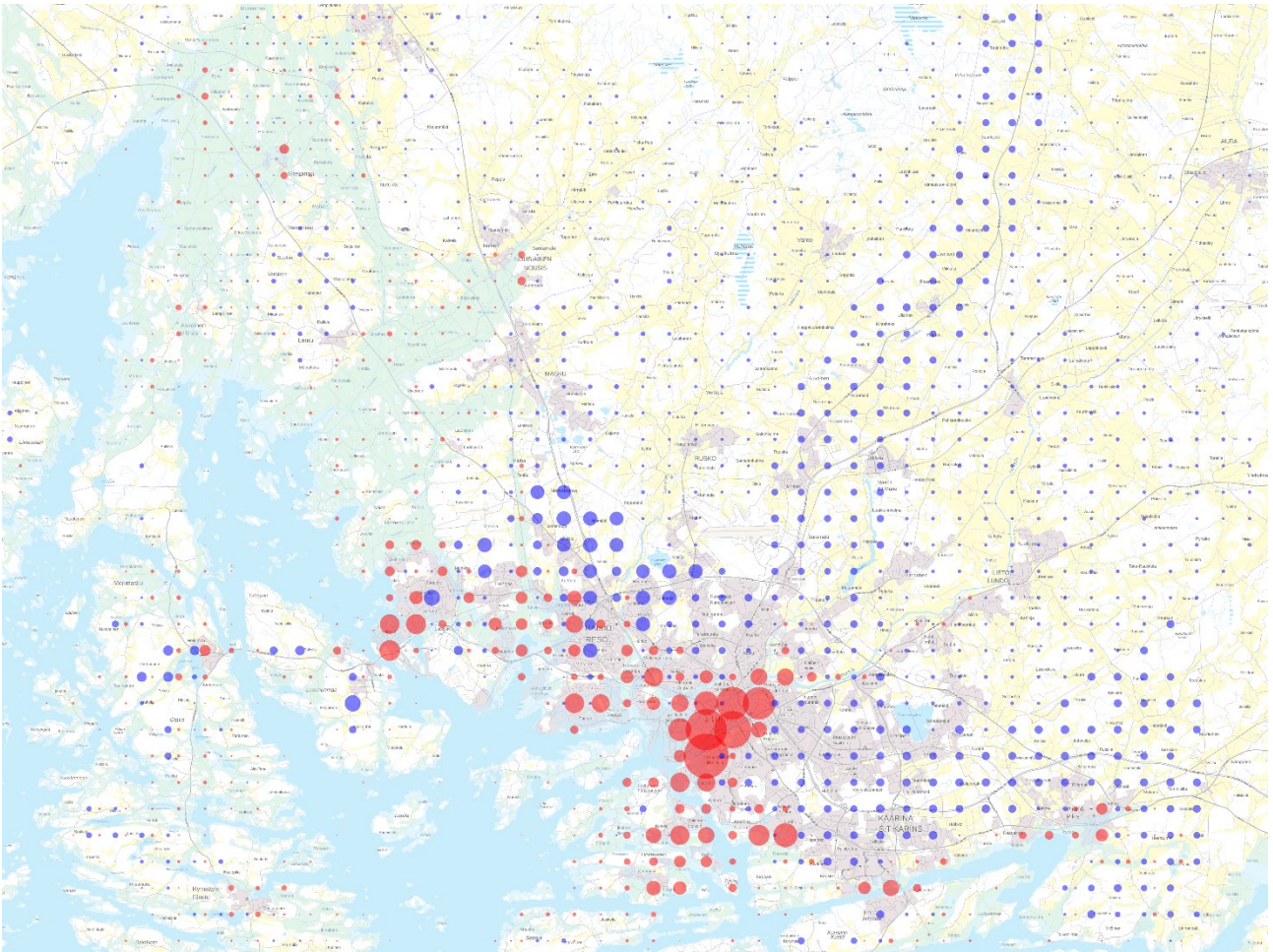
Kunta	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Aura	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66
Kaarina	146	107	107	103	101	95	93	90	84	80	68	65
Lieto	179	179	179	179	179	179	179	179	174	169	169	168
Masku	159	102	92	86	75	68	63	61	59	53	47	42
Mynämäki	98	72	66	59	56	52	44	36	29	21	14	10
Naantali	212	63	50	40	36	21	18	14	11	7	2	0
Nousiainen	117	117	117	115	111	105	94	92	91	87	86	84
Raisio	48	41	39	36	29	29	27	24	21	19	19	18
Rusko	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103
Turku	231	159	153	150	146	142	138	133	130	126	123	122
Kaikki yhteensä	1359	1009	972	937	902	860	825	798	768	731	697	678

Taulukko 8 Mahdolliset kohderasterit kunnittain merenpinnan noustessa metrin kerrallaan

Variaatio b pysähtyy, kun merenpinta nousee 11 metriin. Muuttajat sijoitellaan kunnan alueella oleviin rastereihin satunnaisesti. Naantalissa ei ole silloin enää yhtään rasteria, joka ei olisi menettänyt

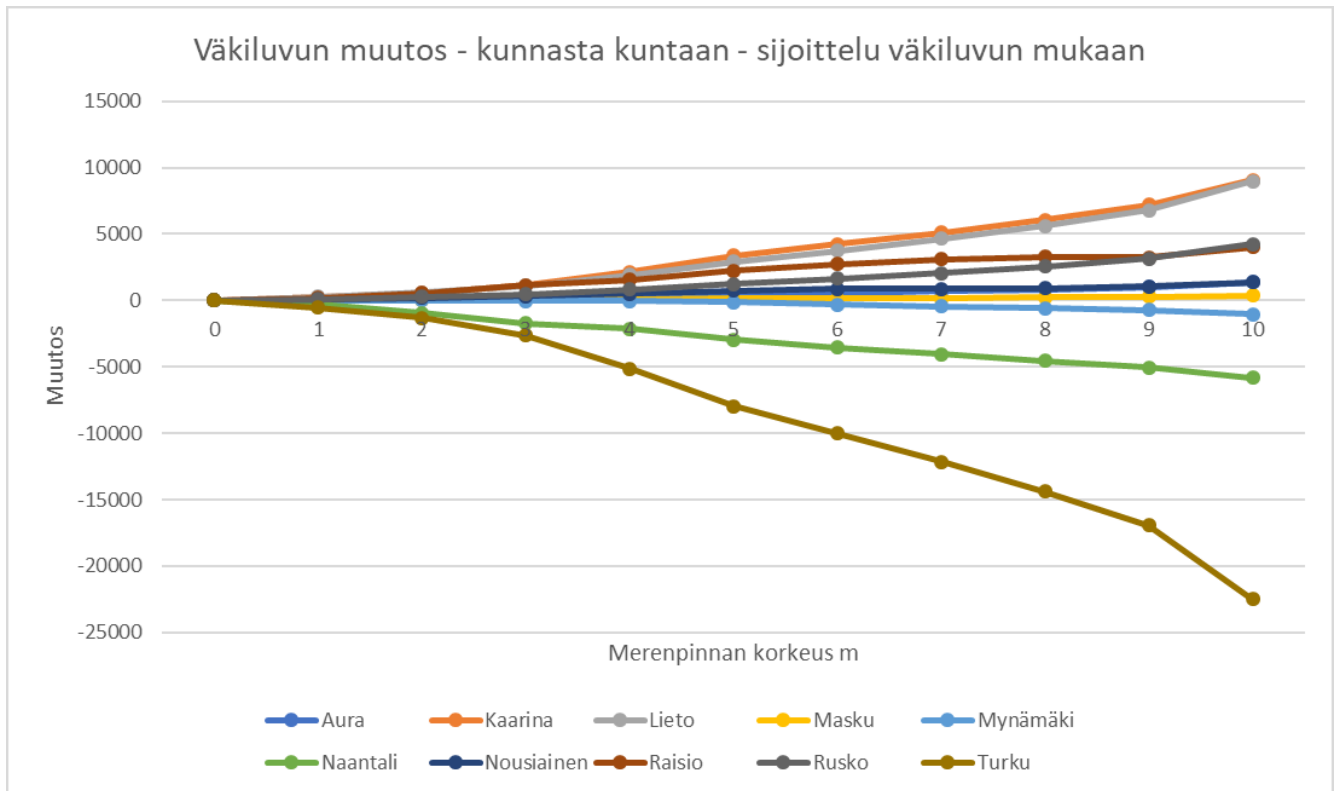
maata merelle eikä sinne muuttaneille voida enää arpoa kohderasteria. Taulukossa 8 on esitetty miten mahdollisten kohderasterien määrä kehittyi merenpinnan noustessa metri metriltä.

Kuvasta 19 näkee miten muuttajien satunnainen jakaminen vaikuttaa. Muuttajat jakautuvat melko tasaisesti yhden kunnan alueella. Hyvä esimerkki on Turun kiila Säköyläntietä pitkin ja hyvinkin saman kokoiset pallot sen varrella.



Kuva 19 Muutto variaatiossa b. Siniset ympyrät kuvaavat sisäänmuuttoa ja punaiset poismuuttoa.

6.5 variaatio c



Kuva 20 Kaavion merenpinnan nousun vaikutuksista kuntien väkilukuun. Muutto tapahtuu kunnasta kuntaan ja sijoittelu rastereihin on suhteutettu väkilukuihin.

Muuttajia on kaiken kaikkiaan 56515 (kymmenen ajon keskiarvo 56515 ja keskihajonta 13). Muuttomäärät pienenevät variaatiosta b viidellä sadalla. Muutos ei johdu satunnaisen sijoittelun korvaamisesta väkilukuun perustuvalla, sillä variaatio c satunnaisella sijoittelulla antaa 40-50 muuttajaa enemmän. Suurin muutos tulee muuton erilaisesta kohdistumisesta, kun muuttomallia ohjataan kohti kuntia, jotka eivät menetä alueita merelle.

Variaatiot b ja c ovat osin samankaltaisia (Taulukko 9) kuten muutos Turun, Kaarinan tai Mynämäen osalta. Väestöä menettävät kunnat ovat samoja. Maskuun ja Raisioon muutto vähenee ja se selittyikin juuri muuton kohdistumisesta kauempana merestä oleviin kuntiin Aura, Lieto ja Rusko, jotka kasvavat enemmän variaatiossa c.

	variaatio a	variaatio b	variaatio c
Aura	7	711	1363
Kaarina	1643	9264	9055
Lieto	159	5139	8961
Masku	347	1290	360
Mynämäki	-428	-824	-1032
Naantali	-390	-2605	-5825
Nousiainen	-54	750	1370
Raisio	2224	5705	3998
Rusko	52	2348	4243
Turku	-3560	-21778	-22493

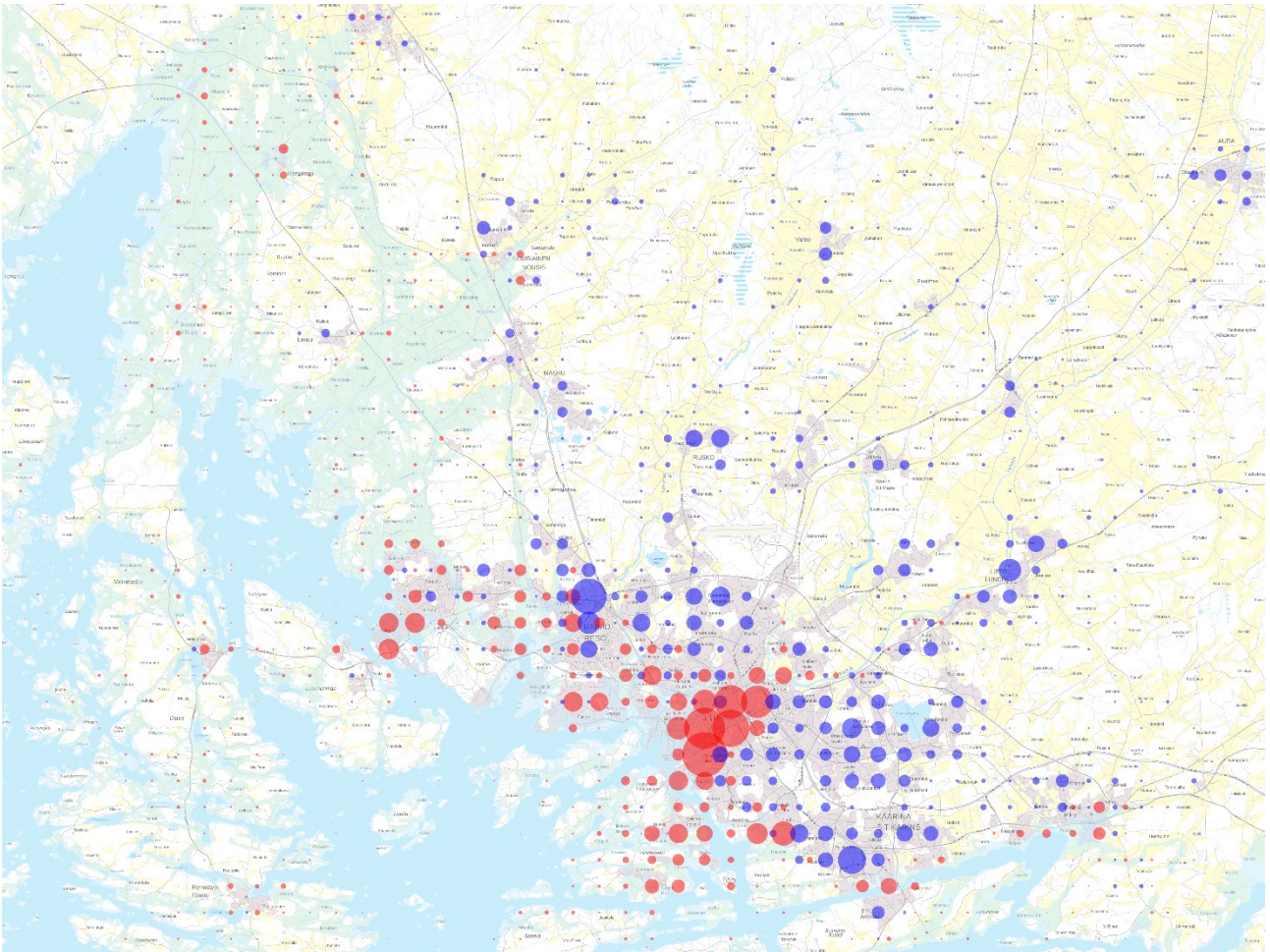
Taulukko 9 Kuntien väkiluvun muutos kymmenen metrin merennousun jälkeen eri variaatioissa.

Taulukkoon 10 on laskettu muuttomallissa käytetyt kertoimet meren noustessa. Kertoimet eivät vaikuta muuton määrään vaan ne vaikuttavat mihin kuntaan muutto suuntautuu. Kunnat, joilla kerroin säilyy suurena (Aura, Lieto, Nousiainen ja Rusko), sisäänmuutto kasvaa. Naantalin kerroin pienenee nopeasti ja sen väkiluku pienenee huomattavasti verrattuna variaatioon b. Tässäkin on kyse sisäänmuuton pienemisestä. Variaatioissa b sisäänmuutto on osin korvannut poismuuttoa ja variaatioissa c sen väheneminen näkyy väkiluvun vähenemisenä.

Kunta	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Aura	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Kaarina	1,00	0,73	0,73	0,71	0,69	0,65	0,64	0,62	0,58	0,55	0,47
Lieto	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,97	0,94	0,94
Masku	1,00	0,64	0,58	0,54	0,47	0,43	0,40	0,38	0,37	0,33	0,30
Mynämäki	1,00	0,73	0,67	0,60	0,57	0,53	0,45	0,37	0,30	0,21	0,14
Naantali	1,00	0,30	0,24	0,19	0,17	0,10	0,08	0,07	0,05	0,03	0,01
Nousiainen	1,00	1,00	1,00	0,98	0,95	0,90	0,80	0,79	0,78	0,74	0,74
Raisio	1,00	0,85	0,81	0,75	0,60	0,60	0,56	0,50	0,44	0,40	0,40
Rusko	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Turku	1,00	0,69	0,66	0,65	0,63	0,61	0,60	0,58	0,56	0,55	0,53

Taulukko 10 Variaation c:n muuttomallin kertoimet.

Kuvasta 21 näkee miten väkiluvun pohjalta satunnaistettu sijoittaminen on vaikuttanut muuttoon. Sisäänmuutto keskittyy asutuskeskuksiin (kartan harmaat alueet). Poismuutto on hyvin samanlainen kuin variaatioissa b, muuton tarkastelu on samanlainen, ainoastaan sijoittelussa on eroa. Silmämääräisesti eroa ei huomaa. Koska kokonaismuutossa ja kuntien väkilukujen muutoksissa on eroa niin numeroita tarkastelemalla eroja varmasti löytyisi.



Kuva 21 Muutto variaatiossa c. Siniset ympyrät kuvaavat sisäänmuuttoa ja punaiset poismuuttoa.

6.6 Uudelleenmuutto

Uudelleenmuutolla tarkoitetaan tässä ihmisten muuttamista paikkaan, josta nouseva meri pakottaa ihmisiä muuttamaan myöhemmin. Termi ei liity ihmisten toimintaan vaan simulaation toimintaan. Simulaatiossa tarkastellaan väkilukuja eikä ihmisiä. Kun paikkaan (kunta tai rasteri) kohdistuu sekä sisään- että ulosmuuttoa on kyse uudelleenmuuttamisesta.

Variaatioiden a, b ja c erot kokonaismuutossa johtuvat eroista uudelleenmuutossa. Variaatiossa a painottuivat lyhyet muutot viereisiin tai läheisiin rastereihin, jotka jäivät myöhemmin meren alle. Variaatiossa b muuton tarkastelun siirto kuntatasolle vähensi uudelleenmuuttoa. Muuttoa kohdistui myös kuntiin, joista tapahtui poismuuttoa. Variaatiossa c muutto pieneni kuntiin, joista oli poismuuttoa ja siten uudelleenmuutto ja kokonaismuutto pieneni. Variaatiossa c sijoittelu rastereihin väkiluvun perusteella pienentää myös uudelleenmuuttoa, mutta sen vaikutus on kertaluokkaa pienempi kuin muuton kohdistaminen kertoimella kuntiin, jotka eivät ole menettäneet maata merelle.

Ilman uudelleenmuuttoa muuttajia olisi 55 204. Voisi sanoa, että tämä määrä ihmisiä on kymmenen metrin merennousussa uhan alla. Se on 18.0% tarkastelualueen väestöstä. Tämän perusteella uudelleenmuuton osuus variaatiossa a olisi noin 3900, variaatiossa b noin 1800 ja variaatiossa c noin 1300.

6.7 Variaatioiden luonnehdinta

Variaatio a voisi kuvata purskauksittain tai hitaasti nousevana merenpintana. Kun ei tiedetä paljonko meri lopulta nousee eikä se ole koko ajan uhkana niin muuttoetäisyydet voivat olla lyhyitä. Kun meri taas myöhemmin nousee, joudutaan muuttamaan uudelleen.

Variaatio b voisi kuvata suunnitelmallista ja ohjattua muuttoa, jossa väestöä sijoitetaan tasaisesti maakuntaan.

Variaatio c voisi olla myös suunnitelmallista muuttoa, mutta nyt väestöä sijoitettaisiin asutuksen joukkoon. Asuinpaikkoja löytyy todennäköisemmin paikoista, joissa on jo asutusta. Variaatio c voisi kuvata myös muuttoa, kun merennousun uhka on paremmin tunnettu.

7 Yhteenveto

Jos Turun alueella merenpinta nousisi kymmenen metriä niin mistä ja minne ihmiset muuttaisivat? Tässä tutkimuksessa toteutettu simulaatio tutkii näitä kahta kysymystä.

Kysymykseen mistä vastauksena on, että Turun keskustasta, sekä muista merenrannan kaupunkialueilta (esimerkiksi kuva 21). Suuret väestötiheydet yhdistettynä matalaan rantaviivaan on suurin muuton lähde. Alavat maat tuo jonkin verran lisää muuttoa Mynämäen ja Maskun alueelta. Muuton lähteet ovat varsin loogisia, yllättävää oli pikemminkin miten matalille alueille seudulla on rakennettu.

Minne ei ole niin yksiselitteinen. Variaatio a:n rasterista rasteriin muutto antoi lyhyitä muuttoetäisyyksiä ja uudelleenmuuttoa, kun kohteena ollut rasteri jäi myöhemmin meren alle. Variaatio b vaihtoi muuton tarkastelun kunnasta kuntaan ja muuttoetäisyydet pitenevät ja maakunta täyttyi tasaisesti satunnaistetun sijoittelun takia. Variaatio c taas keskitti muuton keskuksiin.

Simulaatio sai lopullisen muotonsa vasta tulosten kertyessä. Variaation a:n lyhyet muutot ja väestön kertyminen Turkuun oli yllättävä, siksi variaatio b:ssä muuttomallin tarkastelutaso vaihdettiin 1km rasterista kuntaan. Muuttajien satunnainen sijoittelu variaatio b:ssä oli teknisesti helppo ja nopea kokeilu, jonka tulokset eivät olleet täysin tyydyttäviä. Variaatio c:ssä sijoittelu on toteutettu säteilymallin henkeen sopivalla tavalla ja tuloksena oli muuttojen kohdistuminen asutuskeskuksiin. Lisäksi variaatio c:tä on muutettu siten, että kunnat joissa on merelle maata menettäneitä rastereita ovat vähemmän houkuttelevia. Yhdessä kolme variaatiota antavat jo melko kattavan kuvan mahdollisesta muuton luonteesta. Voisi sanoa, että variaatiot sopisivat erilaisiin merennousun skenaarioihin.

Uudelleenmuutto luonnehtii käsitteenä hyvin variaatioiden eroja kokonaismuuton osalta. Se voisi olla myös kriteeri pakotetun muuttomallin hyvyydelle. Puhdas merennousu pakottaisi 55204 muuttua. Se on 18% tarkastelualueen väestöstä. Variaatiossa a kokonaismuutto on 59122, variaatiossa b noin 57050 ja variaatiossa c noin 56515.

Suurin puute simulaatiossa on väestömallin karkeus. Väestön levittäminen tasaisesti 1km rasterin maapinta-alalle aiheuttaa suurilla väestötiheyksillä poismuuttoa jo pienelläkin määrällä merelle menetettyjä 10m rastereita. Toisaalta 1km rastereihin, joissa on asumattomia korkeita kukkuloita jää ihmisiä. Ongelma tulee osin avointen aineistojen 1km rasterista ja siitä, että väestö simulaatiossa levitetään tasaisesti maa-alueelle. Muita aineistoja tutkimalla (esimerkiksi tarkemmissa kartoissa rakennukset on eroteltu) voisi olla mahdollista rajata aluetta, jolla väestö on. Väestön tarkempi

sijoittaminen rakennuksiin toisi tarkkuutta merenpinnan nousun aiheuttamaan muuttoon. Pinnannousu aiheuttaisi muuttoa vasta kun merenpinta olisi rakennuksilla eikä heti kun maanpintaa menetetään merelle. Vastaavasti rakennuksettomille kukkuloille tai saarille ei jäisi enää väestöä, kuten nykyisessä simulaatiossa.

Mitä on mahdollista tehdä tai tutkia avoimilla aineistoilla on ollut tämän tutkimuksen sivujuonne. Simulaation rakentaminen ja tulosten analysointi on tuonut tuntuman aineistoon, joka on taas mahdollistanut uusien asioiden rakentamisen siihen päälle, kuten vaikkapa variaatiot tai karttapohjan päälle lisätty data (esimerkiksi kuvat 18 tai 21). Henkilökohtaisesti iso oppimisen paikka oli Java Collections tietorakenteiden käyttö. Alkuun hankalilta ja kankeilta tuntuneet tietorakenteet olivat lopulta jatkuvassa käytössä ja moni simulaation toiminnallisuus nojaa niihin.

Tärkeimmät kehityskohteet simulaation osalta olisivat väestömallin tarkentaminen ja taustadatan (korkeusdata ja väestödata) keräämisen ja käsittelyn automatisointi. Tutkimuksellisenä kehityskohteena voisi olla muuttomallin varioiminen uudemman tutkimuksen pohjalta.

8 Lähteet

- Albert Thomas A., Slaaf Dick W. (1995): A rapid regional filling technique for complex binary images. *Computers & Graphics* Volume 19, Issue 4, July–August 1995, Pages 541-549.
- Dutton A. et al. (2015): Sea-level rise due to polar ice-sheet mass loss during past warm periods. *Science* 349, aaa4019
- Ilmatieteenlaitos (2020a): Vedenkorkeusennätykset Suomen rannikolla. [Verkkosivu][Viitattu 25.5.2020] Saatavilla: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/vedenkorkeusennatukset-suomen-rannikolla>
- Ilmatieteenlaitos (2020b): Teoreettinen keskivesi (MW) ja geodeettiset korkeusjärjestelmät Suomessa [Verkkosivu][Viitattu 2.6.2020] Saatavilla: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/keskivesitaulukot>
- IPCC (2013): *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Saatavilla: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_all_final.pdf
- IPCC (2014): *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. [viitattu 24.4.2020.] Saatavilla: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf
- Kumler Mark P., Goodchild Michael F. (1992): The population center of Canada – Just north of Toronto!?, s. 275–279. Teoksessa *Geographical snapshots of North America: commemorating the 27th Congress of the International Geographical Union and Assembly*. Guilford Press [Verkkójulkaisu][Viitattu 9.7.2020] Saatavilla: <http://www.geog.ucsb.edu/~good/papers/169.pdf>
- Lunkka, J. P. (2008): *Maapallon ilmastohistoria: kasvihuoneista jääkausiin*. Helsinki: Gaudeamus Helsinki University Press.
- Maanmittauslaitos: ETRS89 koordinaattijärjestelmä käyttöön. [Viitattu 9.7.2020] saatavilla: https://www.maanmittauslaitos.fi/sites/maanmittauslaitos.fi/files/old/ETRS89koordinaattijarjestelma_kayttoon.pdf
- NASA (2020) Sea level change; observations from space [verkkosivu] [viitattu 26.4.2020] <https://sealevel.nasa.gov/>
- NIST (2019): Manhattan distance [verkkosivu] [viitattu 6.7.2020] <https://xlinux.nist.gov/dads/HTML/manhattanDistance.html>
- Piela, Pasi 2019: Hauholla oltu keskipisteessä yli 20 vuotta. [Verkkosivu][Viitattu 9.7.2020] Saatavissa: <https://www.stat.fi/tietotrendit/blogit/2019/hauholla-oltu-keskipisteessa-yli-20-vuotta/?fbclid=IwAR31ibSzgNf1T5sCBZ1XuDFJkBREwuTpgZHmPyDt1a7heVFWejSpA-ptPC0>
- Poutanen, Markku: Maannousu [Verkkosivu][Viitattu 9.7.2020] Saatavilla: <https://www.maanmittauslaitos.fi/tutkimus/teematietoa/maannousu>

Simini Filippo, Gonzalez Marta C., Maritan Amos, Barabasi Albert-Laszlo (2012): A universal model for mobility and migration patterns. Nature 484, 96-100.

<https://doi.org/10.1038/nature10856>

Tilastokeskus (2019): Suomen tilastollinen vuosikirja 2019. Saatavissa:

<https://www.doria.fi/handle/10024/173580>

Zipf George Kingsley (1946): The P1P2/D Hypothesis: On the Intercity Movement of

Persons. American sociological review 11.6, 677–686. <https://doi.org/10.2307/2087063>