



Kalle Hotti

# 3D-kaupunkimallin hyödyntäminen hiilijalanjäljen arvioinnissa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Maanmittaustekniikka

Insinöörityö

25.4.2021

## Tiivistelmä

Tekijä:	Kalle Hotti
Otsikko:	3D-kaupunkimallin hyödyntäminen hiilijalanjäljen arvioinnissa
Sivumäärä:	52 sivua + 2 liitettä
Aika:	25.4.2021
Tutkinto:	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	maanmittaustekniikka
Ohjaajat:	lehtori Kaisa Kanerva arkkitehti Jussi Partanen yksikönpäällikkö Heikki Surakka

---

Insinööriyön aiheena oli 3D-kaupunkimallin hyödyntäminen aluesuunnittelun hiilijalanjäljen arvioinnissa. Työssä etsittiin mallinnukseen sopivat lähtöarvot ja laskentatavat, laadittiin arvioinnissa käytettävä laskentatapa ja toteutettiin sen ohjelmointi ArcGIS CityEngine -ohjelmistoon.

Lähteinä käytettiin ensisijaisesti tunnettujen ja luotettavien toimijoiden käyttämiä menetelmiä ja lukuja, jotka ovat yhtenäisiä Suomessa yleisimmin käytettyjen kasvihuonekaasupäästöjen arviointimenetelmien kanssa. Kokonaan uutena laskentana toteutettiin energiantuotannon aiheuttamien päästöjen arviointi asuinkerrosneliometriä kohden, tämäkin kyseisiin lähteisiin perustuen.

CityEngine-ohjelmistoon luotiin päästölaskentaa varten uusia laskentaominaisuuksia, joiden avulla käyttäjä voi tutkia rakentamisen, käytön ja ylläpidon päästövaikutuksia rakennusten ja alueiden suunnittelussa. Ohjelmistoon luotiin myös joukko luotettaviin lähteisiin perustuvia esimerkkiarvoja, joiden avulla erilaisten muuttujien päästövaikutusten arviointi on helppoa.

Laskennan koetuksessa luotiin rakennus- ja korttelimallit, joiden avulla laskennan toimintaa ja erilaisten päästöarvojen vaikutuksia rakennuksen kokonaispäästöihin tutkittiin. Laskenta todettiin toimivaksi hiilijalanjäljen laskentamenetelmäksi aluesuunnitteluun ja tarkkuudeltaan parasta saatavilla olevaa tietoa vastaavaksi.

Lopuksi käsiteltiin CityEnginen tarjoamia jatkumahdollisuuksia erilaisten päästöarviointisovellutusten toteuttamiseen, minkä lisäksi pohdittiin kaupunkimallinnuksessa toteutettavan päästöarvioinnin tarkoituksenmukaisuutta.

Avainsanat: ArcGIS, CityEngine, kasvihuonekaasupäästöt, päästölaskenta, kaupunkisuunnittelu, aluesuunnittelu

## Abstract

Author: Kalle Hotti  
Title: Utilization of a 3D City Model in the Estimation of Carbon Footprint  
Number of Pages: 52 pages + 2 appendices  
Date: 25 April 2021

Degree: Bachelor of Engineering  
Degree Programme: Land Surveying  
Instructors: Kaisa Kanerva, Lecturer  
Jussi Partanen, Architect  
Heikki Surakka, Head of Department

---

The subject of this thesis was the utilization of a 3D city model in estimating the carbon footprint of spatial planning. The work consisted of finding relevant source values and emission calculations, developing the finalized calculation used in the estimation, and programming these into ArcGIS CityEngine program.

The source material used was primarily supplied by known and trustworthy organizations and are in line with the nationally most commonly used calculation methods for greenhouse gases. A completely new method for calculating the CO<sub>2</sub> emissions per square meter was also introduced, based on the aforementioned source material.

New features were added to CityEngine program. These features can be used to study the emissions of construction, use, and maintenance in the process of designing buildings and areas. A number of values from trusted sources were also added into the program, by which the user can easily assess the emission impact of a multitude of variables.

The finished calculation was benchmarked by creating 3D models for a building and a city block, and studying the impact of changing the emission variables for them. The program was found to be suitable for spatial planning purposes and as accurate as the best available information allows.

The future applications for different kinds of emission and climate effect estimations in CityEngine were also considered, as was the practicality of using CityEngine in such way.

Keywords: ArcGIS, CityEngine, Greenhouse Gases, Emission calculation, city planning, spatial planning

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Kaupunkisuunnittelu ja vaikutusten arviointi	2
2.1	Kaupunkisuunnittelun kehittyminen	2
2.2	Kaavoitusprosessi Suomessa	2
3	Kolmiulotteinen kaupunkimalli	4
3.1	Arkkitehtuurimallit	4
3.2	Tietokoneavusteinen suunnittelu	5
3.3	Espoon kaupunkimalli ja CityEngine	6
4	Paikkatieto ja paikkatietojärjestelmät	8
4.1	Paikkatieto	8
4.2	Paikkatietojärjestelmä	8
4.3	Paikkatiedon sovellukset ja paikkatietoanalyysi	9
5	Rakentamisen hiilijalanjälki	13
5.1	Rakentamisvaiheen kasvihuonekaasupäästöt	14
5.2	Käytön aikaiset kasvihuonekaasupäästöt	15
5.2.1	Käytön energiatehokkuus	15
5.2.2	Energiantuotannon energiatehokkuus	16
6	ArcGIS CityEngine	17
6.1	Esri ja ArcGIS-tuoteperhe	17
6.2	CityEnginen toiminta	18
6.2.1	Mallinnuksen vaiheet	18
6.2.2	Proseduurit	20
6.2.3	CGA-ohjelmointikielen toiminta	22
6.2.4	CityEngine Dashboard	24
7	Päästölaskentatavan muodostaminen	25
7.1	Aiheen rajaaminen ja tavoitteiden määrittäminen	25
7.2	Lähtötietojen määrittäminen	25

7.2.1	Rakentamisen aikaisten päästöjen arviointi	26
7.2.2	Käytön aikaisten päästöjen arviointi	27
7.3	Käytettävät laskukaavat	28
8	Päästölaskenta CityEnginessä	30
8.1	Laskennan toteuttaminen CGA-kielellä	30
8.1.1	Pääsääntöön (Rule File) tehdyt lisäykset	30
8.1.2	Luodut alisäännöt	32
8.2	Laskennan toimivuus	33
8.2.1	Laskennan koestus yksittäisellä kerrostalolla	33
8.2.2	Laskennan koestus korttelilla	35
8.3	Tulosten havainnollistaminen ja tutkimus Dashboardilla	38
8.4	Laskennan arviointi	41
9	Laskentamallin käyttömahdollisuudet ja jatkokehittäminen	43
9.1	CityEnginen käytettävyys kasvihuonekaasupäästöjen arvioinnissa	43
9.2	Ilmastovaikutuksen arvioinnin jatkokehitys CityEnginen	44
9.2.1	Saavutettavuuslaskennat	44
9.2.2	Hiilivarastot	46
9.2.3	Muun rakentamisen huomioiminen	46
9.3	Laskennan käytettävyys jatkossa	47
10	Päätelmät	48
	Lähteet	49
	Liitteet	
	Liite 1: Pääsäännön koodirivit	
	Liite 2: Käyttöohje KHK-päästöjen arviointityökaluun CityEnginessä	

## **Alkusanat**

Haluan kiittää opinnäytetyöni toimeksiantajia Espoon kaupungin Kaupunkisuunnittelukeskusta ja Ramboll Finlandia mahdollisuudesta suorittaa tämä työ, sekä Esri Finlandia mainion CityEngine-ohjelman käytön mahdollistamisesta opinnäytetyön suorittamiseen.

Erityisesti tahdon kiittää Jussi Partasta, Heikki Surakkaa ja Anna-Maria Rauhalaa ohjauksestanne, neuvoistanne, ideasparrauksestanne ja avustanne läpi opinnäytetyöprosessin.

## Lyhenteet

3D	Three dimensional. Kolmiulotteinen.
CAD	Computer Aided Design. Eriyisen ohjelmiston käyttö suunnittelu-työssä.
CGA	Computer-generated Architecture. ArcGIS CityEngine -ohjelmis-tossa käytettävä ohjelmointikieli.
GNSS	Global Navigation Satellite System, maailmanlaajuinen satelliittipai-kannusjärjestelmä. Esim. GPS, GLONASS ja Galileo
GIS	Geographic Information System. Paikkatietojärjestelmä
VTT	Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, aiemmin Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus
CO <sub>2</sub>	Hiilidioksidi.
kWh	Kilowattitunti
MWh	Megawattitunti
Esri	Environmental Systems Research Institute. Yhdysvaltalainen paik-katietojärjestelmien tuottaja.

# 1 Johdanto

Opinnäytetyön tavoitteena on tutkia ArcGIS CityEngine -ohjelmiston käyttöä aluesuunnittelun kasvihuonekaasupäästöjen arvioinnissa. Tavoitteeseen pyritään luomalla CityEngine-ohjelmistoon joukko parametreja, joiden avulla käyttäjä voi uskottavasti mallintaa suunnitellun rakentamisen aiheuttamia kasvihuonekaasupäästöjä, sekä pohtimalla hiilijalanjäljen laskennan jatkokehityksen tarvetta ja mahdollisuuksia. Työ jakautuu neljään eri vaiheeseen, joita toteutettiin myös osin samanaikaisesti: lähtötietojen keräämiseen ja analysointiin, parametriikkaan, vertailuanalyysiin sekä pohdintaan ja raportointiin.

Opinnäytetyön edetessä työn tekijän ja tilaajan välillä pidettiin säännöllisesti yhteyttä, minkä perusteella työn toteutusta mukautettiin.

Opinnäytetyö toteutettiin Espoon kaupungin ja Ramboll Finland Oy:n toimeksiantosta. Väkiluvultaan Suomen toiseksi suurin kaupunki Espoo tunnetaan korkean teknologian ja yritysten pääkonttoreiden kaupunkina sekä Aalto-yliopiston Otaniemen kampuksen kotina. (1)

Ramboll on kansainvälinen suunnittelu- ja konsulttialan yritys, jolla on kansainvälisesti 16 000 työntekijää. Suomessa Ramboll Finland Oy työllistää 2 500 asiantuntijaa. Rambollin erityisalaa ovat kaupunkien, infrastruktuurin, liikenteen, ympäristön ja rakennusten suunnittelu, rakennuttaminen, rakentaminen sekä ylläpito. (2)



## 2 Kaupunkisuunnittelu ja vaikutusten arviointi

### 2.1 Kaupunkisuunnittelun kehittyminen

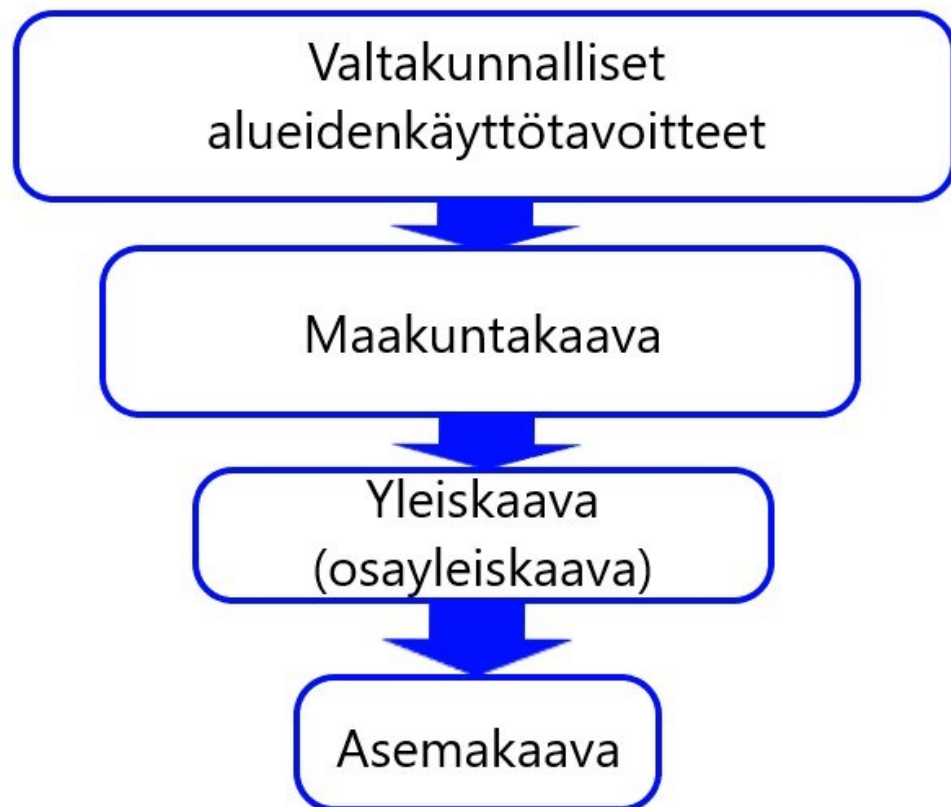
Varhaisimmat kaupungit muodostuivat orgaanisesti ympäristöltään suotuisiin paikkoihin, esimerkiksi jokien varsiin tai helposti puolustettaville kukkuloille. Kaupunkien kasvaessa myös suunnittelun tarve kasvoi, ja maanmittaustaidon kehittyminen mahdollisti suorakulmaisen ruutukaavan synnyn. (3)

Kaupunkisuunnittelu elää vahvasti ajassa. Asumisen, liikkumisen ja palveluiden kehitys on muovannut kaupungeja läpi aikojen. Yhteiskunnassa tapahtuvat arvomuutokset heijastuvat kaupunkisuunnitteluun ja sen painotuksiin. Nykyään, liki 5 000 vuotta ensimmäisten ruutukaavojen jälkeen, ilmastovaikutusten arviointi on kiinteä osa kaupunkisuunnittelua. (3; 4)

Kaupungistumisen myötä tarve uudisrakentamiselle kasvaa. Yhdyskuntien kokonaisvaltainen ja pitkäjänteinen kehittäminen on kestävän rakentamisen ja hyvinvoivan yhteiskunnan perusta. Kestävässä kaupunkisuunnittelussa rakentamisen energiatehokkuus ja energiantuotannon ratkaisut ovat yhä tärkeämpiä. (4)

### 2.2 Kaavoitusprosessi Suomessa

Suomessa maankäytön suunnittelun ohjaus perustuu maankäyttö- ja rakennuslakiin, jossa säädetään muun muassa kaavoituksesta, kuntien rakennusjärjestyksestä, tonttijaosta, rakentamisen luvista ja rakennusvalvonnasta sekä rakentamiselle asetettavista yleisistä vaatimuksista. Kaavoitusprosessin tarkemmat tasot perustuvat aina aluetta koskeviin, yleispiirteisempiin kaavoitustasoihin, eli asemakaavaa ohjaa yleiskaava, jota ohjaa maakuntakaava, jota ohjaavat valtakunnalliset alueidenkäyttötavoitteet (kuva 1). Lisäksi maankäyttöön vaikutetaan esimerkiksi erilaisilla alue- ja kuntastrategioilla, kunnan maapolitiikalla ja rakennusjärjestyksellä. (5; 6)



Kuva 1. Kaavahierarkia. Kaaviossa ylempänä esitetty kaavataso ohjaa alempia kaavoja, ja vastaavasti alempi kaavataso syrjäyttää ylempänsä.

Maankäyttö- ja rakennuslaki edellyttää kaavan vaikutusten arviointia jokaisella kaavatasolla. Tässä opinnäytetyössä tutkittavat menetelmät antavat tietoa ilmastovaikutuksista erityisesti yleiskaavan ja asemakaavan tasoilla tapahtuvan suunnittelutyön tueksi, eivät niinkään olemassa olevan kaupunkirakenteen analysointiin. (6; 7)

### 3 Kolmiulotteinen kaupunkimalli

#### 3.1 Arkkitehtuurimallit

Arkkitehtuurimalli on fyysinen, mittakaavatarkka pienoismalli suunnittelukohteesta. Mallia käytetään useimmiten suunnittelukonseptien tutkimiseen tai esittelyyn. Muototarkkuudeltaan malli voi olla suuntaa antava tai hyvinkin yksityiskohtainen. Arkkitehtuurimalli voi laajuudeltaan kattaa kaiken rakennuksen osasta aina kokonaiseen kaupunkiin. (8)

Varhaisimmat arkkitehtuurimallit ovat esihistoriallisia, mutta niiden käyttötarkoitukset ovat poikenneet myöhemmistä. Niin Egyptin, Kiinan kuin Väli-Amerikan muinaiskulttuureissa hyvinkin tarkkoja pienoismalleja on sijoitettu merkittävien henkilöiden hautoihin helpottamaan vainajan kuolemanjälkeistä elämää. Renessanssin aikana arkkitehdit alkoivat käyttää pienoismalleja nykyisen kaltaisesti ideointiin, tutkimukseen ja projektin esittelyyn tilaajalle. Arkkitehtuurimallit pysyvät samankaltaisessa käytössä aina tietokoneavusteisen suunnittelun yleistymiseen saakka (kuva 2). (9; 10; 11)



Kuva 2. Arkkitehti Eero Saarinen ja St. Louis Archin arkkitehtuurimalli. Kuva: iDesign Wiki

### 3.2 Tietokoneavusteinen suunnittelu

Tietokoneavusteinen suunnittelu eli CAD (Computer Aided Design) on tietokoneohjelmiston käyttöä suunnittelutyön apuna. CAD on yleisessä käytössä tuotteiden suunnittelussa, kehityksessä ja optimoinnissa kaikenlaisessa suunnittelutyössä arkkitehtuurista mikrosiruihin. (12)

Ensimmäiset kaksiulotteiset CAD-ohjelmistot kehitettiin jo 1960-luvulla, mutta tietokoneavusteinen suunnittelu yleistyi vasta vuonna 1982 julkaistun AutoCAD-ohjelmiston myötä. 1990-luvulla CAD-suunnittelu syrjäytti käsin piirtämisen useimmilla teollisuudenaloilla. (12; 13.)

Nykyaikaiset CAD-ohjelmistot ovat monipuolisia ja usein erikoistuneet tietyn ammatin tarpeisiin. Yleiskäyttöisen AutoCADin rinnalle syntyi jo 1980-luvulla esimerkiksi arkkitehtuurisuunnitteluun kehitetty ArchiCAD, julkishallinnossa yleinen MicroStation sekä kotimaisen Kymdata Oy:n (nykyisin CADMATIC Oy) kehittämä CADS-tuoteperhe, johon kuuluu yleisohjelman lisäksi alakohtaiset ohjelmat muun muassa alumiini- ja teräsprofiilivalmisteisiin, sähkö- ja automaatio-suunnitteluun, prosessikaavioihin ja kylmätekniikkaan. Yhdyskuntasuunnittelukäyttöön on tarjolla myös kotimaisen Symetri Oy:n Fiksu Land Use, joka toimii AutoCADin lisäosana. (14; 15; 16; 17.)

Suunnittelutyön kannalta CAD-ohjelmistot tarjoavat lukuisia etuja perinteiseen, käsin tapahtuvaan piirtämiseen verrattuna. Ohjelmistot piirtävät aina täydellisen tarkasti, suunnittelua on helppoa muuttaa kesken työskentelyn ja kolmiulotteisten kohteiden suunnittelu tapahtuu lukitun perspektiivin sijaan aidosti kolmiulotteisena. Useimmissa ohjelmissa suunnittelukohteille on mahdollista antaa myös erilaisia ominaisuuksia: voidaan määritellä esimerkiksi kohteen värityys, pintamateriaali tai lujuusarvo. (18; 19.)

Simulointi on monilla aloilla tärkeä CAD-ohjelmistojen ominaisuus. Niillä voidaan tutkia esimerkiksi käyttökohteen dynaamisten tai kemiallisten ilmiöiden vaikutusta suunnittelukohteeseen, ilmamassojen liikettä suunnitellussa ilmastointikanavassa tai erilaisten sähköjärjestelmien ja virtapiirien toimintaa. Teollista tuotetta suunnitellessa ohjelmistoilla voidaan tutkia esimerkiksi tuotteen materiaalivalintojen ja muodon vaikutuksia tuotannon tehokkuuden ja taloudellisuuden kannalta. (19)

### 3.3 Espoon kaupunkimalli ja CityEngine

Espoon kaupunkisuunnittelukeskus tuottaa älykästä ja ajantasaista kaupunkitietomallia kaupunkirakentamisen, -suunnittelun ja -visualisoinnin tarpeisiin. Kaupunkimalli toimii suunnittelun lähtötietomallina tehokkaamman suunnittelun ja päätöksenteon mahdollistamiseksi. Tiedoiltaan rikas ja monipuolinen kaupunki-

tietomalli mahdollistaa monipuoliset analyysit kaupunkirakenteesta ja infrastruktuurista. Rajapintapalvelussa jaettu ajantasainen kaupunkimalli on muidenkin tahojen kuin kaupungin avoimessa käytössä uusien innovaatioiden ja ratkaisuiden mahdollistamiseksi. (20)

Espoon kaupunkisuunnittelukeskus hyödyntää mallia sovittamalla siihen uudisrakentamisen tarkasteluita, joita tuotetaan mm. CityEngine -ohjelmistolla. Yleiskaavayksikkö tuottaa vuosittain useita maankäyttötarkasteluja kasvavan kaupungin yleiskaavatasoisten suunnitelmien visualisoinnin (kuva 3) ja vaikutusten arvioinnin tueksi. (20; 21.)



Kuva 3. Uusi Kiviruukin alue upotettuna Espoon kaupunkimalliin. Kuva: Espoon kaupunkisuunnittelukeskus 2020.

## 4 Paikkatieto ja paikkatietojärjestelmät

### 4.1 Paikkatieto

Paikkatieto on tietoa mistä tahansa kohteesta, jonka sijainti tunnetaan; sillä on siis sijainti ja ominaisuus. Paikkatiedon visuaalinen esitys on kartta. Paikkatieto voi olla paikantavaa (osoite, koordinaatit), luokittelevaa (kaupunki, meri, vuori), määrällistä (korkeus) tai kuvailevaa (kohteen väri). Sähköinen paikkatieto esitetään joko vektorimuodossa pisteinä, viivoina tai viivojen rajaamina alueina eli polygoneina, tai rasterimuodossa säännöllisinä ja tasasuuruksina ruutuina eli pikseleinä. (22, s. 23; 15.)

Vektorimuotoinen paikkatietoaineisto kuvaa kohteet pikseleiden sijaan pisteinä, viivoina tai alueina. Vektorimuotoinen aineisto on taulukko, jossa kullakin kohteella on sijainti- ja ominaisuustiedot. Karttakuvaksi vektorimuotoinen paikkatieto visualisoidaan paikkatieto-ohjelmalla. Vektorimuotoisessa aineistossa yksittäisen kohteen sijaintia ja ominaisuustietoa voidaan muokata, minkä lisäksi kohteiden ominaisuustietoja voidaan etsiä paikkatietokannasta. Vektorimuotoista paikkatietoa ovat esimerkiksi takymetrillä tai GNSS-laitteistolla mitatut piste-kohteet sekä Google Mapsin ikoni- ja reittiviivakohteet. (23)

Rasteriaineistot ovat yleensä miljoonien pisteiden muodostamia kuvia, jossa pikselin koko määrittää aineiston tarkkuuden eli resoluution ja joissa esimerkiksi pikselin väri tai sävy ilmentää ominaisuustietoa. Kohteiden ominaisuustietojen määrä on tämän esitystavan vuoksi rajallinen. Rasterimuotoinen paikkatieto voi olla esimerkiksi ilma- tai satelliittikuva tai tietokoneelle skannattu paperikartta. (23)

### 4.2 Paikkatietojärjestelmä

Paikkatietojärjestelmä eli GIS on mikä tahansa järjestelmä, jolla tallennetaan, hallitaan, analysoidaan tai esitetään paikkatietoa. Järjestelmä koostuu laitteis-

toista, ohjelmistoista, paikkatietoaineistoista, käyttäjistä ja käytänteistä. Useimmiten paikkatietojärjestelmä koostuu päätelaitteista (tietokone, puhelin, mittalaitteen tallennin), käytettävästä ohjelmistosta, paikkatietoaineistosta sekä käyttäjästä. Yksinkertaisimmillaan paikkatietojärjestelmä voi kuitenkin koostua esimerkiksi käyttäjästä, mittanauhasta sekä kynästä ja vihkosta. (22, s. 26; 23.)

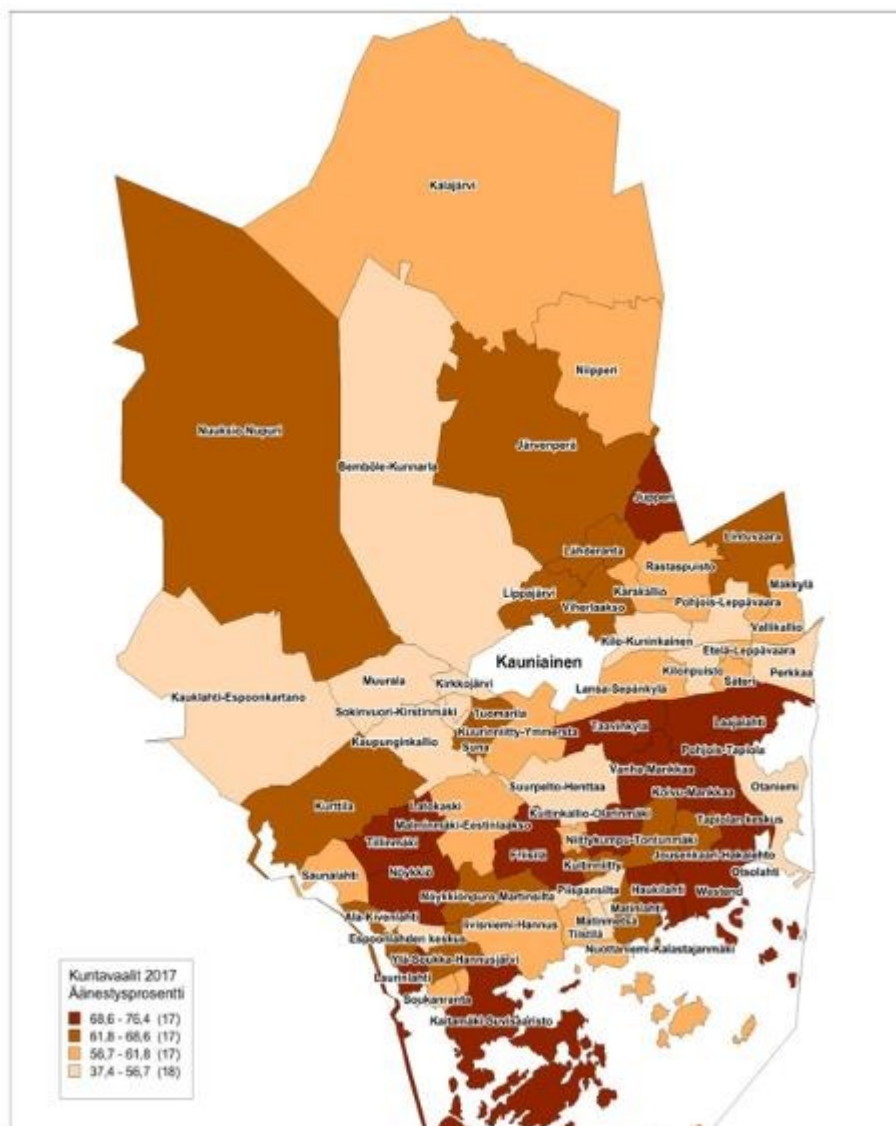
### 4.3 Paikkatiedon sovellukset ja paikkatietoanalyysi

Paikkatietoa käytetään monenlaisten ilmiöiden seuraamiseen ja kuvaamiseen. Sitä hyödynnetään tutkimuksessa ja suunnittelussa, joiden lisäksi älypuhelimet, navigaattorit ja muut arkiset paikannuslaitteet ovat tuoneet paikkatiedon vahvasti myös ihmisten arkeen. Lähintä sushiravintolaa hakiessaan käyttäjä hyödyntää laitteensa paikannuksen lisäksi myös palveluntarjoajan paikkatietoaineistoa, johon ravintolat sijainteineen on tallennettu. Autonavigoinnin kohdalla korostuu tarve paikkatietoaineiston ajantasaisuuteen: matkanteko on sujuvampaa, kun käytössä on tieto mahdollisista tietöistä tai ruuhkista. (23; 24)

Paikkatietoanalyysillä tarkoitetaan paikkatietoaineistojen tutkimista sekä hyödyntämistä uuden tiedon tuottamisessa. Erilaisia tietoja voidaan hakea, luokitella, yleistää ja yhdistellä, tutkia kohteiden alueellisia päällekkäisyyksiä ja yhteyksiä sekä visualisoida tuotettua tietoa. (24)

Paikkatietoanalyysit voidaan jakaa kyselyihin, visuaalisiin analyysihin ja laskennallisiin analyysihin. Kyselyllä voidaan kerätä tutkittavasta aiheesta sellaista käyttäjien kokemukseräistä tietoa, jota ei muilla tavoin helposti voi selvittää. Visuaalisessa analyysissä (kuva 4) tutkitaan päällekkäisten aineistojen muodostamaa karttakuvaa. Kartalle voidaan sijoittaa vertailtavaksi esimerkiksi pikaruokaravintoloiden sijainnit sekä sydän- ja verisuonisairauksiin menehtyneiden ihmisten osoitteet, ja tehdä näin muodostuneen karttakuvan pohjalta päätelmiä.

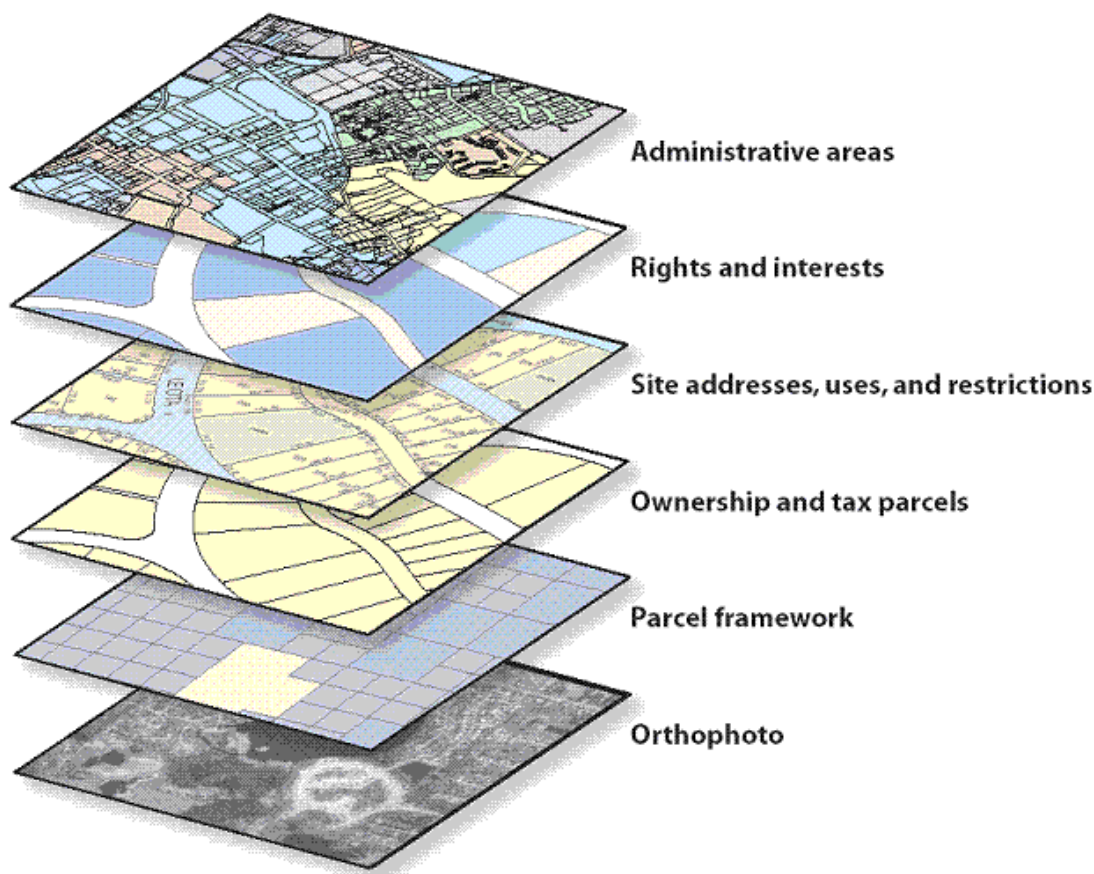




Kuva 4. Äänestysaktiivisuus äänestysalueittain Espoossa v. 2017. Visuaalisessa paikkatietoanalyysissä numeerisesta datasta voidaan muodostaa helposti luettava karttakuva. (Kuva: Espoon kaupunki, 2017)

Laskennalliset paikkatietoanalyysit perustuvat paikkatieto-ohjelmistoissa suoritettaviin tehtäviin. Tavallisimpia laskennallisia analyysejä ovat päällekkäisanalyysit, yhdistävyysanalyysit sekä naapuruusanalyysit.

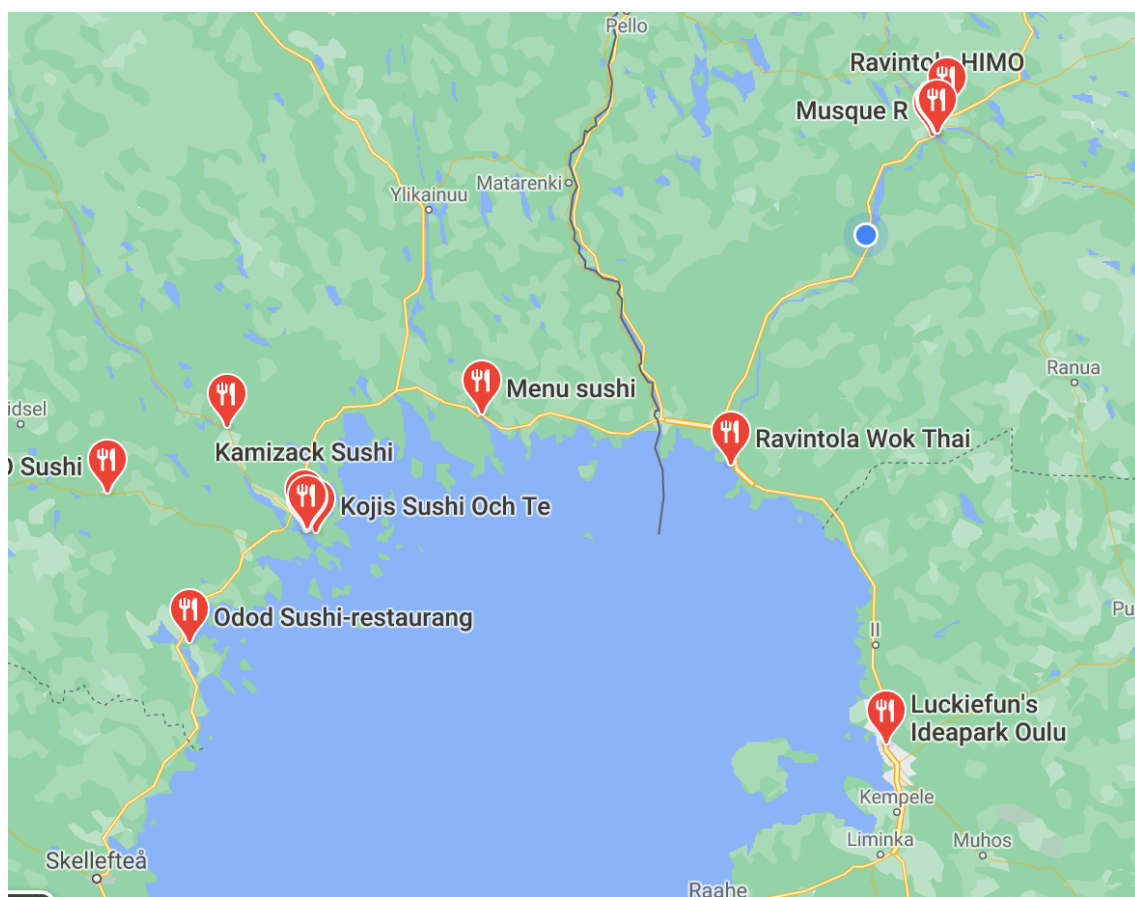
Päällekkäisanalyysissä (kuva 5) verrataan kahta tai useampaa paikkatietoaineistoa päällekkäin ja pyritään löytämään aineistojen välisiä yhteyksiä. Erona visuaaliseen paikkatietoanalyysiin on erityisesti kohteiden laadun ja määrän laajempi kirjo, sillä visuaalinen luettavuus ei rajoita analysoitavaa materiaalia.



Kuva 5. Päällekkäisanalyysissä tietoa tuotetaan päällekkäisten aineistojen avulla. (Kuva: Geospatial Historian)

Yhdistävyysanalyysissä tarkastellaan vektoraineistoja, kuten tiestöä, joukkoliikennereittejä, tai erilaisia jakeluverkostoja. Tällaisella analyysillä voidaan esimerkiksi luoda reittisuosituksia navigaattoriin tai mahdollisimman kustannustehokas jakeluautojen reittijako leipomosta myymälöihin.

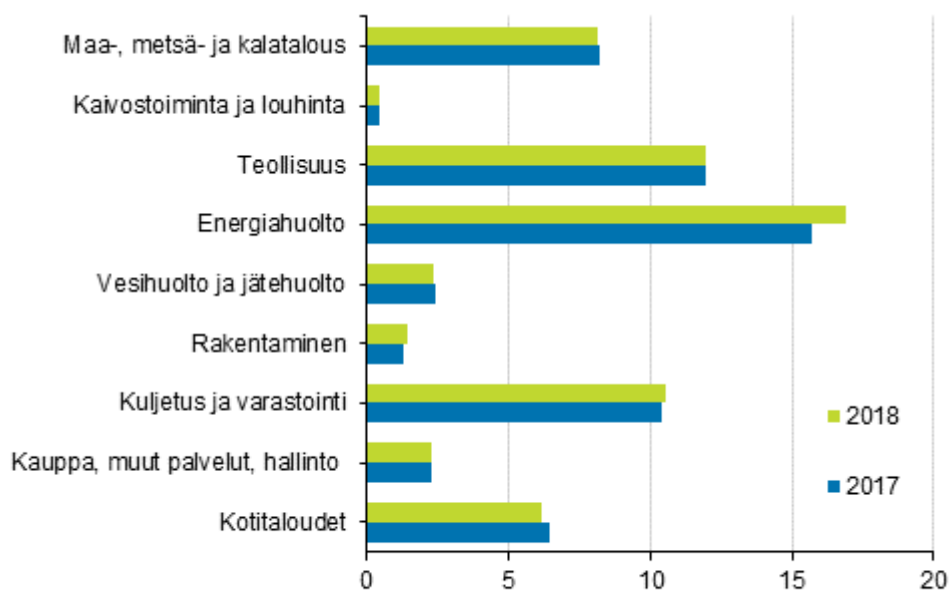
Naapuruusanalyysissä tarkastellaan tutkittavan kohteen yhteyttä sen ympärillä oleviin kohteisiin. Vektorimuotoisessa aineistossa voidaan kohteen ympärille muodostaa halutun suuruinen puskurivyöhyke ja sen avulla verrata kohteen sijoittumista muihin aineistoihin nähden. Esimerkiksi puhelimen tai tietokoneen kyky ehdottaa lähellä käyttäjälle lähimpiä sushiravintoloita (kuva 6) perustuu puskurivyöhykkeen käyttöön. (24)



Kuva 6. Google Mapsin ehdotukset lähimmiksi sushiravintoloiksi. Haja-asutusalueella ehdotukset voivat sijaita hyvin kaukana ja jopa naapurivaltion puolella.

## 5 Rakentamisen hiilijalanjälki

Tilastokeskuksen mukaan Suomen rakennuskanta käsitti vuoden 2019 lopussa 1 538 172 rakennusta, joihin ei lasketa mukaan kesämökkejä tai talousrakennuksia. Rakennuksista 75,6 % on erillisiä pientaloja ja vain 4 % asuinkerrostaloja. Kuitenkin 47 % kaikista asunnoista on kerrostaloasuntoja. (25; 26)



Kuva 7. Kasvihuonekaasupäästöt toimialoittain 2017 ja 2018, miljoonaa tonnia hiilidioksidiekvivalenttia. (Kuva: Tilastokeskus, Suomalaisten kasvihuonepäästöt kasvoivat vuonna 2018 – epäpuhtauspäästöt jatkoivat laskuaan, 2020)

Rakennuksen elinkaaren kasvihuonepäästöt voidaan jakaa kolmeen osa-alueeseen: käyttöä edeltävään, käytön aikaiseen ja käytön jälkeiseen (kuva 7). Suurin osa rakennuksen päästöistä syntyy käytön aikana, mutta energiantuotannon päästöjen laskiessa ja rakennusten energiatehokkuuden parantuessa rakentamisen osuus kokonaispäästöissä kasvaa.

Ennen kaikkea päästöihin voidaan vaikuttaa elinkaaren aikana tehdyillä valinnoilla liittyen rakennuspaikan valintaan, rakentamisen ja korjaamisen suunnitte-

luun, tuotteiden valintaan, rakentamiseen, ylläpidon ja huollon toteutukseen, rakennuksen käyttöön ja lopulta käyttöään päättyessä rakennusosien loppusijoitukseen ja kierrätykseen. Valinnat liittyvät koko rakennuksen elinkaareen, mutta suurin osa valinnoista tehdään jo rakennusta suunniteltaessa (kuva 8). (27, s. 11-14)



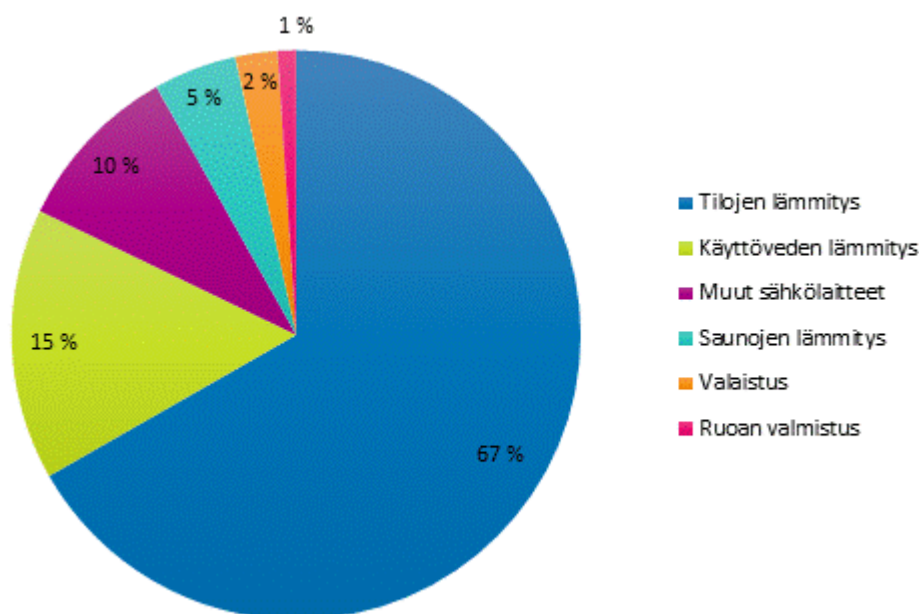
Kuva 8. Hankkeen eteneminen, kyky vaikuttaa päästöihin ja päästövaikutuksia koskevan tiedon kasvu. Kuva: Green Building Council Finland: Rakennuksen elinkaarimittarit (2013)

## 5.1 Rakentamisvaiheen kasvihuonekaasupäästöt

Rakentamisessa tehtäviin päätöksiin ja näin myös syntyviin päästöihin voidaan vaikuttaa ohjaamalla. Kansallisella tasolla ohjaus tapahtuu joko rakennusmääräyksin ja -ohjein tai verotuksen keinoin. Kunnan keinot ohjaukseen ovat monipuolisemmat, ohjausta voidaan toteuttaa kaavoituksella esimerkiksi rakennusoi-keuteen liittyvin keinoin, rakennusvalvonnalla esimerkiksi lupamaksujen ja neu-votteluohjauksen avulla sekä tontinluovutukseen liittyvien ehtojen avulla. Julki-set rakentajat voivat vaatia kohteiltaan rakennusmateriaaleihin ja/tai energiate-hokkuuteen perustuvaa vähähiilisyttä. Lisäksi sekä valtio että kunnat toteutta-vat ohjausta monissa yhteyksissä esimerkiksi jakamalla informaatiota sekä tu-kemalla tutkimusta, tuote- ja palvelukehitystä ja erilaisten merkintä- ja arviointi-menetelmien kehittämistä ja tarjontaa. (28)

## 5.2 Käytön aikaiset kasvihuonekaasupäästöt

Käytön aikaiset kasvihuonepäästöt syntyvät rakennuksen energiankulutuksesta. Syntyviin päästöihin voidaan vaikuttaa ennen kaikkea rakennuksen energiatehokkuuden sekä käytettävien energialähteiden kautta. Valtaosa asumisen energiankulutuksesta kuluu asuintilojen lämmitykseen (kuva 9), joten kaukolämmön päästöjen suhteellinen osuus korostuu käytön aikaisia päästöjä tarkastellessa. (29)



Kuva 9. Asumisen energiankulutus käyttökohteittain vuonna 2019. (Kuva: Suomen virallinen tilasto)

### 5.2.1 Käytön energiatehokkuus

Rakennuksen käytön aikaisen energiatehokkuuden arviointiin käytetään energiatodistusta. Laki rakennuksen energiatodistuksesta (50/2013) siihen liittyvine asetuksineen määrää energiatodistuksen myöntämisestä, sisällöstä, käytöstä

sekä valvonnasta. Haettaessa maankäyttö- ja rakennuslain 125§:n mukaista rakennuslupaa uudisrakennukselle energiatodistuksella osoitetaan rakennuksen arvioitu energiatehokkuus. Jos todistus on puutteellinen tai tiedot tarkentuvat hankkeen edetessä, on hankittava täydennetty tai tarkennettu todistus ennen rakennuksen käyttöönottoa. (30)

Energiatodistuksessa ilmoitetaan rakennuksen peruskulutus (lämmitys, kiinteiden laitteiden, hissien jne. sähkönkulutus) muodossa kWh/m<sup>2</sup> a, eli kilowattituntia neliömetriltä vuodessa. Ympäristöministeriön asetus rakennuksen energiatodistuksesta (1048/2017) määrittää laskentatavan ja laskennassa käytettävät arvot erilaisille rakennustyypeille. (31; 32)

### 5.2.2 Energiantuotannon energiatehokkuus

Sähkön ja lämmön tuottamiseen liittyvästä energiatehokkuudesta määrätään energiatehokkuuslaissa (1429/2014), jossa säädetään energiatehokkuuden edistämisestä, energiatehokkuuden parantamiseksi tehtävistä energiakatselmuksista, erilaisista tuotannon hyötyanalyyseistä sekä alan yritysten velvollisuudesta pyrkiä edistämään energian tehokasta ja säästäväistä käyttöä asiakkaidensa toiminnassa. Laki myös määrää energiateollisuutta ilmoittamaan myymänsä energian hiilidioksidipäästöjen ja radioaktiivisten jätteiden määrän. (33; 34.)

Energiantuottajat ilmoittavat tuotantonsa päästötiedot myös verkkosivuillaan, useimmiten muodossa CO<sub>2</sub> kg/MWh (hiilidioksidikiloa / megawattitunti).

## 6 ArcGIS CityEngine

### 6.1 Esri ja ArcGIS-tuoteperhe

Environmental Systems Research Institute eli Esri on vuonna 1969 perustettu yhdysvaltalainen paikkatietojärjestelmiin ja spatiaalisiin tietokantoihin erikoistunut ohjelmistotoimittaja. Paikkatietoteknologian markkinajohtajana Esri on maailmanlaajuinen toimija, jolla on 49 toimistoa ja 11 tutkimuskeskusta joka puolella maailmaa. Suomessa Esriä edustaa noin 60 työntekijän Esri Finland, joka on osa ruotsalaista paikkatietoratkaisuihin keskittynyttä S-GROUP-konsernia. (35; 36.)

Esrin päätuote on ArcGIS-tuoteperhe, johon kolmen pääohjelmiston (ArcGIS Online, ArcGIS Enterprise ja ArcGIS Pro) lisäksi kuuluu kymmeniä käyttötarkoituksiltaan erikoistuneita ohjelmistoja. ArcGIS Pron edeltäjän, ArcGIS Desktopin kehitystyö päättyi vuonna 2020, mutta ohjelmisto on edelleen laajassa käytössä. ArcGIS Desktopin käyttäjätuki kuitenkin jatkuu vuoteen 2026 asti. (35; 37.)

ArcGIS CityEngine (myöh. CityEngine) on yhdysvaltalaisen Esrin luoma kolmiulotteisten kaupunkimallien luomiseen tarkoitettu mallinnusohjelma. Ohjelmalla voidaan joko mallintaa olemassa olevaa rakentamista tai luoda kokonaan uusia kaupunkeja tai kaupunginosia. CityEnginessä kaupunkimalli voidaan luoda nopeasti kokonaisuutena ilman, että jokaista yksittäistä rakennusta tarvitsee erikseen mallintaa. Tähän ohjelmisto hyödyntää omaa CGA (Computer-generated Architecture) -ohjelmointikieltään, jolla ohjelmisto voidaan esimerkiksi ohjata luomaan automaattista 3D-geometriaa, kuten katu- tai rakennusmalleja, sekä näihin liittyvää laskentaa ja raportointia. CGA:n lisäksi ohjelmiston toimintaa voidaan mukauttaa Python-ohjelmoinnilla. (38)



## 6.2 CityEnginen toiminta

CityEnginen pääkonseptina on proseduraalinen eli vaiheistettu lähestymistapa kaupunkimallintamiseen. Proseduraalisessa ohjelmoinnissa tietokoneelle syötetään koodimuotoinen, komentosarjaa edustava proseduuri eli aliohjelma; tässä tapauksessa geometrisen mallinnuksen komentoja, jotka tietokone suorittaa askel kerrallaan. Perinteisessä 3D-mallinnuksessa käyttäjä käsittelee mallia ja sen geometriaa manuaalisesti, CityEngine taas muodostaa mallit itsenäisesti sääntötiedostossa olevien komentovaiheiden perusteella.

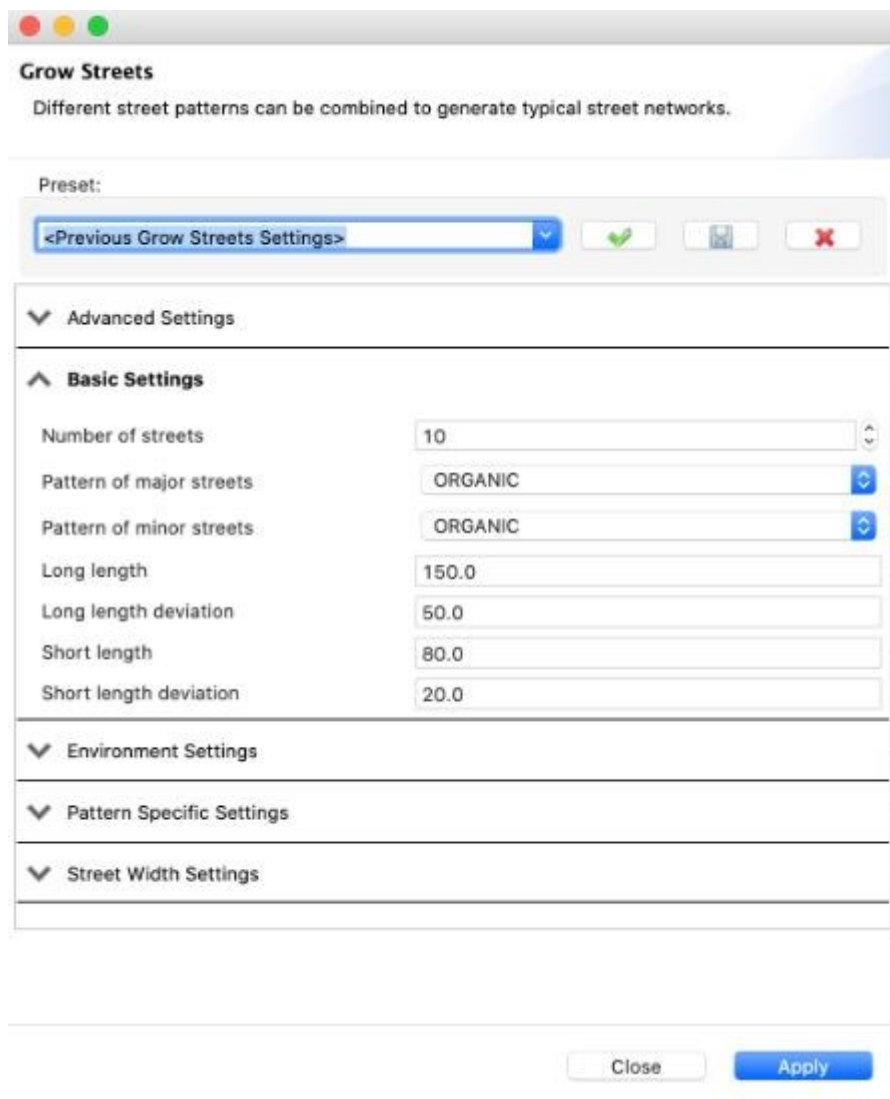
CityEnginen perusajatuksena on automatisoida kaupunkimallinnusta mahdollisimman pitkälle. Ohjelmalla voidaan sekä mallintaa olemassa olevaa kaupunkimiljöötä, että luoda kokonaan uusia kaupunkeja. Yksinkertaisimmillaan käyttäjä pyytää CityEngineä muodostamaan tieverkoston ja tontit sekä antaa ohjelmistolle käytettävän sääntötiedoston, jolloin ohjelmisto muodostaa kaupunkimallin automaattisesti.

CityEnginen käyttöliittymä on mukautuva, joten käyttäjän on mahdollista muokata näkymää omien tarpeidensa mukaisesti. Ohjelmisto tukee alan yleisimpiä tiedostomuotojen, joten tiedon tuonti ja vienti ohjelmien välillä on helppoa. (39, 40.)

### 6.2.1 Mallinnuksen vaiheet

Mallinnuksen alussa käyttäjä voi antaa ohjelmistolle pohjakartan joko erillisenä pohjatiedostona, tai käyttämällä CityEnginen sisäistä Get Map Data (hae kartta-data) -ominaisuutta, jolloin ohjelmisto hakee pohjakartan, maastomallin sekä teiden ja rakennusten sijainnit suoraan Esrin ja sen kumppanien ylläpitämästä tietokannasta. Haettavan materiaalin tarkkuus ja raja-  
aus ovat käyttäjän muokattavissa.

Mallinnuksen toinen vaihe on tieverkoston luominen. Teitä voidaan piirtää manuaalisesti tai muodostaa Grow Streets (kasvata tiet) -komennolla, jolloin ohjelmistolle syötetään teiden määrään, sijoitteluun ja mitoitukseen liittyvät raja-arvot (kuva 10).

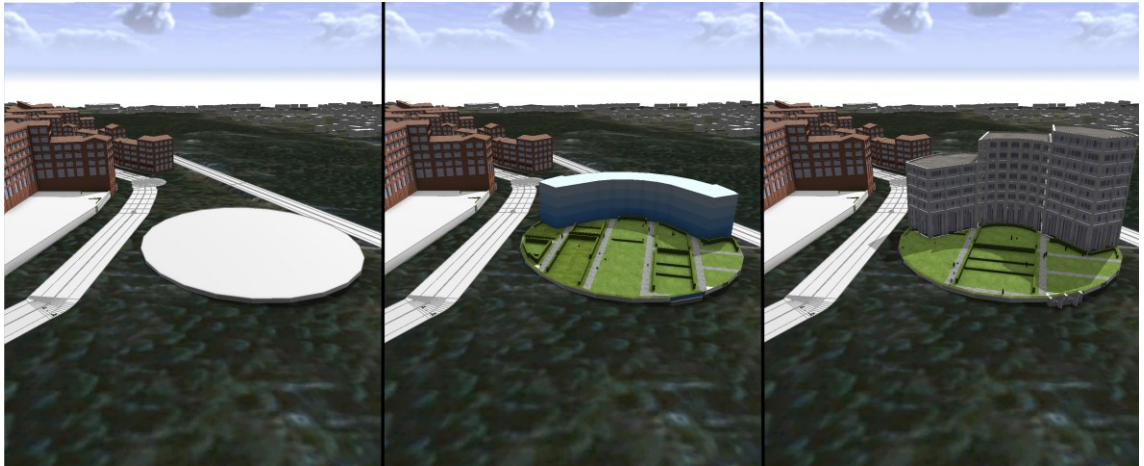


Kuva 10. Grow Streets -valikko. Käyttäjä mukauttaa tienmuodostamisessa käytettäviä sääntöjä, joiden perusteella ohjelmisto luo tieverkoston automaattisesti.

Tieverkoston luomisen jälkeen luodaan tontit. CityEngine muodostaa annettujen sääntöjen mukaan kaksiulotteisen polygonin muodossa tontteja tieverkoston varsille automaattisesti, mutta käyttäjä voi halutessaan tehdä tonttijaottelun

myös manuaalisesti. Näin mahdollistetaan jo olemassa olevan rakennuskannan tarkka mallintaminen.

Lopuksi käyttäjä määrää tonttitiedoille säännöt, joiden mukaan ohjelmisto muodostaa kolmiulotteisia rakennusmalleja. Yksinkertaisimmillaan rakennukset ovat kuutioita, mutta sääntöjen ja manuaalisen mukautuksen myötä käyttäjä saa luotua täysin realistisia mallinnuksia (kuva 11). Suurien kokonaisuuksien tarkempi mallinnus vaatii tietokoneelta valtavan käyttömuistikapasiteetin.



Kuva 11. Rakennuksen mallintaminen sääntöjen avulla. Vasemmalla käyttäjän luoma tyhjä tontti, keskellä CityEnginen sääntöjen perusteella luoma yksinkertainen rakennusmalli ja oikealla käyttäjän mukauttama rakennusmalli.

Esri tarjoaa käyttöön lukuisia esimerkkisääntöjä, joiden avulla käyttäjä voi luoda realistisia kaupunkimalleja joutumatta ohjelmoimaan jokaista sääntötiedostoa itse. Käyttäjät voivat myös jakaa luomiaan sääntötiedostoja ArcGIS Onlinen avulla. (39)

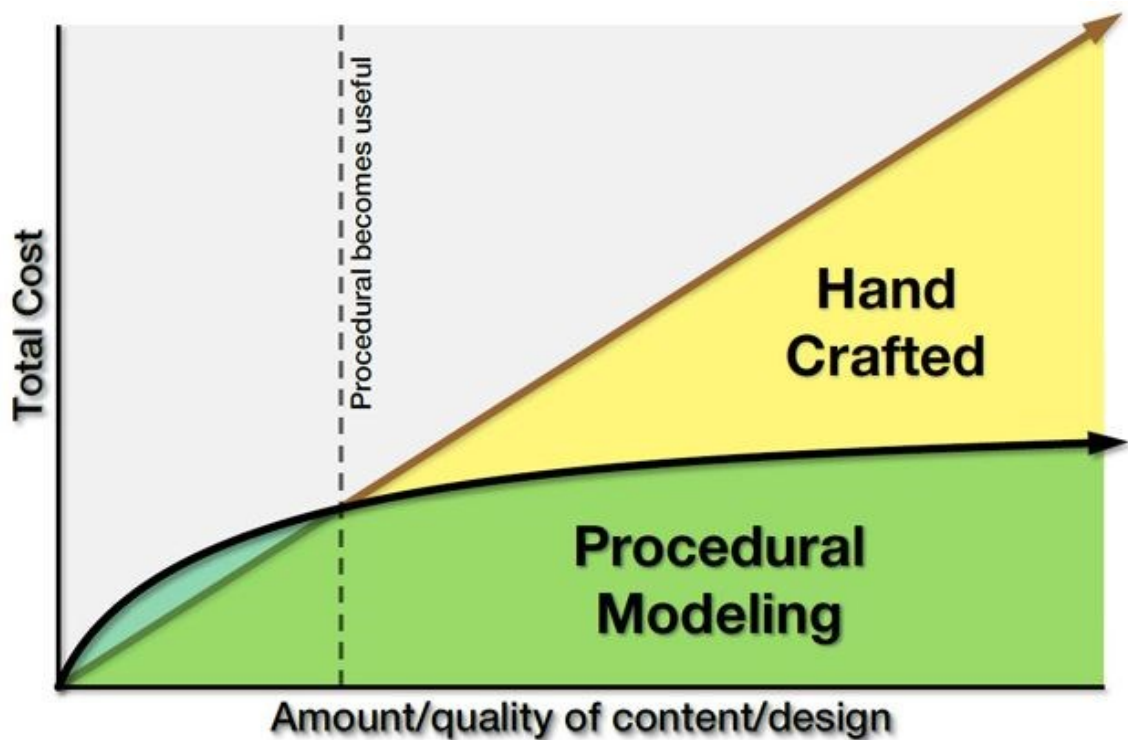
### 6.2.2 Proseduurit

Proseduurit eli menettelytavat löytyvät CityEnginessä erityisistä sääntötiedostoista (rules), joita käyttäjä voi halutessaan muokata rajattomasti. Sääntötiedostot voivat myös viitata toisiinsa, jolloin ohjelmassa valittu Rule File toimii pääsääntönä ja siihen viittaavat sääntötiedostot tämän alisääntöinä (kuva 12).



Kuva 12. CityEnginen sääntötiedostojen valikko.

Proseduraalisen lähestymistavan etuna kaupunkimallinnuksessa on mahdollisuus luoda suuri joukko objekteja yksittäisten sääntötiedostojen pohjalta. Käyttäjä voi esimerkiksi luoda kokonaisen korttelin tai kaupungin käyttämällä samaa sääntöä, jolloin kymmenien tai satojen rakennusmallien luomiseen kuluu vain sekunteja. Proseduraalisesta ohjelmoinnista saadaan sitä suurempi hyöty, mitä suurempaa kohderyhmää käsitellään (kuva 13).



Kuva 13. Proseduraalisen mallinnuksen hyödyn vertailu manuaaliseen mallinnukseen. (Kuva: Esri)

Halutessaan CityEnginen käyttäjä voi syöttää yksittäisille rakennuksille erillisiä sääntötiedostoja, jolloin eri käyttötarkoitusten ja yksilöllisten rakennusten mallintaminen on helppoa.

Sääntöjen toimintaa voidaan ohjata myös muun muassa erillisenä tasona olevien rasteritiedostojen avulla. Käyttäjä voi sijoittaa tahansa toiminnon rasterin tiettyyn väriin, jolloin esimerkiksi maaston muotoa sekä rakennusten käyttötarkoitusta, sijoittelua tai ulkomuotoa voidaan ohjata yksinkertaisen pohjakarttatiedoston avulla. Lukuisien rasterien yhtäaikainenkin käyttö on mahdollista, jolloin yksi rasterikuva voi määrätä esimerkiksi rakennusten värikysestä, toinen sijoittelusta tai korkeudesta, ja kolmas määrittää rakennusten käyttötarkoituksen. (39)

### 6.2.3 CGA-ohjelmointikielen toiminta

CGA (Computer-Generated Architecture) on arkkitehtonisen 3D-mallinnuksen muodostamiseen erikoistunut ohjelmointikieli, jolla luodaan CityEnginessä käytettäviä sääntötiedostoja (rules). Sääntötiedostoissa voidaan määrittää kohteen muotoon, pintoihin tai numeerisiin ominaisuuksiin vaikuttavaa laskentaa ja mallinnusta. (39)

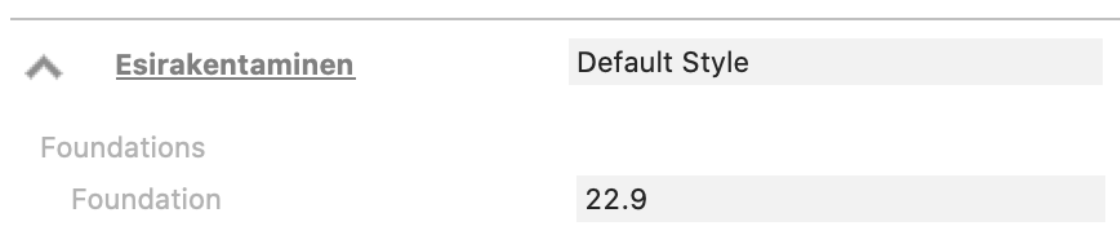
Jokaiselle kappaleelle voidaan valita käytettävä sääntötiedosto (Rule File), joka puolestaan voi sisältää erilaisia lähtösääntöjä (Start Rule). Näillä lähtösääntöillä määritellään kappaleen mallinnus, esimerkiksi käyttötarkoitukseltaan erilaisille rakennuksille voidaan antaa tyystin erilainen mallinnus. Erilaiset kappaleet, kuten rakennukset, kadut tai puistot, voidaan määrittää samassa sääntötiedostossa, mutta useimmiten on koodin selkeyden ja helpon hierarkian vuoksi helpompaa käyttää erillisiä sääntötiedostoja. Kun luonteeltaan erilaiset kappaleet ovat omien sääntöjensä alaisina, sääntötiedostot pysyvät kompaktimpana, ali-sääntöjen listaukset selkeinä, eikä käyttöliittymässä näy turhia ominaisuuksi. Esimerkiksi teitä muokatessa ei ole tarpeen nähdä valikoita rakennuksen pinta-mallinnukseen liittyen, tai toisinpäin. (40)

Ohjelmointikielenä CGA on korkean tason kieli, eli sen tulkitseminen tietokoneen käyttämälle konekielelle vaatii kääntäjän. Käytännössä CGA:n käyttö on tehty helpoksi mahdollistamalla viittaaminen CityEnginen valmiiksi tuntemiin funktioihin ja objekteihin, jonka lisäksi koodi voi viitata toisen sääntötiedoston sisältöön (esimerkkikoodi 1). Tällöin sääntötiedostolle yksinkertaisesti kerrotaan, missä haluttu aläsääntö sijaitsee.

```
import Carbon_Footprint: "Support/Carbon_footprint.cga"
import Foundations: "Support/foundation.cga"
report("GHG. Construction, total (tn)", (Foundations.Foundation + Carbon_Footprint.Yht) * geometry.area /1000
```

Esimerkkikoodi 1. Kooditiedosto viittaa import-komennolla Support-kansiosta löytyviin Carbon\_footprint.cga ja foundation.cga -nimisiin sääntötiedostoihin ja hakee niistä kentät Foundation ja Yht. Report-komennolla laskutoimituksen tulos viedään CityEnginen raportointi-ikkunaan (Reports). Viittaaminen tapahtuu import-komennossa annetun nimen, ei varsinaisen tiedostonimen, perusteella.

Import-komennon avulla CityEnginen sääntövalikkoon voidaan luoda myös uusi alavalikko, jossa kyseisen alisäännön arvoja voidaan mukauttaa. Alisäännölle voidaan luoda style-komennolla erilaisia, nimettyjä ja valmiiksi annettuja lukuarvoja, joiden avulla alisäännön jokainen attribuutti voidaan muuttaa sekunneissa (kuva 14).

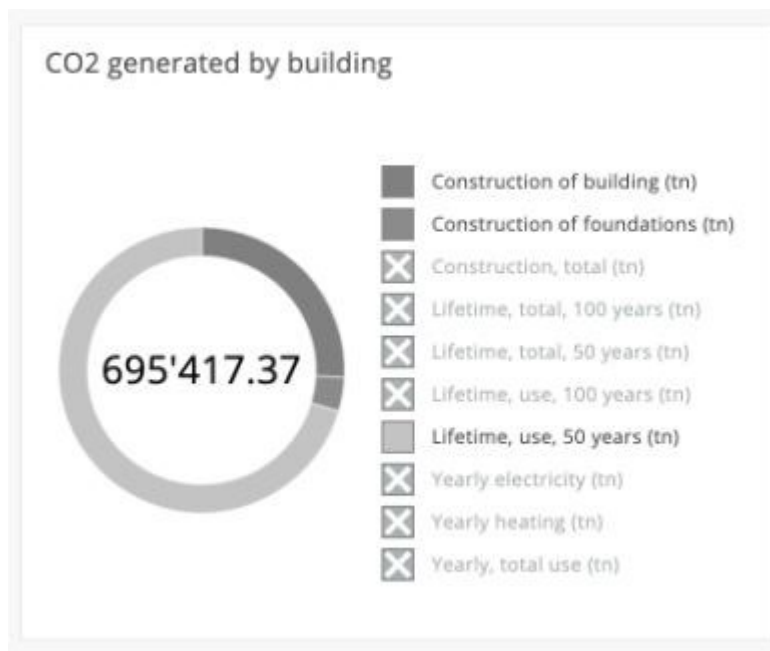


Kuva 14. Esirakentaminen-alisäännön näkymä sääntövalikossa. Tyylivalikossa valittuna oletus, Default Style.

Vaikka CGA-kielen pääasiallinen käyttötarkoitus on 3D-rakennusmallien sijoittelun, muodon ja ulkonäön määrittely, tarjoaa se runsaasti mahdollisuuksia esimerkiksi erilaisten analyysien muodostamiseen. (39; 41.)

## 6.2.4 CityEngine Dashboard

Dashboard eli kojelauta on CityEnginen analyysi- ja esitystyökalu, jonka pääasiallinen toimintamalli on erilaisten kaavioiden luominen kaupunkimallin numeraalisten ominaisuuksien esittelyyn. Kaaviot (kuva 15) toimivat vuorovaikutteisesti ohjelman kanssa niin, että jokainen malliin tehty muutos vaikuttaa myös kaavion lukuihin reaaliaikaisesti.



Kuva 15. CityEnginen Dashboardissa luotu piirakkakaavio. Kaavio esittää rakennuksen hiilidioksidipäästöt 50 vuoden elinkaarella jaoteltuna käytön ja rakentamisen päästöihin.

Dashboard tarjoaa tehokkaan työkalun erilaisten kaupunkisuunnitteluratkaisujen lukujen esittämiseen. Ohjelman luomilla piirakka- ja pylväsdiagrammeilla aineiston ominaisuuksia on helppo tutkia ja havainnollistaa. (41)

## 7 Päästölaskentatavan muodostaminen

### 7.1 Aiheen rajaus ja tavoitteiden määrittäminen

Opinnäytetyön tavoitteena on tutkia ArcGIS CityEngine -ohjelmiston käyttöä aluesuunnittelun kasvihuonekaasupäästöjen arvioinnissa. Tavoitteeseen pyritään luomalla CityEngine-ohjelmistoon joukko parametreja, joiden avulla käyttäjä voi uskottavasti mallintaa suunnitellun rakentamisen kasvihuonekaasupäästöjä sekä pohtia aluesuunnitelman jatkokehityksen tarvetta ja mahdollisuuksia. Työ jakautuu neljään eri vaiheeseen, joita toteutetaan rinnakkain: lähtötietojen keräämiseen ja analysointiin, parametriikkaan, vertailuanalyysiin sekä pohdintaan ja raportointiin.

Opinnäytetyön edetessä on pidetty työn tekijän ja tilaajan välillä säännöllisesti yhteyttä, joiden perusteella työn toteutusta on mukautettu.

### 7.2 Lähtötietojen määrittäminen

Lähtötietojen määrittämiseen kuuluu ArcGIS CityEngine-ohjelmistoon ja siinä käytettävään CGA-ohjelmointikieleen perehtyminen sekä käytettävien parametrien ja arvojen valinta ja puntarointi. Lisäksi perehdytään erilaisiin Suomessa ja muualla käytettäviin kasvihuonekaasupäästöjen mallinnus- ja mittaustapoihin, joiden osalta tehdään vertailua ja pohditaan käytettävyyttä opinnäytetyön parametrien määrittämisessä.

Työn tavoitteen ollessa parametriikan luonti nimenomaan CityEngine-ohjelmistoon on syytä tarkastella, miten ohjelmisto tietoa ja laskentaa lähestyy. Ohjelmisto tarjoaa käyttäjälle laajat muokkaus- ja mukautusmahdollisuudet, mutta laskenta on yksinkertaisinta toteuttaa perustuen joko tontin, rakennuksen pohja-alan tai kerrospinta-alan mukaan. Täten ideaali lähdetieto olisi muodoltaan CO<sub>2</sub> g/m<sup>2</sup>.



### 7.2.1 Rakentamisen aikaisten päästöjen arviointi

Rakentamisen aikaisten päästöjen arviointiin lähteenä käytetään Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:ön julkaisua Rakennusten khk-päästöjen ohjauksen vaikutuksen arviointi (28), jossa esiintyvät arviot asuinkerrostalon arvioiduista kasvihuonekaasupäästöistä ovat peräisin Häkkisen ja Ruuskan kirjoituksesta The significance of various factors for GHG emissions of buildings (29). Kaaviossa (kuva 16) arvioidaan vain asuinkerrostalon rakentamisen ilmastovaikutuksia, mikä työn toteuttamisen kannalta kuitenkin on aivan riittävää.

	CO <sub>2</sub> -ekv, kg/krs-m <sup>2</sup>		
	Perusarvo	Arvioitu minimiarvo	Arvioitu maksimiarvo
Maa-ainekset	0,4	0,0	2,9
Paalutus	8,6	0,0	30,6
Perustukset	13,9	7,7	22,0
Alapohjat	9,4	8,6	18,3
Erillinen, kantava rakennusrunko	0,0	8,6	0,0
Ulkoseinät	75,4	33,8	108,8
Väliseinät	51,3	20,4	51,3
Välipohjat	86,4	49,3	104,3
Yläpohjat	23,6	9,8	33,4
Parvekkeet	37,9	14,3	37,9
Hornit	6,5	1,6	18,7
Portaat	0,4	0,0	0,4
Ei-kantavat väliseinät	6,9	5,7	12,2
Ikkunat, ovet, lasitukset	22,0	17,1	28,1
Kiintokalusteet, varusteet, pintamateriaalit	26,5	20,0	33,4
Kiinnittämättömät materiaalit	7,3	5,3	9,0
Talotekniikka	12,6	9,4	15,5
	CO <sub>2</sub> -ekv, kg/krs-m <sup>2</sup>		
	Perusarvo	Arvioitu minimiarvo	Arvioitu maksimiarvo
Korjausrakentamisen materiaalit, 50 v	114	86,0	144
Rakentaminen	67,2	36,7	97,8
Korjausrakentaminen	5,1	4,1	6,1
Purkutyö	26,5	16,3	36,7
Yhteensä	602	355	812
Yhteensä ilman maa-aineksia, paalutusta, korjausta, korjausrakentamista ja purkutyötä	447	248	591

Kuva 16. Asuinkerrostalon rakentamisen hiilidioksidipäästöt. (28, s. 14)

Käyttäjän on myös mahdollista hyödyntää lukuisia verkosta löytyviä resursseja päästöarvojen tarkentamiseen sekä uusien rakennustyyppien lisäämiseen, mutta ongelmaksi voi kuitenkin tällöin muodostua useiden lähteiden ja työkalujen keskittyminen joko erilaisten materiaalien tai yksittäisten rakennusten hiilijalanjäljen laskentaan. Vaihtoehtoisia tietolähteitä ovat esimerkiksi One Click LCA -palvelu tai Suomen Ympäristökeskuksen ja ympäristöministeriön yhteinen Rakentamisen päästötietokanta ([www.co2data.fi](http://www.co2data.fi)). (42; 43.)

Rakentamisen päästötietokanta on avoin ja maksuton palvelu, johon on kerätty Suomessa käytettyjen rakennustuotteiden, rakentamisprosessien ja palveluiden keskimääräisiä päästötietoja. Ongelmana tietokannan käytössä on kuitenkin se, ettei siinä ole millään tavoin koostettu arvoja rakennustyypeille tai rakennusten osille (ulkoseinä, pohjarakenteet, jne.), joten tietojen koostaminen CityEnginessä käytettäväksi vaatii käyttäjältä huomattavaa ymmärrystä rakentamisen materiaalivalinnoista ja -määristä. Toisaalta asiantuntijan koostamana käyttöön olisi mahdollista saada hyvinkin tarkkaa tietoa. (43)

### 7.2.2 Käytön aikaisten päästöjen arviointi

Käytön aikaisten päästöjen arvioiminen ei onnistu yhtä suoraviivaisesti kuin rakentamisen aikaisten. Lämmityksen tai kulutussähkön päästöistä löytyy kyllä runsaasti energiantuottajien toimittamaa tietoa, mutta se on yleensä muodossa kg/MWh. Neliökohtaista tietoa ei ole saatavilla.

Ongelman ratkaisemiseksi on selvitettävä rakennusten energiankulutus asuin- neliötä kohti. Tämä toteutetaan käyttämällä laskennassa apuna ympäristöministeriön määrittämää energiatehokkuusluokitusta ja sen E-lukuja. E-luvun yksikönä toimii kilowattituntia energiaa lämmitettyä nettoalaa kohden vuodessa ( $\text{kWh}_E/\text{m}^2 \text{ a}$ ). Energiatehokkuusluokkien käyttöä puoltaa myös niiden tunnettuus, energiatodistus ja luokitus A:sta G:hen, joka on laajasti käytössä ja joka esiintyy muun muassa asuntojen myynti-ilmoituksissa.

Laskennassa käytetään ympäristöministeriön Energiatodistusopas 2018 -julkaisun mukaisesti kerrointa 0,9, jolla arvioidaan asuinpinta-alan määrä kokonaispinta-alasta, ellei se ole tiedossa.

On kuitenkin huomioitava, että tämän opinnäytetyön kannalta energiatehokkuusluokilla, niiden raja-arvoilla tai energialuokan määrittämiseen liittyvällä laskennalla ei kuitenkaan ole havainnollistamista suurempaa merkitystä; laskennassa käytetään tarkkaa arvoa joko valmiiden luokkien mukaan tai käyttäjän syöttämänä, eli arvon oletetaan joko olevan tiedossa tai käyttäjän parhaan kyvyn mukaan arvioitu.

### 7.3 Käytettävät laskukaavat

Rakentamisen aikaisten hiilipäästöjen osalta laskenta on yksinkertainen: kerrotaan edellä esitetyn VTT:n taulukon mukaisesti hiilidioksidin kilomäärä rakennuksen kerrosneliöillä (kaava 1).

$$CO_2 \text{ kg} \cdot krs \text{ m}^2 \quad (1)$$

Kaavan tuloksi saadaan siis hiilidioksidin määrä muodossa  $CO_2 \text{ kg /m}^2$ .

Käytön aikaisten päästöjen laskenta toteutetaan yhdistämällä energiantuottajan toimittama päästökerroin ( $kg/MWh = g/kWh$ ) E-luvun laskentakaavaan ( $kWhE/(m^2 \text{ vuosi})$ ) ja näin saadaan päästöjen arvioinnissa käytettävä, lopullinen kaava (kaava 2).

$$\frac{\frac{g}{kWh}}{m^2 \text{ a}} \quad (2)$$

Kaavassa 2 päästökerroin esiintyy muodossa  $g/kWh$  yksiköiden yhtenäistämiseksi. Kaavan tuloksena saadaan hiilidioksidimäärä muodossa  $CO_2 \text{ g/m}^2 \text{ a}$ , eli grammaa neliömetrille vuodessa.

Nämä kaavat yhdistämällä saadaan lopullinen hiilidioksidisumma, jonka laskennassa on huomioitava kaavojen välinen yksikkökerroin. Käsiteltävien kohteiden koon vuoksi lopputulos ilmoitetaan kilojen sijasta tonneina (1 000 kg), jolloin käytettävät kaavat ovat seuraavan laiset.

Rakentamisen hiilidioksidipäästöjen (kaava 3) kaavassa P on rakennuksen hiilidioksidipäästöt neliömetriltä.

$$\frac{(P \text{ CO}_2 \text{ kg/m}^2) \cdot A(\text{m}^2)}{1000} \quad (3)$$

Käytön aikaiset hiilidioksidipäästöjen (kaava 4) kaavassa E on energiatodistusasetuksen mukainen arvioitu kulutus, L CO<sub>2</sub> on lämmityksen hiilidioksidipäästöt, S CO<sub>2</sub> kulutussähkön hiilidioksidipäästöt ja 0,9 Energiatodistusopas 2018:n mukainen asuinpinta-alan kerroin. Y kuvaa rakennuksen ylläpidon (tai purkamisen) hiilidioksidipäästöjä; näistä arvoista toinen on aina nolla, jakamalla korjausarvo viidelläkymmenellä saadaan VTT:n taulukkoarvosta yhden vuoden ylläpidon päästöt.

$$\frac{(E \text{ kWh/m}^2) \cdot (L \text{ CO}_2 \frac{\text{g}}{\text{kWh}} + S \text{ CO}_2 \frac{\text{g}}{\text{kWh}}) \cdot (A(\text{m}^2) \cdot 0,9)}{1\,000\,000} + \frac{Y_{\text{korj}}}{50} + Y_{\text{purku}} \quad (4)$$

Elinkaaripäästöjen (kaava 5) laskennassa esimerkiksi sadan vuoden elinkaari huomioidaan helpoiten suoraan käytön aikaisen energiankulutuksen kertoimessa (1 000 000 / 100 = 10 000).

$$\frac{E \cdot (L+S) \cdot (0,9A)}{10\,000} + \frac{P \cdot A}{1000} \quad (5)$$

Rakentamisen ja käytön osalta kaavoihin syötetään arvot eri mittaluokissa (kilogramma ja gramma) johtuen lähtötietojen merkintätavoista. Laskennassa käytetyillä kertoimilla tulokset muutetaan kuitenkin aina tonneihin eli tuhansiin kiloihin. Tämän toteutuksen taustalla on ajatus siitä, että käyttäjän kannalta on mukavinta syöttää käytettävät arvot siinä muodossa, missä ne lähteissä todennäköisimmin esiintyvät. Tämä yksikköero on käyttäjän kuitenkin syytä tiedostaa, ja tulevan lähdemateriaalin niin vaatiessa huomioida arvoja syöttäessä.

## 8 Päästölaskenta CityEnginessä

### 8.1 Laskennan toteuttaminen CGA-kielellä

Kasvihuonekaasupäästöjen laskentaa koestetaan CityEnginessä käyttämällä pohjana ESRIn luomaa valmista rakennusten mallinnuksen sääntötiedostoa (CityEnginessä Rule File), Building\_Construction.cga:ta. Laskenta tuodaan sääntötiedostoa muokkaamalla, minkä lisäksi luodaan joukko tarvittavia alisääntöjä. Näin aikaansaadaan CityEnginessä sekä selkeämmin luettava koodi että helpokäyttöisemmät valikot. Alisäännöt linkitetään sääntötiedostoon esimerkkikoodin 1 (s. 22) mukaisesti import-komennolla.

Alisäännöt ovat rakenteeltaan yksinkertaisia: ne sisältävät joukon luokiteltuja arvoja laskennassa käytettäväksi eivätkä juuri sisällä omaa laskentaa. Poikkeuksen muodostaa rakentamisen aikaisia päästöjä listaava Carbon\_Footprint.cga -tiedosto, jonka Yht-attribuutti sisältää kaikkien muiden kenttien yhteenlaskun, sekä korjauspurku.cga, jossa on samankaltainen attribuutti. Tämän toteutustavan ansiosta Yht-attribuutti päivittyy oikeaksi mitä tahansa rakentamisen aikaista päästöattribuuttia muutettaessa.

#### 8.1.1 Pääsääntöön (Rule File) tehdyt lisäykset

Koska toteutettava laskenta ei muuta kappaleiden geometriaa, sääntötiedostoon tehdään vain kahdenlaisia lisäyksiä: tiedostoon liitetään alisäännöt import-komennolla (esimerkkikoodi 2) ja luodaan report-komennolla tarvittavat raportointirivit (esimerkkikoodi 3), joissa varsinainen laskenta tapahtuu.

```
import CO2_rakentaminen: "Support/CO2rakentaminen.cga"
import Esirakentaminen: "Support/esirakentaminen.cga"
import ELuokka: "Support/E-luokka.cga"
import Lammitys: "Support/lammitys.cga"
import Sahko: "Support/sahko.cga"
import Yllapito: "Support/korjaus.cga"
```

Esimerkkikoodi 2. Import-komennolla liitetään alisäännöt pääsääntöön. Opinäytetyön laskennassa käytetään kuutta alisääntöä.

Import-komennon käyttö myös luo CityEnginen käyttöliittymän Rules-valikon alle uuden alavalikon, jolloin käyttäjän on mahdollista muuttaa alisääntöjen arvoja ja tyylejä ilman sääntötiedostojen muokkaamista.

Report-komennolla luodaan CityEnginen Reports-näkymään tulostuvat arvot laskentasääntöineen. Luvussa 7.4 käsitellyt kaavat syötetään report-komentoihin.

```
report("GHG. Construction of building (tn)", Carbon_Footprint.Yht * geometry.area / 1000)
# Rakentamisen kokonaispäästöt per pinta-ala, kerroin /1000 muuntaa kilot tonneiksi.
report("GHG. Construction of foundations (tn)", Foundations.Foundation * geometry.area / 1000)
report("GHG. Repair/demolition (tn/year)", (KorjausPurku.Korj_yht/50 + KorjausPurku.Purkutyo) * geometry.area /1000)
###Korjausarvot ovat 50 vuodelle, siksi kerroin /50. Tuloksena aina joko korjaus tai purku, koska jompi kumpi on aina nolla.
```

**Esimerkkikoodi 3.** Report-komennolla määrätään raportoitavat arvot laskukaa-voineen. #-merkin avulla koodiin luodaan kommenttirivejä, joita ohjelma ei lue. Hyvin kommentoitu koodi takaa selkeän käyttökokemuksen.

Erilaisia raporteja luodaan yksitoista kappaletta erilaisten käyttötarkoitusten mahdollistamiseksi. Raportoitavat päästöarvot ovat

- esirakentaminen
- rakentaminen
- edellisten summa
- korjaus ja purku
- lämmitys vuodessa
- sähkönkulutus vuodessa
- kulutus yhteensä vuodessa (sis. korjaus, lämmitys, sähkö)
- käytön elinkaaripäästöt, 50 vuotta
- käytön elinkaaripäästöt, 100 vuotta

- elinkaaripäästöt, rakentaminen ja käyttö, 50 vuotta
- elinkaaripäästöt, rakentaminen ja käyttö, 100 vuotta.

Raportoitavista arvoista osa on tarkoitettu suoraan Reports-osiosta luettavaksi, osa taas käytettäväksi Dashboard-ominaisuudessa.

### 8.1.2 Luodut alisäännöt

Alisäännöt sisältävät kaiken päästölaskennassa käytettävän numeerisen tiedon. Rakenteeltaan työssä luodut alisäännöt ovat erittäin yksinkertaisia: luodaan sääntövalikossa näkyvä ryhmä @Group-komennolla sekä käytettävät attribuutit numeroarvoineen attr-komennolla.

Attribuuttien määrää sääntötiedostoissa ei ole mitenkään rajattu; nyt luoduissa alitiedostoissa niitä on yhdestä kuuteentoista. Selkeiden valikoiden aikaan saamiseksi on kuitenkin järkevintä luoda sääntötiedostoon vain yhdentyypisiä arvoja.

Lisäksi on mahdollista käyttää esimerkkikoodin 4 tapaista style-komentoa tyylien luomiseen; tyylit luovat sääntövalikkoon alavetovalikon, josta käyttäjä voi valita attribuuteille valmiita malliarvoja. Tyylien määrää ei CityEnginen puolesta ole mitenkään rajoitettu, mutta samoin kuin attribuuttien kohdalla, valtavan listan luominen voi tehdä valikon käytettävyyden sekavaksi.

```
@Group ("Foundations",1) @Order(0) @Range(min=0, max=10000)
attr Foundation = 22.9
```

```
style Found_min
attr Foundation = 7.7
```

```
style Found_med
attr Foundation = 22.9
```

```
style Found_max
attr Foundation = 55.5
```

Esimerkkikoodi 4. Esirakentaminen-alisäännön koko numeerinen sisältö. Kolme luotua tyyliä edustavat lähdemateriaalin perusarvoa sekä minimi- ja maksimiarvoja.

Selkeillä ja yksinkertaisilla alisäännöillä mahdollistetaan myös laskentamenetelmän yksinkertainen jatkokehittäminen: laskennassa käytettävien arvojen tarkentuessa tai täydentyessä käyttäjä voi yksinkertaisesti muuttaa tai lisätä attribuutteja asianmukaiseen alisääntöön.

## 8.2 Laskennan toimivuus

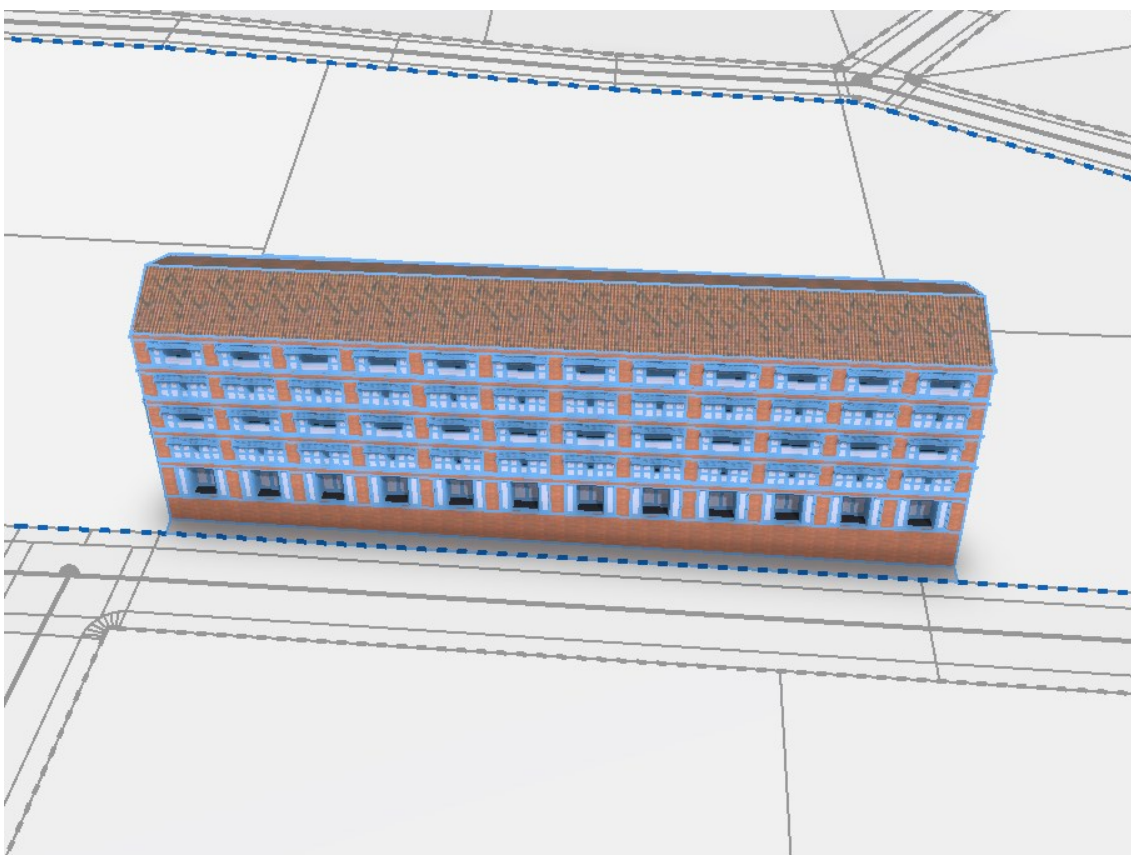
Laskennan toimivuutta voidaan tarkastella yksinkertaisimmin valitsemalla yksi tai useampi rakennus, muokkaamalla rakennuksia ja päästölaskennan attribuutteja sekä seuraamalla muutosten vaikutusta ohjelman raportoimiin päästölukemiin. Tarkastelu on mahdollista suorittaa myös kaikkien arvojen osalta, mutta riittävää on seurata laajinta laskentaa hyödyntävää arvoa. Näin neljää attribuuttia seuraamalla saadaan hyvä kuva koko laskennan toimivuudesta. Tässä koetuksessa seurattavat attribuutit ilmentävät rakentamisen aikaisia päästöjä, vuosittaisen käytön päästöjä sekä 50 vuoden elinkaaripäästöjä niin pelkän käytön kuin kokonaisuudenkin osalta.

### 8.2.1 Laskennan koestus yksittäisellä kerrostalolla

Koestusta varten luotiin yksinkertainen kerrostalomalli (kuva 17), jota tutkitaan viisi- ja yhdeksänkerroksisena ja erilaisilla päästöarvoilla.

Ensimmäisenä tarkastellaan viisikerroksista rakennelmaa päästölaskennan oletusarvoilla (default). Seuraavaksi muutetaan päästöattribuutteja niin, että lämmityksen päästöt vastaavat Espoon kaupungin asettamaa vuoden 2025 tavoitetta kaukolämmölle, rakennuksen E-luokka muutetaan A:ksi ja esirakentaminen tehdään päästöjen osalta raskaammaksi. Samoja arvoja käytetään myös tutkittaessa yhdeksänkerroksista, muutoin vastaavaa rakennusta. Näitä arvoja käyttämällä voidaan verrata hypoteettisen Espooseen rakennetun ja energiatehokkaan rakennuksen päästöarvoja kansalliseen keskiarvoon.





Kuva 17. Käytetty viisikerroksinen kerrostalomalli.

Yhdeksänkerroksisen rakennuksen mallinnus toteutetaan lisäämällä kerroksia viisikerroksiseen malliin. Näin varmistetaan rakennuksen pohja-alan ja muiden geometristen muuttujien pysyvän samoina.

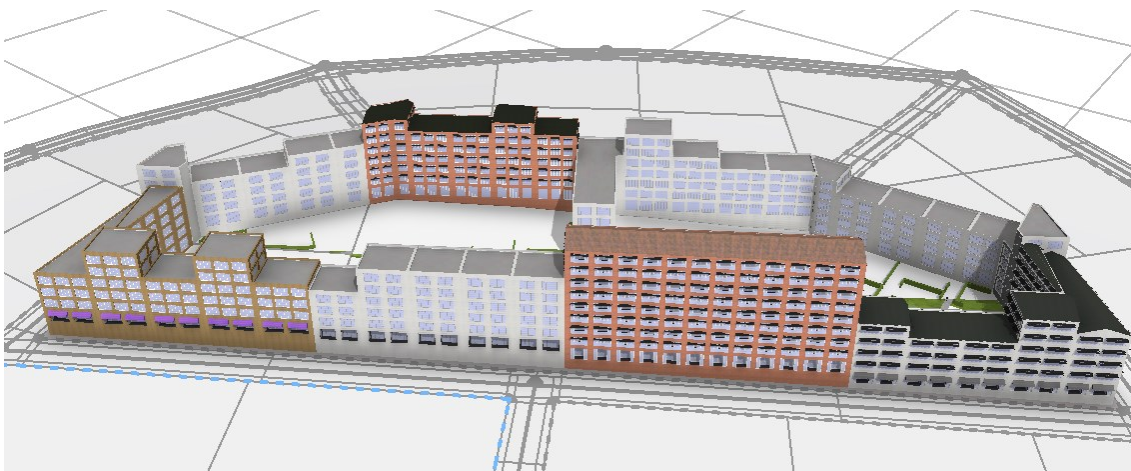
Taulukosta 1 voidaan todeta päästöarvojen muutosten olevan selkeitä ja syötettyjen arvojen suhteen johdonmukaisia. Lämmitystarpeen väheneminen ja selkeästi ekologisempi kaukolämpö pudottivat käytön elinkaari päästöt 38 prosenttiin oletusarvoilla lasketuista päästöistä. Huomion arvoista on myös se, että käytön aikana erittäin ekologinen rakennus nostaa rakentamisen osuutta kokonaispäästöistä selkeästi.

Taulukko 1. Tarkastellun rakennusmallin päästöarvot.

	<b>Viisi kerrosta, oletusarvot</b>	<b>Viisi kerrosta, mukautetut arvot</b>	<b>Yhdeksän kerrosta, oletusarvot</b>	<b>Yhdeksän kerrosta, mukautetut arvot</b>
<b>Rakentamisen kokonaispäästöt (tn)</b>	2275,35	2437,91	4095,62	4388,23
<b>Käytön vuosipäästöt (tn)</b>	127,01	49,24	228,62	88,63
<b>Käytön elinkaari-päästöt, 50 vuotta (tn)</b>	6350,47	2461,97	11 430,85	4431,54
<b>Elinkaari-päästöt yhteensä, 50 vuotta (tn)</b>	8625,82	4899,87	15 526,47	8819,77

### 8.2.2 Laskennan koestus korttelilla

Laskennan toimintaa koestetaan myös kokonaisella korttelilla (kuva 18), johon sijoitetaan niin rakenteeltaan kuin päästöarvoiltaan erilaisia rakennuksia. Näin saadaan tutkittua laskennan toimintaa suuruusluokan muuttuessa.



Kuva 18. Koestamisessa käytettävä, proseduraalisesti luotu korttelimalli.

Testikorttelin rakennukset ovat keskenään erimuotoisia ja -korkuisia. Ensin kaikki rakennukset käyttävät päästöjen oletusarvoja, minkä jälkeen toisessa koeksessa valkoiset, vaaleakattoiset talot (ryhmä A) saavat tätä korkeamman ja muut talot tätä matalamman arvon (ryhmä B). Näin voidaan tutkia muuttujien toiminnan johdonmukaisuutta korttelitasolla sekä nähdään päästöarvoiltaan erilaisten rakennusten vaikutus kokonaispäästöjen muodostumiseen.

Korkeampien päästöjen taloille käytetään mukautetussa laskennassa rakentamisen osalta VTT:n taulukon maksimiarvoja, rakennusten E-luokka on C ( $130 \text{ kWh/m}^2$ ), kaukolämmön arvot vastaavat Kaukolämmön erillistuotannon paikkakuntien ryhmäjakoa ja laskennassa käytettävät ryhmäkohtaiset CO<sub>2</sub>-päästökerroimet -julkaisussa esiintyvää ryhmän L päästöarvoa, ja sähköntuotannon osalta käytetään marginaaliperusteista CO<sub>2</sub>-päästökerrointa. (38; 39.)

Matalampien päästöjen talot saavat kevyemmät rakennuspäästöarvot, energia-luokakseen A:n, kaukolämmön päästöarvo vastaa ryhmä B:tä ja sähköntuotannon osalta arvo on keskiarvoa matalampi.

Taulukoista 1 ja 2 voidaan todeta laskennan toimivan loogisesti ja arvojen mitta-luokan (tonnit) soveltuvan hyvin niin yksittäisten rakennusten kuin suurten kokonaisuuksienkin kuvaamiseen. Taulukosta 2 on selvästi nähtävissä, kuinka käy-

tönaikaisten päästöjen vaikutus korostuu rakennuksen elinkaaren kokonaispäästöissä, ja erityisesti korkeapäästöinen energiantuotanto voi moninkertaistaa rakennuksen elinkaaripäästöt. Vastaavasti ekologisesti tuotetun energian alueilla rakentamisen suhteellinen vaikutus kokonaispäästöihin korostuu.

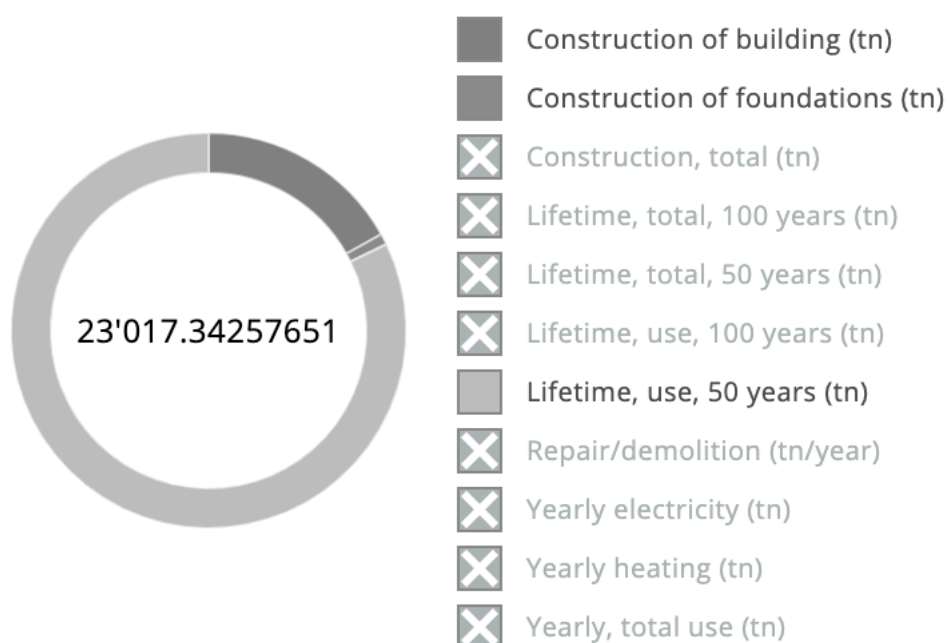
Taulukko 2. Tarkastellun korttelin päästöarvot.

	Oletusarvot	Mukaute- tut arvot, yhteensä	Oletus- arvot, ryhmä A	Mukaute- tut arvot, ryhmä A	Oletus- arvot, ryhmä B	Mukau- tetut ar- vot, ryhmä B
<b>Ra- kenta- misen koko- nais- pääs- töt (tn)</b>	21 885,8 4	19 495,75	9525,09	12 357,78	12 360,7 5	7137,97
<b>Käy- tön vuosi- pääs- töt (tn)</b>	1221,66	2861,55	531,69	2614,17	689,98	247,38
<b>Käy- tön elin- kaari- pääs- töt, 50 vuotta (tn)</b>	61 083,2 2	143 077, 42	26 584,4 6	130 708,5 5	34 498,7 5	12 368,8 7
<b>Elin- kaari- pääs- töt yh- teensä , 50 vuotta (tn)</b>	82 969,0 5	162 573,1 7	36 109,5 5	143 066,3 3	46 859,5 0	19 506,8 5

### 8.3 Tulosten havainnollistaminen ja tutkimus Dashboardilla

Arvojen havainnollistamista kokeillaan Dashboardin erilaisilla kaavioilla. Kunkin kaaviotyypin toimivuus riippuu käsiteltävän tiedon luonteesta. Esimerkiksi kuvien 19 ja 20 piirakkakaavio on käytännöllinen tutkittaessa tai esiteltäessä eri muuttujien osuutta tietyistä kokonaisuuksista.

#### Kasvihuonepäästökertymä (tonnia)

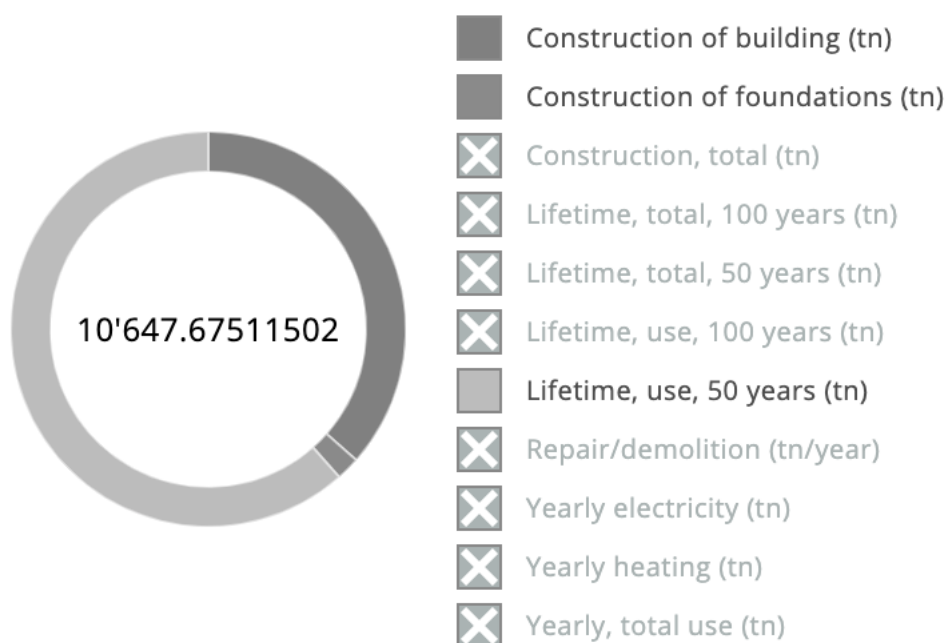


Kuva 19. Piirakkakaavio, jossa näkyvillä esirakentamisen ja rakentamisen päästöt sekä käytön elinkaaripäästöt. Diagrammin keskellä näkyvien päästöjen summa.

Erityisen havainnollistava piirakkakaavio on esiteltäessä arvojen suhteellisia painoarvoja. Kuvassa 19 rakentamisen osuus kokonaispäästöistä on hieman alle 18 %. Kuvassa 20 saman rakennuksen energiankulutus on selkeästi vähäi-

sempää ja energia vähäpäästöisempää, jolloin rakentamisen osuus kokonaisuudesta korostuu: rakentamisen osuus elinkaaren kokonaispäästöistä on 38 %.

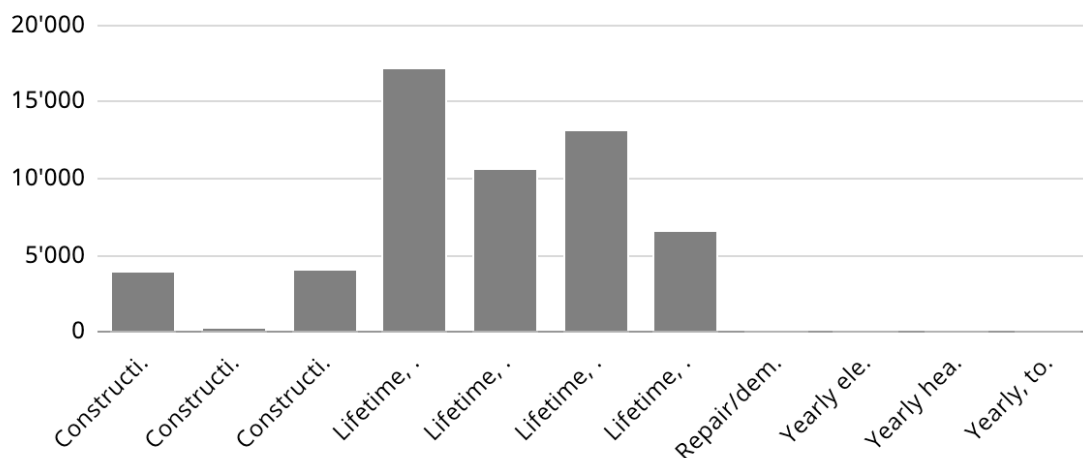
## Kasvihuonepäästökertymä (tonnia)



Kuva 20. Saman rakennuksen elinkaaripäästöt, mutta energiantuotannon päästökertoimia ja rakennuksen energiatehokkuutta on parannettu.

Piirakkakaavio ei kuitenkaan sovellu kaikenlaisen tiedon esittämiseen. Jos tarkoitus on esittää osuuksien sijasta absoluuttisia lukuarvoja, pylväsdiagrammi (kuva 21) on käytännöllinen ratkaisu.

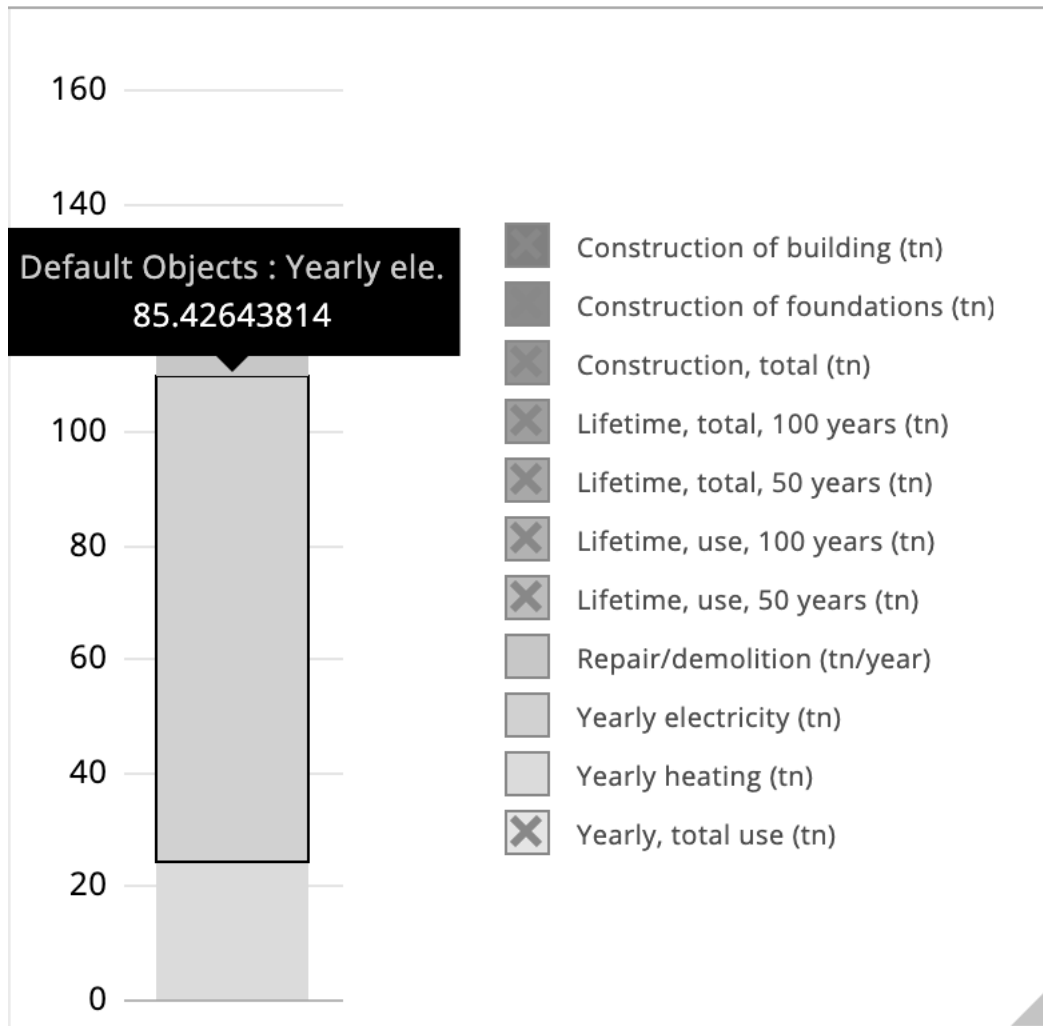
Kasvihuonepäästökertymä, tonnia



Kuva 21. Pylväsdiagrammi, joka esittää esimerkkirakennuksen päästöjä tonneina.

Pylväsdiagrammin vahvuus on sen nopeasti luettavassa asteikossa. Sen sijaan hyvin eri suuruisten tietojen vertailuun se ei sovellu. Kuvassa 16 niin vuosittaiset kulutusarvot kuin esirakentamisen osuus päästöistä ovat elinkaari-päästöihin verrattuna niin pieniä, että pylväs häidin tuskin näkyy.

Dashboardissa on mahdollista luoda myös summapylväsdiagrammeja (kuva 22) ja erilaisia taulukoita. Dashboardin mukauttamisella onkin mahdollista luoda hyvin kattavia näkymiä, joissa erilaiset kaaviot, taulukot ja tekstit ovat helposti luettavissa. Myös pylväiden värit ovat muokattavissa CGA-koodauksella.



Kuva 22. Summapylväsdiagrammi, jossa vuositason sähkön ja lämmityksen sekä ylläpidon aiheuttamat päästöt. Viemällä hiiren minkä tahansa diagrammin osan päälle Dashboard ilmoittaa kuvattavan ilmiön tarkan arvon.

Summapylväsdiagrammista on helppo hahmottaa nopeasti sekä tutkittavien kohteiden suhteet toisiinsa että niiden absoluuttiset numeroarvot.

#### 8.4 Laskennan arviointi

Kasvihuonekaasupäästöjen laskenta onnistui rakennusten ja niiden käytön osalta hyvin. Laskennassa käytetyt luvut ja laskukaavat ovat pääosin peräisin viranomaisten tai muiden luotettavien toimijoiden lähteistä, ja muilta osin laskenta voidaan todeta toimivaksi ja johdonmukaiseksi. Laskenta käyttää parhaita



käytettävissä olevia käytäntöjä ja lähteitä tämän kaltaisen työn toteuttamisen kannalta.

Esimerkiksi Taylor & Francis Online ([tandfonline.com](http://tandfonline.com)) -palvelussa on runsaasti lisää aiheeseen liittyvää tutkimusmateriaalia, joka kuitenkin on maksullista tai vaatii erillistä käyttöoikeuden anomista. Esimerkiksi tämän työn lähteenä käytetyn VTT-raportin toisen kirjoittajan, Tarja Häkkisen, tutkimuksia aiheesta on Taylor & Francis Onlinessa.

Todennäköisesti tarkempien laskenta-arvojen muodostaminen joko näiden lähteiden avulla tai asiantuntijan esimerkiksi [co2data.fi](http://co2data.fi) -sivuston arvoilla luomana tuottaa nykyistä tarkempaa päästöjen elinkaarimallinnusta. Tämän mahdollisuuden tutkiminen ei kuitenkaan ole opinnäytetyön puitteissa mahdollista.

## 9 Laskentamallin käyttömahdollisuudet ja jatkokehittäminen

Osana insinööriötä pohditaan CityEnginen käyttöä päästöarvioinnin apuna aluesuunnittelun näkökulmasta sekä tulevaisuuden kehittymismahdollisuuksia käytön laajentamiseksi ja monipuolistamiseksi.

### 9.1 CityEnginen käytettävyys kasvihuonekaasupäästöjen arvioinnissa

Kasvihuonekaasujen päästölaskennan voidaan todeta soveltuvan CityEngine-käyttöön hyvin. On kuitenkin huomionarvoista, että rakentamisen kasvihuonepäästöt ovat vain osa laajaa kokonaisuutta, johon kaupunkisuunnittelulla voidaan vaikuttaa. Suunnittelun vaikutusten arvioinnissa on tärkeää tunnistaa vaikutusten suuruusluokat ja se, mihin suunnittelulla voidaan vaikuttaa. Esimerkiksi aluerakenteiden saavutettavuus ja joukkoliikenteen suunnittelu voi olla monin tavoin rakennuskohtaisia päästöjä keskeisempi näkökulma ilmastovaikutusten arviointiin.

Energiaratkaisut, kuten hiilineutraalin kaukolämmön saatavuus ja paikalliset energiaratkaisut, ovat keskeisiä kaupunkisuunnittelun vaikutuspiirissä olevia arviointi- ja vaikutuskohteita. Huomionarvoista on myös olevien hiilinielujen tunnistaminen, esimerkiksi turvepohjaiselle metsäalueelle tai turvesuolle rakennettaessa rakentamisen tieltä katoavan hiilinielun suuruusluokka voi olla suhteellisesti merkittävä. Samoin nykyisen rakennuskannan käyttöä jatkaminen ja tällöin niiden energiatehokkuuden huomioiminen ovat seikkoja, joihin kaupunkisuunnittelulla voidaan vaikuttaa.

Suunnitteluvaiheessa toteutettava päästölaskenta on joka tapauksessa aina tulevien päästöjen arviointia, eikä CityEngineä ole tarkoitettu yksityiskohtaisen ja täydellisen tarkan päästöarvion luomiseen. Suunniteltaessa suurempia kokonaisuuksia nyt kehitetty työkalu tarjoaa kuitenkin toimivan työkalun rakentamisen päästöjen suuruuden arviointiin.

Tämän insinööriyön tarkoituksena oli käsitellä rakentamisen kasvihuonekaasupäästöjen arviointia nimenomaan aluesuunnittelun näkökulmasta, ja siihen tarkoitukseen nyt käytetyn laskennan voitiin todeta riittävän. Nykyaikaisessa kaupunkisuunnittelussa rakentamisen ympäristövaikutukset huomioidaan läpi prosessin, ja opinnäytetyössä tutkittu menetelmä tarjoaa selkeän tavan saada tietoa rakentamisen kasvihuonepäästöistä tavanomaisen CityEngine-pohjaisen kaupunkisuunnittelun tueksi.

## 9.2 Ilmastovaikutuksen arvioinnin jatkokehitys CityEngineen

Espoon yleiskaavoituksessa kehitetään parhaillaan työkalupakkia ilmastovaikutusten arviointiin erilaisissa aluekehitystarkasteluissa. Opinnäytetyössä kehitettyä CityEngine-koodia kokeillaan käytännössä syksyllä 2021 yleiskaavan ja asemakaavan välitarkkuudella laadittavassa kaavarunkotyössä. Tavoitteena on saada viitteellistä, suuruusluokkaa kuvaavaa tietoa rakentamisen kasvihuonekaasupäästövaikutuksista osana laajempaa ilmastovaikutusten arvioinnin kokonaisuutta. (7)

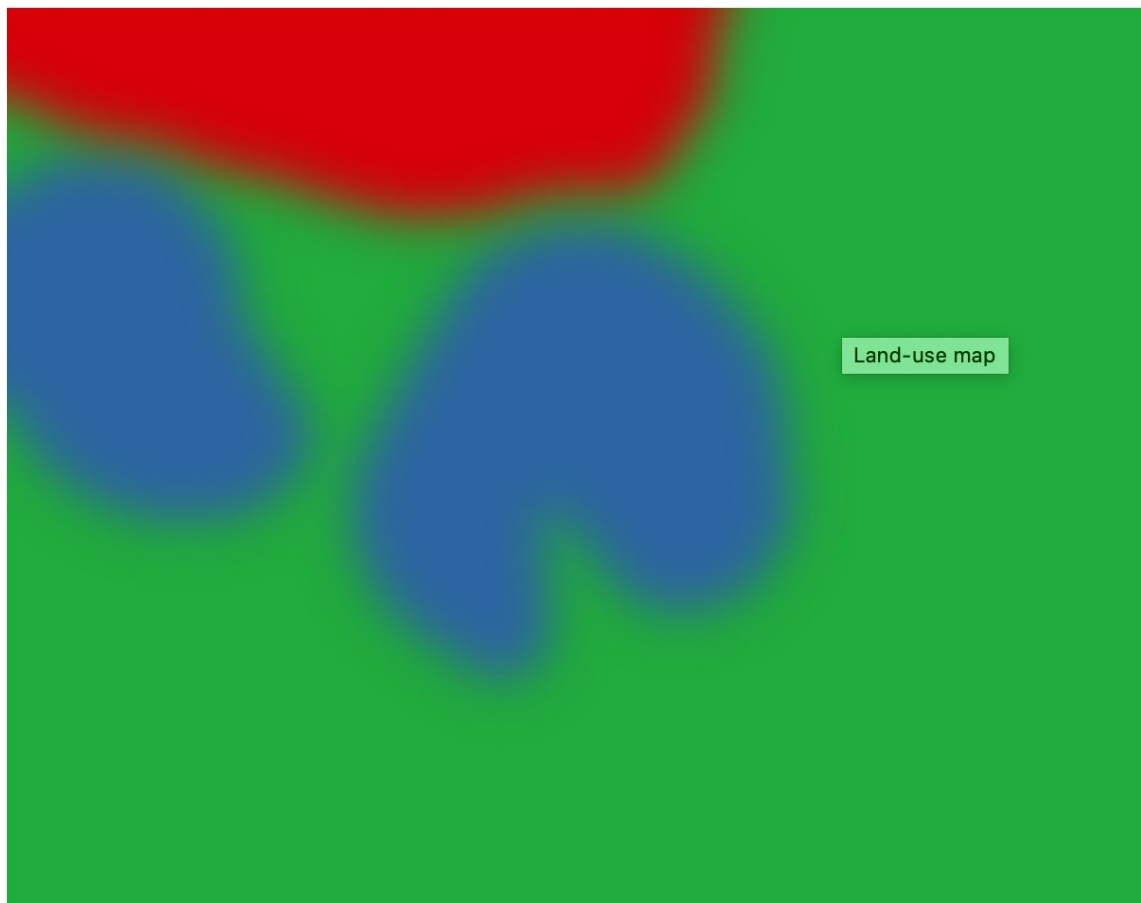
Menetelmää voidaan myöhemmin soveltaa esimerkiksi lähiuudistuksen piirissä, jolloin rakentamisen ilmastovaikutuksista saatava tieto on käyttökelpoista muun muassa purkavan ja säilyttävän täydennysrakentamisen vertailuun.

### 9.2.1 Saavutettavuuslaskennat

Saavutettavuuslaskennan osalta mielenkiintoinen jatkokehityskohde on erityisesti joukkoliikenne, mutta myös jalankulun, pyöräilyn ja yksityisautoilun tutkiminen on mahdollista. CityEnginellä on mahdollista tarkastella suunnitelman saavutettavuutta ja saada numeerista tietoa esimerkiksi rakentamisen etäisyydestä joukkoliikennepysäkeistä. Tällöin suunnitteluvaihtoehtoja vertailemalla voidaan esimerkiksi arvioida sen perusteella, kuinka hyvin ne kannustavat joukkoliikenteen käyttöön.

Käytännössä saavutettavuuslaskentaa voidaan CityEnginessä toteuttaa kahdella eri tavalla: käyttämällä rasterikarttoja tai vektoridataa esimerkiksi joukkoliikenteen pysäkeistä ja asemista.

Rasterikarttojen käyttö on tehty CityEnginessä todella yksinkertaiseksi. CityEnginessä rasterin eri sävyt ja värit voidaan sijoittaa haluttuun attribuuttiin, jolloin esimerkiksi kohteiden saavutettavuusarvot voitaisiin tuoda CityEngineen automaattisesti sopivaa rasteria käyttämällä (kuva 23). Tämän metodin vaikeutena on kuitenkin se, että rasterit täytyy erikseen luoda ja pitää ajan tasalla manuaalisesti, eli kovin automatisoidusta prosessista ei voida puhua.



Kuva 23. Yksinkertainen rasteri, jolla voidaan ohjata esimerkiksi mallinnettujen rakennusten käyttötarkoitusta. Tässä punaisella teollisuus, sinisellä kaupalliset toiminnot ja vihreällä asuinrakentaminen. (Kuva: Esri)

Vektoridataa hyödyntäen taas pysäkkien ja asemien sijainnit tuodaan CityEngineen pistemäisinä kohteina ja saavutettavuus arvioidaan pysäkin ja kohteen

välisen etäisyyden perusteella. Ongelmaksi muodostuu kuitenkin se, ettei CityEngine tue tätä tapaa sisäänrakennetusti. Laskenta täytyisi todennäköisesti toteuttaa Python-ohjelmointikielellä, eikä se toimisi rasterin tavoin automaattisesti. Jokaiselle rakennukselle pitäisi siis ajaa saavutettavuuden laskeva Python-ohjelma erikseen.

Jalankulun, pyöräilyn ja autoilun osalta saavutettavuuden arviointimenetelmät ovat pääosin samankaltaisia, joskin pistemäisen kohteen sijasta rasterin avulla voitaisiin tutkia etäisyyttä reitteihin. Vektoridatan avulla voitaisiin suorittaa yhdistävyysanalyysejä, mutta aiemmin mainittu vektoridataan liittyvä vaikeus pysyy ennallaan – yhdistävyysanalyysiin löytyy CityEngineä parempiakin työkaluja.

### 9.2.2 Hiilivarastot

CityEnginessä on täysin mahdollista tutkia myös suunnittelualueella sijaitsevia, mahdollisesti rakentamisen tieltä katoavia hiilivarastoja, kuten metsää tai soita. Hiilivarastoista löytyy perin tarkkaa rasteridataa esimerkiksi Luonnonvarakeskuksen tuottamana. Helpoin toteutustapa olisi saavutettavuuden yhteydessä mainitulla menetelmällä antaa rasterikartalle numeeriset arvot, joiden perusteella voitaisiin laskea esimerkiksi rakentamisen tieltä poistuvien hiilivarastojen määrä.

Olemassa olevien maanpäällisten ja -alaisten hiilivarastojen lisäksi mielenkiintoista olisi mallintaa myös tulevan hiilensitomiskyvyn katoaminen rakennetulta alueelta. Samoin voitaisiin helposti mallintaa rakennuksiin sitoutuneen hiilen määrä.

### 9.2.3 Muun rakentamisen huomioiminen

Tässä insinööriyössä tutkittiin vain rakennusten kasvihuonekaasupäästöjä, mutta mikään ei estä CityEnginen käyttöä myös muun rakennetun ympäristön tutkimiseen. Infrastruktuurin, pihojen, katujen ja näihin liittyvän rakentamisen tutkiminen ovat CityEnginessä täysin mahdollisia. Tähän käyttöön on kuitenkin

jo olemassa olevia työkaluja, joten on kyseenalaista, kuinka suuri etu laskennan luomisella CityEngineen saavutettaisiin.

### 9.3 Laskennan käytettävyys jatkossa

Insinööriyössä luodun menetelmän pidempiaikainen käyttö edellyttää päästöarvojen pitämistä ajan tasalla. Vähähiilisempien rakennusmateriaalien ja energialähteiden sekä tarkentuvan datan myötä tässä työssä käytetyt arvot voivat olla jo muutaman vuoden päästä vanhentuneita. Voidaan kuitenkin olettaa itse laskennan kestävän aikaa paremmin, mutta vastuu arvojen päivittämisestä jää käyttäjälle.

Rakennuksen elinkaaren päästöjen arviointi on lisäksi parhaimmillaankin valistunut arvaus. Tässä työssä käytetyt viisikymmentä ja sata vuotta ovat aikoina sellaisia, ettei mitään tietoa elinkaaren loppupään päästöarvoista voi olla. Erityisesti sadan vuoden kuluttua energiantuotanto voi olla jotain aivan muuta kuin meidän aikamme.

Tämä koskee kuitenkin ennen kaikkea energiantuotantoa, rakentamisen päästöt syntyvät (ylläpitoa ja purkua lukuun ottamatta) jo rakennusvaiheessa ja rakennusten energiatehokkuus tuskin muuttuvat yhtä nopeasti kuin energiantuotannon tuottamat päästöt. Laskennan tuottamia elinkaaren päästölukuja on joka tapauksessa pidettävä vain viitteellisinä.

## 10 Päätelmät

Insinööriyön tarkoituksena oli selvittää kasvihuonekaasupäästöjen laskennan sisällyttämistä CityEngine-kaupunkimallinnusohjelmistoon sekä CityEnginen käytettävyyttä rakennetun ympäristön kasvihuonekaasupäästöjen arvioinnissa. Työssä kehitettiin onnistuneesti laskentamenetelmä, jolla tunnettuihin ja luotettavaan lähteisiin perustuva rakentamisen ja asumisen päästölaskenta ja -tieto saadaan tuotua CityEngineen. Laskentaa koestettiin ohjelmistossa sekä rakennus- että korttelitasolla ja sen todettiin toimivan tarkoituksenmukaisesti.

Pohdintaosiossa käsiteltiin mahdollisia tulevia sovellutuksia ja lisättäviä ominaisuuksia nyt luotuun päästölaskentatyökaluun. CityEngine on monipuolinen ohjelmisto, joka tarjoaa laajat mahdollisuudet erilaisten sovellutusten ja analyysien toteuttamiselle myös päästöjen arvioinnin saralla. Päästöarviointityökalujen toteuttaminen CityEnginessä kannattaa erityisesti siksi, että arviot ovat suunnittelijan käytössä reaaliaikaisesti läpi koko suunnitteluprosessin. Varsinaisena päästöarviointityökaluna CityEngineä ei varmasti voida jatkossakaan pitää, mutta aluesuunnittelun avuksi ympäristö- ja päästövaikutusten arvioinnin toteuttaminen ohjelmistossa on perusteltua.

Osana insinööriyötä luotiin myös käyttöohjeet (liite 2) koodin käyttöönoton ja käytön selkeyttämiseksi. Tekijä myös kommentoi luodun koodin mahdollisimman kattavasti.

Tässä insinööriyössä esitetty menetelmä on tilaajien, Espoon kaupungin kaupunkisuunnitteluyksikön sekä Ramboll Finland Oy:n käytettävissä erilaisten suunnitteluhankkeiden ja jatkokehityksen apuna.

## Lähteet

- 1 Tietoa Espoosta. Verkkoaineisto. Espoon kaupunki. [https://www.es-poo.fi/fi-FI/Espoon\\_kaupunki/Tietoa\\_Espoosta](https://www.es-poo.fi/fi-FI/Espoon_kaupunki/Tietoa_Espoosta) Luettu 15.3.2021
- 2 Yritys. Verkkoaineisto. Ramboll Finland Oy. [https://fi.ramboll.com/ram-boll\\_finland\\_oy](https://fi.ramboll.com/ram-boll_finland_oy) Luettu 23.3.2021
- 3 Pletcher, Kenneth. Mohenjo-Daro. Verkkoaineisto. Britannica. <https://www.britannica.com/place/Mohenjo-daro> Luettu 9.3.2021
- 4 Kaupunkisuunnittelu. Verkkoaineisto. Ramboll Finland Oy. <https://fi.ramboll.com/palvelut/kaupunkisuunnittelu> Luettu 23.3.2021
- 5 Maankäytön suunnittelu. Verkkoaineisto. Ympäristöministeriö <https://ym.fi/maankayton-suunnittelu> Luettu 9.4.2021
- 6 Maankäyttö- ja rakennuslaki. Verkkoaineisto. Finlex. <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990132> Luettu 9.4.2021
- 7 Partanen, J. 2021. Espoon kaupungin kaupunkisuunnittelukeskus. Arkkitehdin haastattelu. 6.4.2021
- 8 Isotalo, Katri. 2013. Kaupunkimalli on muutakin kuin visualisointia. Positio 1/2013
- 9 Architectural Models: The Ultimate Guide. Verkkoaineisto. RJ Models. <https://www.rjmodels.com.hk/architectural-models-guide/> Luettu 23.2.2021
- 10 JHS-sanasto. Verkkoaineisto. Tietojohtaminen ry. [http://jhs-sanasto.jhs-suositukset.fi/JHS/fi/page/c\\_1d9250b49](http://jhs-sanasto.jhs-suositukset.fi/JHS/fi/page/c_1d9250b49) . Luettu 23.2.2021
- 11 Modeling the World: Ancient Architectural Models Now on View. Verkkoaineisto. Metropolitan Museum of Art. <https://www.metmuseum.org/blogs/now-at-the-met/2015/modeling-the-world-ancient-architectural-models> Luettu 24.2.2021
- 12 Introduction to CAD. Verkkoaineisto. DesignTech Academy. <https://www.designtechacademy.com/knowledge-base/introduction-to-cad> Luettu 24.2.2021
- 13 Computer-Aided Design (CAD). Verkkoaineisto. Techopedia. <https://www.techopedia.com/definition/2063/computer-aided-design-cad> Luettu 24.2.2021
- 14 Archicad. Verkkoaineisto. Graphisoft. <https://graphisoft.com/solutions/products/archicad> Luettu 9.3.2021
- 15 MicroStation. Verkkoaineisto. Bentley. <https://www.bentley.com/en/products/brands/microstation> Luettu 9.3.2021



- 16 Cadmatic. Verkkoaineisto. Cadmatic Oy. <https://www.cadmatic.com/fi/yri-tys> Luettu 9.3.2021
- 17 FIKSU Landuse. Verkkoaineisto. Symetri Oy. <https://www.symetri.fi/tuotteet/fiksu-landuse> Luettu 19.4.2021
- 18 Computer-Aided Design (CAD) and Computer-Aided Manufacturing (CAM). Verkkoaineisto. Inc. <https://www.inc.com/encyclopedia/computer-aided-design-cad-and-computer-aided-cam.html> Luettu 24.2.2021
- 19 Biljecki, F., Ledoux, H., Stoter, J. & Zhao, J. 2014. Formalisation of the level of detail in 3D city modelling. Computers, Environment and Urban Systems vol. 48, 4.6. 2014
- 20 Espoon 3D kaupunkimalli. Verkkoaineisto. Espoon kaupunkisuunnittelu-keskus. <https://kartat.espoo.fi/3d/> Luettu 9.4.2021
- 21 Espoon kaupunki hallitsee nopeaa kasvua ketterän viitesuunnittelun avulla. Verkkoaineisto. Esri Finland. <https://www.esri.fi/fi-fi/tietoa-meista/referenssit/espoo-hallitsee-nopeaa-kasvua-ketteran-viitesuunnittelun-avulla> Luettu 9.4.2021
- 22 TSK 51. Geoinformatiikan sanasto, 4. laitos. 2018. Sanastokeskus TSK ja Maanmittauslaitos.
- 23 Rasteri- ja vektorimuotoinen paikkatietoaineisto. Verkkoaineisto. Paikkaoppi. <https://www.paikkaoppi.fi/fi/rasteri-ja-vektorimuotoinen-paikkatietoaineisto/> Luettu 16.3.2021
- 24 Paikkatiedon hyödyntäminen ja paikkatietoanalyysit. Verkkoaineisto. Paikkaoppi. <https://www.paikkaoppi.fi/fi/paikkatiedon-hyodyntaminen-ja-paikkatietoanalyysit-2/> Luettu 19.3.2021
- 25 Suomen virallinen tilasto (SVT): Rakennukset ja kesämökit. Verkkojulkaisu. ISSN=1798-677X. Rakennuskanta 2019. Tilastokeskus. [http://www.stat.fi/til/rakke/2019/rakke\\_2019\\_2020-05-27\\_kat\\_002\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/rakke/2019/rakke_2019_2020-05-27_kat_002_fi.html) Luettu 9.3.2021
- 26 Suomen virallinen tilasto (SVT): Asunnot ja asuinolot. Verkkojulkaisu. ISSN=1798-6745. Yleiskatsaus 2019, 1. Asuntokanta 2019. Tilastokeskus. [http://www.stat.fi/til/rakke/2019/rakke\\_2019\\_2020-05-27\\_kat\\_002\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/rakke/2019/rakke_2019_2020-05-27_kat_002_fi.html) Luettu 9.3.2021
- 27 Tiekartta rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen huomioimiseksi rakentamisen ohjauksessa. 2017. Verkkoaineisto. Bionova Oy [https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Tiekartta-rakennuksen-elinkaaren-hiilijalanjäljen-huomioonottamiseksi-rakentamisen-ohjauksessa-4B3172BC\\_4F20\\_43AB\\_AA62\\_A09DA890AE6D-129197.pdf/1f3642e1-5d58-8265-40c1-337deeab782d/Tiekartta-rakennuksen-elinkaaren-hiilijalanjäljen-huomioonottamiseksi-rakentamisen-ohjauksessa-](https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Tiekartta-rakennuksen-elinkaaren-hiilijalanjäljen-huomioonottamiseksi-rakentamisen-ohjauksessa-4B3172BC_4F20_43AB_AA62_A09DA890AE6D-129197.pdf/1f3642e1-5d58-8265-40c1-337deeab782d/Tiekartta-rakennuksen-elinkaaren-hiilijalanjäljen-huomioonottamiseksi-rakentamisen-ohjauksessa-)

[4B3172BC\\_4F20\\_43AB\\_AA62\\_A09DA890AE6D-129197.pdf?t=1603260760602](#) Luettu 9.3.2021

- 28 Häkkinen, T. & Vares, S. 2018. Rakennusten khk-päästöjen ohjauksen vaikutusten arviointi. VTT Technology 324.  
<https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/technology/2018/T324.pdf>
- 29 Nousiainen, N. 2019. Rakentamisen ympäristövaikutukset. Verkkoaineisto. Eduskunta, ympäristövaliokunta. <https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/JulkaisuMetatieto/Documents/EDK-2019-AK-267112.pdf> Luettu 28.3.2021
- 30 Laki rakennuksen energiatodistuksesta. 2013. 50/2013.
- 31 Rakennuksen energia- ja ekotehokkuus. 9.4.2014, päivitetty 21.10.2020 Verkkoaineisto. Ympäristöministeriö. [https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Rakentaminen/Rakennuksen\\_energia\\_ja\\_ekotehokkuus](https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Rakentaminen/Rakennuksen_energia_ja_ekotehokkuus) Luettu 2.3.2021
- 32 Ympäristöministeriön asetus rakennuksen energiatodistuksesta. 1048/2017. 28.12.2017.
- 33 Energiatehokkuuslaki. 2014. 1429/2014.
- 34 Energiantuotannon ympäristövaikutukset. Verkkoaineisto. Energiateollisuus. [https://energia.fi/energiasta/energiantuotanto/energiantuotannon\\_ymparistovaikutukset](https://energia.fi/energiasta/energiantuotanto/energiantuotannon_ymparistovaikutukset) Luettu 28.3.2021
- 35 Esri Finland yrityksenä. Verkkoaineisto. Esri Finland. <https://www.esri.fi/fi-fi/tietoa-meista/esri-finland-yrityksena/intro> Luettu 16.3.2021
- 36 About Esri. Verkkoaineisto. Environmental Systems Research Institute. <https://www.esri.com/en-us/about/about-esri/overview> Luettu 16.3.2021
- 37 Product Life Cycle, ArcGIS Desktop 10.8.1. Verkkoaineisto. Environmental Systems Research Institute. <https://support.esri.com/en/Products/Desktop/arcgis-desktop/arcmap/10-8-1#product-support> Luettu 16.3.2021
- 38 ArcGIS CityEngine. Verkkoaineisto. Environmental Systems Research Institute. <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-cityengine/overview> Luettu 16.3.2021
- 39 About CityEngine. Verkkoaineisto. Environmental Systems Research Institute. <https://doc.arcgis.com/en/cityengine/latest/get-started/get-started-about-cityengine.htm> Luettu 16.3.2021
- 40 Tutorial 3: Map Control. Verkkoaineisto. Environmental Systems Research Institute. <https://doc.arcgis.com/en/cityengine/latest/tutorials/tutorial-3-map-control.htm> Luettu 18.3.2021

- 41 Ohjelmointiparadigmoja. Verkkoaineisto. Mooc.fi <https://ohjelmointi-19.mooc.fi/osa-7/1-ohjelmointiparadigmoja> Luettu 16.3.2021
- 42 One Click LCA. Verkkoaineisto. Bionova Ltd. <https://www.oneclicklca.com> Luettu 29.3.2021
- 43 Rakentamisen päästötietokanta. Verkkoaineisto. SYKE ja ympäristöministeriö. <https://co2data.fi> Luettu 29.3.2021
- 44 Kaukolämmön erillistuotannon paikkakuntien ryhmäjako ja laskennassa käytettävät ryhmäkohtaiset CO<sub>2</sub>-päästökertoimet (Päivitetty 12.5.2020). Verkkoaineisto. Energiateollisuus ry. [https://www.motiva.fi/files/17406/Erillistuotannon\\_paikkakunnat\\_2020.pdf](https://www.motiva.fi/files/17406/Erillistuotannon_paikkakunnat_2020.pdf) Luettu 30.3.2021
- 45 CO<sub>2</sub>-päästökertoimet. Verkkoaineisto. Motiva Oy. [https://www.motiva.fi/ratkaisut/energian kaytto\\_suomessa/co2-paastokertoimet](https://www.motiva.fi/ratkaisut/energian kaytto_suomessa/co2-paastokertoimet) Luettu 30.3.2021

## Pääsäännön koodirivit

```

import CO2_rakentaminen: "Support/CO2rakentaminen.cga"
import Esirakentaminen: "Support/esirakentaminen.cga"
import ELuokka: "Support/E-luokka.cga"
import Lammitys: "Support/lammitys.cga"
import Sahko: "Support/sahko.cga"
import Yllapito: "Support/korjaus.cga"

# GREENHOUSE GASES #####
# Kulutuksen osalta geometry.areassa kerroin 0.9 perustuu Ympäristöministe-
riön Energiatodistusoppaassa annettuun kertoimeen,
# jolla määritetään asuinpinta-ala kokonaispinta-alasta, ellei se ole tarkasti tie-
dossa.

report("GHG. Construction of building (tn)", CO2_rakentaminen.Yht * geome-
try.area / 1000)
# Rakentamisen kokonaispäästöt per pinta-ala, kerroin /1000 muuntaa kilot tonneiksi.
report("GHG. Construction of foundations (tn)", Esirakentaminen.Foundation *
geometry.area / 1000)
report("GHG. Repair/demolition (tn/year)", (Yllapito.Korj_yht/50 + Yllapito.Pur-
kutyo) * geometry.area /1000)
###Korjausarvot ovat 50 vuodelle, siksi kerroin /50. Tuloksena aina joko korjaus
tai purku, koska jompi kumpi on aina nolla.
report("GHG. Construction, total (tn)", (Esirakentaminen.Foundation + CO2_ra-
kentaminen.Yht) * geometry.area /1000)
report("GHG. Yearly heating (tn)", ELuokka.Eluku * Lammitys.heat * (geome-
try.area * 0.9) /1000000)
# Eluokka.Eluku antaa arvon kWh/m^2, Kulutus.heat taas CO2 päästöt mallina
kg/MWh, eli g/kWh. Tämän vuoksi /1 000 000, jotta loppuarvot tonneina.
report("GHG. Yearly electricity (tn)", ELuokka.Eluku * Sahko.elec * (geome-
try.area * 0.9) /1000000)
report("GHG. Yearly, total use (tn)", ELuokka.Eluku * (Lammitys.heat + Sa-
hko.elec) * (geometry.area * 0.9) /1000000 + ((Yllapito.Korj_yht/50 + Yllapito.Purkutyo) * ge-
ometry.area) /1000)
###Kts. ylempää
report("GHG. Lifetime, use, 50 years (tn)", (ELuokka.Eluku * (Lammitys.heat +
Sahko.elec) * (geometry.area * 0.9) /1000000 *50) + (((Yllapito.Korj_yht + Yllapito.Purkutyo) *
geometry.area) /1000))
report("GHG. Lifetime, use, 100 years (tn)", ELuokka.Eluku * (Lammitys.heat +
Sahko.elec) * (geometry.area * 0.9) /10000 + (((Yllapito.Korj_yht * 2) + Yllapito.Purkutyo) *
geometry.area) /1000))
# Edellisessä lopussa kerroin *50, tässä käytetty /1 000 000 :n sijasta /10 000

```

```
## Korjausarvo kerrottu kahdella, arvo 50 vuoden korjauksille.  
report("GHG. Lifetime, total, 50 years (tn)", (ELuokka.Eluku * (Lammitys.heat +  
Sahko.elec) * (geometry.area * 0.9) /1000000 * 50) + (((Esirakentaminen.Foundation +  
CO2_rakentaminen.Yht + Yllapito.Korj_yht + Yllapito.Purkutyo) * geometry.area) /1000))  
report("GHG. Lifetime, total, 100 years (tn)", (ELuokka.Eluku * (Lammitys.heat +  
Sahko.elec) * (geometry.area * 0.9) /10000) + (((Esirakentaminen.Foundation + CO2_rakenta-  
minen.Yht + Yllapito.Korj_yht*2 + Yllapito.Purkutyo) * geometry.area) /1000))  
# Haluttaessa selvittää elinkaaripäästöt jollekin muulle aikavälille, helpoin on  
muuttaa 50 years -kohdan *50 -kerroin halutunlaiseksi.  
#Laitathan vastaavan kertoimen myös KorjauPurku.Korj_yht -kohdalle! Esim. 28  
vuoden elinkaari: käytön osalta *28 ja Korj_yht * (2.8/5), tai Korj_yht * (28/50).  
### Jos 28 vuoden päästä rakennus puretaan ja sekin tahdotaan huomioida,  
muuta korjauspurku.cga:n Purkutyo-kohtaa. Ohjeistus myös siellä.
```

## Käyttöohje KHK-päästöjen arviointityökaluun CityEnginessä

30.3. 2021

Kalle Hotti

### Työkalun sisältö

Työkalu koostuu pääsääntötiedostoon liitettävistä koodiriveistä (import- ja report-komennot) sekä kuudesta alasäännöstä: CO2rakentaminen.cga, E-luokka.cga, esirakentaminen.cga, korjaus.cga, lammitys.cga ja sahko.cga.

Laskenta tapahtuu pääosin report-riveillä, alasäännöt sisältävät tarvittavat luvut.

### Käyttöönotto

Liitteessä 1 esitetyt import-komennot lisätään sääntötiedostoon, selkeintä ne on lisätä muiden import-komentojen joukkoon. Huomioi import-komentoa liitettäessä viitattavan tiedoston sijainti (oletuksena Support-kansio)! Huomaa myös, että cga lukee isot ja pienet kirjaimet eri merkkeinä ja luulee väliviivaa miinusmerkkiksi (paitsi lainausmerkkien sisässä). Esimerkiksi E-luokka on siis syytä kirjoittaa esimerkiksi ELuokka tai E\_luokka. Jos muutat luokkien nimiä, joudut muuttamaan ne myös laskentakaavoihin!

report-rivit lisätään koodin siihen osioon, jossa käsitellään kerrospinta-alaan liittyvää laskentaa. Building\_Construction.cga:ssa sopiva kohta löytyy seuraavien rivien alta:

```
FloorStep2(idx,n,usage) -->
```

```
# Report all things based on floor area here. This is called for each floor.
```

```
report("Building, Gross Floor Area (m2)", geometry.area)
```

```
report("Parcel, Floor Area Ratio (Density)", geometry.area/Lot_Area)
```

### Käyttö

Rules-valikkoon ilmestyy kuusi uutta alavalikkoa, niillä nimillä, jotka olet importkomennossa alisäännöille antanut. Rakentamiseen ja ylläpitoon liittyvissä valikoissa valmiiksi luodut stylet perustuvat VTT:n raporttiin. Default style on raportin perusarvo, min ja max puolestaan siellä mainitut ala- ja yläarvot. E-luokkien arvot ovat ympäristöministeriön asetuksesta, kulutuksen osalta arvojen lähteet löytyvät kommentteina kyseisistä cga-tiedostoista.

Koodia ja laskennan toimintaa on ylipäättään kommentoitu koodin sekaan kattavasti (liite 1 ja alisäännöt), siellä on selitetty laskenta ja esitetty ohjeita. Erityisesti korjaus.cga:n kommentit on hyvä lukea, siellä on lisäohjeita kyseisten arvojen käyttöön.

## **Raportit**

Kaikki raportin nimet alkavat GHG. -tekstillä, jotta niitä voitaisiin käyttää suoraan myös Dashboardissa. Osa arvoista on sellaisia, että niistä on hyötyä oikeastaan vain Dashboardissa, osa taas sellaisia, että siellä niillä ei tee mitään. Ensimmäisenä esiintyvä GHG-arvo on CityEnginen automaattisesti luoma summa-arvo, eikä siihen kannata kiinnittää mitään huomiota. Siinä on siis ynnättyä yhteen 301 vuoden edestä käytön päästöjä sekä rakentamisen päästöt kahteen kertaan.