

3D-Virtuaalipuistot – kustannustehokkuutta, tarkkuutta ja lisäarvoa Helsingin viheralueiden ylläpitoon

Hankkeen loppuraportti

Alkusanat

Helsingin kaupungin Innovaatorahasto rahoitti 3D-virtuaalipuistot-hanketta vuoden 2016 aikana. Hankkeen päätavoitteena oli kehittää menetelmä Helsingin puistoissa kasvavien puiden kartoittamiseen. Lisäksi kaupungin katupuurekisteri päivitettiin uusimman laserkeilausaineiston avulla. Katupuurekisterin päivityksessä oli tarkoitus hyödyntää jo kehitettyä menetelmää. Tässä raportissa käydään läpi molempien edellä mainittuihin tavoitteisiin pääsemiseksi läpikäytyt työvaiheet sekä käsitellään saavutettujen tulosten luotettavuutta ja käytännön hyödyntämismahdollisuuksia. Raportti jakaantuu kahteen osaan. Ensimmäinen käsittelee puistopuiden kartoitukseen kehitettyä menetelmää ja sen avulla saavutettuja tuloksia. Toisessa osassa käydään läpi katupuutrekisterin päivityksen työvaiheet.

Tiivistelmä

Hankkeessa kehitettiin ja vietiin käytäntöön laajojen alueiden kartoittamiseen soveltuva, puukohtaista tietoa tuottava menetelmä. Menetelmän avulla ilmasta käsin havaittavissa oleville latvuksille pystytään määrittämään pituus rungon läpimitta ja latvusprojektion pinta-ala. 38 maastokoealan avulla tehdyssä tarkastelussa pilottivaiheen menetelmä aliarvioi puiden kokonaismäärän 9,7 prosentilla, mikä johtui suurelta osin pienten puiden jäämisestä suurempien latvusten alle. Vanhojen, avoimella paikalla kasvaneiden puiden osalta monilatvaisuus aiheutti osalla alueista yliarviota puistopuiden runkoluvussa. Puistopuiden kartoittamisen lisäksi kaupungin katupuurekisteriin kuuluvien noin 23000 puun tiedot päivitettiin pituuden ja läpimitan osalta. Lisäksi jokaiselle puulle määritettiin uutena tunnuksena latvusprojektion pinta-ala.

Hankkeen yhteydessä kartoitettiin ensimmäistä kertaa kattavasti Helsingin puistoissa kasvavat puut. Kartoitettujen puistojen yhteenlaskettu pinta-ala oli noin 2000 hehtaaria. Alueelta löydettiin noin 400 000 puuta, joiden yhteenlaskettu latvuspeitto oli noin 980 hehtaaria. Tuotetun tiedon avulla voidaan helposti tuottaa puisto- ja pienaluekohtaisia estimaatteja puuston pituudesta, läpimittajakaumasta ja latvuspeittävydestä. Puutason tieto mahdollistaa myös kaukokartoitukseen perustuvan puistojen tilan seurannan aloittamisen.

Osa 1: Puistopuiden kartoitus

Johdanto

Tutkimushankkeen tavoitteena oli kartoittaa Helsingin puistopuut lentolaserkeilaukseen (airborne laser scanning, ALS) perustuvalla menetelmällä. Aiemmin katupuurekisterin päivitykseen kehitetty menetelmä haluttiin muokata puistoalueiden kartoittamiseen soveltuvaksi. Toteutuessaan puistopuiden laajamittainen kartoitus mahdollistaisi kattavan puutason tiedon käyttämisen esimerkiksi puistoalueiden hoitotoimenpiteiden kilpailuttamisessa. Hankkeella on yhtymäkohtia Helsingin 3D-tietomalliin. Kattava ja paikkaan sidottu puutieto voidaan yhdistää osaksi 3D-tietomallia,

jolloin puutason tieto on helposti käytettävissä kaupunkiympäristön hankkeiden suunnittelussa sekä ekosysteemipalveluihin liittyvissä analyyseissa (esimerkiksi ilmakehystä sidotun hiilen määrän estimointi).

Alun perin kolmivuotiseksi suunnitellun hankkeen ensimmäisen vuoden tavoitteena oli kehittää menetelmä noin 800 puistohehtaarin kartoittamiseksi ja tuottaa puistoalueille alustavat puukartat. Hankkeen kahden seuraavan vuoden tavoitteina olivat pilottivaiheen menetelmän tarkentaminen ja entistä laajemman, kaikki Helsingin puistot kattavan puurekisterin perustaminen ja rekisterin ylläpidossa tarvittavien menetelmien kehittäminen. Hankkeen rahoitusta ei kuitenkaan jatkettu ensimmäisen vuoden jälkeen, joten tämä raportti kattaa ainoastaan hankkeen pilottivaiheen tulokset.

Materiaalit ja menetelmät

Puistoalueiden valinta

Puiden kartoittaminen rajattiin puistoalueille Helsingin kaupungin yleisten alueiden rekisterin paikkatiedon avulla. Kartoitukseen sisällytetyt puistoalueet valittiin pääosin kaavamerkinnän ja käyttötarkoituksen perusteella (Taulukko 1). Valmiiseen luokitteluun perustuvan valinnan lisäksi, puustoltaan tiheimmät (ts. "metsämäisimmät") kohteet jätettiin tarkastelun ulkopuolelle.

Talukko 1. Puiden kartoitukseen sisällytettyjen puistoalueiden kaavamerkinnät ja käyttötarkoitukset sekä luokkien yhteenlaskettu pinta-ala.

kaavamerkintä	käyttötarkoitus	pinta-ala (ha)
Luonnontilassa säilytettävä puistoalue	Asemakaavoitettu viheralue	2.4
Puisto	Asemakaavoitettu viheralue	1696.7
Puisto	Leikkipuisto	39.8
Puisto	Kartano- ja huvila-alue	35.1
Puisto	Viljelypalsta-alue	31.1
Puisto	Haudat (hautausmaat)	23.2
Puisto	Leikkipaikka	20.5
Puisto	Koira-aitaus	11.2
Puisto	Erytiskohteet, asemakaavoitettu viheralue	5.3
Puisto	Liikennealue	1.7
Puisto	Muu toimiluokka	1.3
Puisto	Suojaviheralue	0.7
Puisto	Tontti (rakentamattomat / sopimus)	0.7
Puisto	Saari (saaret ilman siltayhteyttä)	0.5
Puisto	Uimaranta-alue	0.1
Puisto	Luonnonsuojelualue	0.1
Puisto	Kartanoalue / leikkipaikka	0.1
Puisto, alue jolla ympäristö säilytetään	Erytiskohteet, asemakaavoitettu viheralue	43.4
Puisto, alue jolla ympäristö säilytetään	Kartano- ja huvila-alue	32.2
Puisto, alue jolla ympäristö säilytetään	Asemakaavoitettu viheralue	27.9
Puisto, alue jolla ympäristö säilytetään	Leikkipuisto	0.6
Puisto, alue jolla ympäristö säilytetään	Leikkipaikka	0.2
Puisto, alue jolla ympäristö säilytetään	Saari (saaret ilman siltayhteyttä)	0.1
Puisto, alue jolla ympäristö säilytetään	Koira-aitaus	0.1
Puisto, alue jolla ympäristö säilytetään	Kartanoalue / leikkipaikka	0.1
		<i>Yht. 1975.02</i>

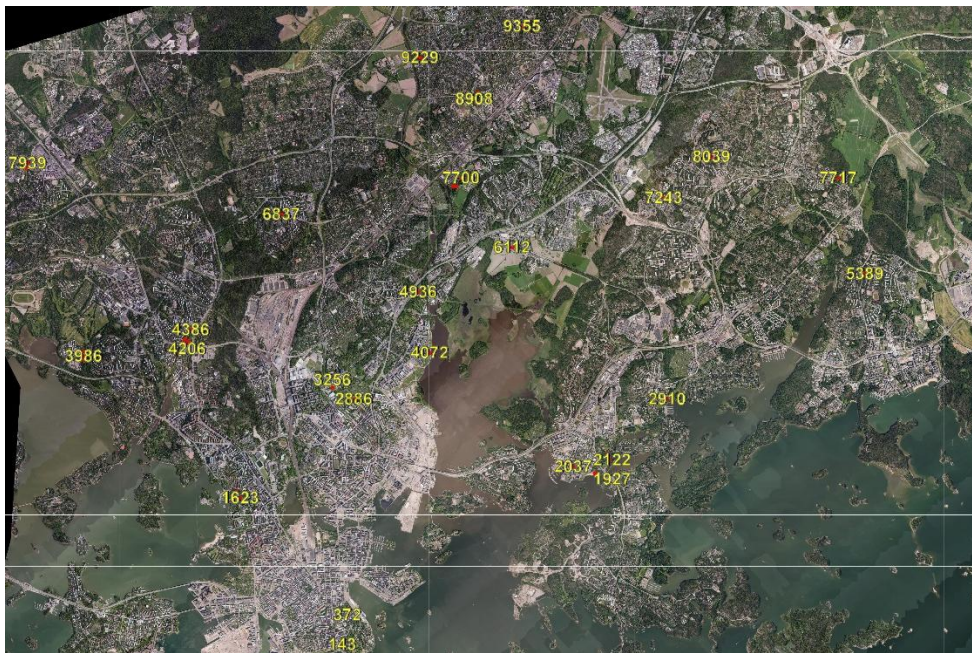
Kaukokartoitusaineisto

Puiden kartoitus perustui kaukokartoitustiedon ja maastossa mitatun puutason tiedon yhdistämiseen. Hankkeessa hyödynnettiin Helsingin kaupungin vuonna 2015 keräämää ALS-dattaa. Aineisto kerättiin keväällä lehdettömään aikaan ja sen keskimääräinen pulssitiheys oli noin 20 pulssia/m². ALS-dattaa käytettiin sekä puiden tunnistamisessa että puutason tunnusten ennustamisessa. Puiden tunnistusta varten kartoitettaville puistoalueille muodostettiin latvuston korkeutta kuvaavat pintamallit (canopy height model, CHM). Pintamallien resoluutioksi valittiin riittävän erottelukyvyn saavuttamiseksi 0,5 metriä. Yksittäisten puiden latvukset erotettiin pintamalleista valuma-aluesegmentoinnin avulla.

Maastoaineisto

Kesän 2016 aikana mitattiin yhteensä 40 kapplaletta 32m x 32m referenssikoealaa ympäri Helsinkiä (Kuva 1). Koealojen sijoittelua varten puistoalueet jaettiin 32m x 32m hilaan. Jokainen hilasolu luokiteltiin ALS-aineistoon perustuen yhteen kolmesta "latvusluokasta". Luokan järjestysnumeron kasvaessa puuston tiheys ja keskipituus kasvavat. Koealat jaettiin latvusluokkien välillä siten, että kullekin luokalle osoitettiin koealoja suhteessa luokan yhteispinta-alaan.

1. Latvuspeitto alle 50 % pinta-alasta (12 koealaa)
2. Latvuspeitto yli 50 % pinta-alasta ja keskipituus alle 15 metriä (16 koealaa)
3. Latvuspeitto yli 50 % pinta-alasta ja keskipituus yli 15 metriä (12 koealaa)



Kuva 1. Maastokoealojen sijoittelu

Koealat mitattiin maastolaserkeilaimen (terrestrial laser scanner, TLS) avulla. TLS-aineiston avulla koealoille muodostettiin yksityiskohtaiset puukartat, jotka sisälsivät tiedot läpimitaltaan yli 5 senttisten puiden sijainneista ja läpimitoista. Referenssikoealoilta mitattua tietoa käytettiin latvusten tunnistuksen optimointiin, puutunnusten mallintamiseen, sekä menetelmän tarkkuuden arviointiin.

Latvusten tunnistus ja menetelmän optimointi

Jokaiselle puistoalueelle muodostettiin ALS-datan avulla latvuston ja yksittäisten puiden korkeutta kuvaava latvuston pintamalli (canopy height model, CHM). Yksittäiset latvukset irrotettiin pintamallista valuma-aluesegmentoinnin avulla. Menetelmä etsii pintamallista paikallisia huippuja eli puiden latvoja. Huippujen löytämisen jälkeen jokaisen latvapisteiden ympärille muodostetaan latvuksen ulkoraja eli latvussegmentti pintamallin muotoa seuraten. Latvussegmentti kuvaa puun latvuksen projektiota ylhäältäpäin.

Latvuston pintamallit ja niiden ennakkokäsittely vaikuttavat olennaisesti valuma-aluesegmentoinnin tuloksiin. Vaikutuksia selvitettiin pintamallien lähtötietoina olevaa ALS-dataa sekä valmiita pintamalleja suodattamalla. ALS-datan suodattamista testattiin kolmella tavalla:

1. ALS-aineiston käyttö ilman muokkauksia
2. Irrallisten kaikujen ja kaikuryhmien poisto
3. Pelkkien "last-of-many"-kaikujen käyttö

Pintamallien suodatukseen testasimme yhteensä kahdeksaa eri suodatusta. Testatuista suodatuksista kaksi perustui aiemmin julkaistuihin tutkimuksiin (Hyyppä et al. 2001, Kaartinen et al. 2012). Molemmat suodatukset perustuvat 3x3 kuvaikkunaan ja painottavat suodatusikkunan keskimmäistä kuva-alkioita. Loput kuusi suodatusta painottivat niin ikään suodatusikkunan keskimmäisiä kuva-alkioita ja noudattivat voimakkuudeltaan normaalijakauman muotoa. Suodatuksen voimakkuutta ja suodatusikkunan kokoa voidaan muuttaa jakauman parametrien avulla. Suodatusten kuvaikkunoiden koko vaihteli 3x3 (1,5 m) ja 13x13 (6,5 m) kuvaikkunoiden välillä.

Testattavia ALS-aineiston ja valmiiden pintamallien suodatusyhdistelmiä syntyi yhteensä 24 kappaletta, joista valittiin ilmakuvia ja syntyneitä puukarttoja vertaamalla neljä parasta (Taulukko 2). Valitut yhdistelmät testattiin perusteellisemmin maastoaineiston avulla.

Taulukko 2. Valituissa latvustentunnistusmenetelmissä käytetyt ALS-aineiston ja pintamallien suodatukset

	ALS-aineisto	Pintamallin suodatus
Menetelmä 1	suodattamaton	kuvaikkunan keskiosan paino 25 %
Menetelmä 2	suodattamaton	kuvaikkunan keskiosan paino 43 %
Menetelmä 3	irraliset kaikuryhmät poistettu	kuvaikkunan keskiosan paino 25 %
Menetelmä 4	irraliset kaikuryhmät poistettu	kuvaikkunan keskiosan paino 43 %

Tunnusten mittaaminen ja mallintaminen

Läpimitta

ALS-aineiston pisteet leikattiin muodostettujen latvussegmenttien avulla. Näin jokaiselle havaitulle puulle pystyttiin osoittamaan sitä kuvaavat laserpisteet. Jokaiselle puulle laskettiin 23 pisteiden jakaumaa kuvaavaa ALS-piirrettä. Tästä joukosta etsittiin Random Forest -menetelmän (Breiman 2001, Falkowski et al. 2010) avulla parhaiten läpimittaa selittävät muuttujat. Läpimittojen mallintamisessa käytettiin lähimmän naapurin menetelmää (kNN). Menetelmässä mittaamattomien puiden tunnuksat mallinnetaan k lähimmän mitatun puun avulla (Crookston & Finley, 2008). Läpimittojen ennustamisessa käytettiin viittä ALS-piirteiden suhteen lähintä puuta ($k=5$). Yhteensä mallinnuksessa käytettiin 837 maastossa mitattua puuta.

Latvuspeitto

Puukohtainen latvuspeitto määritettiin suoraan puukohtaisista pistepilvistä. Kunkin puun latvuksen projektio määritettiin pistepilven äärimmäisten kasvillisuuspisteiden avulla XY-tasossa. Alueason latvuspeittoestimaatit laskettiin alueella kasvavien yksittäisten puiden latvusprojektioiden summana.

Koska monet rakennetun ympäristön kohteista (sähkolinjat, lampputolpat yms.) oli ALS-materiaalissa luokiteltu kasvillisuuteen kuuluviksi, tunnistetut latvuksista pyrittiin poistamaan kohteet, jotka eivät olleet puita. Myös tässä luokittelussa käytettiin hyväksi puille laskettuja ALS-piirteitä ja piirreyhdistelmiä. Tässä vaiheessa löydettyjen puiden joukosta poistettiin ne puut, joilla valitut ALS-piirteet erosivat muista riittävästi. Puiksi luokiteltiin kohteet, jotka täyttivät piirteiden ja piirreyhdistelmien osalta seuraavat kriteerit.

- laserpisteiden lukumäärä latvussegmentin sisällä > 30
- latvusprojektion pinta-ala $> 2 \text{ m}^2$
- pisteiden maksimikorkeus korkeus välillä 4 m – 35 m
- 80 % korkeuden pistekertymä > 0
- 90 % korkeuden pistekertymä $> 0,2$
- 90 % pistekertymän korkeuden suhde maksimikorkeuteen $> 0,6$

- pisteiden korkeuden keskihajonnan suhde pisteiden maksimikorkeuteen > 0,05

Tulosten tarkkuuden arviointi

Puiden tunnistamisen tarkkuuta arviointiin kaikille neljälle menetelmälle koealatasolla. Havaittujen latvussegmenttien määrää verrattiin maastossa määritettyyn puumäärään. Puiden läpimittojen määrittämisen tarkkuutta taas arviointiin puutasolla ja vain menetelmälle 2. Tarkkuuden määrittämiseen kelpuutettiin vain ne mallinnetut puut, jotka voitiin yhdistää maastossa mitattuihin puihin suurella varmuudella. Epävarmat tapaukset jätettiin tarkastelun ulkopuolelle. Tällaisia olivat esimerkiksi läpimitoiltaan samankaltaiset, hyvin lähekkäin sijaitsevat puut.

Koeala- ja puutason tunnusten tarkkuutta arviointiin harhan (bias, kaava 1) ja keskineliövirheen neliöjuuren (RMSE, kaava 2) avulla.

$$bias = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{n}, \quad \text{Kaava 1}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}, \quad \text{Kaava 2}$$

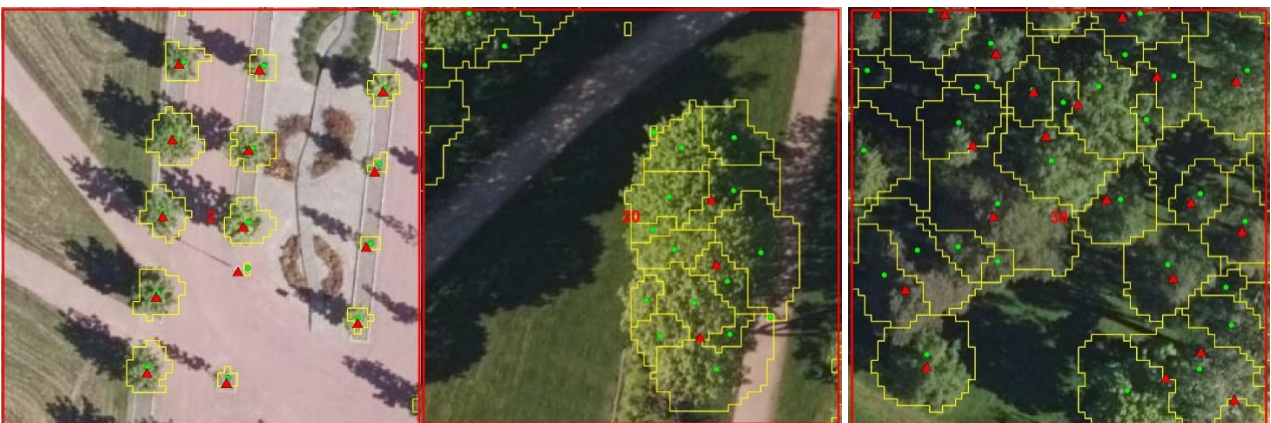
joissa n on havaintojen määrä, y_i havaittu arvo ja \hat{y}_i estimoitu arvo.

Tulokset

Tulokset esitetään kahdessa osassa. Ensimmäinen osa kattaa 38 maastokoealan avulla suoritettujen latvusten segmentointimenetelmien vertailun. Toisessa osassa tarkastellaan parhaaksi osoittautuneella segmentointimenetelmällä saavutettuja puutunnuksia koko kartoitetulla 2000 hehtaarin alueella.

Segmentointimenetelmien vertailu

Maastokoealojen avulla testattujen puuntunnistusmenetelmien tarkkuudet vaihtelivat koealatasolla huomattavasti. Kuva 2 esittää kolmea erityyppistä koealaa ositteista 1 ja 3. Oikealta vasemmalle, kaksi ensimmäistä kuvaa esittävät ositteen 1 koealoja ja kolmas kuva ositteen 3 koealaa. Ensimmäisen ositteen koealat ovat latvuspeiton suhteen melko samanlaisia, mutta keskipituus eroaa useilla metreillä. Kuvaparista huomataan, että ylimääräisiä puita aiheuttaa matalassa puustossa esimerkiksi valaisintolpista kun taas pidemmässä puustossa virhettä aiheuttavat monihaaraiset latvukset. Ositteen 3 koealaa esittävä kuva havainnollistaa tiheän ja korkeudeltaan vaihtelevan puuston vaikutusta menetelmän tarkkuuteen. Suuret ja yhtenäiset latvukset löydetään tarkasti, mutta haaroittuneet ja toisaalta matalat latvukset tuottavat ongelmia.



Kuva 2. Järjestyksessä oikealta vasemmalle, kaksi ensimmäistä kuvaa havainnollistavat ositteeseen 1 kuuluvia koealoja ja kolmas kuva ositteen 3 koealaa. Punaiset kolmiot kuvaavat maastossa mitattuja todellisia puita ja vihreät pisteet ALS-aineiston perusteella kartoitettuja latvussegmentteihin perustuvia puita.

Taulukossa 3 esitetyistä tuloksista voidaan huomata, että mikään testatuista menetelmistä ei toimi muita paremmin kaikilla puisto-/latvustyypeillä. Menetelmä 2 oli keskimääräisesti paras, kun kaikki ositteet otetaan huomioon. Koko alueen tasolla menetelmä aliarvioi puiden lukumäärää noin 9,7 prosenttia. Ositekohtaisessa tarkastelussa huomataan,

että ositteessa 1 puiden määrässä on 50 prosentin yliarvio, kun taas ositteissa 2 ja 3 puiden määrä aliarvioidaan vastaavasti 15,4 ja 7,2 prosentilla.

Taulukko 3. Puiden havaitsemisen ositekohtainen tarkkuus menetelmille 1-4. Tarkimmaksi osoittautuneen menetelmän tunnusluvut esitetään kursivilla.

	koko alue		osite 1		osite 2		osite 3	
	<i>bias</i> (<i>runkoa/koeala</i>)	<i>RMSE</i>	<i>bias</i> (<i>runkoa/koeala</i>)	<i>RMSE</i>	<i>bias</i> (<i>runkoa/koeala</i>)	<i>RMSE</i>	<i>bias</i> (<i>runkoa/koeala</i>)	<i>RMSE</i>
Menetelmä 1	3.03	14.39	-3.83	6.16	4.81	12.38	5	19.55
Menetelmä 2	<i>2.37</i>	<i>14.33</i>	<i>-3.42</i>	<i>6.46</i>	<i>4.75</i>	<i>12.97</i>	<i>2.22</i>	<i>19.38</i>
Menetelmä 3	-3.71	14.34	-2.58	7.94	-5.5	14.17	-4.44	19.77
Menetelmä 4	-7.42	16.67	-3.33	8.02	-10.62	19.25	-8.56	20.63

Läpimitan tarkkuus

Mallinnettujen puukohtaisten läpimittojen tarkkuudet on esitetty läpimittaluokittain Taulukossa 4. Huomionarvoista on, että menetelmä tuotti tarkimmat tulokset läpimitaltaan keskimääräisille (20-40 cm) puille kun taas suurimmissa, ja etenkin pienimmissä läpimittaluokissa suhteellinen RMSE nousi melko suureksi.

Taulukko 4. Läpimitan mallinnuksen tarkkuus puutasolla läpimittaluokittain.

	Yhteensä	5-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	30-40 cm	40-50 cm	50+ cm
bias, cm	0.17	-6.86	-4.79	-1.74	1.5	6.72	18.15
bias %	1	-87	-31	-7	4	15	29
RMSE, cm	10.04	11.14	8.08	5.38	5.8	10.31	24.68
RMSE %	36	142	52	22	17	23	39

Puistopuiden kartoituksen tarkkuus

Kaikkiaan alueelta löydettiin 399 289 latvussegmenttiä, joille määritettiin läpimitta, pituus ja latvusprojektiio eli puukohtainen latvuspeitto (Taulukko 5).

Taulukko 5. Kartoitettujen puistopuiden lukumäärä, keskipituudet ja yhteenlaskettu latvuspeitto

pituusluokka	puiden lukumäärä	keskipituus (m)	keskiläpimitta (cm)	latvuspeitto (ha)
alle 5 m	12689	4.5	15.8	8.7
5-10 m	71246	7.5	23.2	94.7
10-15 m	84019	12.6	25.9	182.1
15-20 m	99088	17.5	26.6	268.9
20-25 m	96894	22.4	28.5	302.1
25-30 m	34068	26.6	32.1	118.2
yli 30 m	1285	31	37.8	5.8
<i>yhteensä</i>	<i>399289</i>	<i>16.3</i>	<i>26.5</i>	<i>980.4</i>

Tulosten tarkastelu

Kuten tuloksista käy ilmi, yksiselitteisesti parasta tapaa latvussegmenttien tunnistamiseen ja latvuksen rajojen irrottamiseen ei pystytty nimeämään testattujen menetelmien joukosta. Vaikka Menetelmä 2 osoittautuikin keskimäärin tarkimmaksi, ositekohtaisessa tarkastelussa huomataan, että Menetelmä 3 tuottaa pienemmän harhan harvassa puustossa (osite 1) kun taas tiheämmässä puustossa (osite 2) Menetelmä 1 on RMSE:n suhteen tarkempi, eli estimoitu puiden määrä osuu keskimäärin lähemmäs oikeaa. Tulokset kertovat paitsi aihepiiriin lisätutkimuksen

tarpeesta, myös puistoalueiden puuston suuresta vaihtelevuudesta. Jopa kasvuympäristöstä johtuvat puulajien sisäiset erot latvuksen rakenteessa ja muodossa vaikuttavat voimakkaasti latvuksen tunnistuksen onnistumiseen ja optimaalisen tunnistusmenetelmän valintaan.

Keskimäärin parhaaksi todettu Menetelmä 1 tuottaa keskimäärin 9,7 %:n aliarvion puiden määrästä. Tämä tarkoittaa, että keskimäärin noin joka kymmenes puu jää löytymättä. Ositekohtaisessa tarkastelussa huomataan, että harvimmissa puustoissa menetelmä tuottaa jopa 50 %:n yliarvio puiden määrästä. Osite 1 koostuu pääosin nuorista ja matalista puista joilla on yhtenäinen ja suppea latvus. Merkittävä virhe johtuu suurelta osin yhdellä koealoista kasvavasta vanhasta tammesta, jonka matala, mutta leveä latvus pilkkoutui automaattisessa tunnistuksessa 16 latvussegmentiksi. Avoimella kasvavat vanhat puut ovat latvuksiin perustuvan puiden kartoittamisen kannalta usein ongelmallisia monilatuaisuutensa vuoksi. Tällaiset kohteet edellyttäisivät hyvin erilaisen latvuksentunnistusmenetelmän käyttöä kuin vastaavan pituinen nuori puusto. Tutkimuksessa esiteltyä menetelmää käytettäessä tulisikin jatkossa kiinnittää enemmän huomiota puistoalueiden ositukseen, jotta ositteiden sisäinen hajonta olisi mahdollisimman pieni.

Tarkasteltaessa ositetta 2, huomataan, että ensimmäisessä ositteessa havaittu runkoluvun suuri yliarvio on vaihtunut 15,4 %:n aliarvioon. Tämä selittyy suurelta osin puuston kokojakaumalla. Vallitsevan latvuskerroksen (tai vallitsevien puiden) alla kasvaa usein pienempiä puita. Nämä pienet puut ovat erittäin vaikeita havaita pintamalleista, sillä ympäröivien suurten puiden latvukset peittävät ne suurelta osin näkyvistä. Tällaisissa tapauksissa on hyvin todennäköistä, että havaitsematta jääneet puut ovat selvästi havaittuja puita pienempiä, eli suurimmat puut pystytään kartoittamaan tarkemmin kuin prosenttilukema antaa ymmärtää. Toinen vaihtoehto puiden puuttumiselle on latvusten yhteensulautuminen. Kaksi vierekkäin kasvavaa puuta muodostavat tällöin niin yhtenäisen latvuksen, että puita on hyvin vaikea erottaa toisistaan pelkän latvuksen perusteella. Tässäkin tapauksessa latvus pystytään rajaamaan hyvinkin tarkasti, vaikka latvukseen kuuluva todellinen runkomäärä arvioidaankin usein todellista pienemmäksi.

Menetelmä aliarvioi puiden määrää myös ositteessa 3. Kuitenkin, aliarvio oli 7,2 % eli alle puolet ositteen 2 aliarviosta. Kolmas osite koostuu keskimäärin suurimmista ja näin ollen todennäköisesti myös vanhimmista puista. Latvukset ovat tällöin suurempia ja varjostavat tehokkaasti matalampaa kasvillisuutta. Tähän ositteeseen kuuluvat myös esimerkiksi hoidetut puistot, joissa alemmaa latvuskerrosta ei kasvateta. Molemmissa tapauksissa lopputuloksena on, että suurten latvusten alle katoaa vähemmän pieniä puita. Korkea RMSE kuitenkin kertoo, että vaihtelu koealojen välillä on suurta. Tässäkin ositteessa puistojen tarkempi ryhmittely siis todennäköisesti parantaisi menetelmän tarkkuutta.

Kehitetyn menetelmän avulla löydettiin kokonaisuudessaan lähes 400.000 puuta. Koealoilta kerätyn referenssin perusteella todellinen puumäärä on todennäköisesti lähellä 440.000 puuta. Puiden läpimitan mallintamisessa törmättiin samantyyppisiin ongelmiin kuin puiden tunnistamisessa. Havaitun puun korkeudella on suhteessa suuri vaikutus mallinnettavaan läpimittaan. Koska pienet puut sijaitsevat puustoissa usein suurempien läheisyydessä, on todennäköistä, että osa pienistä puista saa todellisuudessa pituutensa esimerkiksi vieressä kasvavan suuremman puun oksasta. Tällöin läpimittaestimaattiin syntyy yliarvio. Koska puut ovat pieniä, jo muutaman senttimetrin virhe on prosentuaalisesti erittäin suuri. Vastaavasti suurilla puilla ongelmia aiheuttavat jakautuneet latvukset. Suurimmilla, etenkin avoimella paikalla kasvavilla puilla pituuden merkitys läpimitan selittäjänä pienenee. Tällöin on tärkeää, että mallinusketjuun saadaan tietoa puun latvuksesta mahdollisimman kattavasti. Jakautuneiden latvusten tapauksessa yksi latvussegmentti kuvaa usein vain pientä osaa latvuksesta, jolloin esimerkiksi latvuksen tilavuus ja leveys jäävät murto-osaan todellisesta.

Määritetyistä tunnuksista latvuspeitto on selvästi luotettavin, vaikka sen validointiin tarvittavaa maastodataa ei pystyttykään hankkeessa keräämään. Toisin kuin puiden määrä ja havaittujen puiden läpimitta, latvuspeiton estimaatti perustuu suoriin havaintoihin. Latvuspeittoa tarkastellessa on kuitenkin huomioitava, että käytetty ALS-materiaali on kerätty lehdettömään aikaan. Määritetty latvuspeitto on siis lehtipuiden osalta pienempi kuin todellinen kasvukauden aikainen latvuspeitto. Epävarmuutta estimoidun latvuspeitteen oikeellisuuteen tuovat pienet, alle 4 metriset puut sekä puiden joukossa mahdollisesti olevat valaisinpylväät ja muut rakennetun ympäristön kohteet.

Aineiston käsittelyn kannalta sähkölinjat, tolpat ja muu rakennettu ympäristö aiheuttivat ongelmia puiden tunnistamisen kannalta. ALS aineiston luokittelu ei ole täydellinen ja esimerkiksi suurjännitelinjat oli valmiissa luokituksessa sisällytetty korkeaan kasvillisuuteen. Myös esimerkiksi talojen katoilla olevat hormit ja muut kohoumat oli suurelta osin luokiteltu osaksi kasvillisuutta. Näitä ns. "kovia" kohteita pyrittiin tunnistamaan puusegmenttien

joukosta, mutta testatuilla automaattisilla menetelmillä menetettiin etenkin pieniä puita. ALS-aineiston kehittyneempi luokittelu parantaisi tässä kehitetyn menetelmän tarkkuutta.

Johtopäätökset

Hankkeen ensimmäisessä vaiheessa kehitetyn menetelmän avulla pystyttiin kartoittamaan kaikki Helsingin puistot ja tuottamaan suuntaa-antava puukartta koko alueelle. Kehitetty menetelmä on kuitenkin vasta pilottivaiheessa, eikä sen tuottamaa tietoa suositella käytettäväksi puutason päätöksenteossa ilman kohteena olevan alueen tarkastamista. Yleistettäessä puutason tunnuksia puisto-tason tunnuksiksi, tuotetun tiedon tarkkuus paranee ja lähestyy raportoituja ositekohtaisia tarkkuuksia. Latvuspeitto voidaan tuotetun materiaalin avulla laskea melko luotettavasti mille tahansa puistoalueelle. Merkittävää on myös, että hanke tuotti 2000 hehtaarin alueelle tiedon, jota voidaan käyttää tulevaisuudessa vertailukohtana esimerkiksi puistojen latvuspeittävyiden tai puuston pituuskehityksen seurannassa.

Pilottitutkimus osoitti, että puiden jatkotutkimus tulee kohdistaa poikkeavien puuyksilöiden (esimerkiksi vanhat, monilataiset ja avoimella paikalla kasvavat puut) havaitsemiseen sekä käsiteltävään kohteeseen mukautuvan tunnistusmenetelmän kehittämiseen.

Käytännön vaikuttavuus

Hankkeen yhteydessä pystyttiin ensimmäistä kertaa estimoimaan Helsingin puistopuiden lukumäärä ja määrittämään estimaatin tarkkuus. Tutkimushankkeen pilottivaiheessa kehitettiin menetelmä puutason tiedon keräämiseen laajoilta puistoalueilta. 38 koealalla kehitetty menetelmä vietiin käytäntöön ja sen avulla kartoitettiin ensimmäistä kertaa Helsingin puistoissa lähes 2000 hehtaarin alueella kasvava puusto. Tällaisen alueen kartoittaminen olemassa olevilla menetelmillä olisi ollut käytännössä katsoen mahdotonta. Menetelmän avulla voidaan tarkasti määrittää tarkasti puuston pituus ja latvuspeittävyys kartoitetun alueen puistoissa ja jopa määrittää puuston jakautumista ja latvusrakennetta puistojen sisällä. Puuston pituus ja latvuspeittävyys ovat molemmat keskeisiä tunnuksia koko kaupungin tasolla tehtävien biomassa- ja hiilensidontalaskelmien kannalta.

Osa 2: Katupuurekisterin päivitys

Materiaalit

Katupuiden kartoituksessa hyödynnettiin samaa ALS aineistoa kuin puistopuiden yhteydessä. Koska katujen varsilla kasvavat puut eroavat usein latvus- ja runkomuodoltaan puistopuista, katupuurekisterin päivittämistä varten mitattiin yhteensä 1442 katupuun läpimitat. Mitattavat puut valittiin siten, että kaikki katujen varsilla tavattavat läpimittaluokat ovat riittävästi edustettuna.

Menetelmät

Puiden tunnistus

Katupuiden tunnistamisessa käytettiin samoja menetelmiä kuin puistopuiden kohdallakin. Katupuurekisterin sijaintien perusteella valituille katuosuuksille muodostettiin ensin latvuston pintamallit, joista yksittäiset latvukset erotettiin valuma-aluesegmentoinnin avulla. Puistopuista poiketen, katupuiden latvusten rajaamisessa pystyttiin hyödyntämään olemassa olevaa tietoa puiden koosta sijainnista. Kun puistopuiden tapauksessa vanha haaroittunut latvus muodosti useita latvussegmenttejä, katupuiden sirpaloituneet latvussegmentit pystyttiin yhdistämään suuremmiksi yhtenäisiksi latvussegmenteiksi. Kokoamisessa hyödynnettiin ennakkotietoa puun koosta. Pienillä puilla yhdistettiin hyvin lähellä puun sijaintipistettä (0,75 m) sijaitsevat segmentit kun taas suurilla puilla yhdistettäviä segmenttejä etsittiin laajemmalla säteellä (4,0 m).

Lopulliset latvussegmentit yhdistettiin vastaavan rekisteripuun sijaintiin. Mikäli rekisteripuun sijainnista ei löytynyt latvussegmenttiä, kohde tarkastettiin manuaalisesti ilmakuvan ja latvuston pintamallin avulla. Ylimääräiset puiden sijaintipisteet (ts. poistetut puut ja tuplamerkinnot) poistettiin rekisteripuiden joukosta. Jokainen poistettava sijaintipiste tarkastettiin ilmakuvan ja latvuston pintamallin avulla.

Päivityksen pohjatietona toimineen rekisteritiedon epävarmuus hidasti päivitysprosessia huomattavasti. Käytännössä kaikkien rekisteripuiden oikeellisuus tarkastettiin ennen kuin puut ja latvussegmentit voitiin yhdistää. Vaikutti siltä, että rekisterin virheet olivat peräisin useammasta lähteestä. Osa sijaintipisteistä oli rekisterissä tuplana, eli päivitetty puutieto oli syötetty rekisteriin uutena puuna, poistamatta kuitenkaan alkuperäistä puuta. Osa virheistä oli peräisin edellisestä laajemmasta päivityksestä, jossa puiden sijainnit määritettiin ALS aineiston avulla. Tässä vaiheessa esimerkiksi valaisinpylväät olivat aiheuttaneet virheellisiä segmenttejä. Joissain tapauksissa virheet ALS-data luokittelussa olivat johtaneet suurten rakennusten päälle kurrottaviin latvussegmentteihin.

Puutunnusten mallintaminen ja mallinnuksen tarkkuuden arviointi

Puutunnusten mallintamisessa käytettiin samoja menetelmiä kuin puistopuilla. Läpimitan estimaatit johdettiin maastossa mitatuista puista ALS-piirteiden avulla lähimmän naapurin menetelmää ja Random Forest -menetelmää käyttäen. Puiden pituudet ja latvusprojektion pinta-alat määritettiin suoraan pistepilvistä. Puutunnukset päivitettiin kaikille puille, joista saatiin riittävän kattava kuvaus ALS-datan avulla (vähintään 11 pistettä/puu). Läpimitan mallintamisen tarkkuutta arvioitiin samalla tavalla kuin puistopuiden yhteydessä. Tarkkuuden mittareina käytettiin RMSE:a ja harhaa (bias).

Tulokset

Kaikkiaan 23025 katupuun tunnuksat päivitettiin. Samalla 743 puun sijaintipisteet poistettiin. 108 puun tunnuksia ei pystytty päivittämään, koska puista ei saatu riittävästi havaintoja. Päivitetty katupuurekisteri sisältää siis kokonaisuudessaan 23113 puuta.

Puille ennustettujen läpimittojen tarkkuus vaihteli läpimittaluokittain. Läpimittaluokittaiset tarkkuudet on esitetty taulukossa 6. Puistopuiden vastaavasta taulukosta poiketen, katupuiden läpimittojen harha ja RMSE on esitetty millimetreissä. Ennusteet ovat suhteessa tarkimpia läpimitaltaan yli 10 senttisillä puilla.

Taulukko 6. Katupuille mallinnettujen läpimittojen tarkkuus läpimittaluokittain.

	Yhteensä	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	30-40 cm	40-50 cm	50+ cm
bias, mm	0.04	-11.01	-3.64	-2.26	-6.54	-6.47	27.5
bias %	0	-13	-2	-1	-2	-1	5
RMSE, mm	36.22	23.17	16.46	25.36	40.62	33.72	64.04
RMSE %	11	27	11	1	12	8	11

Tulosten tarkastelu

Katupuiden läpimittojen ennustaminen oli selvästi tarkempaa kuin puistopuilla. Keskimääräinen RMSE oli katupuilla alle kolmasosa puistopuiden vastaavasta. Ositekohtaisessa tarkastelussa erot olivat vieläkin suurempia. Tarkkuuksien suurta eroa selittää ennen kaikkea katupuiden huomattavasti helpompi havaitseminen. Katujen varsilla puiden havaitseminen ja yksiselitteinen yhdistäminen maastossa mitattuihin puihin on huomattavasti helpompaa kuin puistoissa. Katupuiden kohdalla tiedetään siis varmemmin, että maastossa mitattu läpimitta kuuluu juuri tietylle latvussegmentille. Myös suurempi ja tarkemmin ositettu maastoreferenssi vaikuttaa tarkkuuteen. Katupuurekisterin päivittämisen yhteydessä kerättiin varsin kattava maastoaineisto, jossa jokaisessa tarkastellussa läpimittaluokassa (pienintä lukuun ottamatta) oli yli 200 puuta. Tulosten tarkkuus ei kuitenkaan kerro kaikkea. Latvusmuodoltaan ja kasvutavaltaan poikkeavilla puulajeilla ja esimerkiksi tolpatuilla puilla läpimitan virhe on todennäköisesti huomattavasti tutkimuksessa havaittua suurempi.

Rakennettu ympäristö luo omat haasteensa kaukokartoitusaineistojen analysointiin. Katujen varsilla on paljon tolppia, johtimia ja muita rakennettuja kohteita jotka hankaloittavat pistepilvien tulkintaa. Puiden lähellä sijaitsevat lampputolpat, johtimet tai jopa korkeat ajoneuvot aiheuttavat virhettä automaattiseen latvusten tunnistamiseen ja puutunnusten estimointiin (Kuva 3).



Kuva 3. Puiden viereen pysäköidyt ajoneuvot vaikuttavat erityisesti pienimpien puiden kartoitukseen. Virheelliset segmentit venyvät latvusten ulkopuolelle.

Johtopäätökset

Katupuiden kartoitusta pystyttiin kehittämään edellisestä, vuoden 2012 päivityksestä huomattavasti. Tämä näkyi paitsi laadukkaampina puiden latvuksia kuvaavina latvussegmentteinä myös parempana läpimitan tarkkuutena. Päivitys vaati kuitenkin edelleen paljon manuaalista työtä. Vaikeudet aiheutuivat kuitenkin suurelta osin ALS-datan puutteellisesta luokittelusta (väärin luokiteltuja alueita), paikoitellen aukkoisesta ALS-datasta ja alkuperäisen rekisterin epätarkkuuksista, mitä voidaan pitää suurena edistysaskeleena edellisen päivityskierroksen tulokseen.

Jatkossa tutkimus olisi järkevää suunnata puurekisterien muutoksen seurantaan. Kahden ajankohdan pintamallien avulla voitaisiin määrittää esimerkiksi puiden kasvua. Tällaisissa tutkimuksissa tulisi kuitenkin aluksi keskittyä koko kaupungin kattavan inventoinninsijaan pienempien alueiden tarkasteluun.

Lähteet

Crookston, N. L., Finley, A. O. (2008). yaimpute: An R package for kNN imputation. *Journal of Statistical Software* 23: 1–16.

Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine learning* 45: 5–32.

Falkowski, M. J., Hudak, A. T., Crookston, N. L., Gessler, P. E., Uebler, E. H., Smith, A. M. (2010). Landscape-scale parameterization of a tree-level forest growth model: a k-nearest neighbor imputation approach incorporating LiDAR data. *Canadian Journal of Forest Research* 40: 184–199.

Hyypä, J., Kelle, O., Lehtikainen, M., Inkinen, M. (2001). A segmentation-based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 39: 969–975.

Kaartinen, H., Hyypä, J., Yu, X., Vastaranta, M., Hyypä, H., Kukko, A., Holopainen, M., Heipke, C., Hirschmugl, M., Morsdorf, F. (2012). An international comparison of individual tree detection and extraction using airborne laser scanning. *Remote Sensing* 4: 950–974.