



GÖTEBORGS UNIVERSITET

# TRÄDEN I STADEN

– ANVÄNDNINGEN AV LIDAR-DATA FÖR ATT  
IDENTIFIERA URBAN VEGETATION

**Fredrik Lindberg**

**Lars Johansson**

**Sofia Thorsson**

**Stadsklimatgruppen  
Institutionen för geovetenskaper  
Göteborgs universitet**

# RAPPORT

---

GÖTEBORGS UNIVERSITET  
Institutionen för geovetenskaper  
Box 460, 405 30 Göteborg

# INNEHÅLLSFÖRTECKNING

SAMMANFATTNING .....	3
INLEDNING .....	4
Bakgrund .....	4
Syfte .....	4
LiDAR .....	4
METOD .....	6
Studieområden .....	6
Data .....	7
Separering av vegetationsreturer .....	8
Rastrering av LiDAR-data .....	10
Filtrering av vegetationsmodellen .....	14
Hög- och lågfilter .....	15
Linjärt filter .....	15
Friliggande celler .....	16
Hål-filter .....	16
Uppskattning och rastrering av stamzonhöjd .....	18
Beräkning av kronhöjd och kronvolym .....	20
RESULTAT .....	20
Vegetationshöjd .....	20
Stamzonhöjd .....	23
Kronhöjd och kronvolym .....	25
Vegetationsyta .....	25
Kronhöjd .....	25
DISKUSSION .....	33
Klassificering av LiDAR-data .....	33
Rastrering och filtrering av LiDAR-data .....	33
Uppskattning av stamzonhöjd .....	34
SLUTSATSER OCH -KOMMENTARER .....	35
REFERENSER .....	37

## SAMMANFATTNING

Detaljerad kartläggning av urban vegetation är en viktig förutsättning för att värdera ekosystemtjänster i städer. Dock saknas som regel detaljerad information om vegetation som faller utanför stadens detaljplanering och markanvändningskartor, speciellt gäller detta vegetationens tredimensionella egenskaper. I denna studie har två olika LiDAR-dataset använts för att kartlägga den urbana vegetationen med avseende på dess utbredning och tredimensionella egenskaper (vegetationshöjd, stamzonhöjd och krönhöjd): (1) nationella Lantmäteriet (LM) och (2) från Göteborgs stads stadsbyggnadskontor (SBK). Dataseten skiljer sig åt, främst i fråga om punkttäthet, klassificering och årstid för insamling, vilket innebär olika förutsättningar för vegetationskartering. I rapporten redovisas skillnader mellan dataseten och hur dessa skillnader påverkar kartläggningen av vegetation i urban miljö. Resultaten jämfördes med fältobservationer. Fyra områden (1×1 km) i Göteborg användes som fallstudie.

Resultaten visar att vegetationens utbredning och höjd kan uppskattas bra med LiDAR-data i urbana miljöer om punkttätheten är hög och klassificeringen medger bra separering av returerna. SBK-data uppfyller båda dessa kriterier. Den lägre punkttätheten och den grövre klassificeringen av LM-data medför att mycket vegetation utelämnas samt att oönskade objekt i större grad inkluderas i analysen. Beräknad vegetationshöjd korrelerar väl med fältobservationer, vilket gäller båda dataseten. Kronhöjd visar något sämre korrelation på grund av stor osäkerhet i beräkning av stamzonhöjd. Filtrering av preliminära vegetationsraster har genomförts vilket löser en del problem med oönskade objekt och artefakter som härrör från rumsliga variationer i punktmolnets täthet. Filtrering innebär dock manipulation av data och är därför också en osäkerhetsfaktor. LM-data kräver mer filtrering, framför allt måste celler med låga värden (< 2m) avlägsnas för att ta bort oönskade objekt, till exempel bilar. Den lägre upplösningen i LM-data gör också att filtreringen blir mer oprecis.

## INLEDNING

Föreliggande studie har finansierats av Mistra Urban Futures som en förstudie till forskningsprojektet “*Värdering av ekosystemtjänster av urban grönska*”. Studien har utförts av Lars Johansson och Fredrik Linberg, stadsklimatgruppen vid Institutionen för geovetenskaper, Göteborgs universitet i samspråk med Malin Andersson och Mats Lindqvist Trafikverket och Ingela Gustavsson Park- och naturförvaltningen Göteborg stad.

### Bakgrund

Vegetation i urbana miljöer bidrar med ett flertal ekosystemtjänster till samhället så som biologisk mångfald, klimatreglering, luft- och vattenrening, markhantering, ljuddämpning samt rekreation och välbefinnande (Bowler m.fl., 2010). Hirano m.fl. (2004) visade till exempel att även små ytor med vegetation, såsom enskilda träd kan ha betydande påverkan på det lokala urbana klimatet. Information om sådan typ av informell vegetation är ofta exkluderat från allmän markanvändningsdata. Speciellt saknas ofta information om vegetationens tredimensionella egenskaper, det vill säga både utbredning och *höjd*.

På senare tid har Light Detecting And Ranging (LiDAR), eller flygburen laserskanning, möjliggjort framtagandet av sådan detaljerad 3D-information (Bergen m.fl. 2009). På grund av den komplexa geometri och den mångfald av objekt som staden utgörs av är högupplösta dataset att föredra, vilket gör LiDAR till en särskilt lämplig metod för datainsamling. Detaljerad information över stora områden kan också införskaffas till en relativt låg kostnad. LiDAR gör det möjligt att kartlägga utbredning och höjd för både vegetation och byggnader med en mycket hög noggrannhet (Goodwin m.fl. 2009; Holmgren och Persson 2004; Næsset 2004). Därför är det möjligt att skapa rumsliga data som beskriver viktiga 3D-egenskaper för *all* vegetation i städer; information som kan användas till att integrera vegetation i planering och riskhantering.

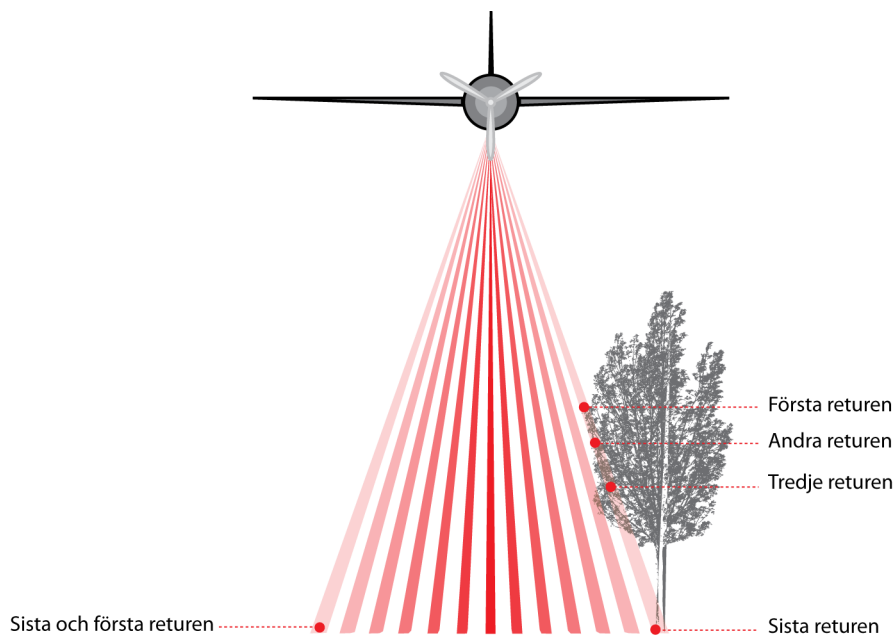
### Syfte

Projektets syfte är att använda LiDAR-data från Stadsbyggnadskontoret, Göteborgs stad och Lantmäteriet för att kartlägga och analysera den rumsliga fördelningen av urban grönska i urbana miljöer, samt att utvärdera möjligheter och problem med metoden.

### LiDAR

Flygburen laserskanning är idag den vanligaste och effektivaste metoden för att samla in data i syfte att ta fram digitala terrängmodeller eller andra geografiska data i 3D. Vid laserskanning skickas laserpulser (IR) från en flygburen sensor mot marken där de reflekteras tillbaka till sensorn där de registreras. Datamängden från en flygning, också benämnd punktmoln, kan vara enorm och innehålla miljontals punkter inom varje km<sup>2</sup>. Kvaliteten på data beror bland annat på flyghöjd och sensors inställningar.

Figur 1 visar principen för flygburen laserskanning. En laserpuls har en viss spridning i horisontalplanet vilket gör att en och samma puls kan reflekteras flera gånger och därför ge flera registreringar, *returer*. Den första returen som registreras, *first return*, kan till exempel komma från ovasidan av en trädkrona. Om laserpulsen penetrerar genom trädet till marken, kommer den sista returen, *last return*, representera markhöjden. Däremellan kan returer också komma från grenar. Detta är en egenskap som är viktig eftersom den kan användas för att ta fram egenskaper hos objekt på marken och möjliggör klassificering av punkter, till exempel som mark eller vegetation. Klassificeringen gör det möjligt att separera vegetationsreturer från övriga returer, vilket lägger grunden för analys av vegetation. På grund av den komplexa miljön i städer är det dock inte bara vegetation som ger upphov till multipla returer. Som diskuteras mer ingående nedan, kan till exempel husfasader ge liknande resultat.



Figur 1. Flygburen laserskanning. En laserpuls som träffar marken kan ge upphov till en eller flera returer som registreras av sensorn. Vegetation ger ofta fler än en retur (till höger i bilden). Detta gör det möjligt att skilja pulser som träffar vegetation från dem som till exempel träffar marken direkt (till vänster i bilden).

Markanvändning och marktäckte har traditionellt karterats och analyserats med satellitdata. Till skillnad från LiDAR finns ingen höjdinformation i satellitdata och upplösningen är sällan tillräcklig för att beskriva urbana miljöers komplexitet. Multipla returer ger också möjlighet att utöver objekts höjd över marken, analysera andra egenskaper hos vegetationen, såsom täthet och volym.

## METOD

### Studieområden

Studien omfattar fyra olika områden om vardera en kvadratkilometer (1000×1000m) i Göteborg och representerar olika typer av urban miljö och grönstruktur, Figur 2. Stor variation med avseende på bebyggelse och vegetation kan dock förekomma inom områdena. Även den allmänna topografin varierar såväl mellan som inom områdena.



Figur 2. Ortofoton av de fyra studieområdena a) Haga, b) Linné-Sahlgrenska, c) Marconi och d) Ringon.

Studieområdet *Haga* omfattar stadsdelen Haga, området kring Skansberget samt stenstaden ner mot Linnégatan och Järntorget i nordväst. Förutom Skansberget karakteriseras området av relativt tät bebyggelse. Vegetationen utgörs huvudsakligen av planterade stadsträd. Området *Linné-Sahlgrenska* omfattar Linnéplatsen, delar av Slottsskogen, Sahlgrenska, Medicinarberget och nordvästra Guldheden, inklusive ett område med kolonistugor. Här är det urbana landskapet varierat med avseende på

bebyggelse, infrastruktur, grönområden och topografi. Det två övriga områdena *Marconimotet* och *Ringön* utgörs främst av industribebyggelse och infrastruktur i form av större trafikleder och i det senare fallet järnväg. Området runt Marconimotet omfattar även ett större område naturskog som ligger betydligt högre än omgivningen. Ringön är studiens flackaste område med låg relief och utbredd låg bebyggelse.

## Data

I studien används LiDAR-data från två olika dataset (1) Lantmäteriets data för framtagning av den nya nationella höjddatabasen samt (2) LiDAR-data från Göteborg stadsbyggnadskontor. Nedan benämns dataseten för LM-data respektive SBK-data. Båda dataseten fanns tillgängliga för Göteborg i LAS-format (version 1.2), vilket är ett standardformat för LiDAR-data. SBK-data är indelat i rutor om 1000×1000 meter och denna indelning valdes som avgränsning av studieområdena.

Tabell 1 visar en sammanställning av de viktigaste egenskaperna hos de båda dataseten. Det finns viktiga skillnader mellan dem, vilka är av betydelse för denna studie. Viktigast är punkttätheten, det vill säga hur många laserpulser som träffar en kvadratmeter på marken. Punkttätheten påverkas av en mängd olika faktorer men i detta fall beror det till allra högsta grad av flyghöjden. Punkttätheten avgör hur hög upplösning data kan rasteras i. Vilken säsong flygningen genomförts är också av betydelse. Om det är löv på träden kommer större andel returerna från vegetationens ovansida. Färre returerna kommer från trädkronornas inre eftersom laserpulsen har svårare att penetrera lövverket. För den här studien har täckningen inte så stor betydelse eftersom den utförs inom Göteborg stad, men generellt är det viktigt att tänka på vilka data som finns tillgängliga för det område som är av intresse. En annan egenskap hos LiDAR-data är hur det är klassificerat. Enligt standarden för LAS-formatet finns ett flertal olika klasser, men här är de sex första (1-6) av intresse. Betydelsen av klassificeringen diskuteras nedan.

Tabell 1. Några egenskaper hos de två dataseten; SBK-data och LM-data.

	SBK-DATA	LM-DATA
Flyghöjd	550 meter	1700-2300 meter
Bredd	20 grader off-nadir	20 grader off-nadir
Punkttäthet	13.65 punkter/m <sup>2</sup>	0.5-1 punkter/m <sup>2</sup>
Footprint diameter	0.13m	0.5m
Täckning	Inom Göteborg kommuns gränser	Rikstäckande
Säsong	Med löv	Utan löv (i Göteborgsregionen)
Klassificering*	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 ...	0, 1, 2

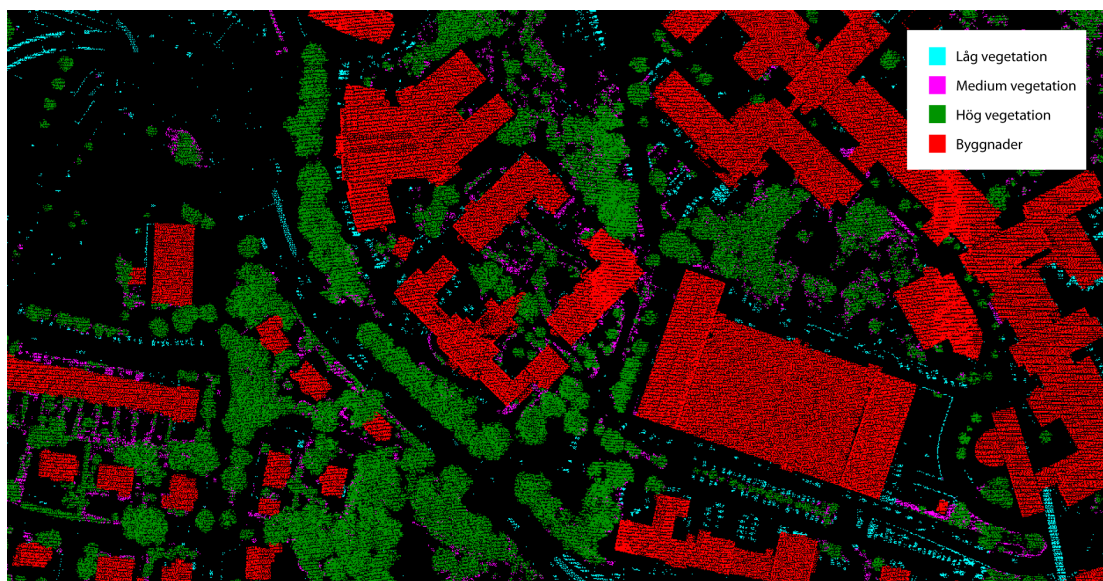
\* 1 Unclassified, 2 Ground, 3 Low vegetation, 4 Medium vegetation, 5, High vegetation, 6 Buildings

Andra data som användes i studien var data över byggnader från Lantmäteriets tätortskarta samt ortofoton, också från Lantmäteriet.

## Separering av vegetationsreturer

För att skilja ut de LiDAR-returer som representerar vegetation nyttjades datamängdens klassificering. Programvaran FugroViewer<sup>1</sup> användes för att utvärdera klassificeringskvalitet. Som ovan nämnts är klassningen av de två olika dataseten väldigt olika. I LM-data är det i praktiken omöjligt att skilja vegetationen från byggnader och andra objekt baserat på klassificeringen eftersom alla returer utom mark är samlade i en klass. Så är inte fallet med LM-data. Eftersom klassningen här utnyttjar fler klasser är förutsättningarna för att skilja ut vegetationen betydligt bättre.

Figur 3 visar SBK-data över en del av området Linné-Sahlgrenska. I figuren är klasserna 3 (low vegetation), 4 (medium vegetation), 5 (high vegetation) och 6 (buildings) inkluderande. Jämförelse med ortofoto visar att byggnader är väl klassificerade och att klass 5 representerar merparten av vegetationen, företrädesvis träd. Vidare återfinns en hel del låg vegetation, till exempel häckar, i klass 4. Klass 3 däremot, inkluderar nästan ingen vegetation. Här återfinns istället många oönskade och problematiska objekt, till exempel bilar, spårvagnar och vägräcken. Att så är fallet öppnar för möjligheten att relativt enkelt skilja vegetationen från sådana objekt genom att endast använda returer klassade som 4 eller 5.



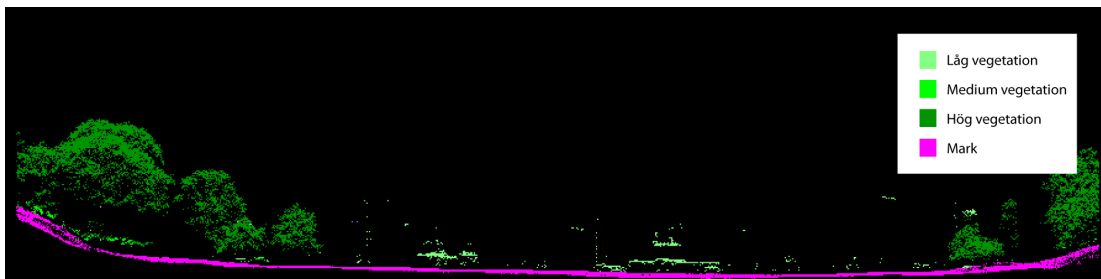
Figur 3. SBK-data Linné-Sahlgrenska, visualiserat med FugroViewer. Bilden visar endast returer klassificerade som de tre vegetationsklasserna samt byggnader.

Det är viktigt att notera att begreppen låg, medium och hög (klass 3, 4 och 5) i praktiken saknar innebörd. Som ovan nämnts inkluderar klass 3 (låg vegetation) nästan ingen

<sup>1</sup> FugroViewer är en gratis programvara för visualisering av geodata. Webb sida: [www.fugroviewer.com](http://www.fugroviewer.com)

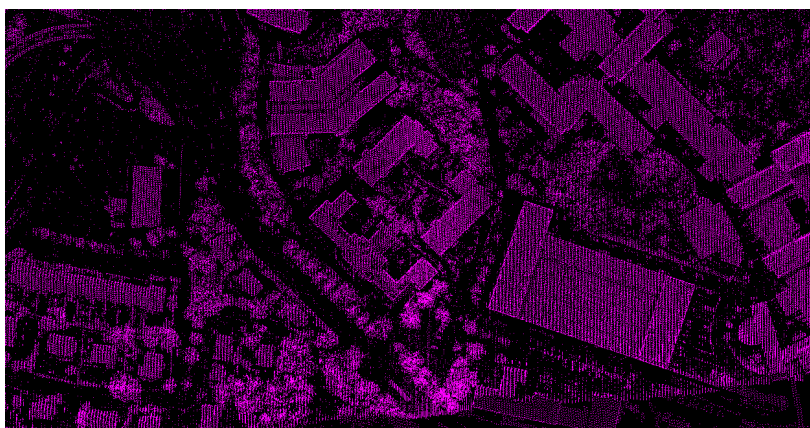


vegetation och de objekt som inkluderas är i flera fall betydligt högre än objekt klassade som medium eller hög vegetation. Det är alltså inte viktigt i vilken klass vegetationsreturerna hamnar, utan hur väl separerade de är från andra objekt i andra klasser. Figur 4, som visar en tvärprofil över Linnéplatsen sedd från söder understryker detta. Belysningsstolpar, spårvagnar och ledningar i bildens mitt är klassade som låg vegetation, även om spridningen i höjddled är relativt stor och även högre än returerna som klassats som medium eller hög vegetation.



Figur 4. SBK-data, tvärprofil över Linnéplatsen sedd från söder, visualiserat med FugroViewer. Returer som felaktigt är klassificerade som låg vegetation syns i bildens mitt.

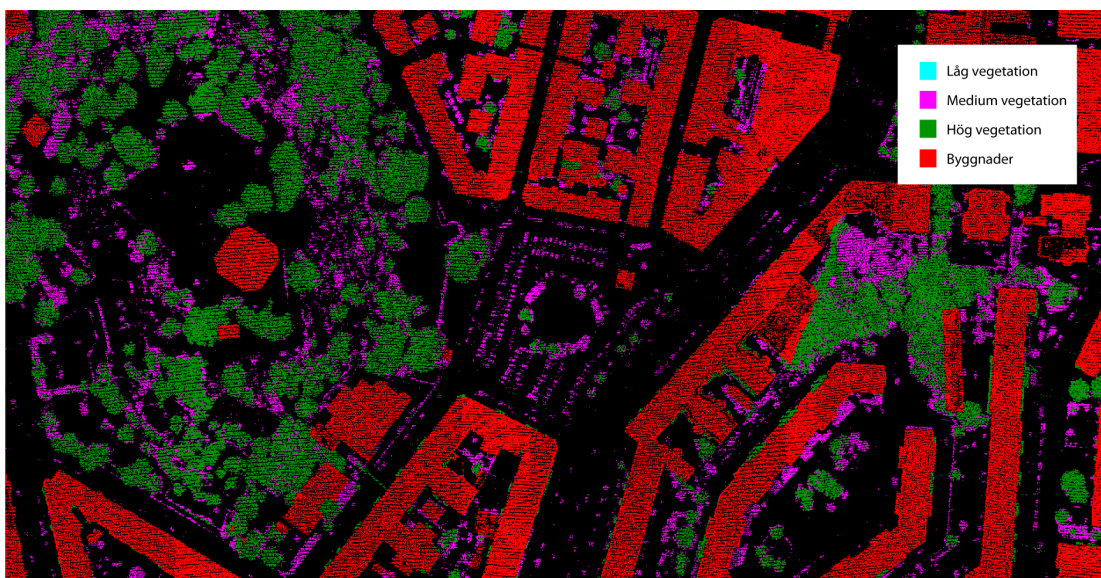
Figur 5 visar lantmäteridata klass 1 (unclassified). Här inkluderas byggnader och vegetation, samt övriga oönskade objekt. I detta dataset går inte vegetationen att särskilja enbart utifrån klassificering. Att modellera vegetationsytan kräver därför ytterligare GIS-metoder, som till exempel att klippa bort byggnader med hjälp av andra data (byggnadspolygoner).



Figur 5. LM-data visualiserat med FugroViewer, klass 1, *unclassified*.

För att avgöra hur väl punktmolnet är klassificerat krävs visuell inspektion, ett mänskligt öga, som kan avgöra vilka klasser som bör inkluderas när vegetationen skall modelleras och vilka eventuella andra metoder som behövs för att förbättra resultaten. Varje område som skall analyseras kräver särskild uppmärksamhet. Figur 6 visar SBK-data för en del av studieområdet Haga. Detta område utgörs av en annan lidardatafil (från leverantören) än Linné-Sahlgrenska ovan. I denna fil är inga returerna klassade som låg vegetation (klass 3).

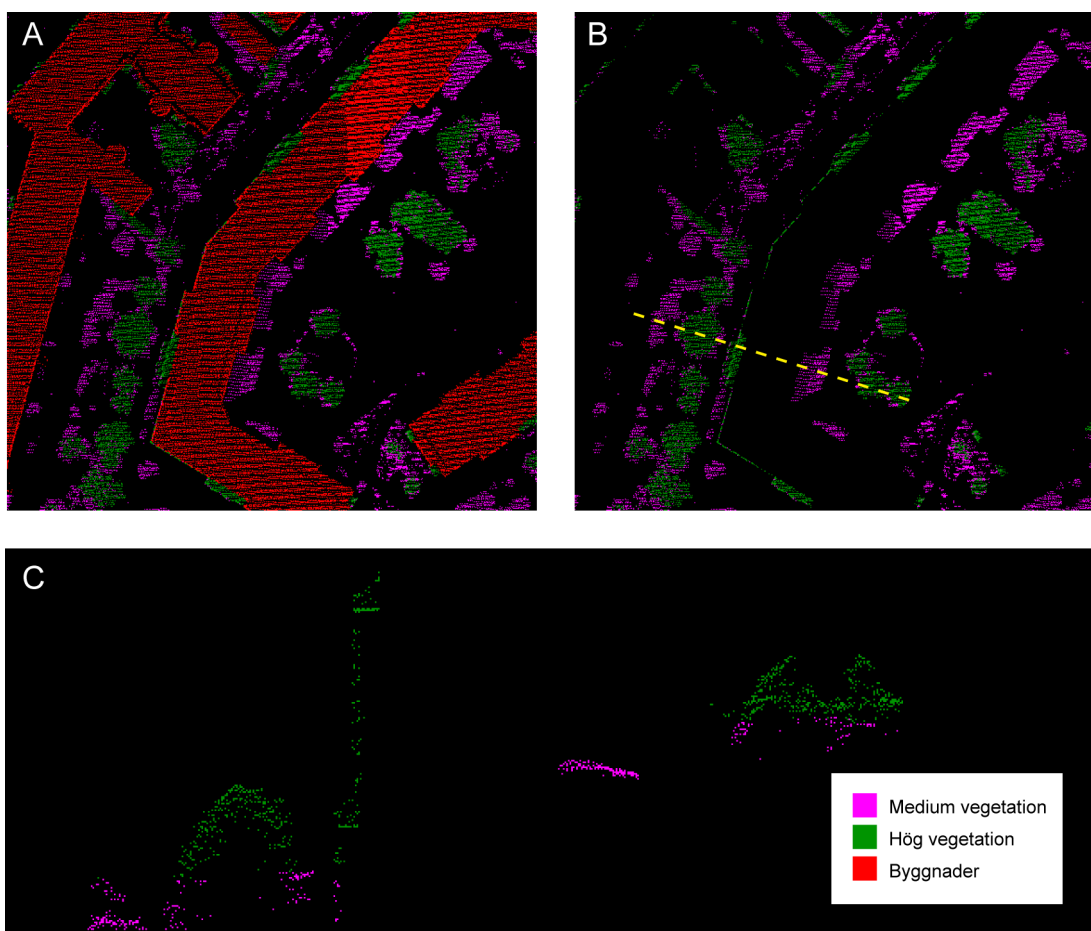
Det innebär (i det här fallet) att de oönskade objekt som ovan kunde väljas bort är inkluderade i klass 4 och därmed sammanblandade med vegetation. Felklassificering av LiDAR-returer i urban miljö uppstår ofta längs med fasader. Figur 7 visar två exempel på objekt felaktigt klassade som vegetation: balkonger och husfasader.



Figur 6. SBK-data Haga, visualiserat med FugroViewer. Bilden visar endast returer klassificerade som de tre vegetationsklasserna samt byggnader. Notera att inga returer är klassificerade som låg vegetation. På parkeringen på Skanstorget i mitten av bilden syns tydligt ett stort antal bilar istället klassificerade som medium vegetation. I samma klass återfinns också stora delar av vegetationen.

## Rastrering av LiDAR-data

För att kunna göra beräkningar och GIS-analyser på LiDAR-data måste punktmolnet konverteras till rasterdata. Rasterdata används för att beskriva ett kontinuerligt fenomen variation i rummet. Markhöjd och temperatur är två illustrativa exempel på kontinuerliga fenomen eller kontinuerliga geografiska variabler. Målet med rasteringen är att erhålla ett raster som beskriver vegetationens utbredning och höjd över marken så detaljrikt och korrekt som möjligt. Varje cell i rastret håller ett värde för vegetationshöjden. Generellt kan sägas att högre upplösning (mindre cellstorlek) ger mer detaljer, men upplösningen måste anpassas till egenskaperna hos det data som ska rasteras, i det här fallet tätheten i punktmolnet. Om punktmolnets täthet är hög medger det att högre upplösning (mindre cellstorlek) kan användas. Generellt sett innebär rasteringen att varje rastercell tilldelas ett värde, till exempel det högsta värdet, av de returer som sammanfaller med rastercellen.

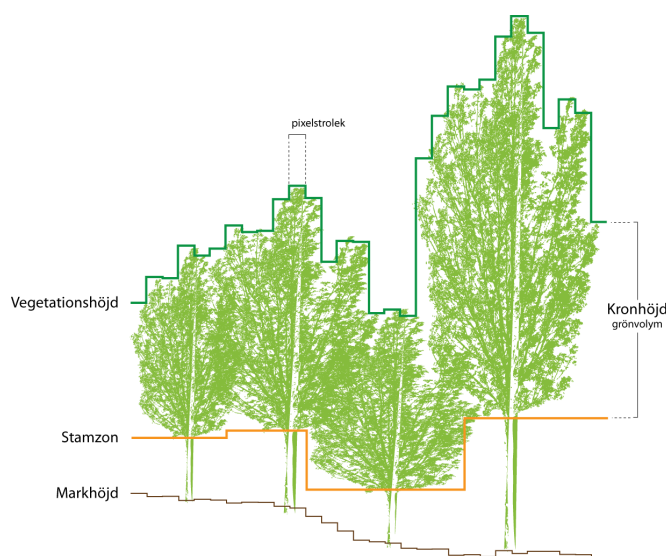


Figur 7. a) Byggnader och vegetation strax sydost om Skanstorget. b) Felklassificerade returerna längs med västra sidan av huskroppen syns tydligt när byggnaderna inte visas. c) Fasaden och balkonger framträder tydligt i en tvärsnittsbild längs linjen i b).

Figur 8 illustrerar vegetationsytan som skall modelleras – vegetationshöjd – som är *vegetationens höjd ovan marken* i en given punkt. För att beräkna vegetationshöjden måste därför också markhöjden modelleras. För att ge en korrekt representation av vegetationen måste, i så stor utsträckning som möjligt, endast de returerna som kommer från vegetation användas vid rasteringen. Som diskuterats ovan är punktmolnets klassificering en lämplig utgångspunkt, men det innebär problem med oönskade objekt klassificerade som vegetation. I fallet med LM-data är alla returerna utom mark samlade i en klass.

Returer som sammanfaller med byggnader kan tas bort ur datasetet med hjälp av vektordata som representerar byggnader, lämpligtvis polygoner från en detaljerad geodatabas. Med hjälp av dessa kan punktmolnet ”klippas” eller så kan i ett senare steg det färdiga rastret överlagras med en rasterad version av byggnadsdata. Nedan har byggnadspolygoner från Lantmäteriets tätortskarta använts. Ovan har även problem med till exempel husfasader som klassificerats som vegetation diskuterats. I många fall är inte data över byggnader tillräckligt detaljerat, till exempel saknas utskjutande balkonger. För att undvika, eller minimera, sådana problem kan byggnadspolygonerna utökas med en

buffertzonen. Det innebär att returerna närmast intill byggnaderna kan avlägsnas när punktmolnet klipps. Att avlägsna returerna som sammanfaller med eller ligger nära byggnader innebär att vegetation som står intill eller sträcker sig över byggnader inte beaktas i analysen. För att motivera avlägsnandet av dessa returerna måste felet som uppstår vara litet i förhållande till det fel som skulle ha blivit om felaktigt klassificerade returerna inkluderades i analysen. Lämplig buffert kan vara en cellstorlek. En annan möjlighet är att digitalisera saknade byggnadsobjekt manuellt.

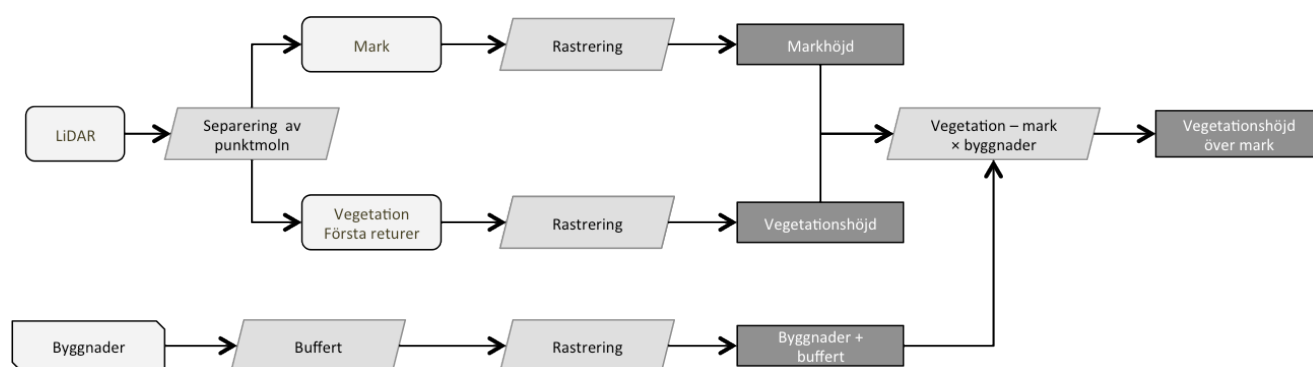


Figur 8. För att beräkna vegetationsvolym behövs tre ytor modelleras; vegetationshöjd, markhöjd och stamzonhöjd. Vegetationshöjden representerar trädkronornas ovsida medan stamzonhöjden deras undersida.

Andra oönskade objekt som felklassificerats, till exempel bilar, lyktstolpar och vägräcken, är svårare att avlägsna på detta sätt. En del av problemen kan avhjälpas med olika filter, vilket beskrivs nedan. Ett polygonlager över vägbanor skulle kunna användas för att radera returerna som kommer från bilar och vägräcken, men vägar representeras oftast av linjeobjekt vilket inte är användbart i det här fallet. Att klippa bort returerna som sammanfaller med vägar i stadsmiljö riskerar också att ta bort allt för mycket av vegetation, till exempel alléer.

Föregående avsnitt behandlade datasetens klassificering och de olika förutsättningar som olika klassificeringar ger när punktmolnen skall rasteras. Figur 9 ger en generell illustration av arbetsflödet från punktmoln till färdigt vegetationsraster. Första steget i rasteringen av punktmolnet är att skilja ut de returerna som representerar vegetationen och de som representerar markytan. Eftersom vegetationshöjden är krontäckets översida, används endast de första returerna (*first returns*) för att rastera vegetationen.

Byggnadspolygonerna utökas med en buffert och rasteras sedan till ett raster där byggnaderna representeras av nollor och övriga celler har värdet 1 (binärt raster). Värt att notera är betydelsen av att rasteringen görs så att alla raster får samma geometriska egenskaper; upplösning och utbredning. Det är nödvändigt eftersom nästa steg är att subtrahera markhöjden från vegetationshöjden och överlagra (multiplicera) resultatet med byggnadsrastret. Ett alternativ till det sistnämnda är att klippa punktmolnet med byggnadspolygoner innan rasteringen. I Figur 9 är eventuell förbearbetning av data inte medtagen. Detta inbegriper sammanfogning och klippning av LiDAR-data så att de överensstämmer med studieområdena, samt projicering till ett och samma koordinatsystem.



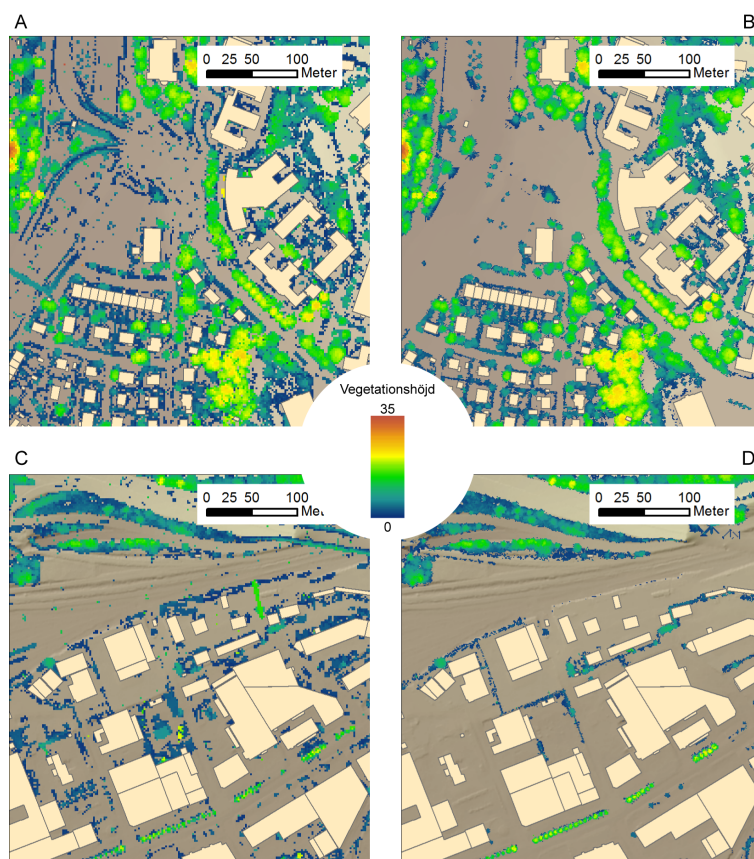
Figur 9. Schematisk illustration av arbetsflöde vid rastering av LiDAR-data för vegetationsanalys.

I studien användes programvaran FUSION<sup>2</sup> för att skapa vegetationsmodellen. FUSION är en gratis programvara utvecklad för vegetationsanalyser av LiDAR-data och har specifika funktioner, eller moduler, för olika arbetsmoment. I praktiken följer dock arbetsgången beskrivningen ovan. Överlagringen med byggnadsrastret utfördes dock efteråt, i samband med filtreringen av vegetationsmodellen. Studieområdet Linne-Sahlgrenska rasterades också med FME<sup>3</sup>. Detta gjordes dels för att jämföra resultat från två olika programvaror, dels för att specifikt undersöka om FME är en tänkbar programvara för den här typen av GIS-analyser. I FME-analysen användes endast SBK-data. I appendix I och II bifogas exempel på hur programvarorna användes.

Figur 10 visar två ofiltrerade vegetationsmodeller för LM- respektive SBK-data. Skillnaden mellan de båda dataseten är uppenbar. Till exempel visar kartan över Ringön mycket ”vegetation” mellan byggnaderna när LM-data använts. Mestadels är detta oönskade objekt (bilar, containrar m.m.). I fallet med SBK-data saknas de flesta sådana objekt. Även om data är insamlat vid olika tidpunkter är det rimligt att anta skillnaden till största del beror på separeringen returerna baserat på punktmolnets klassificering.

<sup>2</sup> Webbsida: [http://forsys.cfr.washington.edu/JFSP06/lidar\\_&\\_ifsar\\_tools.htm](http://forsys.cfr.washington.edu/JFSP06/lidar_&_ifsar_tools.htm)

<sup>3</sup> FME från Safe Software är ett GIS specialiserat på överföring av data från ett format till ett annat. FME kan hantera en stor mängd olika format och bygger på semi-automatiserade arbetsflöden som skapas av användaren. Webbsida: [www.safe.com](http://www.safe.com).



Figur 10. Ofiltrerad vegetationshöjd. a) Linné-Sahlgrenska LM-data, b) Linné-Sahlgrenska SBK-data, c) Ringön, LM-data och d) Ringön, SBK-data.

## Filtrering av vegetationsmodellen

Beroende på hur väl vegetationsreturerna representerar vegetationen och inte oönskade objekt är behovet av efterbearbetning, filtrering, olika stort. SBK-data är som tidigare nämnts väl klassificerat vilket innebär att behovet av efterbearbetning inte är lika stort som i fallet med LM-data. Filtrering innebär att rastret modifieras genom att rastercellernas värden ändras. Förutom att ta bort oönskade objekt kan filter användas för att korrigera för oregelbundenheter i punktmolnet som uppkommit under laserskanningen. I Tabell 2 beskrivs de filter som använts för att förbättra vegetationsmodellen i den här studien.

Filter utgörs av ett ”filterfönster”, ofta 3×3 celler stort, som flyttas längs med rader och kolumner och på så sätt appliceras på alla celler i rastret. Mittencellen, nedan kallat den aktuella cellen, är den cell som filtret appliceras på. De övriga åtta cellerna kallas nedan de omgivande cellerna och de kan användas för att formulera villkor för när filtret skall ha effekt. Alla filter applicerade i den här studien har programmerats i MATLAB speciellt för detta ändamål.

Tabell 2. Beskrivning av filter för filtrering av vegetationsraster.

Filter	Funktion	Syfte	Kommentar
Högfilter	Sätter värden över ett tröskelvärde till noll.	Avlägsna orimliga värden (uteliggare) eller oönskade objekt som är högre än vegetationen.	Tröskelvärdet måste vara högre än den högsta vegetationen.
Lågfilter	Sätter värden under ett tröskelvärde till noll.	Avlägsna låga objekt som inte är vegetation, till exempel bilar.	Vegetation lägre än tröskelvärdet avlägsnas.
Linjärt filter	Identifierar linjära objekt och sätter cellvärdena till noll.	Avlägsna objekt som husfasader och trottoarkanter.	Precisionen är starkt beroende av rastrets upplösning.
Friliggande celler	Sätter värdet på enstaka friliggande celler till noll.	Avlägsna oönskade objekt med liten rumslig utbredning, till exempel lyktstolpar.	Små träd och buskar avlägsnas. Beror på rastrets upplösning.
Hål-filter I	Sätter celler med värdet noll till medianvärdet av omgivande pixlar.	Fylla igen hål i vegetationen som uppkommit på grund av oregelbundenheter i punktmolnet.	Naturliga hål i vegetationen fylls igen.
Hål-filter II	Sätter celler som tydligt är lägre än omgivande celler till medianvärdet av de omgivande cellerna.	Korrigerar för oregelbundenheter i punktmolnet.	Naturliga, kraftiga variationer i vegetationstäcket jämnas ut.

### Hög- och lågfilter

LiDAR-data kan innehålla ”outliers”, värden som är orimligt/betydligt högre eller lägre än naturligt/vanligt förekommande i landskapet. Genom att ersätta väldigt höga eller låga värden med noll kan dessa outliers korrigeras. Gränsvärdena för vad som betraktas som högt och lågt kan anpassas så att en hel del oönskade objekt avlägsnas. Behovet av detta beror på hur väl punktmolnet är klassificerat. I fallet med LM-data behövs ett relativt högt värde för låg-filtret för att avlägsna objekt på marken, till exempel bilar. Här användes ett låg-filter med gränsvärdet två meter för LM-data och en meter för SBK-data. Det innebär dock att all vegetation under två respektive en meter avlägsnas. Notera att en meter användes även för SBK Haga, även om klassificeringen här motiverar ett annat val av gräns, till exempel två meter. Efter inspektion av vegetationsmodellen sattes gränsvärdet för hög-filtret till 40 meter, vilket med viss marginal är högre än de högsta träden.

### Linjärt filter

I avsnittet om klassificering av LiDAR-data ovan diskuterades problemet med husfasader som ofta klassificeras som vegetation. Sådana fel visar sig ofta som cirka en cell breda linjära objekt i vegetationsmodellen. Linjära objekt kan också härstamma från till exempel trottoarkanter. Är upplösningen hög är tydliga linjära objekt sällan vegetation. Häckar har då oftast en bredd av ett par celler. Vid större cellstorlekar är risken för förväxling större.

Att använda byggnadspolygoner med buffert som beskrivits ovan löser i stort sett problemet med fasader. Kvarvarande problem kan förbättras med ett linjärt filter.

För att korrigera linjära objekt ersätts cellvärden inom objektet med noll. Objektet identifieras inom ett filterfönster där antalet vegetationsceller längs mittenraden jämförs med antalet omgivande vegetationsceller (Goodwin m.fl., 2009). Är antalet celler på linjen högt i förhållande till omgivningen, ersätts den aktuella cellen med noll. För att identifiera objekt i olika riktningar roteras linjen från 0° till 175° i steg om 5°. Antalet omgivande celler beräknas sedan med ett andra filterfönster som applicerades på varje vegetationscell tillhörande det linjära objektet.

För att identifiera linjära objekt i SBK-data användes ett 9×9 celler stort filterfönster med villkoret att antalet vegetationsceller på linjen var  $\geq 4$  och antalet omgivande celler var  $< 3$ . För LM-data var filterstorleken 5×5 och antalet omgivande vegetationsceller sänktes till två på grund av den större cellstorleken. Filterfönstret för att identifiera och summera antalet omgivande celler var 5×5 respektive 3×3 celler.

### Friliggande celler

Med friliggande celler menas här enstaka celler med ingen eller få omgivande vegetationsceller. En sådan cell kan till exempel representera en lyktstolpe, eller andra objekt med liten rumslig utbredning, men som kan felklassificeras som vegetation. Små träd och buskar kan också ge upphov till friliggande celler och risken för förväxling beror på rastrets upplösning. Friliggande celler kan avlägsnas genom att använda ett 3×3 celler stort filterfönster där den aktuella cellens värde sätts till noll om antalet omgivande celler är mindre än ett angivet gränsvärde. Detta gränsvärde styr hur hårt rastret filtreras. Här togs vegetationsceller bort om de hade noll eller en omgivande vegetationscell.

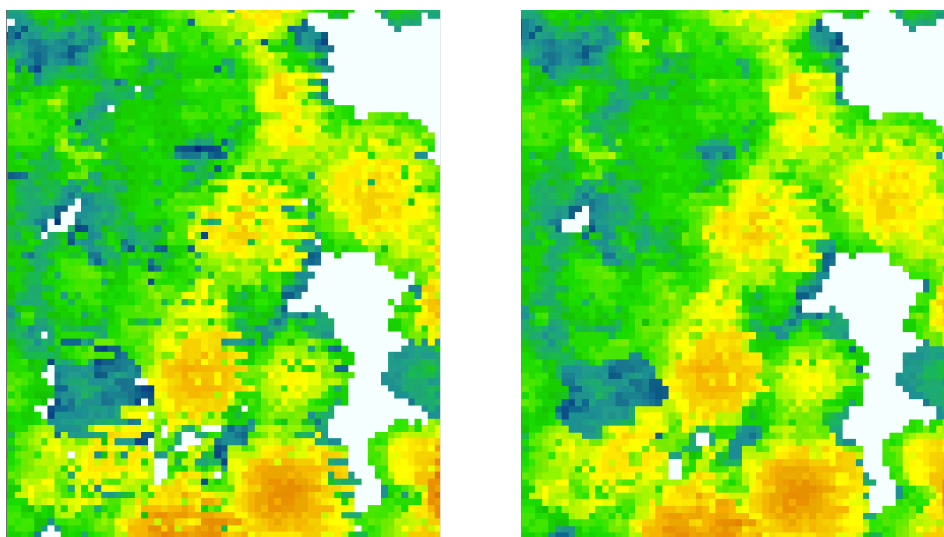
### Hål-filter

Oönskade ”hål” i vegetationstäckets orsakade av laserpulsernas spridningsmönster kan korrigeras med ett selektivt medianfilter. Ett medianfilter ersätter ett cellvärde med medianvärdet av de omgivande cellernas värde. Att ett filter är selektivt innebär att detta endast sker om ett visst villkor är uppfyllt. Ett typiskt medianfilter utgörs av ett filterfönster om 3×3 celler och den aktuella cellen har då åtta omgivande celler. Här användes två olika median-filter. Det första (Hål-filter I) ersatte tomma celler omgivna av minst sex (av åtta) vegetationsceller. Detta filter applicerades två gånger för att fylla igen eventuella resterande hål. Onaturliga variationer kan också uppträda som ”ränder” i vegetationsytan, vilket indikerar att de är ett resultat av laserskanningen och bör korrigeras. Det andra filtret (Hål-filter II) ersatte cellvärden om den aktuella cellens värde var betydligt lägre än medelvärdet av de omgivande pixlarna. I det här fallet användes ett differensvärde på 4 meter. Om den aktuella cellen omgavs av någon icke-vegetationscell, gjordes ingen förändring eftersom variationen i höjddled kan anses vara stor i utkanten av trädkronan. Figur 11 visar effekten av selektiva medianfilter inom studieområdet Linné-Sahlgrenska. Till vänster är den ursprungliga vegetationsmodellen som har både hål i vegetationstäckets (celler med värdet noll) samt tydliga artefakter från laserskanningen

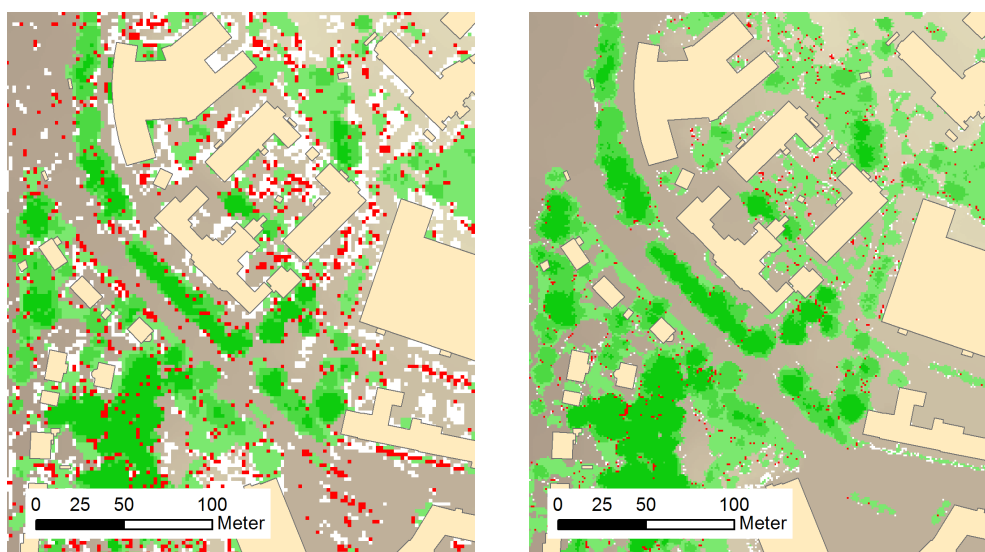


synliga som en randning från vänster till höger. I bilden till höger visas den filtrerade bilden. De minsta hålen ( $1 \times 1$  cell) är igenfyllda och randningen är betydligt mindre tydlig; vegetationsytan har ett mer naturligt utseende. Nackdelen med medianfilter, även om de är selektiva och villkoren kan anpassas, är att rastret manipuleras utan egentlig kontroll över vad som är ett resultat av naturligt förekommande variationer och vad som är felaktigheter som behöver korrigeras.

Figur 12 visar celler som påverkats av filtreringen, det vill säga tagits bort, lagts till eller fått förändrat värde, inom ett område av studieområdet Linné-Sahlgrenska. Celler som tagits bort av låg-filter är färgade vita, övriga är röda. Figuren visar att LM-data påverkas i mycket större utsträckning av filtreringen än SBK-data. Orsaken är att den grova klassificeringen gör att LM-data måste filtreras hårdare av framför allt låg-filtret. Här har ett gränsvärde på två meter använts, vilket gör att många celler raderas.



Figur 11. Effekt av de två olika hål-filtren. Bilden till vänster visar det ofiltrerade rastret. Här syns både "hål" i vegetationen och en tydlig onaturlig "randning" från vänster till höger. I det filtrerade rastret till höger är hålen igenfyllda samt randningen betydligt mindre utpräglad. Bilderna visar en del av Slottsskogen i studieområdet Linné-Sahlgrenska, SBK-data, FME-rastret. Färgskalan indikerar vegetationshöjd där mörkblått är låga och orange höga värden.



Figur 12. Den sammantagna effekten av de applicerade filtren illustreras här och det är tydligt att LM-data (till vänster) påverkas i mycket större grad än SBK-data. Vita celler har påverkats av låg-filtret. Röda celler har påverkats av övriga filter.

## Uppskattning och rastering av stamzonhöjd

Den filtrerade vegetationsmodellen representerar vegetationens utbredning och höjd över marken. För att beräkna kronhöjden och kronvolymen behövs ett korresponderande raster som anger höjden från marken till undersidan av trädkronan, *stamzonhöjden*.

Stamzonhöjden kan uppskattas genom att först urskilja alla returerna som sammanfaller med vegetationens utbredning och sedan analysera deras distribution i höjdlager (Holmgren och Larsson, 2004). Denna analys utfördes med modulen *DensityMetrics* i FUSION.

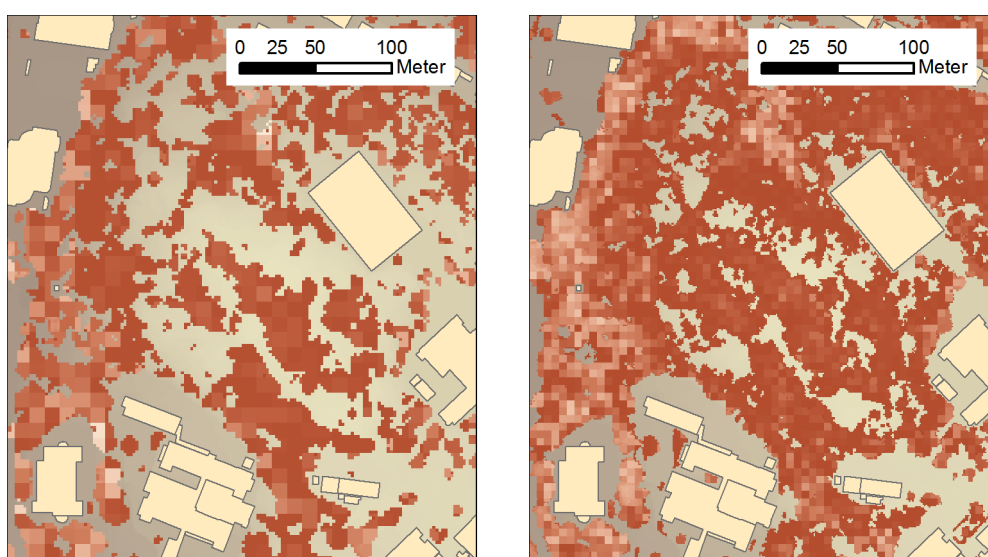
*DensityMetrics* delar in punktmolnet i ett horisontellt rutsystem och i höjdlager. För varje horisontell cell i rutsystemet räknas antalet returerna i varje höjdlager. Stamzonhöjden i varje cell kan sedan bestämmas som höjden för det lägsta höjdlaget som innehåller minst en procent av det totala antalet returerna i trädkronan (Holmgren och Larsson, 2004), se Figur 13. Eftersom alla returerna används i analysen, uppstår problem med markreturerna och undervegetation som gör det svårt att identifiera undersidan av trädkronan. Figur 13 visar ett idealfall där alla returerna antas komma från trädkronan, vilket ger en tydlig gräns. I figuren blir stamzonhöjden 1m för den analyserade cellen. I själva verket kommer ett stort antal returerna att ligga marknära. För att avhjälpa detta problem, antas en lägsta stamzonhöjd varifrån beräkningen utgår. Nackdelen med denna metod är att stamzonhöjder lägre än denna nivå missas samt att undervegetation inte beaktas. Eftersom det krävs en viss datamängd för beräkna andelen returerna i varje höjdlager får inte cellerna i rutsystemet vara för små. Storleken beror av tätheten i punktmolnet. Här användes 5×5m för SBK-data och 10×10m för LM-data. Varje höjdlager hade en vertikal utsträckning på 0,2m. För att separera ut alla returerna som sammanfaller med vegetation omklassificerades med överlagring med de filtrerade vegetationsmodellerna på LiDAR-data i FME.



onaturligt intryck, framför allt i LM-data. Rumsligt visar de båda kartorna på ganska god överensstämmelse: höga värden och låga värden har liknande utbredning.

## Beräkning av kronhöjd och kronvolym

Kronhöjd för varje cell beräknas enkelt genom att subtrahera stamzonhöjden från vegetationshöjden, vilket kan göras i de flesta GIS. Grönvolymen fås sedan genom att multiplicera med cellarean. Det är viktigt att tänka på att kronhöjden här är beräknad för rasterceller, inte för enskilda träd.



Figur 14. Stamzonhöjd på Medicinareberget i studieområdet Linné-Sahlgrenska, a) LM-data och b) SBK-data.

## RESULTAT

### Vegetationshöjd

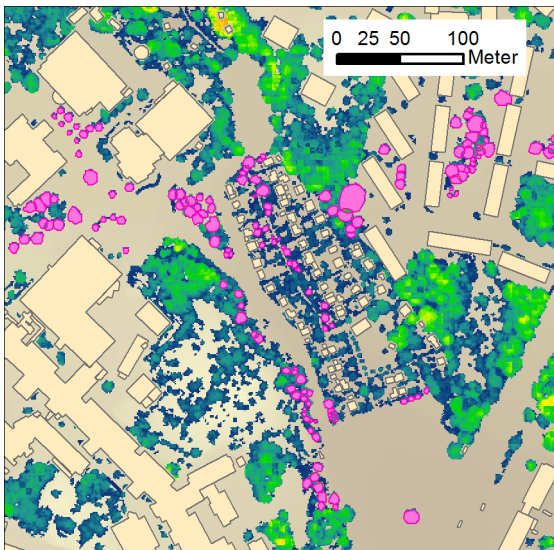
Modellerad vegetationshöjd för SBK- och LM-data undersöktes i 5000 slumpvis genererade samplingspunkter inom varje studieområde. Resultatet återfinns i Tabell 3. Endast de punkter som sammanfaller med vegetation i *båda* dataseten är inkluderade i beräkningen av statistiken. Det innebär att hänsyn tagits till att olika gränsvärde i låg-filtret (två respektive en meter). Antalet inkluderade samplingspunkter (*Antal*) ger därför också en indikation på hur stor yta av varje studieområde som täcks av vegetation högre än två meter. Som framgår av tabellen är skillnaden i höjd mellan SBK- och LM-data inte särskilt stor, men i alla studieområden ger SBK-data något högre värden. Tabell 3 ger också en indikation på vegetationens karaktär inom studieområdena. Studieområdet Linne-Sahlgrenska, följt av Haga, har den högsta vegetationen och täcks, liksom Marconimotet,

till cirka en fjärdedel av vegetation. Studieområdet Ringön täcks till endast cirka 7% av vegetation och har i genomsnitt den lägsta vegetationen av samtliga områden.

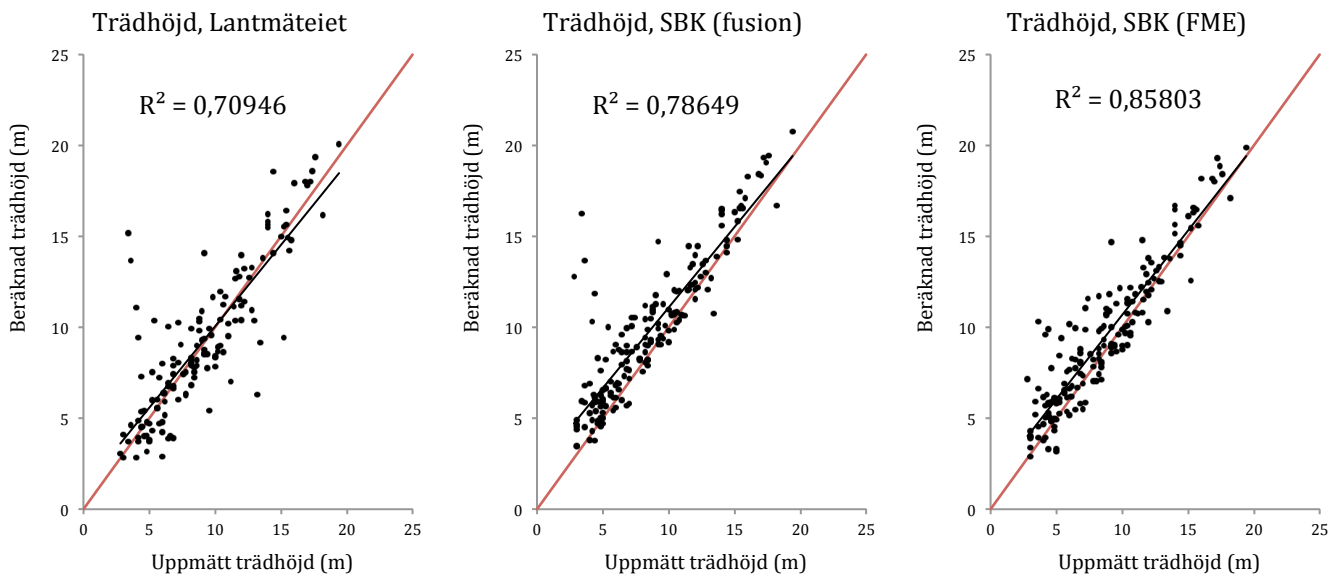
Den beräknade vegetationshöjden har jämförts med uppmätta värden för 180 träd inom en del av Guldheden, studieområde Linné-Sahlgrenska. Uppmätta träd identifierades och digitaliserades som polygoner med hjälp av ortofoton från Lantmäteriet, se Figur 15. Eftersom fältobservationerna utgjordes av uppmätt *trädhöjd*, användes det högsta cellvärdet för vegetationshöjden inom respektive trädpolygon som korresponderande beräknat värde. Figur 16 indikerar att det är god överensstämmelse mellan fältdata och beräknad trädhöjd för båda LM-data och SBK-data, med något större spridning för LM-data. Bäst korrelation ( $R^2 = 0,86$ ) visar datasetet där FME använts för rastreningen av LiDAR-data. SBK tenderar att överskatta vid lägre trädhöjder. I både LM-data och SBG (Fusion) visar några punkter vid lägre uppmätta värden ganska stor avvikelse. Åtminstone några av dessa kan härledas till misspassning mellan digitaliserade träd och rastrerad LiDAR-data, det vill säga den högsta cellen inom polygonen kommer från ett angränsande högre träd.

Tabell 3. Statistik för vegetationshöjd i 5000 samplingspunkter i varje studieområde. Punkter som faller utanför vegetation i något av dataseten är inte inkluderade.

HAGA	Antal	Medelhöjd (m)	Standard- avvikelse	Maxhöjd	Percentil 25%	Percentil 75%	Yta vegetation > 2m
<b>LM</b>	706	11,43	5,24	28,32	7,44	14,9	14%
<b>SBK (Fusion)</b>		12,02	5,38	28,75	8,11	15,73	
LINNE- SAHLGRENSKA	Antal	Medelhöjd (m)	Standard- avvikelse	Maxhöjd	Percentil 25%	Percentil 75%	Yta vegetation > 2m
<b>LM</b>	1271	11,59	5,76	27,90	6,86	15,48	25%
<b>SBK (Fusion)</b>		12,34	5,73	28,47	7,81	16,35	
MARCONI- MOTET	Antal	Medelhöjd (m)	Standard- avvikelse	Maxhöjd	Percentil 25%	Percentil 75%	Yta vegetation > 2m
<b>LM</b>	1201	9,94	4,34	25,91	6,68	12,88	24%
<b>SBK (Fusion)</b>		10,29	4,49	24,13	6,85	13,26	
RINGÖN	Antal	Medelhöjd (m)	Standard- avvikelse	Maxhöjd	Percentil 25%	Percentil 75%	Yta vegetation > 2m
<b>LM</b>	352	9,51	5,06	26,48	5,34	12,88	7%
<b>SBK (Fusion)</b>		10,01	5,41	27,13	5,86	13,55	



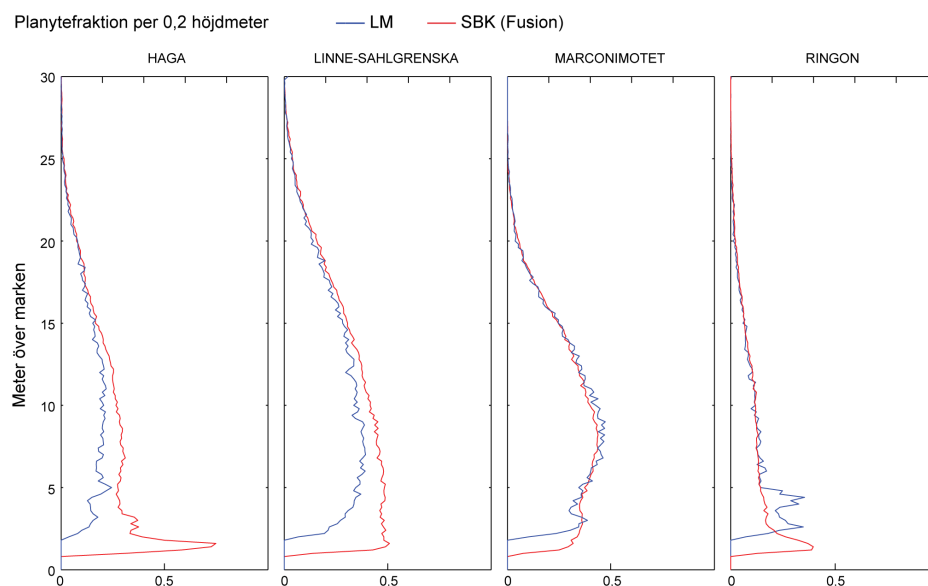
Figur 15. Guldheden sydväst om Wavrinskys plats. Rosa polygoner visar utbredningen av de träd som mättes i fält. Vegetationen är visualiserad med vegetationshöjd, SBK-data.



Figur 16. Punktdiagram över trädhöjd: fältdata och beräknad trädhöjd från vegetationshöjd. Den röda linjen visar 1:1-förhållande och den svarta linjen är trendlinjen för datamängden. För LM-data har polygoner där LM-rastret saknat vegetation uteslutits.

Figur 17 visar den vertikala fördelning av planytefraktion, det vill säga hur stor andel av varje studieområde som utgörs av vegetation av en viss höjd för de fyra olika områdena. Flera viktiga saker kan noteras. För det första syns tydligt effekten av låg-filtret på en respektive två meter. Dessutom syns skillnaden i klassificering för SBK Haga jämfört med de andra SBK-data. Haga uppvisar en kraftig topp mellan en och två meter som troligtvis

beror på bilar och andra oönskade objekt som finns med här, men inte i SBK-data för de andra områdena. Skillnaden mellan LM-data och SBK-data är liten i Marconimotet och Ringön, medan den är relativt stor i Haga och Linné-Sahlgrenska under cirka 15m. En anledning är troligtvis en kombination av bebyggelsestäthet och cellstorlek. Då en byggnadsbuffert på en cellstorleksenhet används i bearbetningen tas mer byggnadsnära vegetation bort i LM-fallet. I Ringön syns två avvikande toppar mellan cirka tre och fem meter över marken. En bidragande orsak till dessa är oönskade objekt som är högre än gränsvärdet i låg-filtret, till exempel järnvägsvagnar, som får stort genomslag eftersom det totalt sett är lite vegetation i Ringön. Vid hög vegetation är skillnaderna små. Det kan bero på att den högsta vegetationen oftast är omgiven av annan vegetation i ett sammanhängande område eller inom ett större träd. Dessa celler angränsar sällan till problematiska områden och oönskade objekt, och tenderar i större grad att bli ”rätt” genom rastering- och filtreringsprocesserna. Under 15 meter i Haga och Linné-Sahlgrenska är det dock en tydlig skillnad mellan dataseten, som förstärks närmare marken.



Figur 17. Vertikala vegetationsprofiler i 0,2m intervall för de fyra studieområdena och de två dataseten.

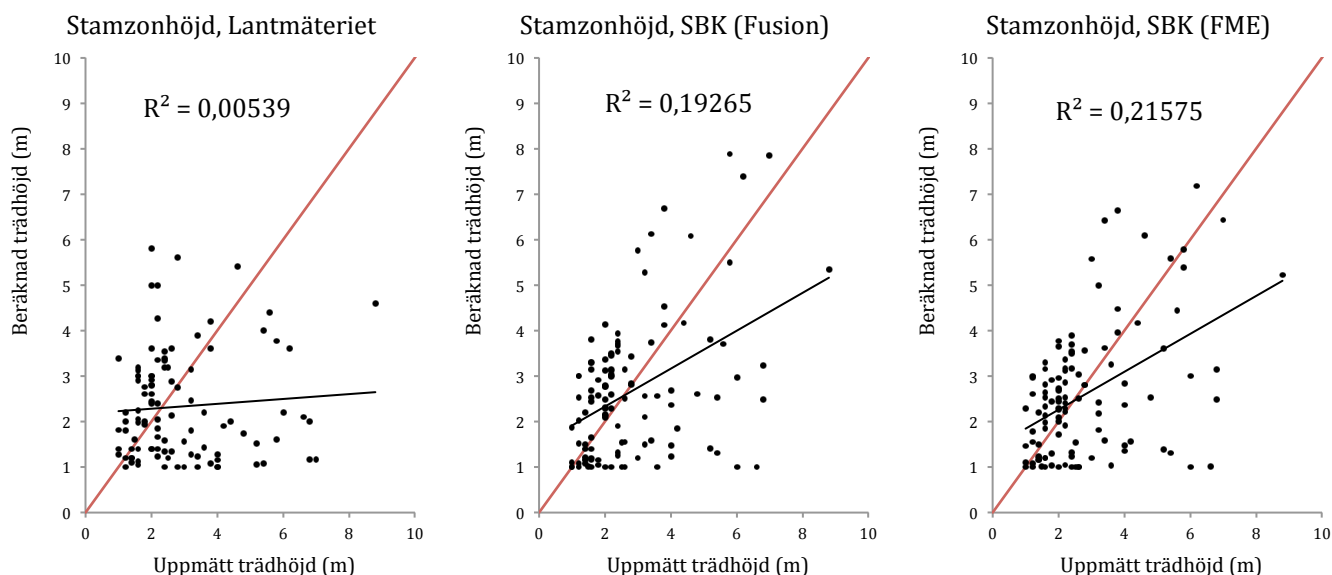
## Stamzonhöjd

Stamzonhöjden skiljer tydligt mellan LM- och SBK-data med genomgående lägre värden för LM-data. Orsaken till det är troligtvis att Lantmäteriets data är insamlat under avlövnings säsongen. Då kan laserpulsen lättare penetrera trädkronan och ge ett bättre dataunderlag för analysen. Under sommaren hindrar lövtäckten laserpulsen och det blir färre returerna från trädkronans nedre delar än i fallet med LM-data. Eftersom punkttätheten också är mycket större i SBK-data, blir andelen punkter ”uppe i trädet” också större, vilket medför att 1%-nivån riskerar att förskjutas uppåt. Statistik för stamzonhöjd i samma samlingspunkter som ovan redovisas i Tabell 4.

Tabell 4. Statistik för stamzonhöjd i 5000 samplingspunkter i varje studieområde. Punkter som faller utanför vegetation i något av dataseten är inte inkluderade.

HAGA	Medelhöjd	Std.av.	Maxhöjd	Percentil 25%	Percentil 75%
LM	2,8	2,1	10,0	1,0	4,2
SBK (Fusion)	3,9	2,7	11,8	1,5	5,6
LINNE-SAHLGRENSKA	Medelhöjd	Std.av.	Maxhöjd	Percentil 25%	Percentil 75%
LM	2,6	2,0	10,0	1,2	3,6
SBK (Fusion)	3,6	2,6	10,3	1,2	5,4
MARCONIMOTET	Medelhöjd	Std.av.	Maxhöjd	Percentil 25%	Percentil 75%
LM	1,9	1,4	10,0	1,0	2,0
SBK (Fusion)	2,6	1,9	10,0	1,2	3,4
RINGÖN	Medelhöjd	Std.av.	Maxhöjd	Percentil 25%	Percentil 75%
LM	1,8	1,3	8,0	1,0	2,2
SBK (Fusion)	2,6	2,1	9,4	1,0	3,2

Jämförelse med fältdata visar på stor osäkerhet i uppskattning av stamzonhöjd, Figur 18. Framförallt gäller det LM-data. För att få fram beräknad stamzonhöjd har medelvärden för de celler som sammanfaller med polygonerna använts. All träd som saknas i modellerna eller har en uppmätt stamzonhöjd under en meter har tagits bort, eftersom denna gräns användes vid uppskattningen av stamzonhöjd. Figur 18 visar på stor spridning med låg korrelation mellan uppmätt och beräknad stamzonhöjd, särskilt vid högre värden.



Figur 18. Punktdiagram över stamzonhöjd: fältdata och beräknad stamzonhöjd. Den röda linjen visar 1:1-förhållande och den svarta linjen är trendlinjen för datamängden. För LM-data har polygoner där LM-rastret saknat vegetation uteslutits. Alla träd med uppmätta värden under en meter har också uteslutits i alla diagram.



## Kronhöjd och kronvolym

Genom att avgränsa och studera mindre områden kan effekten av oönskade objekt minimeras och skillnader mellan dataseten kan lättare visualiseras. I Tabell 5 är statistik för kronhöjd i nio mindre områden sammanställd. Alla nio områden återfinns inom de fyra studieområdena, se kartor på sidorna 27-32. För områden inom Linné-Sahlgrenska är även resultat från rastningen med FME inkluderade i tabellen. Notera att resultaten visar kronhöjd och därför är beroende av alla de operationer som utförts på de två dataseten. Att LM-data genomgående resulterar i en mindre vegetationsarea, kan vara en följd av att låg-filtret tar bort alla celler under två meter. Trots det är jämförelserna praktiskt viktiga eftersom olika efterbearbetning (filtrering) krävs på grund av olika förutsättningar från början.

### Vegetationsyta

SBK (Fusion) ger genomgående störst area och volym. Den areella skillnaden mellan SBK-data och LM-data är störst i området Ringögatan och i Haga. Här är vegetationsytan för LM-data endast cirka 20% av ytan för SBK-data. Båda dessa områden har liten vegetationsyta, 14% respektive 8% av områdets totala yta, beräknat utifrån SBK-data. Motsvarande skillnad är minst i områdena Lunbyleden (78%), Guldheden II (79%) och Marconimotet (85%). SBK (Fusion) ger också större yta än SBK (FME) även om skillnaderna är små.

### Kronhöjd

Den lägsta vegetationen återfinns i Lunbyleden och i Haga, sett till medelhöjden. Högst medelhöjd har Slottsskogen följt av Guldheden II. Skillnaderna mellan SBK-data och LM-data följer ingen tydlig trend, men LM-data tenderar att ha något högre medelvärde, vilket kan bero på att vegetation under två meter är borttagen. SBK-data visar däremot högst maxhöjd i de flesta områdena. Däremot är det tydligt att SBK (FME) ger något lägre värden än SBK (Fusion), vilket också framgår av Figur 16. Enligt jämförelsen med fältdata ligger SBK (FME) något närmare verkligheten än SBK (Fusion).

Tabell 5. Statistik för kronhöjd i nio utvalda delområden. Statistiken är beräknad med Zonal Statistics i ArcGIS desktop.

LUNDBYLEDEN	$A_{veg}^1$ (m <sup>2</sup> )	$A_{veg}^2$ (%)	$A_{SBK}^3$ (%)	Maxhöjd <sup>4</sup> (m)	Medelhöjd (m)	Standard- avvikelse	Volym (m <sup>3</sup> )
Lantmäteriet	7488	42	78 %	15.0	5.1	3.2	37941
SBK (Fusion)	9583			15.5	4.3	3.1	40920
RINGÖGATAN	$A_{veg}$ (m <sup>2</sup> )	$A_{veg}$ (%)	$A_{SBK}$ (%)	Maxhöjd (m)	Medelhöjd (m)	Standard- avvikelse	Volym (m <sup>3</sup> )
Lantmäteriet	260	14	20 %	15.4	7.7	4.2	2011
SBK (Fusion)	1323			18.3	8.8	3.9	11595

TRÄDEN I STADEN  
– ANVÄNDNINGEN AV LIDAR-DATA FÖR ATT IDENTIFIERA URBAN VEGETATION

SLOTTSSKOGEN							
	$A_{veg}$ (m <sup>2</sup> )	$A_{veg}$ (%)	$A_{SBK}$ (%)	Maxhöjd (m)	Medelhöjd (m)	Standard- avvikelse	Volym (m <sup>3</sup> )
Lantmäteriet	10776		70 %	25.8	12.0	5.2	128838
SBK (Fusion)	15399	63		23.8	10.2	4.6	156849
SBK (FME)	14857		96 %	23.5	9.4	4.4	139025
GULDHEDEN I							
	$A_{veg}$ (m <sup>2</sup> )	$A_{veg}$ (%)	$A_{SBK}$ (%)	Maxhöjd (m)	Medelhöjd (m)	Standard- avvikelse	Volym (m <sup>3</sup> )
Lantmäteriet	1252		55 %	15.4	7.3	3.7	9113
SBK (Fusion)	2268	20		16.5	6.1	4.0	13827
SBK (FME)	2017		89 %	15.5	5.9	3.7	11967
GULDHEDEN II							
	$A_{veg}$ (m <sup>2</sup> )	$A_{veg}$ (%)	$A_{SBK}$ (%)	Maxhöjd (m)	Medelhöjd (m)	Standard- avvikelse	Volym (m <sup>3</sup> )
Lantmäteriet	6744		79 %	21.2	9.6	5.0	64463
SBK (Fusion)	8549	75		20.2	8.1	4.4	69519
SBK (FME)	8334		97 %	20.6	7.1	4.2	59178
MARCONIMOTET							
	$A_{veg}$ (m <sup>2</sup> )	$A_{veg}$ (%)	$A_{SBK}$ (%)	Maxhöjd (m)	Medelhöjd (m)	Standard- avvikelse	Volym (m <sup>3</sup> )
Lantmäteriet	14316		85 %	16.6	6.4	3.5	91709
SBK (Fusion)	16775	29		18.6	5.5	3.4	93077
NYA ALLÉN							
	$A_{veg}$ (m <sup>2</sup> )	$A_{veg}$ (%)	$A_{SBK}$ (%)	Maxhöjd (m)	Medelhöjd (m)	Standard- avvikelse	Volym (m <sup>3</sup> )
Lantmäteriet	6028		53 %	30.1	6.4	4.2	38481
SBK (Fusion)	11408	43		20.0	5.2	3.5	58962
HAGA							
	$A_{veg}$ (m <sup>2</sup> )	$A_{veg}$ (%)	$A_{SBK}$ (%)	Maxhöjd (m)	Medelhöjd (m)	Standard- avvikelse	Volym (m <sup>3</sup> )
Lantmäteriet	492		21 %	7.9	4.0	1.9	1952
SBK (Fusion)	2290	8		16.1	3.4	2.3	7833

1 Yta vegetation

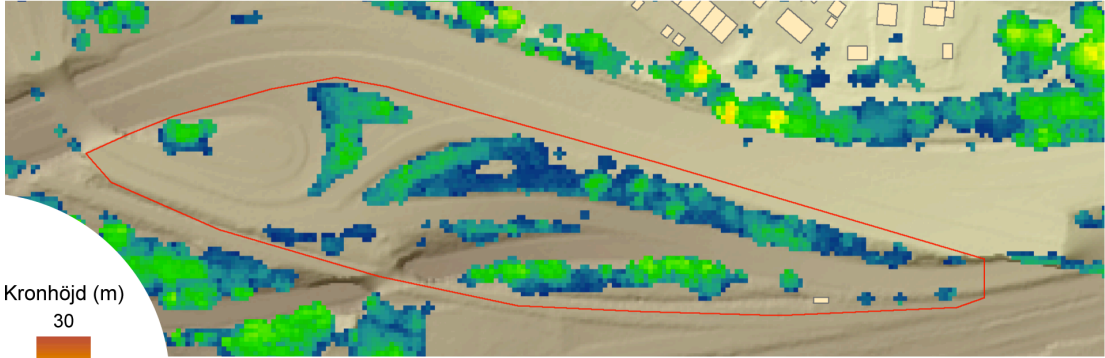
2 Yta vegetation som procent av områdets totala yta

3 Yta vegetation i förhållande till yta vegetation beräknad med SBK (Fusion)

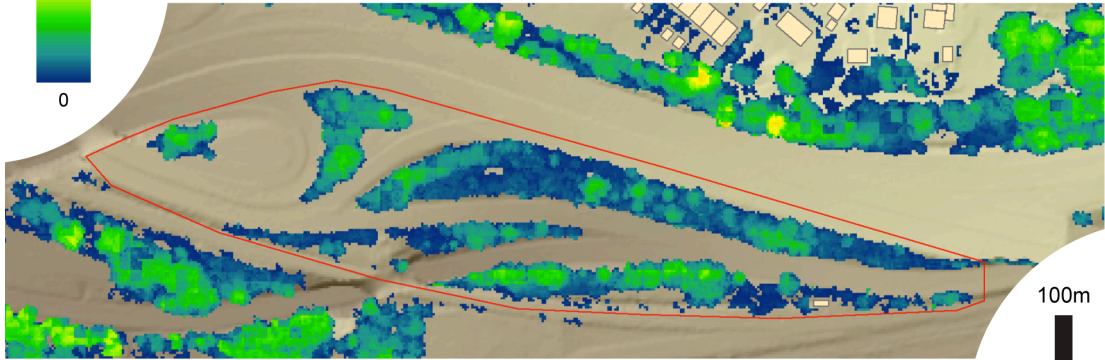
4 Minimumhöjd anges inte, eftersom låg-filtret isätter denna gräns till en respektive två meter.

## LUNDBY- OCH KUNGÄLVSLEDEN

Lantmäteriet



SBK



Ortofoto

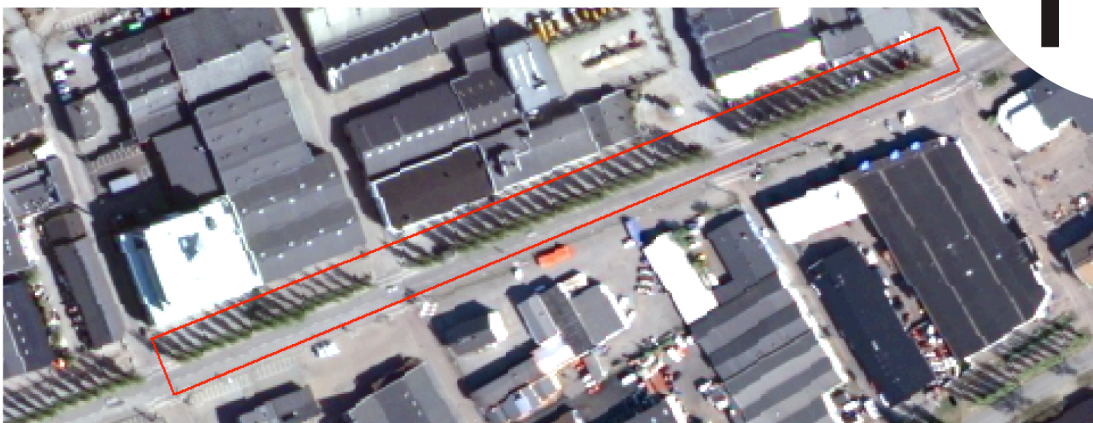


## RINGÖGATAN

Lantmäteriet

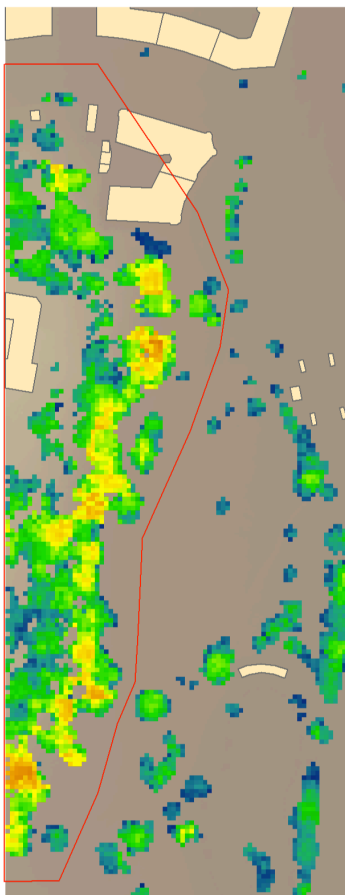


Ortofoto



## SLOTTSSKOGEN

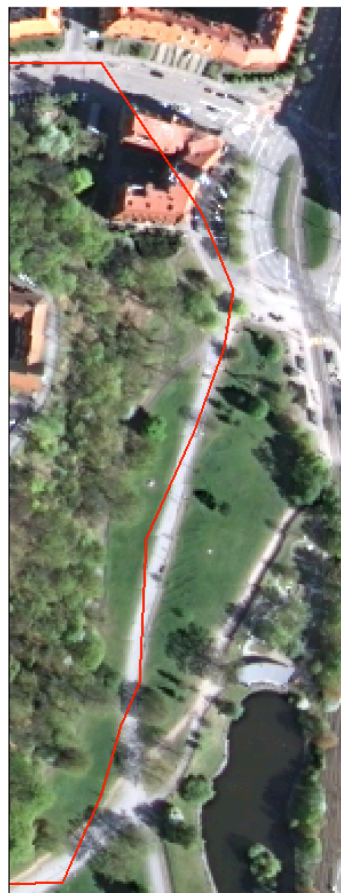
Lantmäteriet



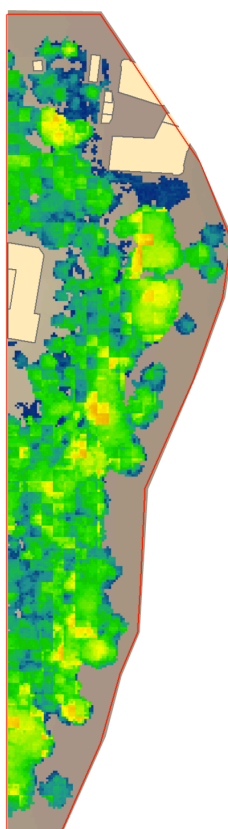
Kronhöjd (m)



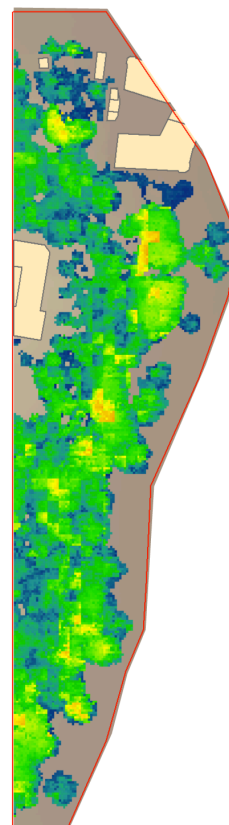
100m



Ortofoto

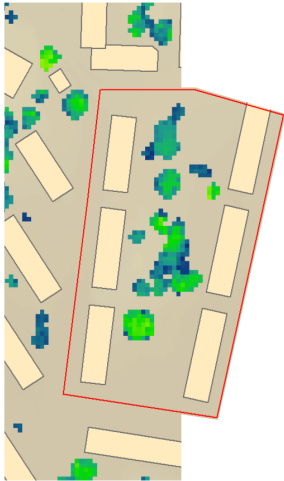


SBK (FUSION)

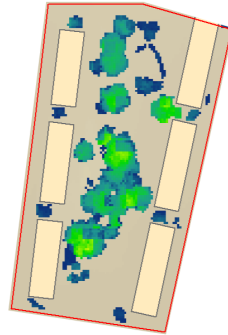


SBK (FME)

### GULDHEDEN I



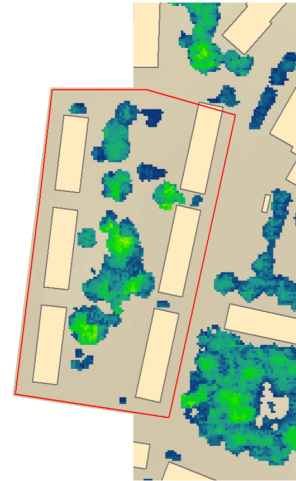
Lantmäteriet



SBK (FUSION)



Ortofoto



SBK (FME)

Kronhöjd (m)

30

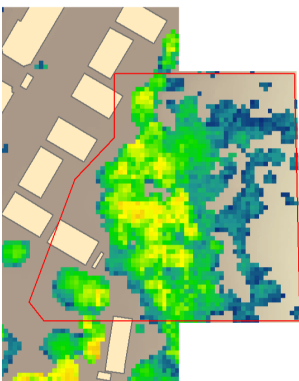


0

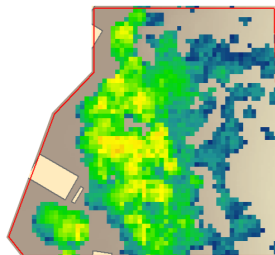
100m



### GULDHEDEN II



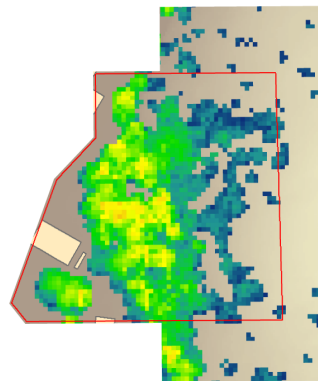
Lantmäteriet



SBK (FUSION)



Ortofoto



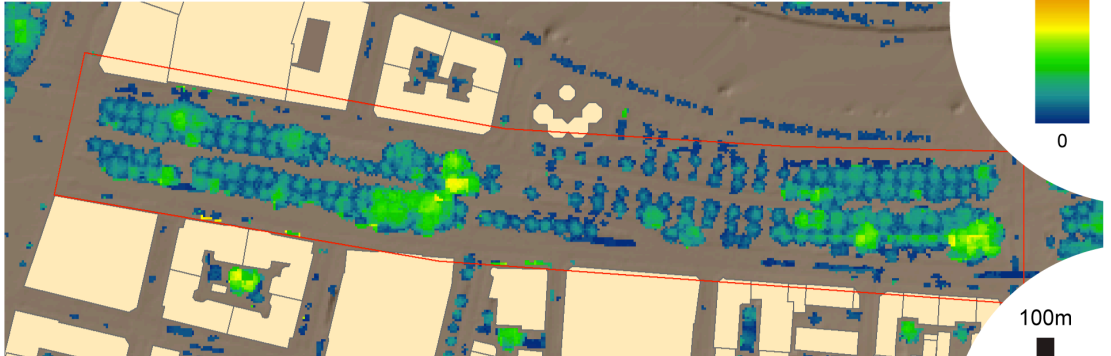
SBK (FME)

## NYA ALLÉN

Lantmäteriet



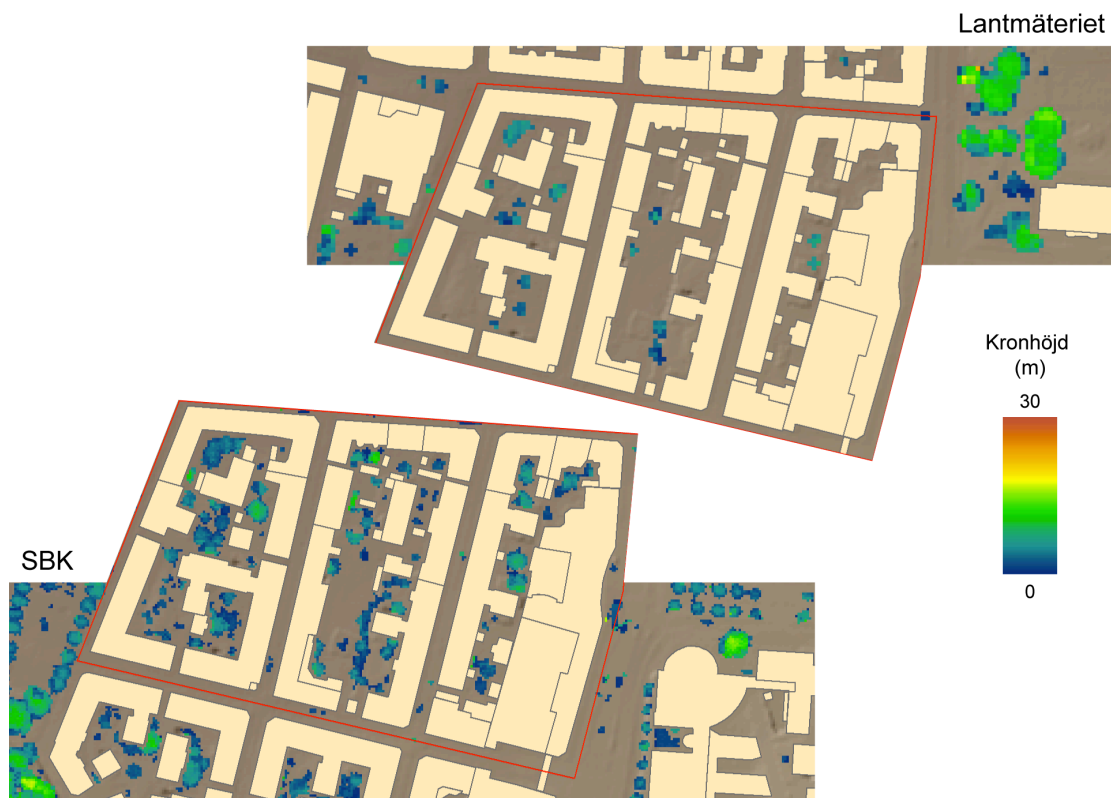
SBK



Ortofoto



## HAGA



100m



Ortofoto



## DISKUSSION

Fel i uppskattning av kronhöjd och kronvolym kan härledas till fyra huvudsakliga tänkbara orsaker: (1) osäkerhet i registrering av höjd i samband med laserskanning, (2) ”felklassificering” av LiDAR-data, (3) rastering av LiDAR-data och (4) uppskattning av stamzonhöjd. Av dessa kan den första betraktas som försumbar i sammanhanget. Det finns inget som tyder på att skillnader i höjdvärden mellan olika LiDAR-data har något avgörande inflytande på resultaten. Däremot kan tidpunkten för laserskanningen ha betydelse, det vill säga om träden bär löv eller inte. Nedan diskuteras problem vidhäftade med de tre sista punkterna.

### Klassificering av LiDAR-data

Klassificeringen av de två dataseten i studien har diskuterats ovan. Skillnaderna mellan de två dataseten är stora vilket medför olika förutsättningar för vegetationsanalys i städer. I städer finns många objekt som kan misstolkas som vegetation vilket gör Lantmäteriets klassificering av data olämplig att använda. Istället kan andra metoder att separera vegetationspunkterna undersökas. Till exempel kan de sista returerna (*last returns*) användas för att kartlägga vegetationens utbredning (Goodwin m.fl., 2009).

I fallet med LM-data påverkas resultatet på två sätt. Dels genom att kvarvarande oönskade objekt som inte filtrerats bort ger en överskattning av vegetationsvolymen, dels genom att låg vegetation filtreras bort. Det senare underskattar vegetationsvolymen i områden med mycket låg vegetation. Detta sätter gränser för vilken typ av vegetation som går att analysera. Grov klassificering gör filtrering nödvändig men också svårare, eftersom typen av problem som skall adresseras är fler. Ett dataset som är bättre klassificerat, till exempel SBK-data, gör filtreringen lättare att genomföra.

Rasteringen kan också göras genom att först kartlägga utbredningen av *last returns* vilket indikerar förekomsten av vegetation och sedan separera ut alla returer inom dessa områden. Metoden har inte utvärderats i denna studie, men är ett tänkbart alternativ för LM-data.

### Rastering och filterning av LiDAR-data

Rastering av LiDAR-data innebär att laserreturernas värden överförs till ett raster. För varje cell i rastret ska det högsta värdet anges. För att på så sätt representera vegetationshöjden korrekt är det viktigt att rastrets upplösning är vald med punktmolnets täthet i åtanke. För stora rasterceller leder till överskattning av vegetationshöjden, eftersom den högsta laserpunkten då får inflytande över ett större område (cellens storlek). För små rasterceller i förhållande till tätheten kan ge upphov till många tomma celler och manipulering i efterhand genom filtrering kan då ge upphov till onödigt stora fel. Ett högupplöst raster riskerar också att sätta gränser för hur stora områden som är genomförbart att analysera med avseende på datorkraft, tid och pengar. Rastrets upplösning påverkar också filtrens precision.

Lika viktigt som en väl vald cellstorlek är att kunna kontrollera den geografiska registreringen av rastren. I den här studien är FUSION problematiskt i det avseendet. *CanopyModel* och *DensityMetrics* har möjligheten att ange utbredning och antal rader och kolumner för de resulterande rastren (switch: *Grid*). Funktionen avrundar antalet rader och kolumner uppåt; för att få 1000×1000 celler måste därför 998 anges om cellstorleken är två meter. Det visade sig också att applikationen hade problem tillsammans med andra funktioner. Används inte Grid kan rastren få olika antal celler för olika områden (till exempel 1002×1003). Dessutom sätts rastrets utgångs-koordinat till centrum för den nedre vänstra cellen (lower left center), vilket måste tas hänsyn till i efterkommande databearbetning och -analys. Särskilt om raster från olika programvaror används. FME medger bättre kontroll av dessa parametrar vid rastring och kan därför vara att föredra, särskilt om ett stort antal dataset skall processas. FME saknar dock specifika funktioner för vegetationsanalys, vilket kan vara en nackdel.

Behovet av filtrering är olika för olika dataset. Filtrering görs för att korrigera fel som uppkommer i rastningsprocessen. Felen har i huvudsak två olika ursprung: (1) fel klassificerade celler som gett upphov till oönskade objekt och (2) mer eller mindre systematiska variationer i punktmolnets täthet. En ingående komponent i båda punkterna är rastrets upplösning som påverkar hur felen representeras i rastren och därmed i vilken mån de kan korrigeras.

Den första typen kan åtgärdas med hög- och lågfilter, linjärt filter och filter för att ta bort friliggande pixlar. Den andra typen åtgärdas med de två hål-filtren. Varje filter har sina parametrar som avgör hur de manipulerar data. Vilka värden på parametrarna som är lämpliga beror av rastrets upplösning och vilka problem som ska åtgärdas. Till exempel kan det vara stor skillnad vad en friliggande pixel representerar i ett raster med en meters upplösning mot ett med två meters upplösning.

Utvärdering av resultatet av en filtrering är svårt att göra. Att inspektera data manuellt och jämföra med andra data, till exempel flygfoton, är ett sätt. Över stora områden är det tidskrävande. Det kan då vara lämpligt att välja ut mindre områden eller specifika objekt och se hur de påverkas av olika filterinställningar. I slutänden innebär filtrering en kompromiss mellan att minimera existerande fel utan att introducera nya. Ett alternativ eller komplement till filtrering är att manuellt radera felaktiga celler med någon lämplig GIS-metod.

## Uppskattning av stamzonhöjd

För att beräkna vegetationsvolymen är det nödvändigt att uppskatta stamzonhöjden, det vill säga undersidan av trädkronans höjd över marken. Detta är problematiskt av flera olika anledningar: (1) returerna måste finnas i trädkronans nedre delar, (2) datamängden otillräcklig för att matcha upplösningen på vegetationshöjden och (3) närvaro av undervegetation.

Punkt ett och två ovan hänger ihop; om inte laserpulsen kan penetrera trädkronan blir antalet returerna från de lägre delarna få vilket gör att en större upplösning måste användas vilket ökar risken för feluppskattning. Det kan antas att laserpulsens penetrering beror av lövverkets täthet och därför av årstiden för datainsamlingen och typ av vegetation. Antalet returerna påverkar också indelningen av datamängden i höjdlager (se ovan). Om små intervall kan användas kan en mer noggrann uppskattning av stamzonhöjden göras och vice versa. Små intervall kan dock innebära stora lokala fel på grund av variationer i antalet returerna i trädkronan. Större intervall ger en grövre uppskattning, men kan dämpa stora fel. Liksom vid rastering av vegetationshöjd är den geografiska registreringen av rastren viktig, särskilt som cellstorleken är relativt stor. En förskjutning på en rad eller kolumn kan innebära stora fel, speciellt om den verkliga variationen av stamzonhöjd är stor på en liten yta.

I denna studie användes höjdintervall på 0,2 m för båda dataseten. Cellstorleken var fem meter för SBK-data och tio meter för LM-data. Jämfört med fältmätningar är resultaten i båda fall osäkra, men något bättre för SBK-data. Orsaken är i viss mån svårtolkad; den högre punkttätheten i SBK-data talar för, men att data är insamlad vid olika säsonger talar emot. Uppenbara fel, till exempel att stamzonhöjden uppskattades högre än den beräknade vegetationshöjden korrigerades genom att ersätta stamzonhöjden med ett värde baserat på den genomsnittliga proportionen mellan vegetationshöjd och stamzonhöjd för datasetet. Det kan diskuteras om inte ett sådant generellt värde beräknat från fältmätningar kan användas som en enklare metod att uppskatta stamzonhöjden och ge tillfredställande resultat.

Närvaro av undervegetation gör det svårt att identifiera undersidan av trädkronan och uppskatta stamzonhöjden med den här använda metoden. Någonstans måste gränsen mellan mark och vegetation dras, här sattes den till en meter. Det innebär att i närvaro av undervegetation eller för buskar med kronor nära marken blir uppskattningen felaktig.

## SLUTSATSER OCH -KOMMENTARER

Detaljerad kartläggning av urban vegetation är en viktig förutsättning för att utvärdera och beräkna ekosystemtjänster i städer. Ofta saknas information om vegetation som faller utanför stadens detaljplanering. Denna studie har använt två olika LiDAR-dataset för att kartlägga vegetation, dess utbredning och tredimensionella egenskaper, i urbana miljöer; (1) data från Göteborgs stads stadsbyggnadskontor (SBK) och (2) från Lantmäteriet (LM). Dataseten skiljer sig åt i fråga om punkttäthet, klassificering och årstid för insamling. Vegetation i städer är fragmenterad och omgivningen komplex, bestående av en mängd objekt som i LiDAR-data kan förväxlas med vegetation. Syftet var att undersöka hur skillnaderna mellan dataseten påverkar kartläggningen av vegetation i en sådan miljö.

Resultaten av studien visar att vegetationens utbredning och höjd kan uppskattas bra med LiDAR-data i urbana miljöer om punkttätheten är hög och klassificeringen medger bra separering av returerna. SBK-data uppfyller dessa kriterier, medan LM-data inte gör det. Det medför att om LM-data används riskerar mycket vegetation att utelämnas samt oönskade objekt inkluderas i analysen. Kronhöjd och kronvolym är osäkrare att beräkna på grund av svårigheterna med att uppskatta stamzonhöjden, men även stamzonhöjden uppskattas bättre med SBK-data än LM-data. Dessa slutsatser stöds av fältmätningar. Filtreringens påverkan på resultatet har inte undersökts kvantitativt. Det kan dock konstateras att filter löser en del problem med oönskade objekt och artefakter som härrör från rumsliga variationer i punktmolnets täthet.

Av de två programvaror som använts för rasteringen av LiDAR-data, FUSION och FME, ger FME bättre kontroll över rastrens geometri. Antalet rader och kolumner samt varierar med FUSION, vilket kräver extra visuell inspektion för att undvika följdfel. Korrekt geometri är nödvändig om data från olika källor och program ska användas i olika steg i analysen. Risken för stora fel är annars stor, eftersom den geometriska precisionen måste vara hög vid analys av urbana miljöer.

Följande saker bör man ta i beaktning vid analys av urban vegetation med hjälp av LiDAR-data:

- Manuell inspektion av delresultat är nödvändig för att undvika att fel fortplantar sig genom analysprocessen. Ett helt automatiserat arbetsflöde riskerar att leda till stora missberäkningar, eftersom det då är svårt att upptäcka fel under arbetets gång och till exempel använda lämpliga filterparametrar.
- Uppskattning av stamzonhöjd är förknippat med stor osäkerhet. Ett enkelt sätt att uppskatta stamzonhöjden vore att använda ett generellt förhållande mellan vegetationshöjd och stamzonhöjd baserat på fältmätningar.
- SBK-data är bättre klassificerat för vegetationsanalyser i städer. Dock är området Haga (SBK-tile 147000,6396000) annorlunda klassificerat. Det motiverar varför all data måste inspekteras före analys.
- Att oönskade objekt kommer med i rasteringen från början är den största orsaken till fel i uppskattning av grönvolym. Oönskade objekt tillför inte bara ”vegetation” som inte finns, utan medför också att behovet av filtrering är större vilket leder till mer omfattande manipulation av data, vilket i sig är en osäkerhetsfaktor.
- Ett komplement till filtrering är att manuellt ”radera” oönskade objekt i ett GIS. Detta har dock inte gjorts i den här studien. Omvänt kan också mindre, sammanhängande områden med vegetation avgränsas och analyseras.
- Data med hög punkttäthet och bra klassificering medger att högre rasterupplösning kan användas och fler detaljer samt även låg vegetation, till exempel häckar, kan analyseras.

- Hög rasterupplösning ger större datafiler som tar längre tid att processa, vilket är en viktig aspekt att ta hänsyn till om stora områden ska analyseras.
- En stor nackdel med SBK-data är dess begränsade täckning (Göteborgs stad). LM-data är rikstäckande.

Baserat på ovanstående rekommenderas LiDAR-data med hög punkttäthet och klassificering av returerna i ett flertal av de klasser som finns tillgängliga enligt standard. Det medger relativt enkel separering av returerna, detaljerad analys med mindre behov av filtrering och minimering av felkällor. Detta är särskilt viktigt i områden med fragmenterad vegetation blandad med tät bebyggelse och andra objekt som kan ge upphov till fel. Manuell inspektion av data är viktigt för att avgöra hur bearbetning och analys av data bäst bör genomföras, samt för att undvika att onödigt stora fel fortplantar sig genom arbetsprocessen.

## REFERENSER

- Bergen KM et al. 2009. Remote sensing of vegetation 3D structure for biodiversity and habitat: Review and implications for lidar and radar spaceborne missions. *J. Geophys. Res.* 114:G00E06
- Bowler DE et al. 2010. Urban greening to cool towns and cities: a systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning* 97:147-155
- Holmgren J, Persson Å 2004. Identifying species of individual trees using airborne laser scanner. *Remote Sensing of Environment* 90:415-423
- Goodwin NR et al. 2009. Characterizing urban surface cover and structure with airborne lidar technology. *Canadian Journal of Remote Sensing* 35:297-309
- Hirano Y et al. 2004. Urban climate simulation by incorporating satellite-derived vegetation cover distribution into a mesoscale meteorological model. *Theoretical and Applied Climatology* 79:175-184
- Lindberg F and Grimmond CSB 2011. Nature of vegetation and building morphology characteristics across a city: influence on shadow patterns and mean radiant temperatures in London. *Urban Ecosystems* 11: 617-634
- Næsset E 2004. Accuracy of forest inventory using airborne laser scanning: evaluating the first nordic full-scale operational project. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19:554 - 557