

Norges miljø- og biovitenskapelige
universitet
Fakultet for miljøvitenskap og teknologi
Institutt for matematiske realfag og teknologi

Masteroppgave 2014
30 stp

Klassifisering av objekt i urbane områder ved bruk av høyoppløselige laserdata

Classification of Objects in Urban Areas from High-Resolution LiDAR Data

Morten Gammelby

Forord

Med denne oppgaven avslutter jeg min mastergrad i Geomatikk ved Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet(NMBU).

Flybåren laserskanning er et spennende fagfelt i stor utvikling og derfor var det av ønske å utforske noen av de mange mulighetene ved å skrive en masteroppgave innen dette feltet.

Denne oppgaven har blitt til ved et samarbeid med Blom Geomatics og det meste av arbeidet har foregått i deres lokaler på Skøyen våren 2014. Arbeidet gjennom våren har vært interessant og til tider krevende. Det har vært spennende å se hvordan forskning som er gjort de siste årene kan anvendes ved bruk av forskjellige verktøy.

En stor takk rettes til hovedveileder Ivar Maalen-Johansen for sine innspill, ideer og raske tilbakemeldinger gjennom hele våren.

Videre rettes det også en takk til biveileder Floris Jan Groesz for gode innspill og tanker, Ivar Oveland for innføring i programvare og resten av folket ved Blom for hjelpelighet ved eventuelle ting jeg lurte på. I tillegg ønsker jeg også å takke venner og familie for støtte og tålmodighet gjennom arbeidet med oppgaven.

Morten Gammelby, Ås, 14.05.2014

Sammendrag

En trend som har gjort seg gjeldene de siste årene i flybåren laserskanning er etterspørselen etter punktskyer med høyere tetthet. Ved å fly lavere og saktere er det mulig med dagens sensorer å fremstille punktskyer med en tetthet på inntil $50\text{punkt}/\text{m}^2$. Med en slik høy tetthet åpner det seg en rekke nye muligheter om hva slags informasjon som kan hentes ut av punktskyene.

I denne oppgaven ble det forsøkt å fremstille metoder, på bakgrunn av forskjellige programvarer og tilnærminger, for klassifisering av utvalgte objekt i urbane områder ved bruk av slike høyoppløselige laserdata. I dette tilfellet ble sett nærmere på fortauskanter, takkanter og fasadeliv. Programvaren som ble benyttet for fremstillingen av metodene var TerraScan, LIS og GRASS GIS. Den gjennomsnittlige punkt tettheten til datasettet benyttet i denne oppgaven var på $43\text{punkt}/\text{m}^2$.

For fortauskantene ga metoden utviklet i LIS en tilfredsstillende nøyaktighet, men det ble observert at objekter som biler og tett vegetasjon påvirket fullstendigheten til det endelige resultatet.

For takkantene gav ingen av de fremstilte metodene et tilfredsstillende resultat. På bakgrunn av en videre analyse av resultatet kan det se ut til at metoden fra TerraScan kan forbedres hvis det blir funnet en bedre måte å filtrere ut vegetasjonen på.

For fasadelivet ble det konkludert med at til tross for at det var en svært høy punkt tetthet i dette tilfellet var det fortsatt vanskelig å få tilstrekkelig med punkt på veggene grunnet vegetasjon og flyretningen.

Abstract

Over the past few years there has been a growing demand for high-resolution LiDAR for different purposes. By flying lower and slower it is possible with today's systems to collect point densities up until $50\text{points}/\text{m}^2$. Such high point density opens up a whole new world of classification of different objects.

The goal of this thesis was to develop methods, by the use of different software and approaches, for classification of selected objects from high-resolution LiDAR. In this thesis curbstones, roof edges and the trendline along the building façade were closer examined. The software chosen for the development of the methods were TerraScan, LIS and GRASS GIS. The average point density in this dataset was $43\text{points}/\text{m}^2$.

For the curbstones the method developed by the use of LIS gained the best result. It was also noticed that objects like cars and vegetation affected the completeness of the final result.

For the roof edges none of the developed methods gained a precise enough result. Based on further analysis of the results it would appear that the method of TerraScan can be used if found a better way to filter out vegetation than used in this thesis.

For the trendline along the building façade it was concluded that despite the fact that the point density in this case was very high, it was still difficult to get enough points on the walls due to vegetation and the flight path.

Figurene i denne oppgaven er fremstilt selv hvis ikke annet er oppgitt.

Innhold

1	Innledning	3
1.1	Problemstilling	3
1.2	Blom Geomatics	4
2	Bakgrunn	5
2.1	Teori	5
2.1.1	Laser	5
2.1.2	LiDAR	5
2.1.3	Flybåren Laserskanning	6
2.1.4	Flyplan	7
2.1.5	Punktetthet	7
2.1.6	Feilbudsjett	8
2.1.7	Flere retursignal	8
2.1.8	Klassifisering av punktskyer	9
2.1.9	FKB	12
2.2	Objekter	13
2.2.1	Fortauskanter	13
2.2.2	Takkanter	13
2.2.3	Fasadeliv	13
2.3	Datasett	15
2.3.1	Laserdata	15
2.3.2	Landmålingsdata fra Kirkegata i Oslo	16
2.3.3	FKB-data	17
2.3.4	Testområde	17
2.4	Programvare	18
2.4.1	TerraScan	18
2.4.2	Laserdata LIS	18
2.4.3	LasTools	18
2.4.4	GRASS GIS	19
2.4.5	Annen programvare	20
3	Metode	22
3.1	Fortauskanter	22
3.1.1	Tidligere arbeid	22
3.1.2	TerraScan	24
3.1.3	LIS	27
3.1.4	GRASS GIS & LAStools	30
3.2	Takkanter	34
3.2.1	Tidligere arbeid	34

3.2.2	TerraScan	35
3.2.3	GRASS GIS	37
3.3	Fasadeliv	40
3.3.1	Tidligere arbeid	40
3.3.2	TerraScan	41
3.3.3	LIS	43
3.4	Analyse av resultatene	45
4	Resultater	49
4.1	Fortauskanter	50
4.2	Takkanter	53
4.3	Fasadeliv	59
5	Diskusjon	62
5.1	Fortauskanter	62
5.2	Takkanter	64
5.3	Fasadeliv	66
5.4	Samlet vurdering av metodene	69
5.5	Videre arbeid	69
6	Konklusjon	71

Kapittel 1

Innledning

Gjennom de siste 20 årene har det vært en rivende utvikling i bruken av flybåren laserskanning. Med sin høye presisjon og lave kostnad sammenlignet med tradisjonelle fotogrammetriske metoder har laserskanning fra fly blitt et svært populært oppmålingsverktøy i en rekke fagfelt[1]. Per dags dato finner vi bruk av flybåren laserskanning i alt fra tradisjonell fremstilling av digitale overflatemodeller til påvising av kulturminner i skogområder.[27]

Teknologien som benyttes har gått fra å være en enkelt sensor montert på et fly til avanserte multisensor-systemer som kombinerer bruk av navigasjonssensorer og bildesensorer[1]. Programvaren har i takt med dette utviklet seg til å kunne håndtere større og mer komplekse datasett.

En trend som har gjort seg gjeldene de siste årene er etterspørselen om datasett med høyere punkttetthet[2]. Ved bruk av helikopter er det mulig å fly lavere og saktere, noe som kan gi en punktetthet på alt fra 5 til nærmere $50\text{punkt}/m^2$ [2]. Flere og flere slike datasett har blitt fremstilt over urbane områder, men også skogbruket og andre industrier har sett nytten av høyoppløselige punktskyer[4].

Laserdata med en høy oppløsning vil gi en mer fullstendig og detaljert beskrivelse av den skannede overflaten. En høy tetthet av punkter vil kunne trenge gjennom vegetasjon og nå bakken under for en bedre terrengmodell i tillegg til å gi en mer fullstendig og nøyaktig gjengivelse av objektene som befinner seg på overflaten[4].

Ved bruk av flybåren laserskanning er det ofte av interesse å foreta en videre klassifisering av punktskyen for å bestemme hva som konkret befinner seg på overflaten. Med slike høyoppløselige punktskyer åpner det seg en rekke nye muligheter for klassifisering av flere objekter som det er ønskelig å se nærmere på.

1.1 Problemstilling

Utgangspunktet for denne oppgaven var i samarbeid med Blom Geomatics å utforske hvordan slike høyoppløselige laserdata kan benyttes til klassifisering av tekniske objekt i urbane områder. Med dette menes menneskeskapte objekter som fortaus- og veikanter, murer, bygninger, vegger, veimerkinger og lignende. På bakgrunn av dette ble problemstillingen “Klassifisering av objekt i urbane områder ved bruk av høyoppløselige laserdata” formulert.

For å svare på denne problemstillingen ble følgende delproblemstillinger definert:

- Utvikle metoder for klassifisering av utvalgte objekt i urbane områder. I dette tilfellet ble det valgt å se nærmere på fortauskanter, takkanter og fasadeliv.
- En vurdering av resultatet med hensyn på nøyaktighet og fullstendighet.

- I tillegg var det av ønske å gi en enkel vurdering av selve metodene som ble fremstilt for objektene.

Objektene som skulle undersøkes i denne oppgaven er objekter som vanligvis blir vektorisert ved bruk av fotogrammetriske metoder eller landmåling. Hvis det skulle vise seg å være mulig å finne disse med tilsvarende nøyaktighet ved bruk av flybåren laserskanning, vil dette være en mye mer effektiv fremgangsmåte. Derfor var det også av interesse å sammenligne de foreløpige resultatene med kvalitetskravene satt av FKB-standarden for å få en indikasjon på om nøyaktigheten var tilstrekkelig god.

Videre var det også ønskelig at de forskjellige metodene ble fremstilt så mye som mulig ved bruk av en type software, da dette ofte er av ønske i en produksjonssammenheng både med hensyn på opplæring og pris. Det er verdt å nevne at ikke programvaren skulle vurderes, men heller metodene som det var kommet frem til.

Fagfeltet er i en såpass stor utvikling at en del av arbeidet ville være å sette seg inn i aktuelle studier som var gjort på dette området de siste årene. Det ble også viet en del tid til å lære seg programvare og utforske verktøyene som var tilgjengelige i disse.

1.2 Blom Geomatics

Blom Geomatics ble etablert i 2003, som et resultat av en sammenslåing av Fotonor AS, Norkart sin kartavdeling og Blom Kart AS. Per dags dato er det et av Europas største konsern innen moderne landkartlegging. Blom leverer en rekke produkter innen laserskanning fra fly og helikopter og videre analyse av laserdata til blant annet flomkartlegging, bymodellering, skogbruk og veidata.

Kapittel 2

Bakgrunn

2.1 Teori

2.1.1 Laser

Laser(Light Amplification by Stimulated Emission), er en betegnelse på lyskilder “hvor strålingen forsterkes ved stimulert emisjon”[6] Lyset utsendt fra en laser kan være synlig, eller virke i det ultrafiolette eller nærinfrarøde delen av spekteret. Til forskjell fra andre lyskilder er strålen utsendt fra laseren koherent¹, monokromatisk² og sterkt avgrenset i en retning. Disse egenskapene gjør laser anvendelig på svært mange områder, noe som gjør at vi finner bruk av laser i alt fra medisin til avstandsmåling. [6]

2.1.2 LiDAR

LiDAR(Light Detection And Ranging) er en metode som benytter laserstrålen til å måle avstanden til objekter eller jordoverflaten. [7] Utgangspunktet er at det benyttes sender som emitterer et lasersignal til et objekt eller overflate og på bakgrunn av den reflekterte energien kan avstanden beregnes. Dette kan utføres ved forskjellige metoder, men de to vanligste er ved bruk av puls- eller fasemålinger. Ved bruk av en pulsskanner sendes det ut laserpulser og avstanden beregnes ved tiden, «Time-of-Flight», det tar for den utsendte pulsen til å returnere til skanneren.[7] Lysets hastighet er kjent og avstanden er gitt ved formelen:

$$R = \frac{1}{2} \cdot c \cdot t_L \quad (2.1)$$

Ved en fasemåling sendes det ut et kontinuerlig signal og faseshiftet mellom utsendt og mottatt signal brukes til å beregne avstanden. Faseshiftet er gitt ved:

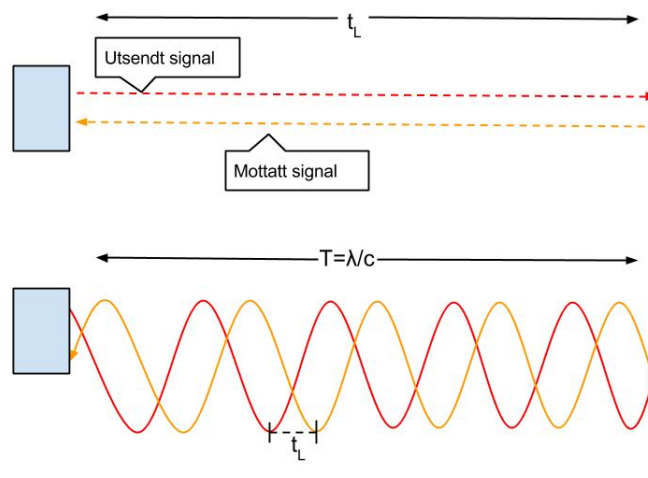
$$t_L = \frac{\phi}{2\Pi} \cdot T \quad (2.2)$$

På bakgrunn av dette beregnes avstanden ved:

$$R = \frac{1}{2} \cdot c \cdot \frac{\phi}{2\Pi} \cdot T = \frac{\lambda}{4\Pi} \cdot \phi \quad (2.3)$$

¹“Svingninger som vedvarende foregår ved samme frekvens, slik at man alltid har ett og samme faseforhold mellom dem.”[12]

²“Lys som består av bølger med en enkel frekvens eller bølgelengde.”[13]

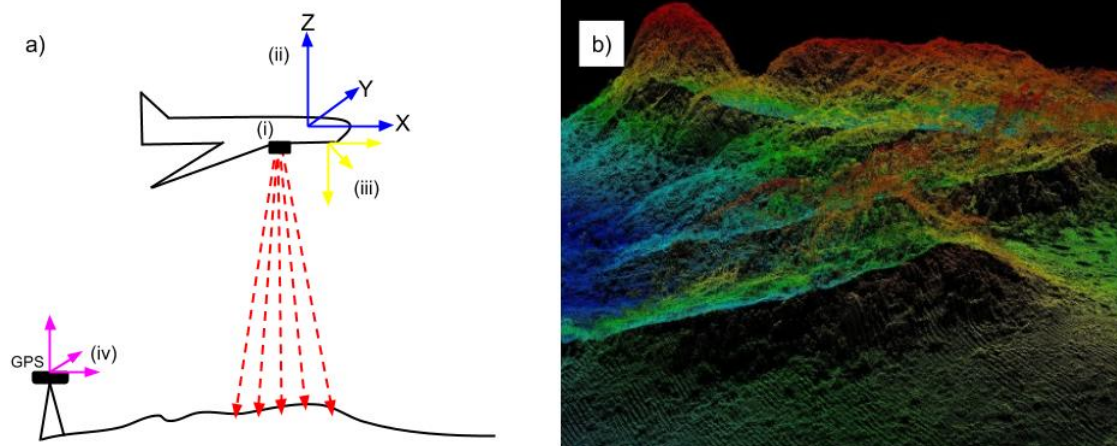


Figur 2.1: Avstandsberegning ved bruk av pulsmåling og fasemåling.

2.1.3 Flybåren Laserskanning

Flybåren laserskanning er en metode for innsamling av høydedata fra fly eller helikopter ved bruk av LiDAR. Laserskanneren er festet til flykroppen og ved hjelp av et roterende eller sveipende speil, spres de infrarøde strålene i terrenget. Avstanden til terrenget beregnes på bakgrunn av tiden det tar før det utsendte signalet returneres til senderen. Dagens skannere har mulighet til å sende avgårde nye pulser før den forrige har returnert til sensoren.[7] Hver mottatte signal vil ende opp som et punkt og ved å skanne et område vil det bli generert en punktsky. [9]

Videre benyttes det GNSS(Global Navigation Satellite System) for å bestemme flyets posisjon. Flyets rotasjoner og vinkelendringer beregnes ved bruk av INS(Inertial Navigation System), som sammen med de målte avstandene gjør at det kan dannes vektorer fra flyet til punktene på overflaten. Når disse vektorene kobles sammen med posisjonen til flyet kan koordinatene til punktene på overflaten bestemmes.[7]



Figur 2.2: a) Systemet kan deles opp i fire komponenter: (i) Laserskanner, (ii) INS, (iii) GNSS og (iv) GNSS bakkestasjoner. b) På bakgrunn av de reflekterte laserstrålene dannes det en punktsky.[5]

2.1.4 Flyplan

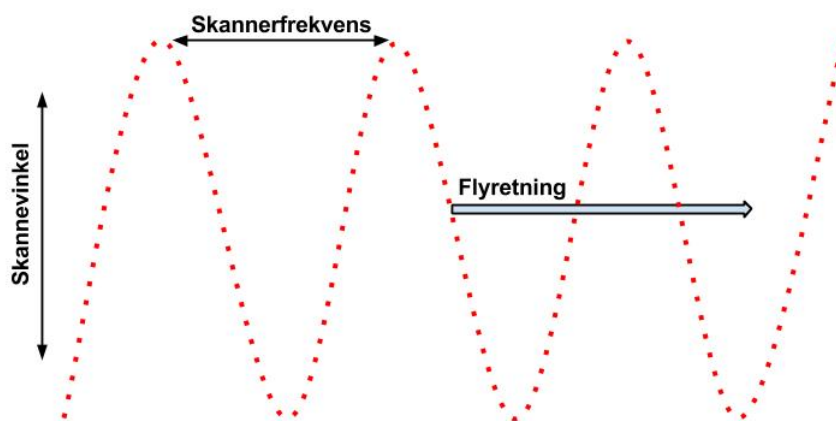
Før skanning av et området er det nødvendig å legge en flyplan for at skannet skal oppfylle de kravene som er satt av prosjektet. På bakgrunn av ønsket overlapp mellom flystripene bestemmes det hvor mange striper som skal flys for å dekke området. Vanligvis benyttes det en overlapp på 20% for å unngå hull mellom stripene og som en sikkerhet i tilfelle det skulle oppstå problemer med navigasjonen av flyet. Flyplanen inneholder i tillegg til dette retningen og lengden av flystripene og høyden og hastigheten som må holdes for ønsket punktetthet[22].

2.1.5 Punktetthet

Ved flybåren laserskanning er det en rekke parametre påvirker punktettheten til skannet. Forskjellige skannere kan ha forskjellige mønstre å spre laserstrålene på, men det vanligste mønsteret er et z-mønster generert av et sveipende speil. Et slikt mønster vil føre til en høyere tetthet av punkter i kantene enn midt på. Videre er skannevinkelen, speilets maksimale utslag, av interesse[7]. En stor skannevinkel vil føre til færre flystriper for å få dekket et område, men vil på en annen side gi lavere punktetthet. Speilet sveiper frem og tilbake med satt hastighet, skannerfrekvensen. Denne parameteren er med på bestemme avstanden mellom punktene i flyretningen.

En skanner sender ut et satt antall pulser per sekund, kjent som pulsfrekvensen. En høyere frekvens vil føre til en høyere tetthet. Pulsfrekvensen varierer med forskjellige type skannere men dagens skannere kan ha en frekvens på inntil 300kHz[22].

Gjennomføringen av selve flyvningen vil også påvirke den endelige punktettheten. En lav flyhøyde vil gi en høyere punktetthet enn ved en høy flyhøyde og dette må tilpasses etter hva som er ønsket. Sammen med skannevinkelen til skanneren vil flyhøyden være med på å bestemme «lasersensorens opptaksområde på overflaten», også kjent som fotavtrykket[14]. I tillegg til skannerfrekvensen vil også flyhastigheten bestemme tettheten i flyretningen.



Figur 2.3: Sammenhengen mellom de ulike skannerparametrene.

På bakgrunn av de forskjellige parametrene presentert ovenfor, kan den gjennomsnittlige punktettheten beregnes ved formelen[22]:

$$P_M = \frac{PRF}{2 \cdot v \cdot h \cdot \tan(\theta/2)} \quad (2.4)$$

Hvor PRF er pulsfrekvensen, v er flyhastigheten, h er flyhøyden og skannevinkelen er gitt ved θ . Fra formelen ser man at ved en høy pulsfrekvens og påfølgende lav flyhøyde, flyhastighet og skannevinkel vil gi en høy punktetthet[22].

I tillegg til skannerparametrene vil også egenskapene til overflaten som skal skannes påvirke det endelige resultatet. Et kupert terreng vil gi større variasjoner i punktettheten enn flaterer områder.

2.1.6 Feilbudsjett

Ved bruk av flybåren laserskanning må mulige feilkilder i både målesystemet og ytre forhold betraktes. Med feil i målesystemet menes det den “ totale feilen sammensatt av bidraget fra laser, GNSS og INS.”[11] Typiske feil her avstandsfeil knyttet til tidsmålefeil, oppløsning i tidsmålesystemet og Signal-Støy-ratio, feil i sveipemekanismen på grunn av manglende stabilitet, feil ved INS og feil ved integreringen av GNSS/INS og laser. Med ytre forhold menes feil knyttet til overflate og atmosfære.[11] Atmosfæren sin varierende tetthet kan føre til absorpsjon og spredning som påvirker Signal/Støy-ratioen. I tillegg kan “signalforsinkning og manglende kompensasjon grunnet feil i atmosfæremodellen gi tidsfeil.” Overflateforhold som varierende reflektans, helning og kompleksitet vil også påvirke nøyaktigheten til det endelige resultatet.

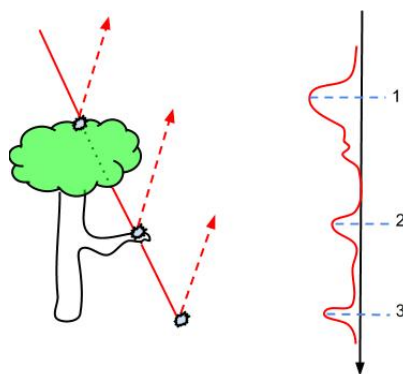
2.1.7 Flere retursignal

Ved skanning av et område skjer det ofte at et ustendt signal gir flere retursignal tilbake til skanneren. Dette skjer fordi en del av pulsen treffer et objekt og blir reflektert tilbake, mens resten av pulsen vil fortsette til den treffer andre objekter eller flater. Trær og vegetasjon er typiske objekter som grunnet sin “gjennomsiktighet”, gjør at signalet treffer en rekke mindre objekter, som greiner, før det treffer bakken. Bygninger kan også gi flere retursignal ved at første del av pulsen treffer kanten mens resten treffer bakken nedenfor.[7]

Hvordan pulser med flere retursignal behandles avhenger av hva slags type skanner som benyttes. Et vanlig diskret multipuls-system beregner avstanden på bakgrunnen av

topp-punktene til de returnerte signalene og på denne måten blir retursignalet delt opp i diskrete ekkoer. En slik mottaker kan vanligvis motta opp til fire ekkoer per puls; første, andre, tredje og siste.

Gjennom de siste årene er det kommet flere og flere mottakere som gir mulighet for å lagre hele bølgeformen til retursignalet. En slik “Full Waveform”-mottaker vil gi en mer fullstendig gjengivelse av egenskapene til et objekt, siden man får lagret de svakere retursignalene i tillegg til topp-punktene. Ulempen er at slike dataene er mer krevende å jobbe med og krever svært stor datakapasitet[22].



Figur 2.4: *Eksempel på flere refleksjoner. Et diskret multipuls-system vil registrere tre diskrete retursignal, mens et “Full-wave”-system vil lagre hele signalet.*

2.1.8 Klassifisering av punktskyer

Selv om en punktsky fra flybåren laserskanning gir en nøyaktig og detaljert gjengivelse av området som er skannet, inneholder den ingen info i seg selv om hva slags type objekter som befinner seg på overflaten. Av denne grunn er det som oftest av interesse å foreta en klassifisering av punktskyen for å få samlet laserdataene i ulike klasser. Fra “Produktspesifikasjon Nasjonal modell for høydedata fra laserskanning (FKB-Laser)”[14] er det definert 10 klasser (se kapittel 5.1.3 for mer informasjon) som laserdata skal være klassifisert i henholdt til ved en standard levereranse.

Gjennom årenes løp er det blitt publisert en rekke metoder for klassifisering av punktskyer. Avsnittene som følger vil gi en enkel oversikt over noen av de ulike tilnærmingene for filtrering av bakkepunkter og andre objekter tatt med utgangspunkt i kapitlet “Extraction of Digital Terrain Models” fra boken “Airborne and Terrestrial Laser Scanning”[22]:

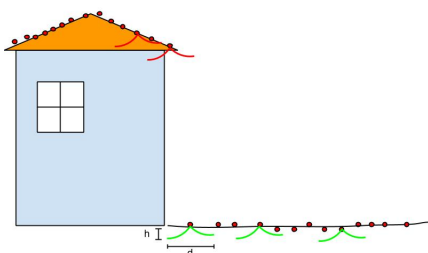
Morforlogisk filtrering

Denne metoden for filtrering baserer seg på konseptet om matematisk morfologi, der man får en kvantitativ beskrivelse av geometriske strukturer basert på ett sett med matematiske operatører[22].

En av de aller første metodene presentert for filtrering av punktskyer benyttet seg av konseptet om matematisk morfologi. I denne algoritmen[15] blir først et søkevindu av relativt stor orden ført over punktene hvor de laveste punktene i dette vinduet blir benyttet til fremstilling av en grov DTM. Videre blir punkt med en høydeforskjell som overskrider en satt grense filtrert ut for et mer presis terrengoverflate. Dette steget blir repetert i flere omganger, der størrelsen på vinduet blir redusert for hvert steg. Resultatet fra metoden er avhengig av størrelsen på det endelige vinduet og den endelige grenseverdien for hva som skal være overflatepunkter. Et lite vindu vil føre til at punkter på store bygninger vil bli

lagt til terrengklassen, mens et stort vindu vil medføre en mer “glattere overflate”. En høy grenseverdi vil føre til at punkter som tilhører lav vegetasjon vil havne i terrengklassen, mens en lav grenseverdi vil fjerne små ujevnheter på overflaten.

En annen metode basert på matematisk morfologi med en litt annen tilnærming ble presentert i 2000 av Vosselman[16]. Denne metoden ser på den maksimale tillatte høydeforskjellen Δh innenfor en radius d . Dette blir gjort ved at et strukturelement med definert størrelse i x-og y-retningen blir plassert på et punkt. Videre blir avstanden og høydeforskjellen beregnet til alle punkt som befinner seg innenfor strukturelementet. Hvis høydeforskjellen til et beregnet punkt er høyere enn den fastsatte grensen, vil dette bli klassifisert som “ikke-terreng”. Dette filteret tar også utgangspunkt i at det laveste punktet i et område tilhører terrenget, så et punkt blir kun definert som terreng hvis det ikke befinner seg noen punkt under strukturelementet.



Figur 2.5: Resultatet av et morfologisk filter.

I tillegg til å beregne den maksimale høydeforskjellen innen et område, er det også fremstilt filter der man heller ser på den maksimale tillatte helningen innen et område. For beregning av helningen er det nødvendig med en apriori DTM. Sithole[17] foreslår bruk av en grov DTM fremstilt ved å benytte de laveste punktene innen en fastsatt rastercellestørrelse.

Morfologisk filtrering er også brukt ved klassifisering av bygninger. En metode presentert av Weidner og Förstner[18] benytter seg av et morfologisk filter for fremstilling av en DTM som videre blir trukket fra den originale overflaten for fremstilling av en nDOM. Denne blir så filtrert ved å sette en minimumsverdi for høyden. Ved og så analysere det denne for sammenhengende komponenter av en fastsatt størrelse, kan mindre segmenter som trær og vegetasjon filtreres bort for et endelig resultat.

Gradvis fortetning

Med gradvis fortetning blir det foretatt en litt annen tilnærming enn ved morfologiske filtere. Felles for metodene som benytter seg av dette prinsippet er at de først klassifiserer punkter som med stor sikkerhet befinner seg på bakkenivå for og så gradvis iterere seg ut fra disse punktene for en mer fullstendig terrengoverflate.

Et mye anvendt filter i denne kategorien er metoden presentert av Axelsson i 2000[19]. Første steg i denne metoden er å klassifisere punkter som befinner seg på bakkenivå ved en blokkfiltrering med stor cellestørrelse. På bakgrunn av disse punktene blir det fremstilt et TIN for en grov tilnærming av bakkemodellen. Videre blir det for hvert av triangelene lagt til et terrengpunkt hvis kriteriene er oppfylt. Disse kriteriene kan variere, men Axelsson foreslår å betrakte vinkelen mellom et punkt og triangelet. Hvis et punkt befinner seg under en fastsatt vinkel, vil dette bli lagt til terrengmodellen.

I tillegg til dette filteret finns det en rekke andre filtere med litt andre tilnærminger som benytter seg av samme prinsipp[20, 21]

Overflatebasert filtrering

I motsetning til filterene som benytter seg av gradvis fortetning starter en overflatebasert filtrering med antakelsen om at alle punkt tilhører terrengoverflaten for og så filtrere bort punkter som ikke passer overflatemodellen ved en gradvis forbedring av overflatebeskrivelsen.[22]

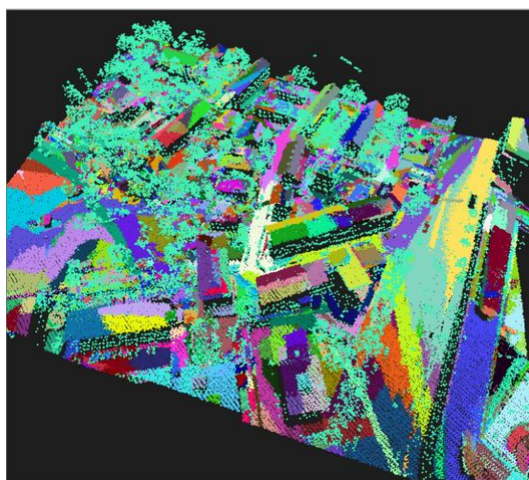
Segmenteringsbasert filtrering

Segmenteringsbasert filtrering benytter seg av hele segmenter, nærliggende punkter med like egenskaper, ved filtrering av en punktsky i motsetning til å betrakte ett og ett punkt, som filterne presentert tidligere. Punktene blir gruppert som oftes etter de som ligger i samme plan, sylinder eller en annen definert overflate. Ved å kunne detektere punkter som tilhører plan kan man få klassifisert bygninger, mens punkt som tilhører samme glatte overflate med definerte grenseverdier kan bli definert som bakke.

I studien “Automatic DTM Extraction from Dense Raw LIDAR Data in Urban Areas”[23] presenteres det en metode for filtrering av bakkepunkter ved bruk av segmentering. I denne algoritmen blir det først lagt et grid over punktskyen og videre blir det triangulert mellom punktene. Det blir så foretatt en “Region Growing” der triangler blir hektet sammen med utgangspunkt i en maksimal satt grense for vinkelen mellom normalverdiene og høydeforskjellen mellom massesenteret. Segmenter med en størrelse på under en fastsatt grense blir klassifisert som objekt.

En annen metode for filtrering av bakkepunkter ved segmentering[24] tar utgangspunkt i et “startpunkt”, der punkt blir lagt gradvis til samme segment hvis det oppfyller krav til verdier for normalvektorene og romlig nærhet. Etter at segmenteringen er utført blir det benyttet et overflatebasert filter for filtrering av bakkepunkt med utgangspunkt i de fremstilte segmentene.

Som nevnt over kan segmentering også være nyttig i prosessen for detektering av bygninger. Rottensteiner og Briese presenterer i sin studie fra 2003[25]en metode for klassifisering av bygninger i urbane områder. Etter å ha trukket terrengmodellen fra overflaten blir bygninger skilt fra vegetasjonen ved å detektere punkter som befinner seg på plan ved en analyse av normalvektorene til punktene. Disse planene blir utvidet ved å foreta en “region growing”. Nabolaget til de detekterte planene blir analysert og på bakgrunn av dette blir fremstilt en modell av taket til bygningene.



Figur 2.6: Segmentert punktsky[66]

Klassifisering på bakgrunn av egenskaper ved retursignalet

I tillegg til tiden det tar for at et signal kommer tilbake til senderen registrerer de fleste laserskannere i dag også intensiteten til retursignalet. Objekter med høy reflektans, som snø eller metalltak, vil gi en høyere intensitet enn mørke objekter, som for eksempel asfalt. På bakgrunn av dette er det mulig å benytte seg av intensitetsverdien ved deteksjon av ulike objekter. Det er vist at det er mulig skille mellom asfalt, gress, hustak og trær ved bruk av intensitetsverdiene til LiDAR data[26]

Med full-waveform-skanning åpner det seg en rekke nye muligheter for filtrering av laserdata. Ved analyse av hele bølgeformen til retursignalet er det mulig å skille mellom retursignal som ligger nærmere hverandre i tid, se figur 2.4, ved en analyse av bølgeformen. Dette gjør det blant annet mulig å foreta en mer finfølende bortrensing av bakkenær vegetasjon.[27]

2.1.9 FKB

FKB står for Felles Kartdatabase og “er Norges offentlige kartverk i digital form.” Denne inneholder de mest detaljerte kartdataene og “egner seg for kartproduksjon og til bruk i saksbehandling, prosjektering og til geografiske analyser.”[29]

Videre er FKB-data spesifisert i fire standarder, FKB-A, FKB-B, FKB-C og FKB-D. Detaljenivået er størst i A- og minst i D-standard. FKB-A benyttes i byområder mens FKB-D benyttes på områder uten økonomisk kartverk. Dette innebærer stort sett fjellområder. [29]

Nøyaktigheten er på $\pm 0.2\text{m}$ til 2m avhengig av objekttype og datafangstmetode. [29]

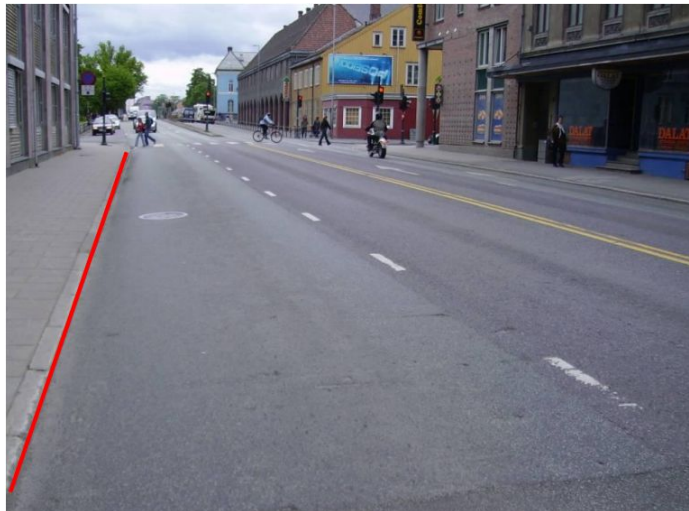
2.2 Objekter

2.2.1 Fortauskanter

Det første objektet det var ønskelig å foreta en klassifisering av var fortauskanter. Fortauskanter representerer en viktig del av veien, da den separerer fortauet og veibanen. Godt definerte fortauskanter er viktige ved vedlikehold av vei og planlegging i byområder. I tillegg blir de også benyttet til å lede vann ned i avløpssystemet og er derfor nyttige til eventuelle flomanalyser.

“SOSI Del 3 Produktspesifikasjon for FKB - Veg”[30] skiller mellom to typer fortauskanter, “FortauskantYtre” og “Fortauskant”. I denne oppgaven var det kun av interesse å betrakte vanlige fortauskanter, “Fortauskant”. Disse er definert som “avgrensning av del av veg reservert for gående”, videre spesifisert ved “Fortauskant skal kun benyttes som avgrensning av veger og parkeringsområder og ikke som avgrensning av annet vegareal.”

Fra 14.5.1 “Klasser for stedfestningsnøyaktighet og fullstendighet” kan leses at kvalitetskravet for fortauskanter i FKB-A er 0.2m i grunnriss, 0.15m i høyde og fullstendighetskrav som tilfredsstillende klasse 1[30].



Figur 2.7: “Eksempel på fortauskant (tegnet med rød linje)”[30]

2.2.2 Takkanter

Det neste objektet som var av interesse å se nærmere på var takkanter. Takkanter er av stor interesse da disse er en viktig del av beskrivelsen til bygningene sine fysiske egenskaper og er en essensiell del ved fremstilling av kartdata i bebygde områder og 3D-modeller av bygninger.

Fra “SOSI Del 3 Produktspesifikasjon for FKB – Bygning”[29] takkanter definert som “bygningens ytre takflateavgrensning” der “høydereferansen er de målte punktene på taket.”

Kvalitetskravet for takkanter i FKB-A er 0.2m i grunnriss, 0.25m i høyde og fullstendighetskrav som tilfredsstillende klasse 1[29]

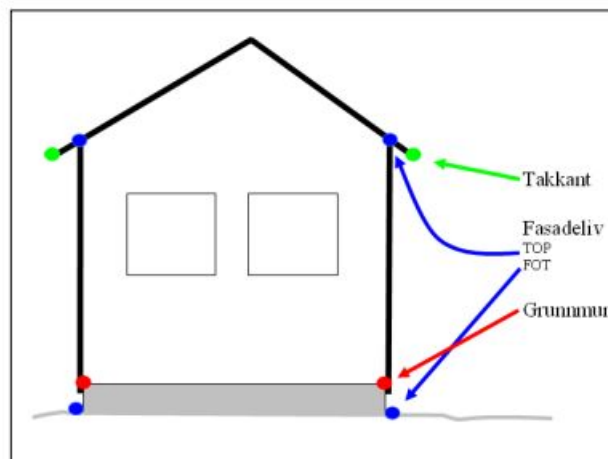
2.2.3 Fasadeliv

Avslutningsvis var det av ønskelig å se på mulighetene for klassifisering av fasadeliv. Deteksjon av vegger er i likhet med takkanter viktige for fremstilling av fullstendige modeller av bygninger.

Fra “SOSI Del 3 Produktspesifikasjon for FKB – Bygning”[31] er fasadelivet definert som “bygningens ytre avgrensning i fasadelivriss”. Videre er høydereferansen foten eller toppen av fasadelivet.

Fasadelivet er av særlig interesse ved fremstilling av 3D-modeller av bygg. Ofte blir veggene fremstilt ved å trekke linjer direkte ned fra takkantene til bakken, noe som vil gjøre at volumet på bygget blir større enn i virkeligheten. Ved bruk av fasadelivet vil volumet av bygningen bli mer riktig.[31]

Kvalitetskravet for fasadeliv i FKB-A er 0.2m i grunnriss og 0.35m i høyde. Det er ikke satt noen krav til fullstendighet da det ikke er noe krav at fasadelivet skal være i FKB-dataene.



Figur 2.8: *Forholdet mellom takkant og fasadeliv* [31]

2.3 Datasett

2.3.1 Laserdata

Laserdataene som ble benyttet i denne oppgaven er hentet fra prosjektet “RW Oslo Ajour” som ble flydd for Oslo kommune, Plan- og bygningsetaten, Avdeling for Geodata i 2011. Fra rapporten til prosjektet kan følgende informasjon hentes ut:

Prosjektet ble flydd med helikopter der instrumentet “TopEye system S/N 700” ble brukt til innsamlingen. Videre ble det tatt bilder ved bruk av et “Rollei” kamera type P45.

Totalt ble det flydd 116 striper i perioden 19.07.2011 - 06.10.2011. Følgende skannerparametere ble definert for dette prosjektet:

Flyplan	
Sensor	RIEGL LMS-Q680i
Flyhøyde	500m
Pulsfrekvens	267kHz
Skannevinkel	30
Flyhastighet	15 m/s
Stripekilometer	903 km

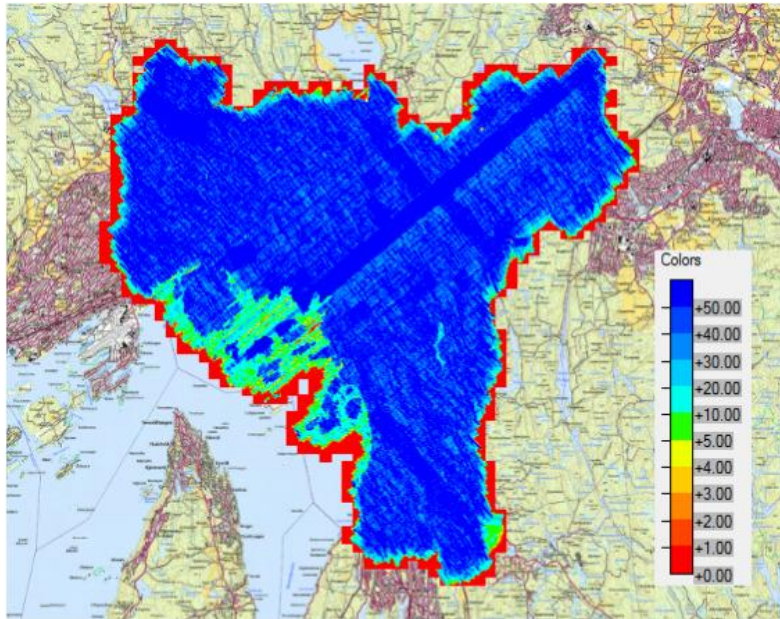
Tabell 2.1: *Skannerparameterene til prosjektet*

Punktskyen ble levert i koordinatsystemet Euref89, UTM-sone 32 og to forskjellige høydesystemer, “Oslo Lokal” og “NN2000”.

Datasettet ble kontrollert mot totalt 11 kontrollflater for detektering av eventuelle høydeavvik(offset). Hver kontrollflate bestod av 36 landmålte punkt. For punktskyen med høydesystemet “Oslo lokal” viste kontrollflatene et gjennomsnittlig høydeavvik på 0.004m og et standardavvik på 0.029m, mens punktskyen med “NN2000” ga et gjennomsnittlig høydeavvik på 0.004m og standardavvik på 0.026m.

For kontroll av konsistensen mellom laserstripene ble programvaren TASQ(Topeye Area Statistics and Quality) brukt. Denne “estimerer den relative kvaliteten i laserdatasettet gjennom en statistisk evaluering av avvik mellom overlappende laserstriper”. Den gjennomsnittlige RMS-verdien er på 0.053m.

Den gjennomsnittlige punktettheten til prosjektet er på $43\text{punkt}/\text{m}^2$, noe som er å anse som svært høyt.



Figur 2.9: *Utrekningen og punkttettheten (punkt/m²) til prosjektet.*

2.3.2 Landmålingsdata fra Kirkegata i Oslo

Knut Martin Fladby utforsket i sin masteroppgave fra 2012 om bilbåren laserskanning var egnet til å komplettere FKB-data og andre objekttyper i byområder[32]. Oppgaven tar for seg flere objekter, blant annet fasadeliv og fortauskanter. I den forbindelse ble det målt en rekke kontrollpunkt i dette området som det var ønskelig å benytte som en fasit for de klassifiserte punktene i denne oppgaven. Målingene av disse punktene er gjort i to oppstillinger, en for øvre delen og en for nedre delen av Kirkegata. Fra kap 9.2 “Resultater fra beregning av kontrollpunkter” kan vi se at ved utjevningen av punktene som er målt i øvre delen av gaten er det beregnet et standardavvik på vektsenheten lik 1.62 og for den nedre delen er det beregnet et standardavvik på vekstenheten 1.86. Det blir videre observert at det er et punkt i hver av oppstillingene som bidrar til å dra ned den totale nøyaktigheten noe, men at disse er inkludert i utjevningen.

Fortauskanter

Kontrollpunktene på fortauskantene er målt to ganger, med henholdsvis topp (på høyde med fortauet) og bunn (på høyde med veien) på kantene. På grunn av prismestangen var det ikke mulig å komme til helt inntil kanten, noe som gir punktene en eksentrisitet på 1cm.

Fasadeliv

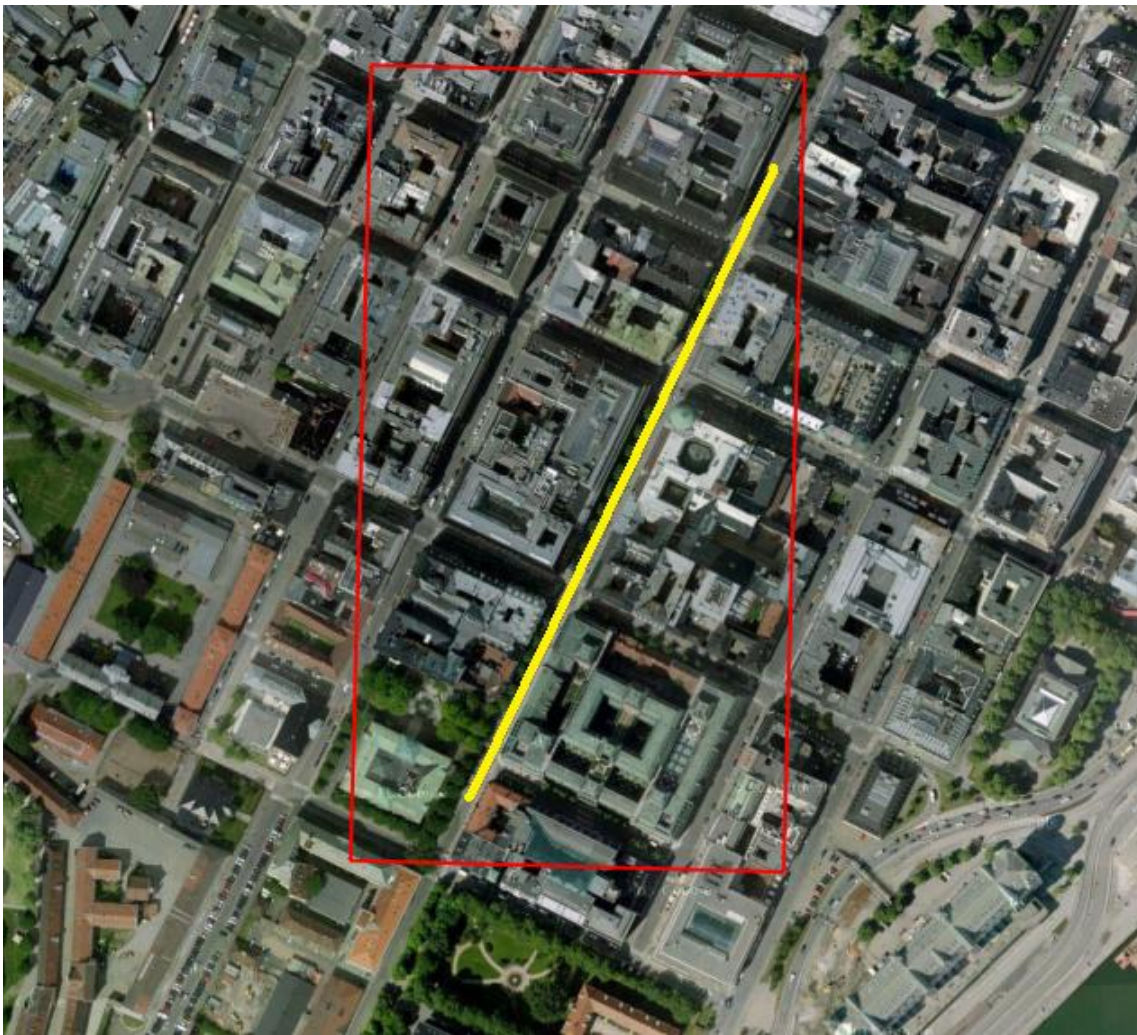
Kontrollpunktene for fasadelivet var målt inn i to omganger. Fasadeliv fot ble målt med prismestang. I likhet med fortauskantpunktene fikk også disse punktene en offset på 1cm. Fasadeliv fot vil ofte være litt lenger ut i gaten enn øvre del av fasaden og av denne grunn var det også målt fasadeliv 1,5m over bakken. Dette ble gjort ved hjelp av en prismestav satt til 1,5m og en robotstasjon. I tillegg er det interessant å foreta en sammenligning mellom disse to områdene for å se om det blir noen forskjell i nøyaktighet og fullstendighet ved en klassifisering.

2.3.3 FKB-data

I tillegg til landmålingspunktene var det hentet inn FKB-data fra samme område som fasit til takkantene. Dette er FKB-A data, noe som med andre ord har en nøyaktighet i grunnriss på 0.2m[29].

2.3.4 Testområde

Videre var det ønskelig å bestemme et testområde som skulle benyttes i oppgaven. Ønsket var å få med en del av området rundt i tillegg området med kontrollpunktene for en representativ analyse. På bakgrunn av dette ble et rektangulært område bestående av 5384523 punkt valgt ut.



Figur 2.10: Testområdet i denne oppgaven. Kirkegata er markert i gult.

2.4 Programvare

Ved valg av programvare var det ønskelig å benytte seg av software som ga muligheter for forskjellige tilnærminger. Valget falt på TerraScan, LIS og GRASS GIS. I tillegg ble også LasTools benyttet såvidt.

Førstnevnte program er svært mye brukt til analyse av laserdata, så denne var av stor interesse å benytte. LIS gir en rekke muligheter utover det TerraScan tilbyr som segmentering og andre analyseverktøy og ble derfor programvare nummer to.

Kryssningen mellom laserdata og GIS gir en rekke spennende muligheter og derfor var det av interesse å benytte seg av GRASS GIS. Dette er i tillegg en open-source programvare, noe som gjør det interessant å sammenligne metodene fremstilt ved bruk av denne mot de to første. Videre følger en nærmere beskrivelse av programvarene og noen av verktøyene som er tilgjengelige.

2.4.1 TerraScan

TerraScan er en mye brukt software for prosessering og analyse av laserdata. Programmet tilbyr en rekke verktøy for klassifisering av punktskyer. Disse verktøyene kan settes sammen i makroer, noe som gjør at man enkelt kan kjøre omfattende analyser på flere datasett. Av filtreringsverktøyene som TerraScan tilbyr er det noen som er ekstra interessante for denne oppgaven:

Ground: Dette er et verktøy for automatisk klassifisering av bakkepunkter. Rutinen benytter seg av gradvis fortetnings-metoden til Axelsson[19], beskrevet i 2.1.5. Som grenseverdi for filtreringen blir det satt en maksimumsverdi for Terrengvinkelen, Iterasjonsvinkelen og Iterasjonsavstanden[33].

Hard Surface: Dette er et nytt verktøy presentert i versjon 012.001 av TerraScan. Denne gir et alternativ til bakkeklassifiseringen ved å klassifisere dominerende medianpunkter på overflaten. Dette skal kunne gi et bedre resultat på asfalt og klare å beholde fortauskanter bedre enn bakkeklassifiseringen[34].

Buildings: Denne rutinen klassifiserer punkt på som befinner seg på taket til bygninger. Før denne rutinen gjennomføres er det nødvendig med en bakkeklassifisering og det er også en fordel om det er foretatt en vegetasjonsklassifisering. Rutinen har to parametre som kan tilpasses etter datasettet; minimum bygningsstørrelse og Z-toleranse[33].

2.4.2 Laserdata LIS

Laserdata LIS er en programvare utviklet for LiDAR-data håndtering og analyse. Programvaren er bygd med på topp av SAGA GIS, som er et open source geografisk informasjonssystem. LIS håndterer både punkt og rasterdata. I tillegg til en rekke verktøy for filtrering av laserdata, er det muligheter innenfor analyse av selve punktskyen som bratthetsanalyser, tetthetsanalyser, lokale planegenskaper og ujevnheter. [35]

2.4.3 LasTools

Et annet program for prosessering av laserdata som har mye oppmerksomhet de siste årene er LasTools av Martin Isenburg. Programmet tilbyr en rekke verktøy for blant annet klassifisering, filtrering, klipping, triangulering og konvertering av LiDAR-data. Alle verktøyene kan settes sammen i batcher eller kjøres via en GUI. I tillegg til dette har det blitt utviklet en verktøyboks for ArcGIS og QGIS, noe som gir muligheter for å kombinere verktøyene fra LasTools med mer standard GIS-verktøy. Av de verktøyene som LasTools tilbyr er det bakkeklassifiseringen som har blitt benyttet[36].

lasground: Algoritmen som blir benyttet i denne modulen er tilsvarende den som blir benyttet i TerraScan[19]. Til forskjell fra TerraScan er det mulig i LasTools å spesifisere tilleggsopplysninger som gjør at resultatet blir bedre. Defaultinnstillingene fungerer svært godt i omgivelser med lite menneskeskapt objekt, men ved å spesifisere ‘-town’, ‘-city’ eller ‘-metro’ justeres “step size” så klassifiseringen tilpasses mer urbane områder. Verktøyet er utviklet for flybåren laserskanning, men kan også benyttes til terrestriske eller mobile data ved å spesifisere ‘-not _airborne’ data.

2.4.4 GRASS GIS

Geographic Resources Analysis Support System, kjent som GRASS GIS, er et fritt tilgjengelig open-source geografisk informasjonssystem(GIS) som tilbyr en rekke verktøy innen analyse og behandling av geodata, produksjon av kart, romling statistikk, bildebehandling og visualisering. Programmet er opprinnelig et militært system, benyttet og utviklet av den amerikanske hæren i perioden 1982-1995. Siden 1997 har GRASS vært underlagt ulike akademiske institusjoner. Per dags dato har det internasjonale GRASS-utviklingsteamet, bestående av ansatte ved vitenskapelige institusjoner over hele verden, ansvaret for utvikling av videre kildekode, utgivelser og dokumentasjon. I tillegg til dette bidrar flere frivillige gjennom forskjellige “GRASS GIS user groups”.

Foruten om verktøy for operasjoner på raster- og vektordata er det blitt utviklet egne verktøy for prosessering og filtrering av LiDAR-data. Fremgangsmåten er litt annerledes enn ved bruk av “klassiske” filtreringer og kan beskrives kort i følgende steg:

Etter at dataene er importert som vektordata, GRASS 7 tilbyr direkte importering av LiDAR, benyttes modulen “v.lidar.edgedetection.”[37] Hensikten her er å detektere kanter i terrenget for videre klassifisering av objekter som befinner seg på terrengoverflaten. Modulen gir et vektorkart med klassene “Terreng”, “Kant” eller “Ukjent”, som benyttes videre i “v.lidar.growing.” I denne modulen blir innsiden og utsiden av de klassifiserte kantene identifisert.[38] Dette gjøres ved antakelsen om at høydene på innsiden av et objekt er høyere enn på grensen. Resultatet er et vektorkart med følgende klasser: “Terreng enkeltpuls”, “Terreng dobbelpuls”, “Objekt enkeltpuls” og “Objekt dobbelpuls”. Siste steg i klassifiseringen/filtreringen er modulen “v.lidar.correction.” Her blir det foretatt en sammenligning mellom LiDAR-observasjonene og en interpolert overflate der kun terrengpunktene har blitt benyttet.[39] Når den nye referanseoverflaten er blitt fremstilt, blir det videre utført en reklassifisering der punkt som er klassifisert som “Terreng” med et avvik større enn en fastsatt grenseverdi blir klassifisert som “Objekt” og motsatt for punkt klassifisert som “Objekt”.

Kombinasjonen av GRASS og LiDAR har blitt anvendt med forskjellige tilnærminger og dette har gitt noen resultater som er det er verdt å se nærmere på:

I artikkelen “Comparison of GRASS-LiDAR modules–TerraScan with respect to vegetation filtering”[40] blir det foretatt en sammenligning av filtreringsmetodene i TerraScan og GRASS GIS. Ved sammenligningen av bakkeklassifiseringen gav faktisk GRASS det beste resultatet. Nå skal det legges til at forskjellen var på kun 3% og at begge klassifiseringene var langt fra fullstendige, GRASS med 70% av bakkepunktene mot TerraScan med 67%. I tillegg var dette kun i ett datasett og skal det konkluderes helt, er det nødt til å gjøres flere sammenligninger på forskjellige datasett. Videre ble det observert i denne studien at GRASS var bedre på deteksjon av lave vegetasjonspunkter, mens TerraScan ga et bedre resultat på menneskeskapt objekter.

Artikkelen “LiDAR data filtering with GRASS GIS for the determination of digital terrain models”[41] utforsker mulighetene for bruk av GRASS for fremstilling av en DTM. For filtreringen ble modulene “v.lidar.edgedetection”, “v.lidar.growing”, og “v.lidar.correction”

benyttet. Studien konkluderer med at verktøyene i GRASS gir en effektiv metode for fremstilling av en DTM, men at for videre analyse av LiDAR-data er det nødt til å fremstilles en algoritme som skiller mellom bygninger og vegetasjon.

Punktettheten i studiene som har benyttet GRASS, har vært relativt lav. I studien fra 2012 har vi en tetthet på $1.5\text{punkt}/\text{m}^2$, mens i 2007 er det en tetthet på $0.9\text{punkt}/\text{m}^2$. Det vil derfor være interessant, i tillegg til deteksjonen av objekt, å se på hvordan et datasett med veldig høy punktethet, $>30\text{punkt}/\text{m}^2$, blir håndtert.

2.4.5 Annen programvare

I tillegg til programvaren som ble benyttet i denne oppgaven er det en rekke andre programvarer med forskjellige tilnærminger som tilbyr analyse av laserdata.

ArcGis

Ved bruk av verktøyet “Las Dataset toolbar” som tilbys i ArcGis sin versjon 10.1 er det rekke muligheter for bruk av LiDAR-data, men dette er først og fremst med tanke på en allerede klassifisert punktsky. Verktøyboksen gir muligheter for å fremstille overflater med verdier som høyde, aspect, bratthet og høydekurver. Det er også en rekke muligheter for visualisering og målinger av laserdata. ArcGis støtter .las-formatet, noe som gjør at laserdata kan lastes direkte inn uten noe konvertering[42].

OPALS

OPALS står for Orientation and Processing of Airborne Laser Scanning data. Programmet er bygd opp av en rekke moduler for prosessering av punktskyer fra flybåren laserskanning. Disse modulene kan kjøres via DOS/Unix, Python eller via programmer skrevet i C++. Med dette åpner det seg en muligheter for finjustering av moduler for ønsket resultat i tillegg til import av egne moduler. [43]

Modulene tilbudt av OPALS er gruppert tematisk i pakker etter hva slags operasjoner som er ønskelig å foreta på laserdataene. Av disse pakkene er “opalsGeomorph” svært interessant med tanke på utgangspunktet for denne oppgaven. Med dette verktøyet skal det være mulig å automatisk detekttere og modellere knekklinjer på terrengoverflaten. Pakken er dessverre ikke ferdig utviklet enda, men det kunne vært svært interessant å benytte seg av denne med tanke på objektene som skal undersøkes i denne oppgaven[44].

eCognition

eCognition er en programvare som er utviklet først og fremst for analyse av fjernmålingsdata som flyfotografering, multispektrale bilder tatt fra satellitter og radarmåling, men med “eCognition developer 8” åpner det seg muligheter for bruk av LiDAR også[45]. Kombinasjonen av laserdata og andre format kan gi noen interessante verktøy for analyse og klassifiseringer. Ved bruk av LiDAR sammen med multispektrale bilder er det blitt gjort forsøk på flere forskjellige tilnærminger for klassifisering av bygninger[46, 47]. De multispektrale bildene gir muligheter for å filtrere bort vegetasjon ved bruk av vegetasjonsindeksen, noe som kan gi økt kvalitet i bygningsklassifiseringen.

Cloud Compare

I likhet med GRASS GIS, er CloudCompare en fritt tilgjengelig “open source” programvare. Programvaren ble til i forbindelse med PhD til Daniel Girardeau-Montaut i 2003 om

“Change Detection on 3D Geometric Data”. Hensikten da var detektere endringer i punktskyer med høy tetthet generert fra laserskanning, men har siden da utviklet seg til et mer avansert verktøy for prosessering av 3D-data. I tillegg til standardverktøy for editering av punktskyene og fremstilling av mesher, er det muligheter for mer avanserte operasjoner som segmentering, beregning av statistikk og geometriske egenskaper som tetthet, krummning og ujevnheter. [48]

Kapittel 3

Metode

3.1 Fortauskanter

Detektering av fortauskanter byr på en rekke nye utfordringer i analyse av punktskyen. Til forskjell fra mer definerte kanter som tak, medfører en fortauskant som oftest en svært liten endring i høyde og kan derfor ofte oppfattes mer som en ujevnhet på overflaten enn en definert kant. Stikkprøver foretatt i datasettet viser en gjennomsnittlig høyde på $\pm 10\text{cm}$. Punktettheten er på en annen side svært høy og noe som gjør at detaljnivået i punktskyen er høyt.



Figur 3.1: *Fortauskant i profil*

3.1.1 Tidligere arbeid

Metoder for klassifisering av objekter i urbane områder er det gjort mye forskning på de siste ti årene, men dette er først og fremst større objekter som bygninger og vegetasjon. Likevel ble det funnet studier på fortauskanter. Vosselman & Liang sin artikkel “Detection of Curbstones in Airborne Laser Scanning Data”[49] fra 2009 viste seg å være svært interessant og blir gått gjennom litt grundigere enn de andre:

I denne artikkelen blir det presentert en metode for automatisk detektering av fortauskanter ved bruk av flybåren laserskanning. Datasettet som blir benyttet har en punktethet på rundt $20\text{punkt}/\text{m}^2$. Metoden som blir presentert består av følgende steg:

1. *Deteksjon av lokasjoner med små høydeforskjeller*

For å avgjøre om et punkt var nær veikanten ble det etablert et nabolag for hvert punkt og fordelingen av punktene i nabolaget ble analysert. Punkt ble betraktet som et nabolag hvis avstanden mellom punktene var mindre enn 50cm. For hvert nabolag ble følgende kriterier undersøkt:

- a) Den maksimale høydeforskjellen innad i nabolaget bør være mindre enn den maksimale forventede høydeforskjellen til en fortauskant, pluss litt evt. støy.
- b) Høydevariasjonen bør være større enn variasjonen påført fra målestøyen.
- c) Punktene i nabolaget skulle være nærme terrengoverflaten.

2. *Rekonstruksjon av linjetopologi*

For å samle punktene som hører til samme fortauskant ble disse heftet sammen. Punkt med kort avstand mellom hverandre ble gitt den samme “labelen” og satt sammen til en komponent. Hver komponent blir så prosessert separat der komponentene som bestod av få punkt ble ignorert. For de andre komponentene ble en RANSAC¹ algoritme benyttet for å finne punkter som var på en (nesten) rett linje.

3. Tetting av hull i fortauskantene

Grunnet parkerte biler og andre objekter som blokkerte sikten ble det observert en del “hull” i de detekterte fortauskantene. For å fylle disse hullene så mye som mulig ble følgende steg utført:

a) To rette linjesegmenter som lå på samme linje ble heftet sammen hvis ikke noe annet linjesegment fant sted i hullet mellom dem. Den samme regelen regelen ble anvendt for linjesegmenter der de siste fem punktene på hver side er på en rett linje.

b) Linjesegment-par som var igjen etter anvendelsen av a) ble også heftet sammen hvis avstanden mellom ekstensjonen av den ene og endepunktet til det andre segmentet var under en fastsatt grense.

Metoden ble anvendt på tre veikryss. Som referanse ble det manuelt hentet ut fortauskanter fra ortofoto som så ble bufret med 50 cm. Videre ble fullstendigheten til de detekterte linjene, lengen av linjen som havnet innenfor, sjekket opp mot bufferet. I tillegg til dette ble linjene sjekket opp mot GPS-målinger fra området. Fullstendigheten varierte mellom 50% og 86%, alt etter antall parkerte biler som stod på fortauskantene. RMSE ved sammenligning av GPS-målingene var på 0.18m.

I Vosselman & Liang sitt studie fra 2012[50] blir det foretatt en sammenligning av fortausklassifisering ved bruk av flybåren laserskanning og skanning utført fra bil. Metoden som ble brukt på flydataene var den samme som presentert over. Resultatet varierte mellom 53% og 92% for flydataene og 54% og 83% for bildataene. RMS-verdien var 0.11 ved bruk av fly og 0.06 ved bruk av bil.

I tillegg til disse to artikkelene er det også to studier[51, 52] som tar for seg deteksjon av fortauskanter ved bruk av terrestrisk laserskanning. I Denis *et al.*[52] blir fortauskantene detektert ved å analysere høydegradienten i bakkemodellen for og så bli sortert og heftet sammen. Dette er bare et førsteutkast til en algoritme og trenger mer utvikling, men likevel ga den en et ganske bra resultat på områder med mange biler. El-Halawany *et al.*[51] presenterer en detekteringsmetode der man først å foretar en 3D-segmentering av punktskyen for å videre analysere nabolaget til hvert punkt ved beregning av retningene til normalvektorene og egenvektorene til overflaten. Selv om denne metoden er utviklet med tanke på terrestriske data er det ikke utenkelig at noe tilsvarende, analyse av vektorene og gradienten, kan fungere på høyoppløselige punktskyer fra flybåren skanning.

¹“En iterativ metode for å estimere parametre til en matematiske modell fra et sett med data som inneholder outliers.”[67]

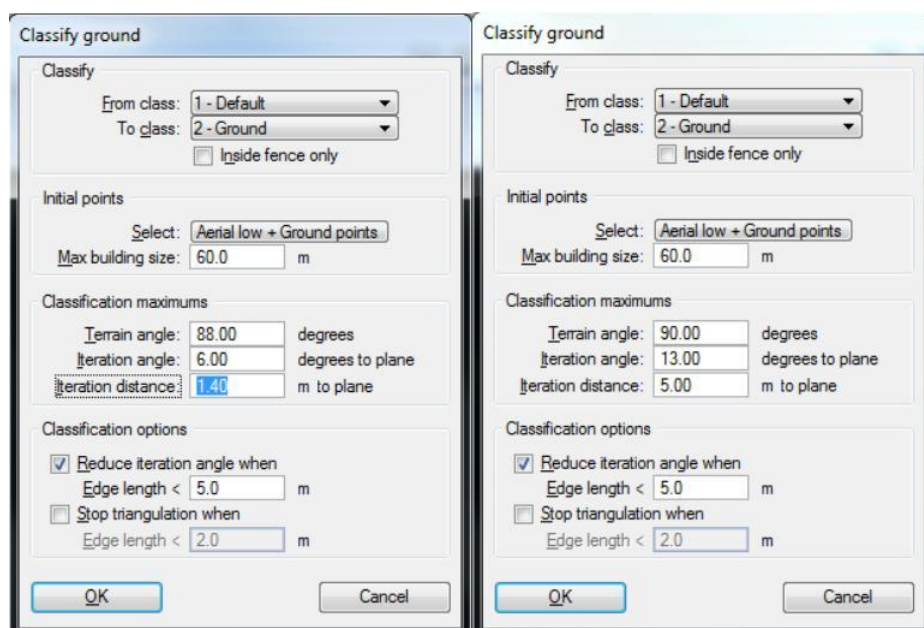
3.1.2 TerraScan

Som nevnt i kapittelet om programvarer tilbyr TerraScan en rekke algoritmer for filtreringer og klassifiseringer, men i tillegg til dette er det også muligheter for å eksportere punktskyen som grid med mer spesielle egenskaper. Av disse egenskapene er det særlig “surface roughness” som er av interesse. Med denne kan man få kartlagt uregelmessigheter på en overflate ved hjelp av endringer i slope-verdien til punktene. Tar man utgangspunkt i at overflaten på en bakkemodell fra et urbant område vil være relativt homogen, vil disse uregelmessighetene forhåpentligvis være fortauskanter. Videre var det også av interesse å benytte seg av verktøyet “Classify Hard Surface” ved fremstilling av interesseområdet. Med dette som utgangspunkt ble følgende metode fremstilt:

Fremstille interesseområdet

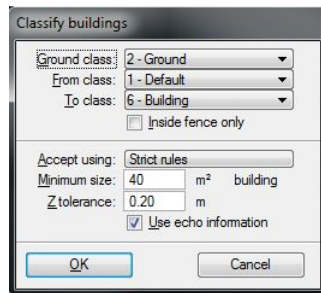
Første del av metoden var å fremstille interesseområdet for “roughness”-analysen og det ble derfor forsøkt å benytte “Classify Hard Surface”. Dette viste seg å ta med taket på bygninger i tillegg til bakken og det var derfor nødvendig å skille disse fra hverandre før verktøyet ble brukt.

Først ble det derfor foretatt en bakkeklassifisering ved bruk av “Classify Ground”. Siden dette er et område med mye bygninger og store endringer i høyde ble både “Iteration angle” og “Iteration distance” satt relativt store.



Figur 3.2: Bakkeklassifiseringen i TerraScan. Boksen til venstre viser default-verdiene, mens boksen til høyre viser verdier som ble brukt.

Videre var det ønskelig å samle punktene som ikke var av interesse. Tanken bak dette var at dette kunne bli brukt som et eventuelt filter hvis det skulle bli mye støy på de detekterte områdene. Først ble “Classify Buildings” benyttet. På minimum bygningsstørrelse og Z-toleranse ble defaultverdiene benyttet. For å unngå at vegetasjon skulle havne i bygningsklassen ble aksepten satt til “Strict rules” og “Use echo information” huket av.

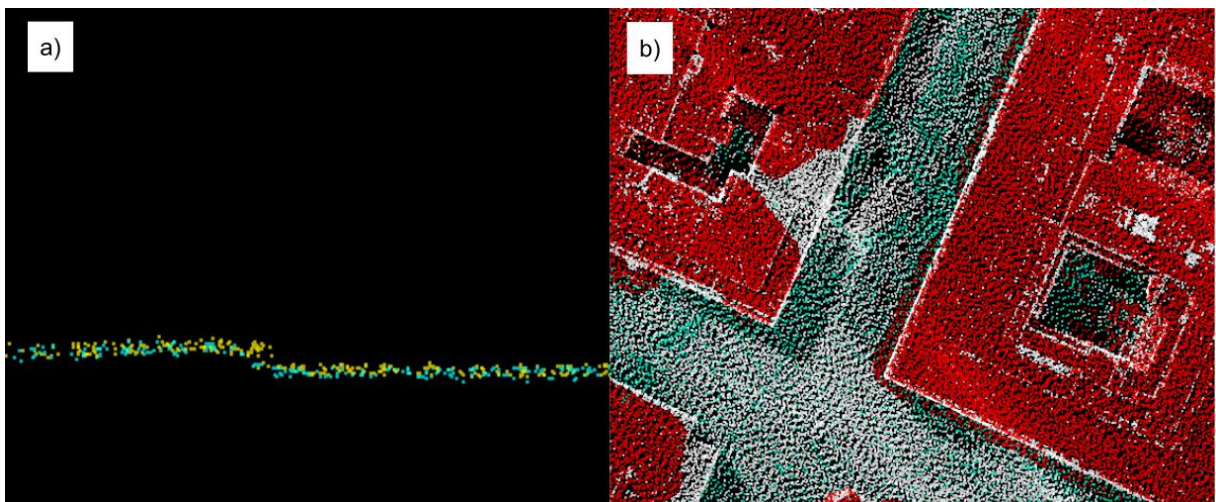


Figur 3.3: Bygningsklassifisering i TerraScan

Videre var det ønskelig å foreta en enkel klassifisering av områder med vegetasjon. Grunnet vegetasjon sin “gjennomsiktighet”, var det hensiktsmessig å klassifisere områder med flere retursignaler. Dette ble gjort ved bruk av “Classify Echo”, der retursignal med egenskapen “Intermediate” ble klassifisert. Dette er “mellomreturen” fra en puls med tre eller flere retursignaler. Punkter som befant seg nærmere enn 1,5m fra dette signalet ble lagt til samme klasse. Denne vegetasjonsklassifiseringen medfører noe feilklassifiseringer, men dette var først og fremst for å filtrere vekk områder som ikke var av interesse.

Etter at disse klassifiseringene var gjennomført ble følgende observert i dataene:

- Bakkeklassifiseringen inkluderte ikke ønsket mengde punkter
- Bygningsklassifiseringen var ikke fullstendig
- Enkelte steder hadde bygningsklassifiseringen fortsatt litt utenfor takkanten, slik at noe av bakken under hadde blitt klassifisert som bygning.

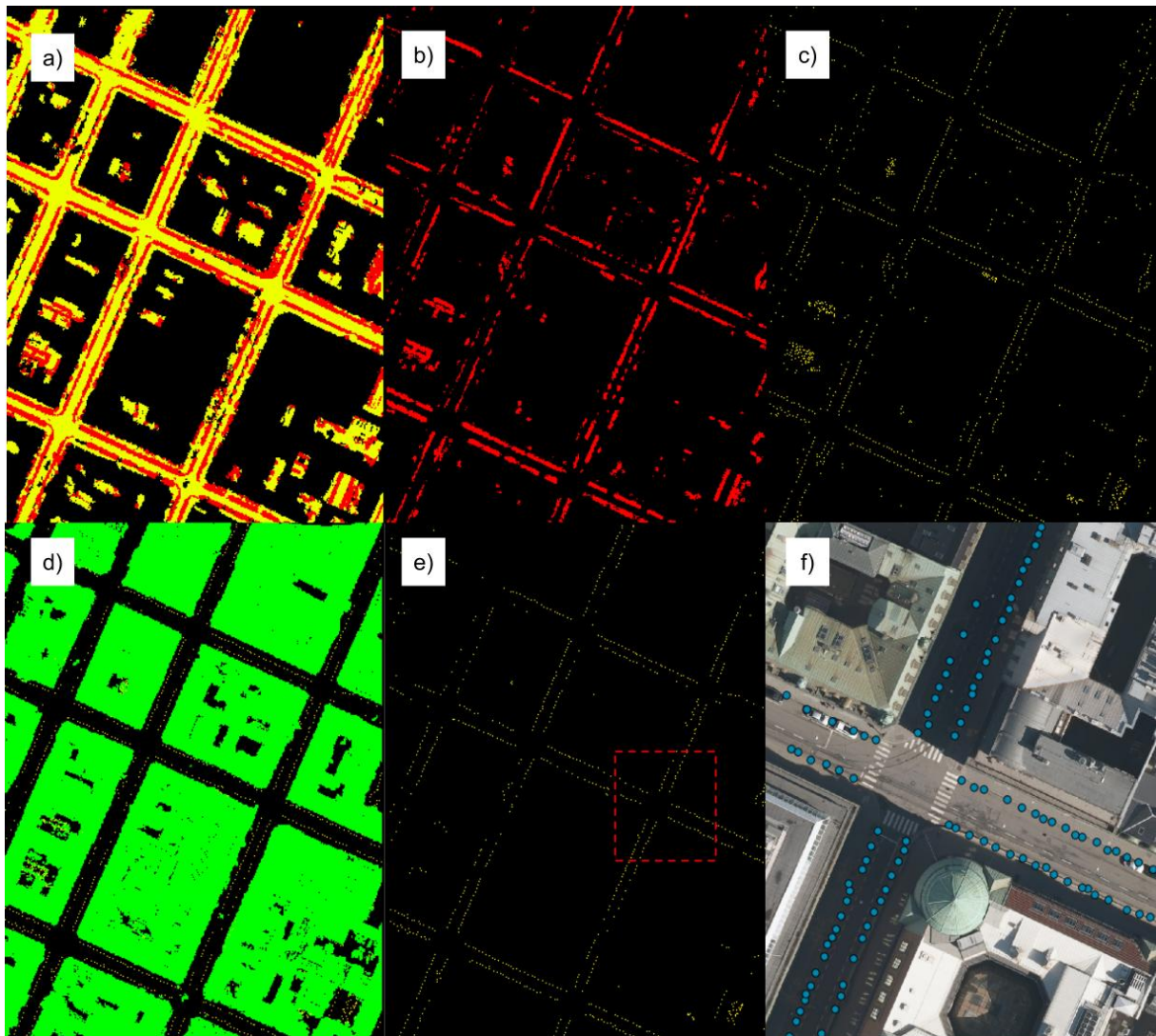


Figur 3.4: a) Eksempel på punkter som ikke er blitt tatt med i bakkeklassifiseringen. De gule punktene er de som ikke ble tatt med i bakkeklassifiseringen. b) Bygningsklassen vist i rødt, uklassifisert i hvit og bakkeklassen i blått. Som observert er noe av bakken klassifisert som bygning og bygningsklassen ufullstendig.

Av denne grunn ble uklassifiserte punkter som befant seg over 15m fra bakkenivå lagt til i bygningsklassen. Videre ble alle uklassifiserte punkt og bygningspunkt som var innen 0.5 m radius fra bakken lagt til bakkeklassen. For fremstilling av endelig interesseområde ble “Classify Hard Surface” brukt på bakkeklassen.

Roughness analyse av interesseområdet

Interesseområdet fremstilt i del 1 ble så eksportert som ett grid med “surface-roughness”-verdiene og lastet inn i TerraScan på nytt. I tillegg til dette ble også bygningene eksportert. Ved å se på høydeverdiene til gitteret får vi detektert områder med en endring i høyde. På bakgrunn av dette ble de områdene med høyest endring i høyde valgt ut for videre betraktning. Som observert i Figur 3.5 ble disse områdene relativt brede, og punktmengden i disse områdene var nødt til å reduseres for å fremstille en linje. Til dette ble “Thin Points” benyttet, der det ble beregnet et gjennomsnittlig punkt for områder der det var flere punkt i bredden. Avslutningsvis ble punkter som lå 1m fra bygningene filtrert bort ved bruk av “Classify Closeby”. De endelige punktene ble så eksportert fra TerraScan for videre analyse.



Figur 3.5: a) Lattice-modellen lastet inn i TerraScan. b) Områder med høyest roughness-verdi er hentet ut. c) En tynning er foretatt på de utvalgte områdene. d) Bygningene blir lastet inn i for å filtrere bort punkter som ligger nærmere enn 1m fra bygninger. e) Endelige resultatet etter filtreringen. f) Utsnittet fra e) vist i QGIS med ortofoto i bakgrunnen.

3.1.3 LIS

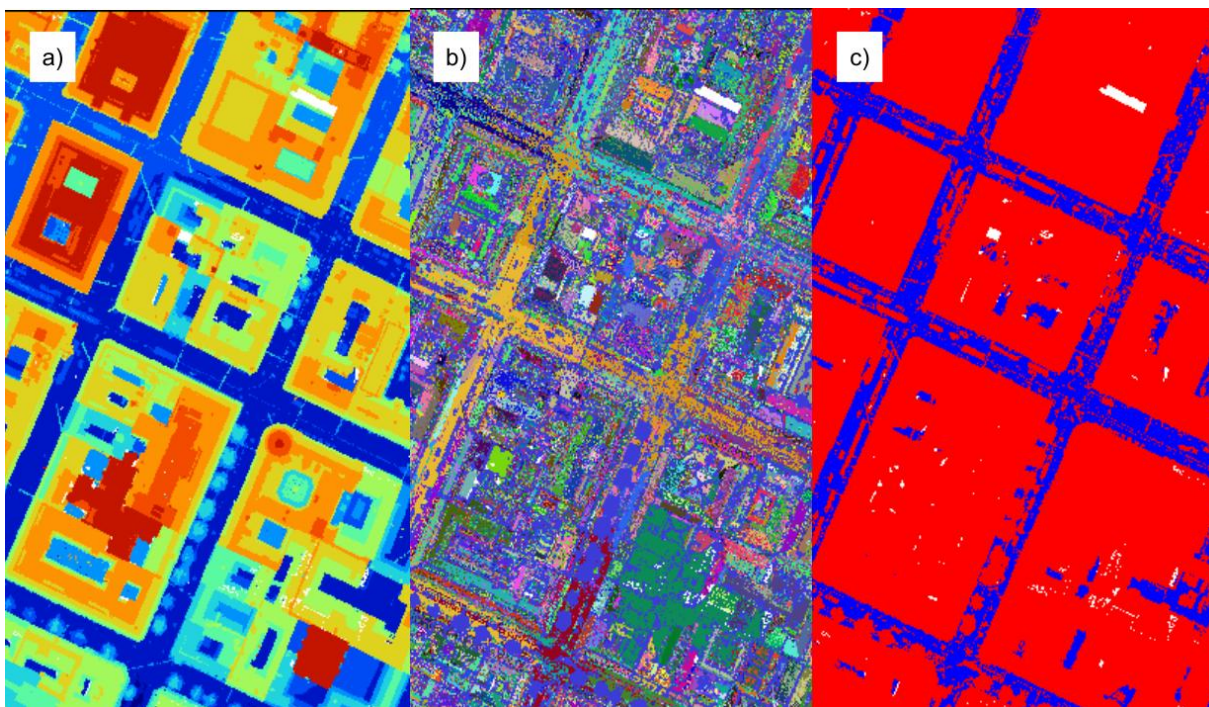
Med programvaren LIS åpner mulighetene seg for segmentering, noe som er interessant med tanke på at samtlige av metodene presentert i innledningen foretar en segmentering før en videre analyse. I likhet med fremgangsmåten ved bruk av TerraScan var det av interesse å fremstille en bakkeklasse for videre analyse. Dette ble gjort med utgangspunktet i kapitlet “Enhanced Point Cloud Classification” fra Tutorialen til LIS[66], men med noen endringer for å få frem ønskelig resultat. Fullstendig fremgangsmåte ble som følgende:

Segmentering

Første steg i denne metoden var å foreta en segmentering. Til dette ble modulen “Segmentation by Planes” benyttet. Denne modulen foretar et søk i det lokale nabolaget til hvert punkt og på bakgrunn av dette blir et “best-fit”-plan beregnet for gruppen med punkter[60]. Som søkemethode ble “k Nearest Neighbors” valgt. Denne klassifiserer et punkt på bakgrunn av antallet punkt av en klasse som befinner seg i nærheten. Til segmenteringen ble “Robust Plane Fitting” brukt da denne gir muligheten til å forkaste eventuelle outliere som befinner seg et stykke vekk fra planet. Maksimal avstand fra modellplanet ble satt til 0.3m. Til “Region Growing” ble søkeradiusen satt til 2.5m og for minimum og maksimum segmentstørrelse ble default-verdiene benyttet. For videre å få definert en bakkemodell var man nødt til å få beregnet “Segment Slope”. I tillegg ble Normalvektoren(xyz) og “Quality of fit” beregnet til punktene i segmentene.

Bakkemodell

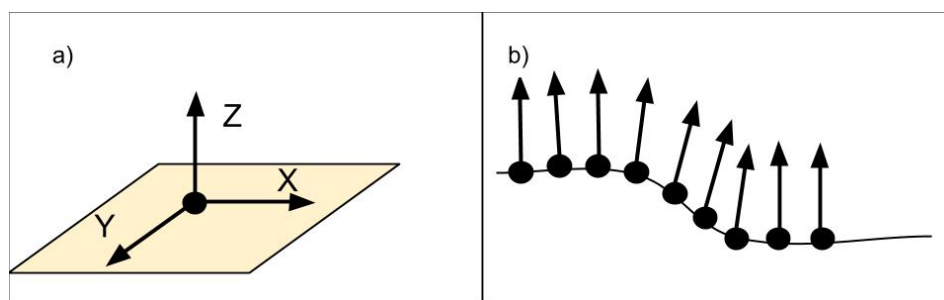
Neste steg var å fremstille en bakkemodell. Først ble modulen “Create Ground Seeds” benyttet. Denne skiller punktskyen i to deler, der “Seeds”-punkter blir klassifisert som bakke, mens de andre punktene forblir uklassifisert. For generering av bakkepunkt blir det først dannet et grid over hele punktskyen. De laveste punktene i hver celle blir videre benyttet til å bygge opp et TIN som blir benyttet som beskriver filteroverflaten, tilsvarende en gradvis fortetning. Som størrelse på cellene i gridet ble defaultverdiene benyttet. For en endelig fremstilling av bakkemodellen ble “Region Growing benyttet” for gruppering av punkt til segmenter og objekter. Ved bruk av normalvektorene beregnet fra segmenteringen ble punktene gruppert basert på et maksimalt tillat normal- og planavvik i tillegg til en nærmeste nabo analyse[60]. Siden det var beregnet en “seed”-attributt fra tidligere, ble det satt at det kun skulle foretas en “region growing” fra punkter som tilhørte denne klassen.



Figur 3.6: a) Punktskyen vist med Z som verdi. b) En segmentering er utført. c) På bakgrunn av “ground-seeds” en bakkeklasse, vist i blått, fremstilt.

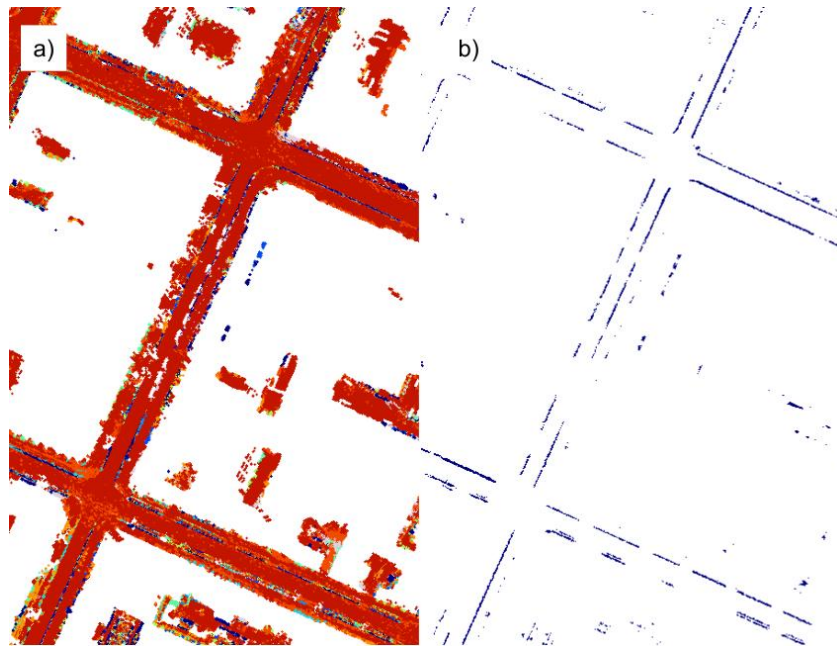
Analyse av bakkemodell

Videre var det ønskelig å ta en nærmere titt på normalvektoren til punktene i bakkemodellen. Punkter der normalvektoren til z avviker fra området rundt kan indikere på at det er en signifikant endring i bratthet og høyde[51].



Figur 3.7: a) x, y og z komponentene til normalvektoren. b) Eksempel på hvordan endring i høyde kan påvirke z komponenten.

Videre ble punkter som lå mer enn 5cm fra planene generert ved segmenteringen fjernet, da dette var mest som støy å beregne. Avslutningsvis var det nødvendig med en tynning for å fremstille en endelig kant. Til dette ble modulen “3D Block Thinning of LiDAR Points” benyttet. Som tynningsparameter ble “mean” benyttet. I likhet med TerraScan-metoden ble punktene som lå i nærheten av bygningene filtrert bort.



Figur 3.8: a) Bakkeklassen er valgt ut. Her vist med normalvektoren til z -komponenten som egenskap. b) Fortauskantene hentet ut fra bakkeklassen.

3.1.4 GRASS GIS & LAsTools

Avslutningsvis var det av interesse å utforske mulighetene for detektering av fortauskanter i et raster/GIS-miljø.

Utgangspunktet for denne metoden var først og fremst å benytte seg av LiDAR-modulen til GRASS GIS for filtrering av dataene og fremstilling av en bakkemodell til videre analyse ved en rasterisering. Etter gjentatte forsøk med områder av forskjellig størrelse og tetthet ble det konkludert med at LiDAR-verktøyene GRASS ikke egner seg for data med høy punkt tetthet grunnet for lang prosesseringstid. Avgjørelsen ble å utføre en bakkeklassifisering i LAsTools for og så foreta en rasteranalyse av området i GRASS GIS.

LAsTools

Bakkeklassifiseringen ble utført ved bruk av “lasground”-modulen i LAsTools. Dette ble gjort ved å lage en batch for prosessering av laserdataene. Siden dette er et urbant område ble “step size” økt til 10m ved å sette “-town”. Batchen innehold følgende kommando:

```
lasground -i %INPUT%\bakke.las -o bakke_class.las -town
```

GRASS GIS

Etter at bakkemodellen var fremstilt ble dataene lastet inn som rasterdata i GRASS GIS. Før dataene kunne lastes inn som et raster i GRASS var det nødvendig å definere avgrensningen til området. Dette ble gjort ved bruk av “r.in.xyz” der funksjonene -s og -g ble benyttet. Funksjonen “-s” skanner datafilen og finner utstrekningen uten å importere filen. “-g” printer resultatet slik at det enkelt kan kopieres til neste kommando.

```
r.in.xyz endelig_omraade.xyz out=region fs=space -s -g
n=6642899.970000 s=6642452.980000 e=597599.990000 w=597356.270000 b=-218.270000 t=169.390000
```

Området som skal lastes inn er på 244m*447m og antall punkt er 5384523. Den romlige oppløsningen ble satt med formelen[53]:

$$res = 2 \cdot \sqrt{region_area/N_points} \quad (3.1)$$

Dette ga en oppløsning på 0.28, som ble rundet opp til 0.3. På bakgrunn av dette ble det endelige området definert ved “g.region”:

```
g.region n=6642899.970000 s=6642452.980000 e=597599.990000 w=597356.270000 res=0.3 -a -p
projection: 1 (UTM)
zone:      0
datum:     towgs84=0,0,0,0,0,0,0
ellipsoid: grs80
north:     6642900
south:     6642452.7
west:      597356.1
east:      597600
nsres:     0.3
ewres:     0.3
rows:      1491
cols:      813
cells:     1212183
```

Laserdataene ble så lastet inn som et raster ved bruk av “r.in.xyz”. Verdiene for rastercellene ble beregnet ved bruk av “mean”.

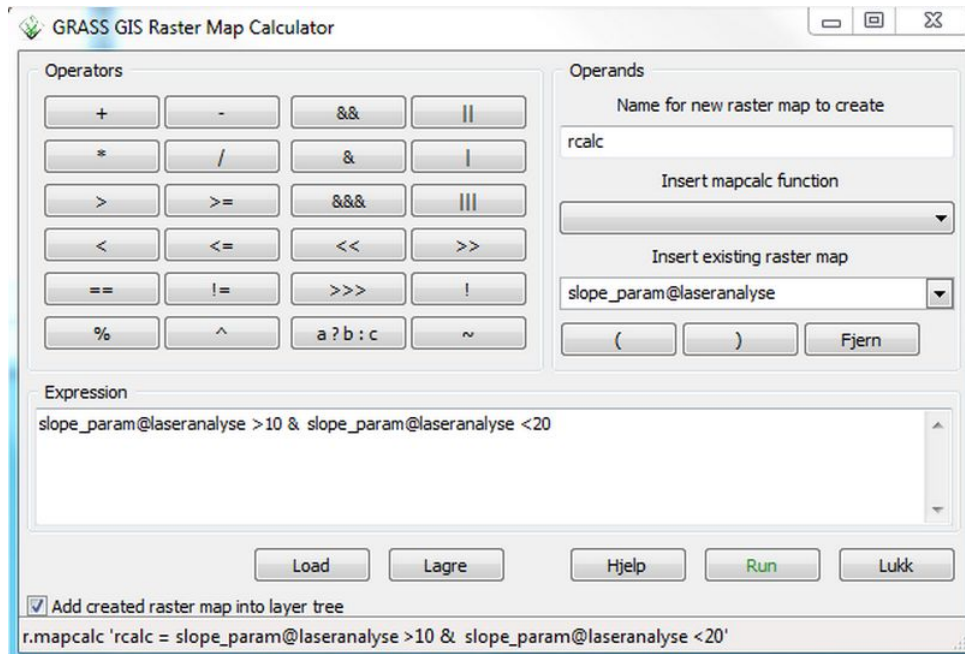
```
r.in.xyz endelig_omraade_bakke.xyz out=bakkemodell fs=space method=mean
Reading data ...
Writing to map ...
r.in.xyz complete. 660784 points found in region.
```

Videre ble det nå foretatt en bratthetsanalyse av bakkemodellen for å finne områder av interesse. Dette ble gjort ved bruk av verktøyet “r.slope.aspect”. Dette verktøyet genererer

en rekke rastere med forskjellige egenskaper fra et raster med høydeverdier, men det som var av interesse var rasteret med “slope”-verdiene.

```
r.slope.aspect elevation=bakke@laseranalyse slope=bratthet
Slope raster map <bratthet> complete
```

Etter noen observasjoner av bratthetsrasteret ble områdene med en vinkel på 10 til 20 grader valgt ut ved hjelp av rasterkalkulatoren til GRASS GIS.

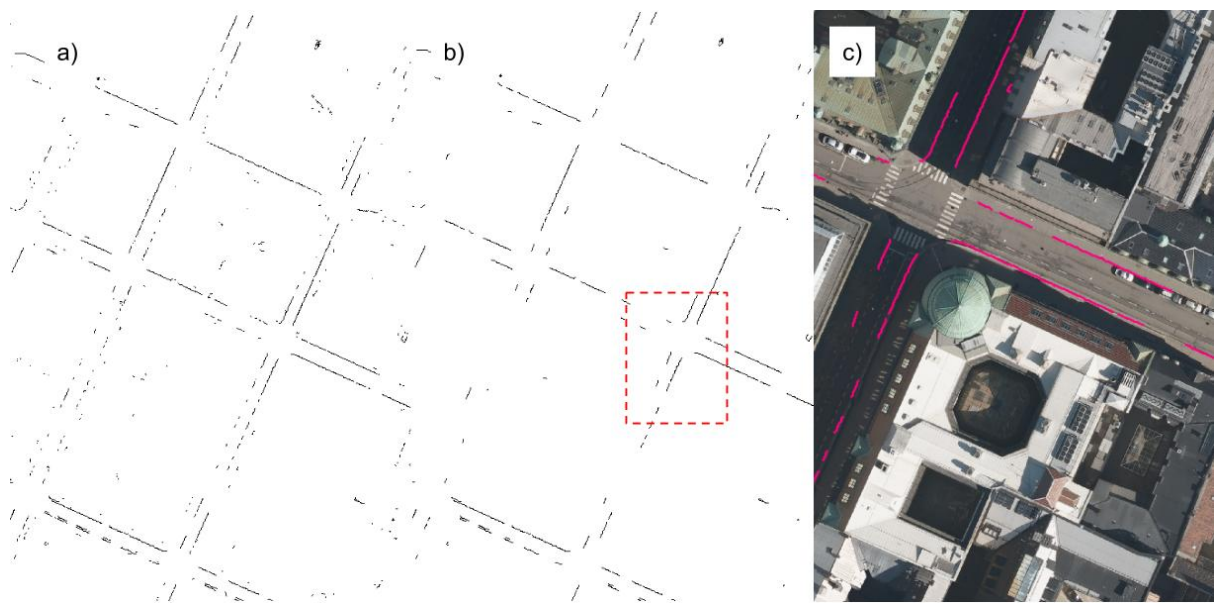


Figur 3.9: “Rastermap calculator” er et kraftfullt verktøy som gir en rekke muligheter for matematiske operasjoner på rasterdatasett.



Figur 3.10: a) *Bakkemodellen lastet inn som raster.* b) *Raster med "slope"-egenskapene til bakkemodellen.* c) *Områdene med en vinkel på 10 til 20 grader, vist i rødt, er valgt ut. Områder utenfor dette får fargen gul.*

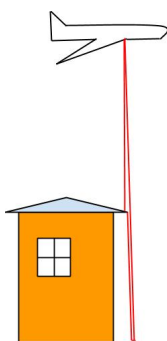
Det ble observert her, i likhet med de to andre metodene, at de detekterte områdene var for brede. Av denne grunn ble det fortetatt en tynning ved bruk av "r.thin" før rasteret ble konvertert til vektor hjelp av "r.to.vect". Metoden fører med seg en del støy og det var ønskelig å foreta en liten opprydding der korte usammenhengende linjesegmenter ble fjernet. Til dette ble "v.clean" benyttet, med funksjonen "remove dangles".



Figur 3.11: a) Vektorisering av rasteret. b) Verktøyet "v.clean" blir brukt til en opprydding for et endelig resultat. c) Utsnittet fra b) vist med ortofoto i bakgrunnen.

3.2 Takkanter

En takkant medfører som oftest en betydelig endring i høyde i terrenget, noe som er fordelaktig i en detekteringsprosess. Ved å se etter områder med en bratt økning i høyde kan det være mulig å finne frem til områder med takkanter. Det som derimot kan by på utfordringer er om området som detekteres faktisk befinner seg på selve kanten og ikke på veggen eller området rundt. Som nevnt i 2.1.6, vil takkanter ofte føre til at det blir registrert to retursignaler i skanneren når første delen av pulsen treffer kanten og når resten av pulsen treffer bakken under. Dette kan benyttes med tanke på detektering av punkt som befinner seg på selve kanten. Datasettet benyttet i dette tilfellet har en såpass stor punktetthet at det også er det rimelig å anta at det er tilstrekkelig nok punkter langs kantene til å fremstille fullstendige huskanter. Det må også tas hensyn til at områder med vegetasjon også vil gi lignende retursignal, så det er derfor viktig at vegetasjon og bygninger er tilstrekkelig skilt fra hverandre før en denne fremgangsmåten benyttes.



Figur 3.12: *Laserstråle som treffer takkant.*

3.2.1 Tidligere arbeid

I motsetning til fortauskanter er det gjort en del forskning på detektering av takkanter. Følgende studier viste seg å være relevante for utgangspunktet i denne oppgaven:

I Rutzinger *et al.*[55] blir det utforsket muligheter for deteksjon av bygninger ved bruk av laserdata i GRASS GIS. Datasettet i denne studien har en gjennomsnittlig punktetthet på $16\text{punkt}/\text{m}^2$. På forhånd er det fremstilt en DOM og en FLDM med forskjellige høydeforskjeller mellom signalene. Det blir observert i dette tilfellet at FLDM alene ikke har høy nok punktetthet for å finne bygningskanter. Datasettet i denne oppgaven har ca 2.5 ganger så høy punktetthet som i denne studien, så et videre forsøk på fremstille takkanter på denne måten er derfor av interesse.

Li *et al.*[56] presenterer i sin studie en metode for detektering av takkanter ved bruk av raster og den lokale endringen i høyde som en takkant medfører. Studien konkluderer med at dette er en effektiv metode å finne takkanter i urbane områder. Dog blir det ikke foretatt noe grundig vurdering av resultatene mot en eventuell fasit i denne studien, noe som hadde vært av interesse.

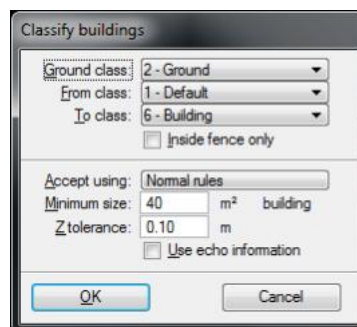
Michelin *et al.*[54] benytter seg også av egenskapen med flere retursignaler langs med takkanter. I denne artikkelen blir det benyttet Full-Waveform-laserdata i motsetning til diskrete signal som i denne oppgaven. Takkantene blir i dette tilfellet detektert ved å finne områder der det er en vertikal diskontinuitet på mer enn 2m. Det blir her registrert at denne klassifiseringen tar med seg vegetasjonen i området. Dette ble videre filtrert bort på bakgrunn av egenskaper ved spredningen i plan og volum. Metoden ga en deteksjonsrate på 87% for takkantene og en feildeteksjonsrate på 12%.

3.2.2 TerraScan

TerraScan gir med verktøyet “Classify Echo Difference” muligheten til å klassifisere punkter på bakgrunn av høydeforskjellen mellom første og siste retursignal, noe som er av interesse med egenskapene til takkantene. Ved å i tillegg benytte seg av bygningsklassifiseringsverktøyet vil det være mulig å skille vegetasjon fra bygninger.

Klassifisering

Første del av metoden blir derfor å foreta en klassifisering for å skille mellom bakke, vegetasjon og bygninger. For bakkeklassifiseringen blir det benyttet samme parametere som tidligere. Etter bakkeklassifiseringen er ønskelig å foreta en bygningsklassifisering. Som tidligere blir “Minimum size” satt til $40m^2$ og “Normal rules” benyttet, men “use echo information” blir ikke huket av. Siden ekkoinformasjonen er av interesse til videre klassifisering av takkanter er det derfor ønskelig at mest mulig av denne er med i bygningsklassen. Som en sikkerhet mot at eventuell vegetasjon skulle havne i bygningsklassen blir derfor “Z-tolerance” satt litt lavere.



Figur 3.13: Verdiene som ble satt i bygningsklassifiseringen

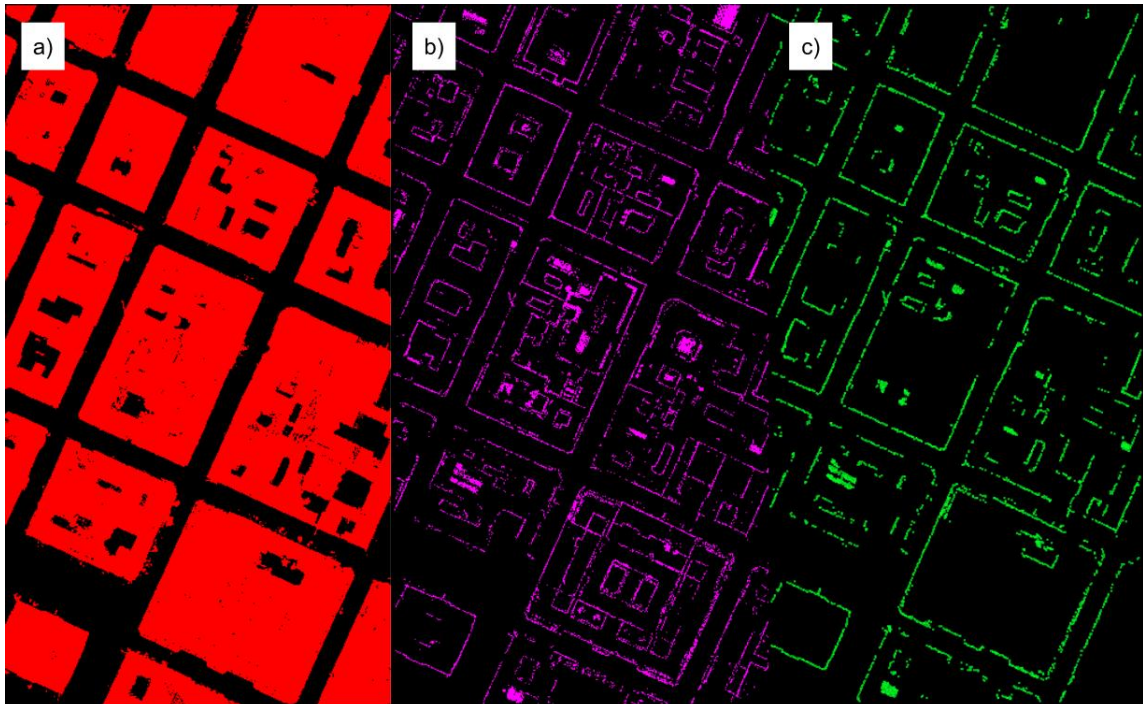
For en filtrering av vegetasjonen blir pulser med flere enn to retursignal detektert. Punkter som befinner seg innen 1.5m radius fra disse blir lagt til vegetasjonsklassen. Etter at klassifiseringene er utført blir det observert, i likhet med tidligere, at bygningsklassen og bakkeklassen ikke er fullstendig. Av denne grunn blir uklassifiserte punkt innen 5m radius lagt til bygningsklassen. Punkt som befinner seg innen 3m radius fra bakken blir lagt til bakkeklassen. Hvorfor denne blir bufret såpass mye blir nevnt i neste seksjon.

Detektering av kanter

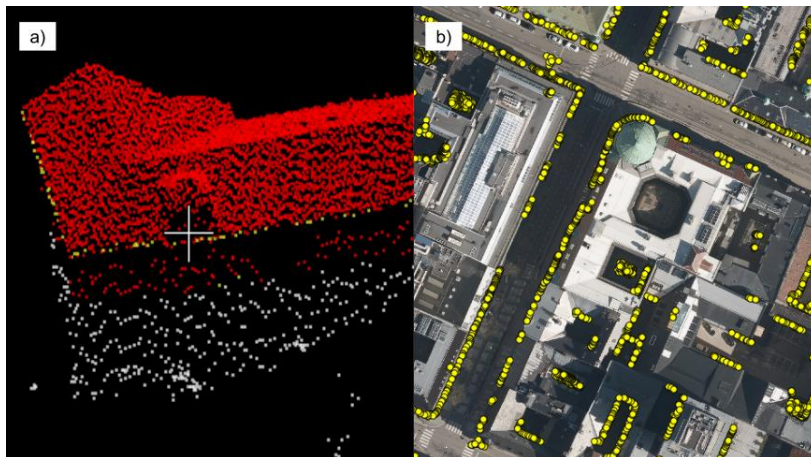
Etter at den endelige bygningsklassen er fremstilt er det nå ønskelig å analysere høydeforskjellen mellom retursignalene i bygningsklassen. Til dette ble “Classify Echo Difference” benyttet. På bakgrunn av målinger foretatt i datasettet ble grenseverdien for høydeforskjellen satt til 7m.

Det neste steget nå var å velge ut de punktene som befant seg på kanten av bygningene. Kanten av bygningene ble derfor definert som områder der det befinner seg terreng nedenfor bygningene. For å skille ut disse områdene ble “Classify Height from Ground” benyttet. Høyden ble satt til minimum 5m over bakken og “Max triangle” til 1.0m. Dette gjør at den maksimale triangelstørrelsen i til bakkeklassen blir svært liten, noe som fører til at kun punkt innen en meter fra kanten til bakkeklassen blir tatt med i beregningen. Dette vil da være punkt som befinner seg på kanten av bygningene. Av denne grunn er det derfor ønskelig å ha en bakkeklasse som inkluderer litt ekstra, slik at alle kantene blir detektert.

Avslutningsvis ble foretatt en tynning og “Classify isolated points” ble benyttet for å fjerne støy.



Figur 3.14: a) *Bygningsklassen*. b) *Punkter med en “Echo Difference” på mer enn 7m ble valgt ut av bygningsklassen*. c) *Punkter på som befant seg på kanten av bygningene ble valgt ut. Her vist i grønt*.



Figur 3.15: a) *De detekterte takkantene, vist i gult, på punktskyen*. b) *Endelig resultat vist i QGIS med ortofoto*.

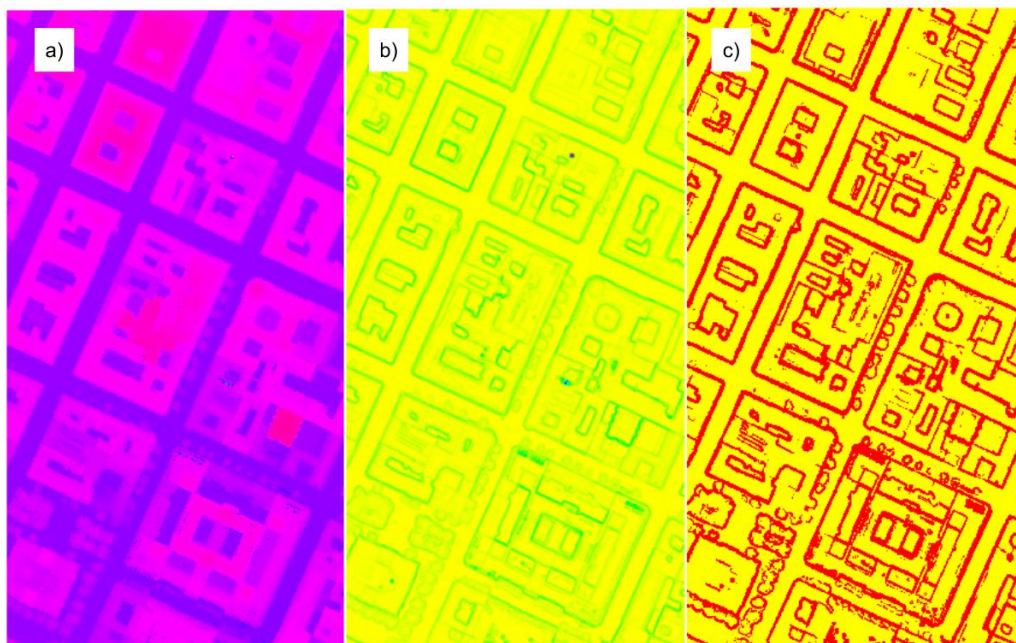
3.2.3 GRASS GIS

Siden “edge detection”-modulen til GRASS GIS ikke viste seg å fungere på datasett med en så høy punktetthet som i dette tilfellet, var det ønskelig å finne en annen måte å detektere takkanter på i GRASS GIS. Ved å igjen rasterisere dataene åpner det seg mange muligheter for analyse av området, blant annet å finne nabolag der det lokalt er en stor endring i høyden. Med dette og retursignalegenskapene som utgangspunkt ble det mulighetene for detektering av takkanter i et raster/GIS miljø undersøkt.

Før laserdataene ble lastet inn i GRASS ble det fremstilt tre datasett. Et datasett med alle punktene fra området, et datasett med punkter der det var flere enn to retursignaler og en FLDM² som inneholdt punkter med en høydeforskjell på mer enn 2m. Datasettene ble så lastet inn og videre rasterifisert på samme måte som under fortauskantdetekteringen. Etter at dataene var lastet inn ble “r.fillnulls” benyttet for å fylle områder i rasterdataene med “no-data” for en fullstendig høydemodell av overflaten i datasettet med alle punktene. For en glatting av overflaten ble modulen “r.neighbours” benyttet. Denne beregner en ny celleverdi på bakgrunn av cellene rundt den. Matematisk verdi ble satt til “average” med en vindustørrelse på 5x5.

Deteksjon av områder med endring i høyde

Neste steg var å finne områder med en signifikant endring i høyde ved hjelp av en nabolagsanalyse. Til dette ble modulen “r.neighbours” benyttet. Som matematisk størrelse ble standardavviket beregnet og nabolagstørrelsen ble satt til 5x5. Videre ble områder med et standardavvik på høyere enn 1.5m valgt ut ved bruk av rasterkalkulatoren. Tanken var at denne skulle benyttes videre som et filtreringsområde.



Figur 3.16: a) Laserdataene er rasterifisert og områder med verdi “NULL” er fylt. b) Nabolagsanalyse der områder med høyt standardavvik er detektert i grønt. c) Områder med standardavvik på høyere enn 1.5m er valgt ut.

²“First/Last Echo Difference Model”

Filtrering av vegetasjon

Som man ser i Figur 3.16 ble også kantene til høy vegetasjon tatt med ved deteksjon av takkantene. Av denne grunn var det ønskelig å foreta en filtrering av områder med vegetasjon. Til dette ble datasettet som inneholdt flere enn to retursignaler benyttet. Områdene med der punktene befant seg ble bufret ved bruk av `r.neighbour` med funksjonen `average` og et 3x3 vindu. Ved rastifisering av dette datasettet fikk vi en del celler uten verdi. Disse ble fylt ved bruk av “`r.mapcalculator`”, der områder med “NULL” fikk verdien 0. Ved hjelp av “`r.mapcalculator`” ble dette datasettet trukket fra datasettet med kantene for en bortfiltrering av vegetasjonen:

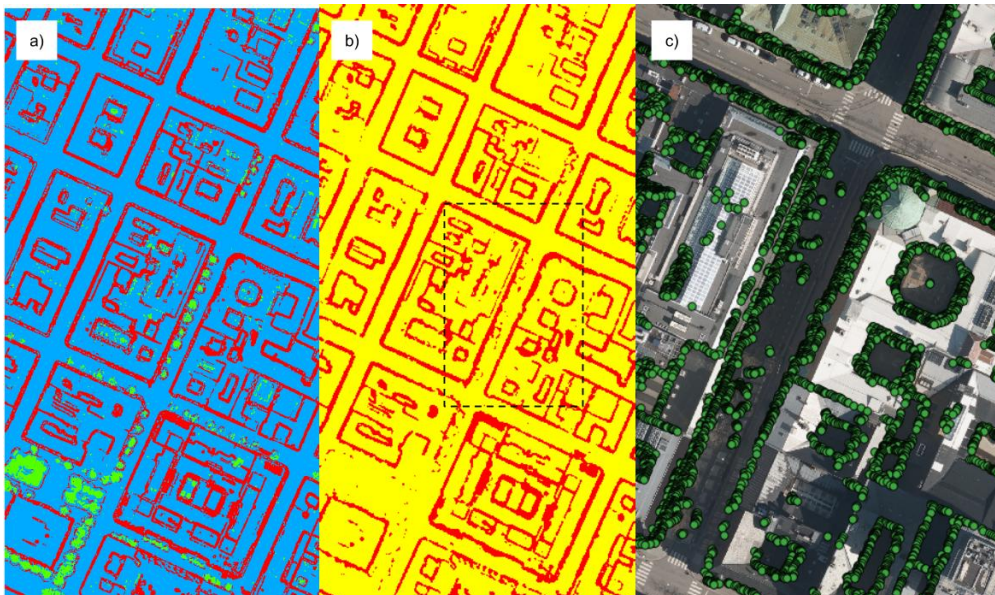
```
(filled_av_stdev_kanter@laseranalyse -( intermediate_filter_
filled@laseranalyse>0))>0
```

Det endelige filterområdet ble fremstilt ved å benytte “`r.neighbour`” med `average` og et 7x7 vindu.

Detektering av takkantene

Etter at filterområdet var fremstilt var det neste steget å benytte FLDM datasettet til deteksjon av takkanter. Igjen ble rasterkalkulatoren og punkt som befant seg inne i områdene med kanter ble hentet ut:

```
(fldm@laseranalyse>0) - (if( filled_filtret_av@laseranalyse == 0 ,
null(),filled_filtret_av@laseranalyse )>0)
```



Figur 3.17: a) Områder med vegetasjon (grønt) er detektert. b) Endelig filtreringsområde. c) Filtreringsområde blir benyttet til å hente ut de punktene som befinner seg på takkantene, her vist i grønt. Utsnittet fra b) vist med ortofoto i bakgrunn.

Forbedring av resultatet

Som man ser i Figur 3.17 inneholdt de detekterte takkantene svært mye støy. Det var derfor ønskelig å finjustere filtreringsområdet for et bedre resultat. Dette ble gjort ved å først tynne filterområdet for og så konvertere det til en vektor. På denne måten denne måten kan man benytte seg av modulen “v.clean” for å fjerne små linje-elementer som for det meste er støy og rester etter vegetasjon. Til dette ble funksjonen “remove dangles” benyttet der alle linjesegmenter på under 10m ble fjernet. Linjen ble så bufret med 30cm. Avslutningsvis ble punktene som var fremstilt fra stegene over så klippet mot bufferet.



Figur 3.18: *Endelig resultat etter forbedringen.*

3.3 Fasadeliv

I likhet med detektering av fortauskanter byr fasadeliv på en rekke nye utfordringer. Det første er bestemmelse av selve området som skal forsøkes å finnes ut fra punkttskyen. De landmålte dataene fra området er fra 1.5m over bakken, så i dette tilfelle er det punkter med denne høyden over bakken som vil være av interesse. Det å detektere punkter som ligger eksakt 1.5m over bakken kan føre til et svært mangelfullt resultat. Derfor ble dette området utvidet med 0.5m i z-retningen med antakelsen om at punkt som befinner seg innen denne avstanden vil ha tilnærmet lik x- og y-verdi. I tillegg skulle også fasadeliv fot detekteres. I dette tilfellet ble punktene som befant seg 0 til 0.5m over bakken betraktet.

Vertikale fasader medfører ofte en del problemer på grunn av varierende tetthet og fordeling, noe som kan gi ufullstendige områder.[57] Det er også å regne med at det vil være en del støy rundt dette området i form av vegetasjon og andre objekter som vil påvirke resultatet.

Det at punkttskyen er generert fra helikopter medfører noen egenskaper som kan gjøres nytte av i en detektering. Helikopteret vil til tider svinge litt flyretningen eller holde samme posisjon i luften, noe som medfører samme område blir skannet flere ganger og gi en svært høy punkt tetthet[57]. Siden vegger blir projisert på et horisontalt plan, kan vegger på større bygninger detekteres ved å analysere punkt tettheten i x- og y-retningen.[57]

Det mest intuitive vil være å foreta en segmentering for og videre se etter vertikale flater. På denne måten vil det også være mulig og spesifisere planegenskaper, noe som kan være med på å fjerne støy fra uønskede objekter.

3.3.1 Tidligere arbeid

Når det gjelder ekstraksjon av bygninger fra flybåren laserdata er det publisert en rekke studier, men få tar for seg deteksjonen av vegger og fasader spesifikt. Det ble funnet frem til to studier som var relevante for dette tilfellet:

Zhang *et al.*[58] presenterer en metode for automatisk rekonstruksjon av vegger fra flybåren laserdata. Metoden velger først "Seed"-punkter for planare segmenter ved hjelp av en prinsipalkomponentsanalyse, altså ved å finne punkter som representerer flaten. Punkt i området rundt blir så analysert og planare segmenter blir fremstilt på bakgrunn av punkter som blir lagt til. Etter dette blir det foretatt en segmentbasert klassifisering for identifisere tak, vegger og bakkeoverflater. For vegger med få punkter blir det så foretatt en analyse av nabolaget til de detekterte takkantene, der punkter blir lagt til ved bruk av geometriske og topologiske begrensninger.

Vosselman *et al.*[59] fra 2012 presenterer i sin studie en metode for ekstraksjon av vertikale vegger fra laserdata generert fra mobil og flybåren laserskanning. I likhet med metoden presentert i Zhang *et al.*[58] blir veggene detektert ved å fremstille "Seed"-punkter der det videre blir lagt til punkter på flaten. Det blir også foretatt noen interessante sammenligninger av flydata og bildata:

Studien observerer, som forventet, en stor forskjell i fullstendigheten til veggene fra mobil- og flybåren laserskanning. Fullstendigheten til bildataene avhenger først og fremst av objekter som blokkerer sikten til veggene, mens fullstendigheten til flydataene avhenger av skannerposisjonen. Noen av områdene som ikke er dekket ved bruk av mobil skanner blir detektert ved bruk av fly. Men selv om det ble benyttet en skanner som sendte ut stråler i flere retninger var det fortsatt flere områder på bygningene som ikke var dekket. Datasettet som ble fremstilt ved flybåren laserskanning hadde en punkt tetthet på $20\text{punkt}/\text{m}^2$.

3.3.2 TerraScan

TerraScan har ikke noen mulighet for segmentering, noe som kan gjøre prosessen med å bestemme punkter på vegger en del vanskeligere. Derfor ble det forsøkt med utgangspunkt i bygningsklassifiseringsverktøyet å finne punkter av interesse på bygningene. Metoden ble gjennomført to ganger, en gang for fasadelivet 1.5m over bakken og en gang for fasadelivet ved foten av bygningene.

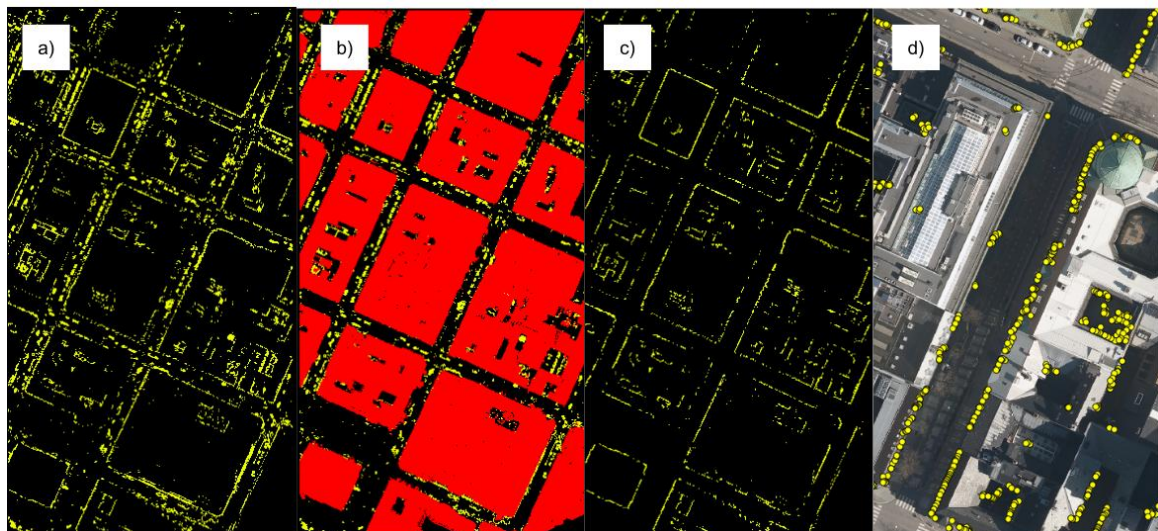
Klassifisering

Første steg var å foreta en klassifisering for å skille mellom bakke, bygninger og vegetasjon. Dette ble gjort på samme måte som tidligere. Videre ble “Classify by Height From Ground” benyttet for å klassifisere punkter 1m og 2m over bakkenivå til en foreløpig klasse med fasadeliv. Ved klassifisering av fasadeliv bunn ble disse grenseverdiene satt til 0m og 0.5m.

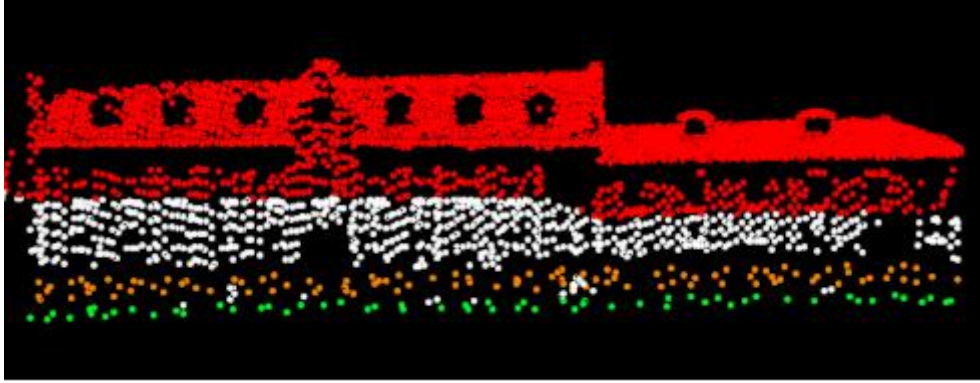
Videre ble punkt i bygningsklassen som befant seg innen 0.5m fra bakken lagt til bakkeklassen og resterende punkt innen 3m fra bygningene lagt til disse for en mer fullstendig klasse.

Filtrering av fasadelivet

Den foreløpige klassen med fasadelivet innehold alle punktene som befant seg innen for den grenseverdien som ble satt for høyden over bakken. Videre var det av ønske å hente ut punktene som befant seg rett under takkantene. Til dette ble verktøyet “Classify height from ground” benyttet på samme måte som under deteksjonen av takkanter. Ved å sette bygningene som bakkeklasse, negativ høydeverdi og “Max triangle” til 1.0m ble kun punktene som befant seg rett under takkantene filtrert ut for fremstilling av fasadelivet. Avslutningsvis var det ønskelig å fjerne støy på datasettet. Først ble det foretatt en “Thinning” av datasettet før “Classify Isolated” ble benyttet.



Figur 3.19: a) Alle punkter som befinner seg 1m til 2m over bakkenivå. b) Bygningsklassen blir benyttet som filter. c) Fasadelivet er filtrert ut. d) Endelig resultat.



Figur 3.20: *Det klassifiserte området. Fasadeliv fot er vist i grønt og fasadelivet 1.5m over bakken er vist i brunt.*

3.3.3 LIS

Klassifisering

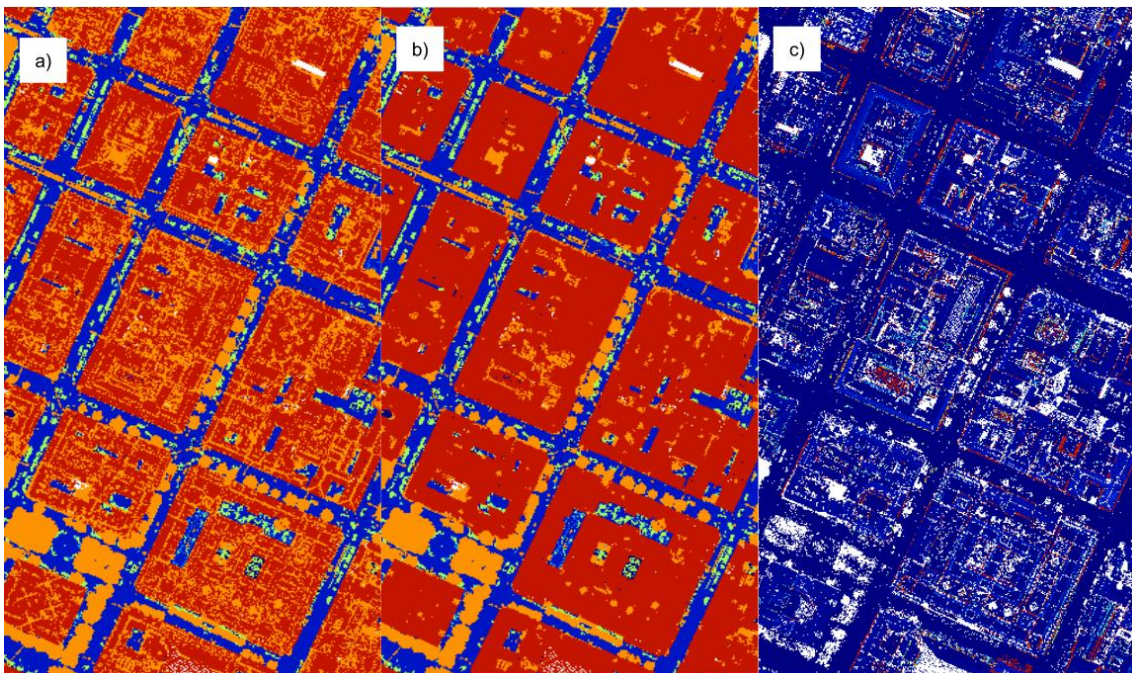
Fra bakkeklassen som var fremstilt i 3.1.3 var ønskelig å foreta en videre filtrering av punktskyen. Til dette ble modulen “Enhanced Point Cloud Classification” benyttet. Denne klassifiserer punktene til klassene bakke, bygninger, vegetasjon(lav, middel, høy) og uklassifisert på bakgrunn av segmenteringen som var gjort tidligere[60].

Avslutningsvis ble modulen “Majority filter” benyttet for en forbedring av klassifiseringen. Denne filtrerer ut eller legger punkt til de ulike klassene på bakgrunn av egenskapene til nabolaget rundt.

Filtrering av vegger

Etter at klassifiseringen var utført ble punkter som tilhørte bakke-og bygningsklassen hentet ut. Videre var det nå ønskelig å filtrere ut områdene av interesse. Til dette ble “Point Cloud to Grid” benyttet. Denne modulen lager en grid av punktskyen på bakgrunn av statistiske egenskaper til punktene som havner innen hver celle.[60] I likhet med fremgangsmåten for takkanter var det også her av ønske å finne områder der det var en signifikant økning i høyde. Derfor ble attributten med høyden over bakken(dz) benyttet og statistisk verdi satt til standardavvik. Cellestørrelsen ble satt til den samme som ved bruk av GRASS[53].

Etter at gridet var fremstilt ble dette brukt til en filtrering av punktskyen med alle klassene. Dette var fordi at det ble observert at nedre del av bygningene var klassifisert som lav vegetasjon. Av denne grunn kunne ikke punktskyen med kun bakke og bygning benyttes.



Figur 3.21: a) Den klassifiserte punktskyen. Bakkeklassen er vist i blått, Bygningene i rødt, Lav vegetasjon i lysegrønt og Høy vegetasjon vist i oransje. b) Klassifiseringsstøy er fjernet ved bruk av “Majority filter”. Fargene er de samme som i a). c) Filtreringsgrid er fremstilt på bakgrunn av bakke- og bygningsklassen. Det røde området angir nabolag med en endring i standardavviket til dz.

Til den filtrerte punktskyen ble følgende krav satt for fasadelivspunktene:

- Punkter som befant seg 0-0.5m over bakken ble lagt til fasadeliv fot.
- Punkter som befant seg 1-2m over bakken ble lagt til klassen for fasadelivet 1.5m over bakken.
- Flaten som punktene befant seg på måtte ha en slope på mer enn 80 grader.

De klassifiserte punktene ble så tynnet for og så bli eksportert for en videre analyse.



Figur 3.22: a) punkter med en slope på mer enn 80 grader er valgt ut. b) punkter som befinner seg 1-2m over bakken er valgt ut. c) Ferdige resultatet med ortofoto.

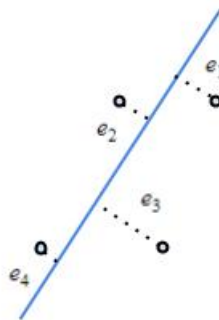
3.4 Analyse av resultatene

Ved etableringen av en fasit ble det tatt stilling til hva det var hensiktsmessig å vurdere resultatet opp mot. Fra Kartverket sin “Kontroll av Geodata” [65] er det i kapitlet 6.2 “Fasitmåling ved kontroll av stedfestingsnøyaktighet” spesifisert hva som kreves ved fremstilling av en fasit for vurdering av FKB-data.

Punktene som er fremstilt i dette tilfellet er langt i fra et ferdig vektorisert resultat og det er derfor lite hensiktsmessig å foreta en vurdering etter standarden. For dette tilfellet ble det avgjort å beregne “Root Mean Square Error”, RMSE, mellom de fremstilte punktene og fremstilte fasitlinjer fra området for en indikasjon på nøyaktigheten. RMSE er definert som et mål på forskjellen i grunnriss mellom et kjent punkt og et digitalisert eller interpolert punkt [61]. I GIS-sammenheng benyttes denne ofte til å beskrive posisjonsfeilen til både punkt, linjer og polygoner [62]. RMSE blir videre beregnet ved [62]:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(e_i)^2}{n}} \quad (3.2)$$

der feildistansen, e_i , i dette tilfellet er gitt som avstanden mellom det fremstilte punktet P og fasitlinjen.



Figur 3.23: Feildistansen, e_i

For å få en visuell fremstilling av kvaliteten til de enkelte fremstilte punktene og detektere eventuelle outliers var det av interesse å plote feildistansene opp mot kvalitetskravet til FKB-A i grunnriss. Ved en geometrisk sortering av punktene var det mulig å detektere eventuelle områder av objektene som befant seg innenfor kravet og hvilke som befant seg utenfor. Den totale RMSE ble inkludert i samme plott for å se hvordan denne lå sammenlignet med kvalitetskravet.

I tillegg til nøyaktigheten til de detekterte punktene var det også av interesse å se på spredningen for kartlegging av ufullstendige områder. En mulighet var å beregne avstanden mellom punktene som et mål på hvor store de eventuelle hullene var, men avgjørelsen falt på å foreta en ren visuell betraktning av resultatet i dette tilfellet.

Fasitlinjer

Som hovedverktøyet for fasiten ble softwaren QGIS benyttet. QGIS tilbyr en rekke verktøy som kan være nyttig ved en geografisk analyse og i tillegg er det støtte for GRASS, noe som gir enda flere muligheter hva verktøy angår. I første omgang ble KOF-filen med landmålingspunktene ble lastet inn i QGIS. Punktene ble så vurdert opp mot FKB-data fra området for å plukke ut de punktene som var av interesse.



Figur 3.24: Landmålingspunktene som var av interesse ble valgt.

For fortauskantene ble det fremstilt to tekstfiler, “fortauskant_1” og “fortauskant_2”, med de utvalgte punktene.

For fasadelivet derimot var det mål i to omganger, en der punktene befant seg i overgangen mellom bakke og fasade og en der punktene befant seg 1.5m over bakken. Det ble observert at det manglet et par punkter for å kunne fremstille en linje som representerte trenden langs fasadelivet godt nok i fasadeliv 1 og 2. Likevel var det ønskelig å bruke disse punktene siden de var av bedre kvalitet enn FKB-dataene for fasadeliv fra området[64]. Av denne grunn ble det lagt til to punkt i hver av målingene. Fasadeliv 3 derimot var såpass rett at det ble tilstrekkelig representert. På bakgrunn av disse punktene ble det fremstilt totalt seks filer; tre for fasadelivet 1.5m over bakken og tre for fasadelivet ved bakkenivå. Punktene i disse filene ble videre sortert etter nærmeste nabo ved bruk av skriptet “naboer.py” før de ble lastet inn i QGIS på nytt. For å danne en vektor mellom punktene ble funksjonen “Points2One” benyttet.

Som fasitlinjer for takkantene ble henholdsvis FKB-data fra området benyttet. Takkantene ble delt opp etter hvilke hus de hørte til. På bakgrunn av dette ble totalt 6 fasitlinjer fremstilt for takkantene.



Figur 3.25: a) Fasitlinjer for fortauskantene. b) Fasitlinjer for fasadeliv 1.5m over bakken. c) Fasitlinjer for fasadeliv fot d) Fasitlinjer for takkantene

Analyse

Etter at fasiten var etablert var det nå ønskelig å plote de detekterte punktene mot linjene. Fortauskantene som var fremstilt ved bruk av GRASS GIS skilte seg fra resten da dette var linjer og ikke punkter. Valget ble derfor å gjør om disse til punkter for at vurderingen av alle resultatene skulle være tilnærmet lik. Til dette ble “v.to.points” benyttet der avstanden mellom punktene langs linjene ble satt til 1m.

For beregning av avstanden, avviket, mellom punktene og linjene ble verktøyet “v.distance” med funksjonen “Minimum distance to nearest feature” benyttet. De beregnede avvikene

ble lagt til attributtdataene til punktene. De beregnede avstandene ble videre eksportert til Excel for beregning av RMSE og en grafisk fremstilling av resultatet. I tillegg til avvikene var det også av interesse å se på antallet punkt hvert av objektene bestod av. Et lavt antall punkter svekker kvaliteten til resultatet og må derfor tas med i betraktning.

Kapittel 4

Resultater

Følgende kapittel inneholder resultatene fra de klassifiserte punktene plottet opp mot de fremstilte fasitlinjene. Siden linjene kun dekket en liten del av området ble punkter som befant seg innenfor det området som linjene definerte valgt ut. Når det gjaldt støy og andre punkter som befant seg i nærheten av linjene, men fortsatt litt lenger utenfor enn de andre, ble følgende kriterie satt: Dannet disse en klar trend, for eksempel en nærliggende takkant, ble de ikke tatt med i vurderingen. Var de mer som støy og beregne, som enkelstående punkter, ble de tatt med da dette var av interesse for å si noe om nøyaktigheten.

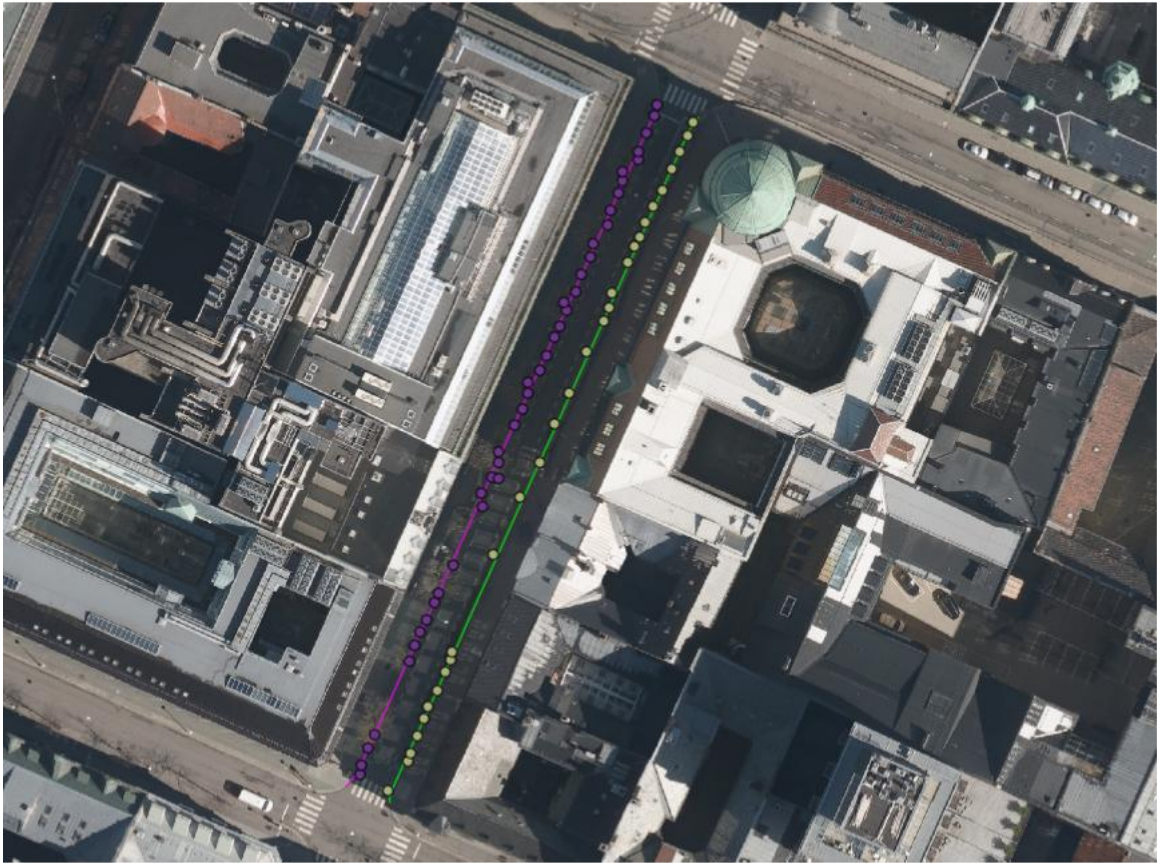
For fasadelivet fremstilt ved bruk av LIS var det to litt spesielle tilfeller:

- Det vestliggende fasadelivet 1.5m over bakken var så mangelfullt at det ikke var noen hensikt å plote dette mot fasitlinjene.
- Det samme gjaldt alle forsøkene for fasadeliv som befant seg ved overgangen mellom fasade og bakke.

Plottene fremstilt i Excel er å finne i Vedlegg B.

4.1 Fortauskanter

TerraScan

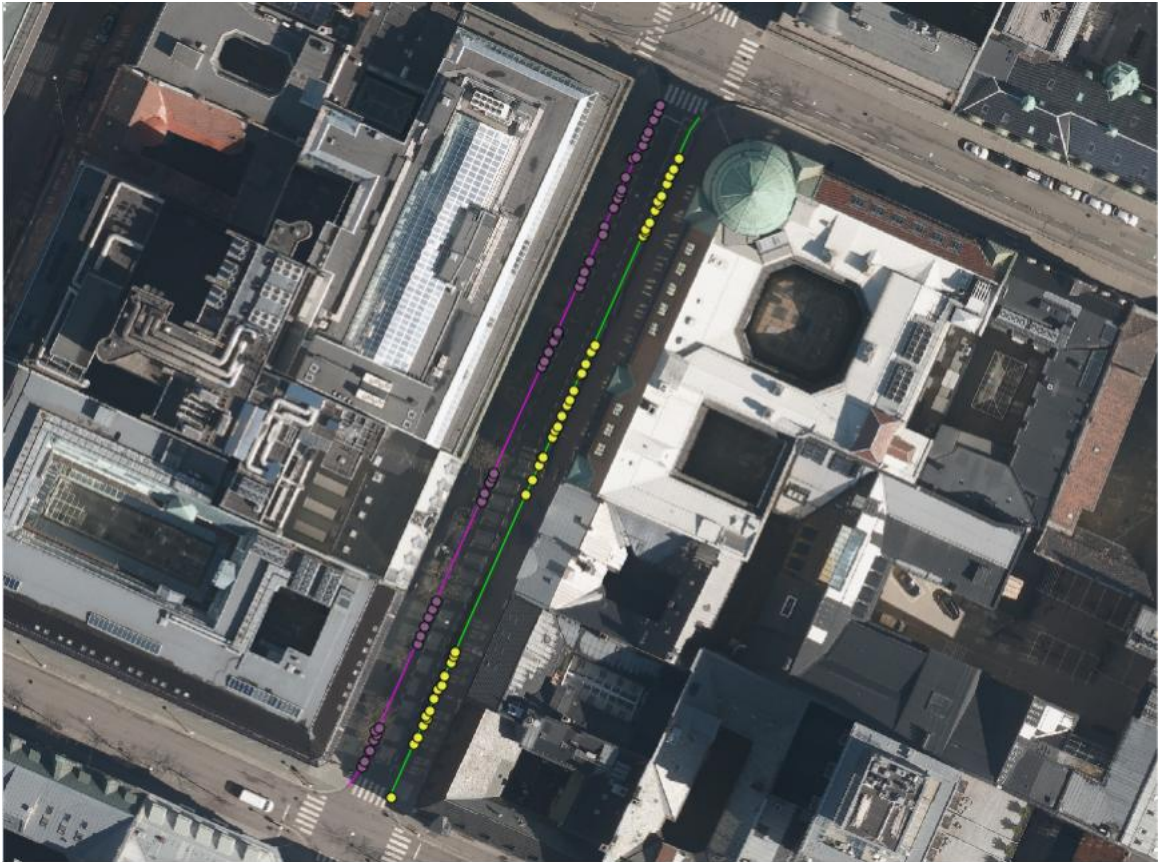


Figur 4.1: *Fortauskant 1 og 2 fra TerraScan plottet mot fasitlinjene.*

	Fortauskant 1	Fortauskant 2
RMSE	0.38	0.38
N	41	29

Tabell: 4.1: *Total RMSE og antall punkt beregnet for fortauskantene fra TerraScan*

LIS

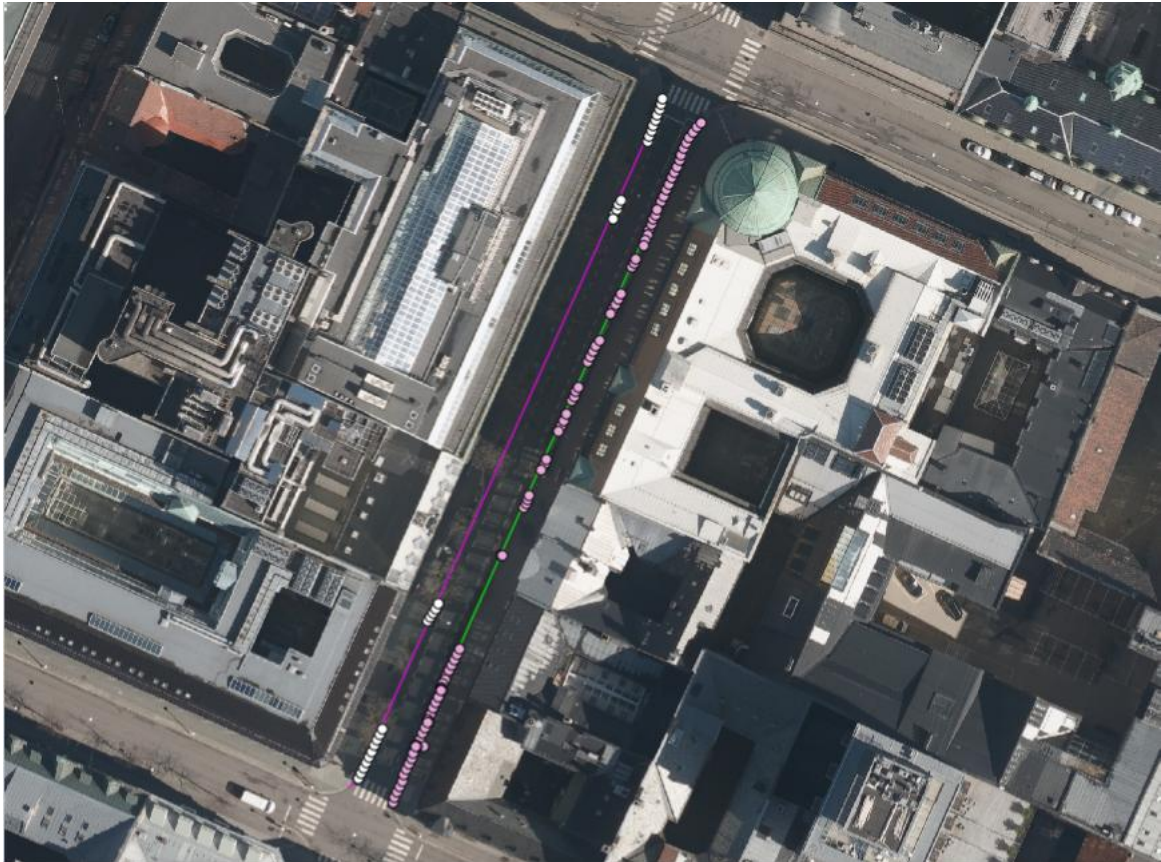


Figur: 4.2: Fortauskantene fra LIS plottet mot fasitlinjene.

	Fortauskant 1	Fortauskant 2
RMSE	0.13	0.09
N	43	43

Tabell: 4.2: Total RMSE og antall punkt beregnet for fortauskantene fra LIS

GRASS GIS



Figur: 4.3: Fortauskantene fra GRASS plottet mot fasitlinjene.

	Fortauskant 1	Fortauskant 2
RMSE	0.18	0.19
N	29	99

Tabell: 4.3: Total RMSE og antall punkt beregnet for fortauskantene fra GRASS.

4.2 Takkanter

TerraScan



Figur: 4.4: Takkant 1 og 2 fra TerraScan plottet mot fasitlinjene.

	Takkant 1	Takkant 2
RMSE	0.22	0.45
N	152	157

Tabell: 4.4: Total RMSE og antall punkt beregnet for takkantene fra TerraScan.



Figur: 4.5: Takkant 3 og 4 fra TerraScan plottet mot fasitlinjene.

	Takkant 3	Takkant 4
RMSE	2.08	0.55
N	54	174

Tabell: 4.5: Total RMSE og antall punkt beregnet for takkantene fra TerraScan.



Figur: 4.6: Takkant 5 og 6 fra TerraScan plottet mot fasitlinjene.

	Takkant 5	Takkant 6
RMSE	0.25	0.93
N	77	72

Tabell: 4.6: Total RMSE og antall punkt beregnet for takkantene fra TerraScan.

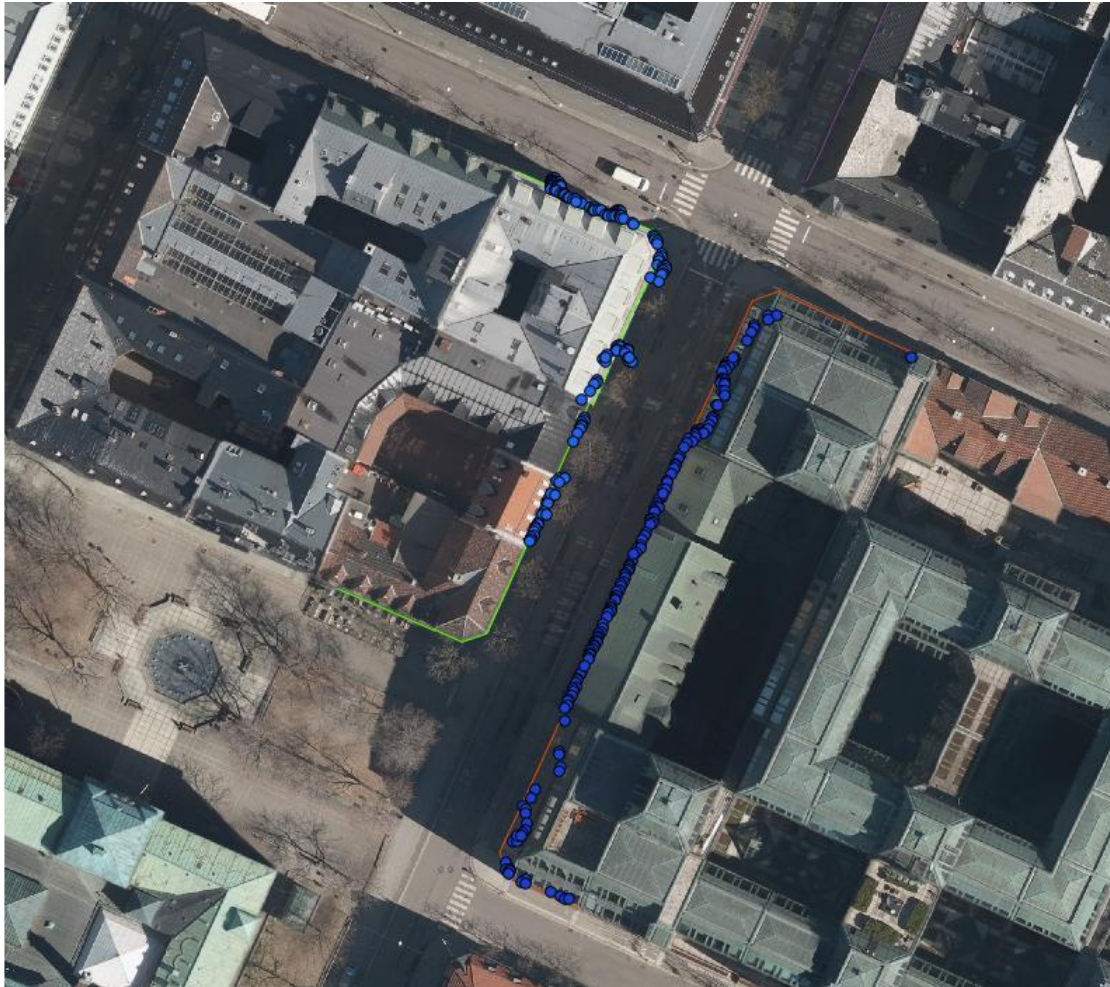
GRASS GIS



Figur: 4.7: Takkant 1 og 2 fra GRASS plottet mot fasitlinjene.

	Takkant 1	Takkant 2
RMSE	0.41	0.68
N	333	279

Tabell: 4.7: Total RMSE og antall punkt beregnet for takkantene fra GRASS.



Figur: 4.8: *Takkant 3 og 4 fra GRASS plottet mot fasitlinjene.*

	Takkant 3	Takkant 4
RMSE	0.79	0.82
N	136	169

Tabell: 4.8: *Total RMSE og antall punkt beregnet for takkantene fra GRASS.*



Figur: 4.9: Takkant 5 og 6 fra GRASS plottet mot fasitlinjene.

	Takkant 5	Takkant 6
RMSE	0.59	0.19
N	122	100

Tabell: 4.9: Total RMSE og antall punkt beregnet for takkantene fra GRASS.

4.3 Fasadeliv

TerraScan



Figur: 4.10: “Fasadeliv 1 fot” og “Fasadeliv 2 fot” fra TerraScan plottet mot fasitlinjene.

	Fasadeliv 1	Fasadeliv 2	Fasadeliv 3
RMSE	0.52	0.41	1.27
N	77	96	53

Tabell: 4.10: Total RMSE og antall punkt beregnet for fasadelivet fra TerraScan.



Figur: 4.11: “Fasadeliv 1 - 1.5m” og “Fasadeliv 2 - 1.5m” fra TerraScan plottet mot fasitlinjene.

	Fasadeliv 1	Fasadeliv 2	Fasadeliv 3
RMSE	0.46	0.82	0.43
N	69	175	121

Tabell: 4.11: Total RMSE og antall punkt beregnet for fasadelivet fra TerraScan.

LIS



Figur: 4.12: "Fasadeliv 2 - 1.5m" bakken fra LIS plottet mot fasitlinjene.

	Fasadeliv 1	Fasadeliv 2	Fasadeliv 3
RMSE	X	0.49	0.14
N	X	73	49

Tabell: 4.12: Total RMSE og antall punkt beregnet for fasadelivet fra LIS

Kapittel 5

Diskusjon

5.1 Fortauskanter

For klassifisering av fortauskanter var det kommet frem til et resultat ved bruk av tre forskjellige metoder. Det kan argumenteres for at metodene som ble fremstilt var relativt like, men likevel ble nøyaktigheten og fullstendigheten til de endelige resultatene svært forskjellig.

Nøyaktighet og Fullstendighet

Fra tabell 4.1-4.3 observeres det noen klare forskjeller i nøyaktigheten til resultatet. Fortauskantene detektert ved bruk av LIS har en vesentlig høyere nøyaktighet enn de to andre. Dette skyldes først og fremst at det ble foretatt en rasterifisering av dataene ved bruk av GRASS og delvis i TerraScan, noe som vil gi et tap i nøyaktighet[63]. Ved bruk av LIS derimot er alle analysene foretatt direkte i punktskyen.

Ved en betraktning av plottene B.1-B.6 observeres det noen interessante forskjeller i avvikene til de enkelte resultatene:

Plottene for TerraScan viser en svært stor spredning i punktene. Dette har en sammenheng med at de detekterte områdene ved bruk av “Export Lattice” ble svært brede, se figur 3.5, noe som fører til en ujevn spredning når det ved en tynning blir beregnet et midlere punkt. På grunn av lite dokumentasjon av denne funksjonen har det ikke vært mulig å finne frem til hva som eksakt skylder dette, men det ser ut til at nabolaget som blir benyttet til å beregne “roughness”-verdiene for hver celle er relativt stort, noe som vil gi større områder. Det er ikke mulig å justere denne til et smalere område.

Plottene for LIS viser jevnt over et lavt avvik, med et par outliere som drar opp den totale RMSE noe.

Resultatet fremstilt ved GRASS viser en klar lineær sammenheng mellom segmenter av de ulike punktene, som kan forklares ved at punktene i denne sammenheng ble fremstilt ved konvertering fra linjer til punkter med eksakt 1m avstand mellom.

Videre var det ønskelig å betrakte fullstendigheten til fortauskantene. Den vestre delen av Kirkegata har en del vegetasjon i form av trær, noe som gjør den interessant i denne sammenheng.

Resultatet ved bruk av TerraScan gir den mest en jevne fordelingen av punktene langs med hele gaten, men likevel kan det observeres et par hull. Ved en nærmere betraktning av disse områdene ser det ut til at det er parkerte biler og nedsenkinger i fortauet som fører til dette.

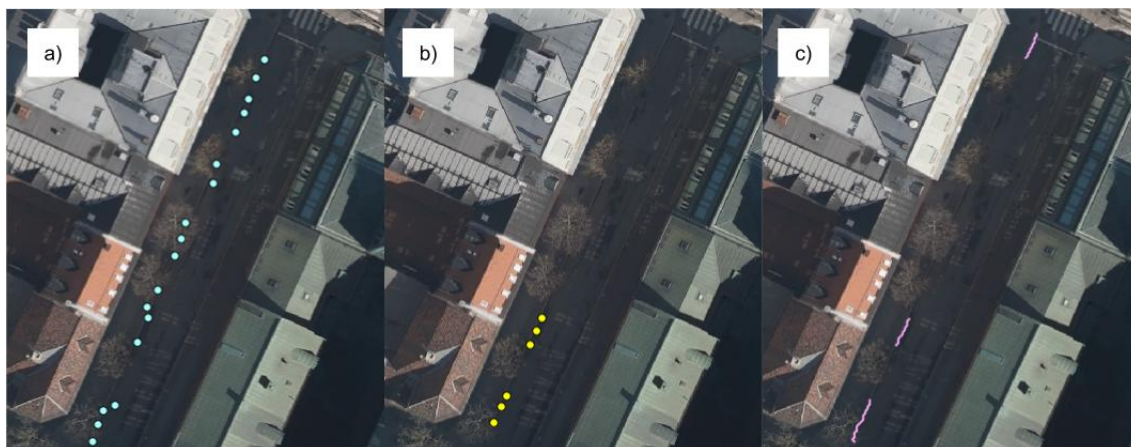
Den vestre fortauskanten fremstilt fra LIS har i likhet med TerraScan hull der det er

parkert biler, men det ser ut som dette påvirker resultatet mer i dette tilfellet. I tillegg ser det ut til at noe av vegetasjonen også fører til en lavere fullstendighet. Ved bruk av TerraScan ble den foreløpige bakkeklassen utvidet til å inkludere alle punkt som befant seg innen 0.5m radius, noe som kan ha fanget opp små fortaussegmenter som befinner seg mellom biler og eventuelle punkter under vegetasjon som ikke ble tatt med. For fremstillingen av den endelige bakkeklassen ble også funksjonen “Hard Surface” benyttet, noe som også gir et litt annet resultat. Nedsenkinger i fortauet førte også i større grad til hull i resultatet fra LIS. Dette skyldes at ved fremstillingen av rasteret i TerraScan beregnes verdiene i cellene på bakgrunn av punktene rundt, noe som vil føre til at disse områdene jevnes ut og vil bli litt høyere i nærheten av der det er godt definerte fortauskanter.

Sammenlignet med de to andre resultatene var den vestre fortauskanten ved bruk av GRASS er svært ufullstendig. Under fremstillingen av denne ble det en del støy og det var derfor nødvendig å sette en høy grenseverdi for linjesegmenter som skulle filtreres ut. Dette medførte også at mindre fortauskanter ble filtrert ut (se figur 3.11), noe som førte til et såpass ufullstendig resultat. Det er derfor vanskelig å si noe om hvor mye biler, nedsenkinger og vegetasjon påvirket resultatet i dette tilfellet.

For den østre fortauskanten var det ikke noe vegetasjon som blokkerte signalet. Her observeres det også at biler og nedsenkinger fører til ufullstendige områder. Fortauskanten fra LIS er den påvirkes i høyest grad av dette, mens fortauskanten fra TerraScan og GRASS gir et tilnærmet likt resultat med en litt høyere tetthet for sistnevnte. Ved en sammenligning av østre og vestre fortauskant ser det ut til at vegetasjonen påvirker fullstendigheten til fortauskantene ved bruk av TerraScan i vesentlig mindre grad enn ved bruk av LIS. Beveger man seg utenfor området med fasitdataene observeres det at dette gjelder resultatet fra GRASS også.

Datasettet som ble benyttet i dette tilfellet ble skannet delvis om sommeren og derfor er det en ganske tett vegetasjon. Hadde denne skanningen blitt utført tidligere på året er det rimelig å anta at vegetasjonen hadde påvirket resultatet i mindre grad.



Figur 5.1: a) Resultatet i et område med vegetasjon ved bruk av a) TerraScan, b) LIS og c) GRASS.

Det observeres også i området utenfor fasitdataene at hjørnene på fortauskantene ikke kommer med i klassifiseringen. Her er det også en nedsenking i fortauet, noe som gjør at det ikke er mulig å detektere disse ved bruk av lokale ujevnheter eller endringer i normalvektoren. Dette gjør at de fleste fortaussegmentene som er fremstilt i dette tilfellet er mer mindre helt rette, noe som svekker kvaliteten til resultatet noe. Vosselman & Liang[49]

observerte ved bruk av sin metode at det var særlig i krumme områder at nøyaktigheten var lav, så en sammenligning av dette hadde derfor vært av interesse. Nå skal det legges til at resultatet fra denne studien er en endelig vektorisering, noe som ikke er gjort i dette tilfellet.

Det er fortsatt noe støy igjen etter klassifiseringen og en videre forbedring av resultatet er derfor nødvendig.

Vurdering av metodene

Som nevnt innledningsvis er tankegangen bak de tre fremstilte metodene relativt lik; det var ønskelig å fremstille en bakkemodell der det videre ble sett etter områder med ujevnheter. Ujevnhetene i dette tilfellet ble detektert ved områder med en endring i slope eller normalvektoren i z-retningen, tilsvarende det som er gjort i El-Halawany *et al.*[51]. Vosselman & Liang[49] og Denis *et al.*[52] ser derimot på en endring i høyden.

Antakelsen gjort i denne oppgaven medfører som observert noen begrensninger, siden deler av en fortauskant ofte kan være så lav at den ikke blir fanget opp eller rett og slett ikke har en stor nok endring i brattheten. Videre er man også avhengig av en fullstendig bakkeklasse for å få et bra resultat, noe Figur 5.1 et godt eksempel på.

Ved en rasteranalyse, som det er gjort i GRASS og delvis i TerraScan, forsvinner også høydeverdien til de detekterte fortauskantene. Det gjør at ikke er mulig å skille mellom en eventuell topp og fot, noe som ofte er av interesse. Høydeverdien for fortauskantene ved bruk av LIS blir heller ikke riktig, da det ved tynningen blir beregnet nye punkter på bakgrunn av gjennomsnittverdien i 3D til punktene rundt.

Ved bruk av såpass store datasett som høyoppløselige laserdata fører med seg, er det også verdt å nevne at det går med en del prosesseringstid. Ved konverteringen av laserdata til raster blir denne kortet ned betydelig. Det må legges til at det som oftest er nødvendig med en filtrering på forhånd, som det ble gjort i dette tilfellet.

Sammenligning med FKB-A

Avlutningsvis var det av interesse å sammenligne punktene med nøyaktighetskravet til FKB-A i grunnriss, spesifisert til 0.2m.

Fra tabell 4.1-4.3 observeres det at fortauskantene som ble fremstilt ved LIS og GRASS har en RMSE-verdi som er lavere enn denne grensen. Den vestlige fortauskanten fremstilt med GRASS er såpass ufullstendig at denne velges å forkastes i dette tilfellet. Med andre ord ser det ut til at tre av de totalt seks fremstilte fortauskantene kan oppfylle nøyaktighetskravet til FKB-A.

5.2 Takkanter

Begge metodene som var fremstilt for detektering av takkanter tok utgangspunkt i at det blir registrert to retursignal ved en takkant, en når første delen av pulsen treffer kanten og en når resten treffer bakken. Det som skiller metodene fra hverandre er hvordan området som befant seg på kanten av bygningene ble valgt ut og dette medførte også noen forskjeller i resultatet.

Nøyaktighet og fullstendighet

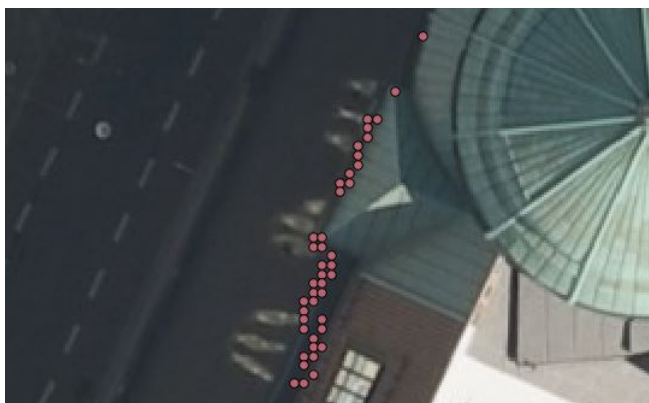
Fra tabell 4.4-4.9 observeres det at RMSE til de fremstilte takkantene jevnt over er svært høy, både ved bruk av TerraScan og GRASS. Det var derfor nødvendig med en nærmere

betraktning av plottene for å se hva dette skyldtes.

Plottene til takkantene generert fra TerraScan, B.7-B.12, viser noen interessante resultater. Alle plottene, bortsett fra takkant 3, har områder der de fremstilte punktene følger takkanten svært bra, men på grunn av mye støy i enkelte områder blir den totale RMSE dratt opp betraktelig. Som nevnt i metodedelen ga ikke bygningsklassifiseringen et fullstendig nok resultat og det var derfor nødt til å inkludere alle punkt som befant seg innenfor en satt radius. Selv om området rundt var filtrert på forhånd medførte dette en god del støy i form av vegetasjon som ikke ble tatt med i vegetasjonsklassifiseringen eller andre uklassifiserte objekter som for eksempel ledninger.

Takkant 3 var den som kom ut aller dårligst ut for TerraScan. Denne ligger i et typisk problemområde med mye vegetasjon som er like høy eller høyere enn bygningene. Vegetasjonsklassifiseringen som var gjort i dette i tilfellet er i tillegg svært grov, noe som fører til et enda dårligere resultat i slike områder.

Fra plottene til takkantene fra GRASS, B.13-B.18, ble det registrert noen litt spesielle trender. For det første er antallet punkt som er detektert langs med disse kantene svært høyt sammenlignet med TerraScan. Dette kan forklares ved først og fremst at grensen for høyden mellom første og siste restursignal ble satt lavere i dette tilfellet enn i TerraScan. Dette ble gjort fordi det var ønskelig nok punkter ved klassifiseringen for fullstendige takkanter. Punktene fra TerraScan er i tillegg tynnet, noe som gir en litt lavere tetthet. Videre observeres det noen svært tykke områder med punkter i disse plottene, se figur B.13 og B.14. Dette kommer av at punktene får en “kvadratisk” mønster når de ble konvertert til raster og tilbake til vektor igjen.



Figur 5.2: *Eksempel på mønstert som en raster medfører.*

Det observeres her også at det er noen deler som ser ut til å følge takkantene bra, men i en noe mindre grad enn punktene fra TerraScan. I tillegg er det også noen områder som ikke følger takkantene, men heller et område lenger inn på taket. Se Takkant 2 og 4. Dette kommer først og fremst fra forsøket på forbedringen av filterområdet. For å fjerne støy fra dette området ble dette konvertert til en vektor. Før denne konverteringen var det nødvendig å foreta en tynning av dette området som resulterte i noen svært ujevne segmenter langs med takkantene. Dette var særlig gjeldene på de delene av takkanten som ikke var rette. Disse ujevnheten ble forsøkt å rettes ut ved bruk av verktøyet “v.generalise”, men dette resulterte kun i et dårligere resultat andre steder og derfor ble originalen beholdt.

Når det kommer til fullstendigheten til takkantene observeres det at høy vegetasjon som befinner seg i nærheten av bygningene fører til ufullstendige områder. Dette forekommer særlig for Takkant 1 og Takkant 3 ved bruk av begge metodene. Som nevnt over er vegetasjonsfilteringen gjort i TerraScan svært grov og dette gjelder for bruk av GRASS

også. Her ble vegetasjonen fjernet ved å trekke fra et utvidet område med steder der det var flere enn to returpulser.

Vurdering av metodene

Som nevnt innledningsvis ligger forskjellen i de to fremstilte metodene i hvordan punktene som befinner seg på kanten av bygningene blir bestemt.

Ved bruk av TerraScan ble det først foretatt en bygningsklassifisering der punkter med en avstand mellom første og siste retur større enn en satt grense ble hentet ut fra bygningsklassen. Punktene som befant seg i grenseområdet mellom bygninger og bakken ble definert som kantpunkter. Denne antakelsen medfører med andre ord at det kreves en svært fullstendig bygningsklasse og bakkeklasse. Dette ekskluderer i tillegg punkter på takkanter som ikke befinner seg i grenseområdet mellom bakke og bygninger, for eksempel mellom to plan på et hus eller lignende. Som observert i denne oppgaven var det et vanskelig å få en fullstendig nok bygningsklasse og det er her den største utfordringen knyttet til denne metoden ligger. Videre observeres det at kantene i dette området er relativt komplekse og består ofte av flere plan i nærheten av hverandre, for eksempel øvre delen av Takkant 4. Dette gjør at det kan bli definert flere takkanter i nærheten av hverandre. En videre filteringsmetode for å skille mellom disse er derfor nødvendig.

Metoden som ble fremstilt for GRASS definerer takkantene som områder med en lokal signifikant endring i standardavviket til høyden, tilsvarende Li *et al.*[56]. Dette medfører som observert tidligere at høy vegetasjon også blir tatt med. Etter at vegetasjonen var trukket fra var det fortsatt noe støy igjen og det var derfor nødvendig med en vektorisering for å rydde opp i resultatet. Det som svekker resultatet i denne sammenhengen er først og fremst at tynningen av filterområdet er såpass ujevn, som igjen skyldes at filterområdet er såpass bredt. Sett i etttertid skulle også grenseverdiene i det fremstilte FLDM vært satt noe høyere for å unngå noe av støyen på resultatet og for å forsikre at punktene som blir hentet ut faktisk befinner seg på kanten av bygningene.

Det observeres fra begge metodene at høy vegetasjon i nærheten av bygningene skaper i problemer. Siden det var ønskelig å benytte seg av områder med flere retursignal for klassifisering av takkanter var det viktig at vegetasjonen var filtrert tilstrekkelig bort. Av denne grunn ble det avgjort at vegetasjonsklassen skulle heller inneholde litt ekstra enn litt for lite, noe som gjorde at noe av bygningene havnet i vegetasjonsklassen.

Jevnt over observeres det fra begge metodene at den høye oppløsningen til datasettet gir tilstrekkelig med punkter langs kanten av bygningene, men at det også fører med noen utfordringer knyttet til støy.

Sammenligning med FKB-A

Fra de totalt 12 forsøkene på detektering av takkanter er det kun en, Takkant 6 fra GRASS, som ga indikasjoner på at kravet til FKB-A var oppfylt.

5.3 Fasadeliv

Det siste objektet som ble forsøkt klassifisert var fasadeliv. De to metodene som ble fremstilt i TerraScan og LIS ble videre anvendt på to områder, "Fasadeliv fot" og fasadelivet som fulgte trenden 1.5m over bakken.

Nøyaktighet og fullstendighet

Fra Tabell 4.10 og 4.11 observeres det en svært høy RMSE for det detekterte fasadelivet fra TerraScan og det ble også her tatt en nærmere titt på plottene.

Fra B.19-B.24 observeres det i plottene en trend av varierende størrelse som følger fasitlinjen, i tillegg til svært mye støy. Dette var som forventet, da det ikke er satt noe nærmere krav i TerraScan bortsett fra egenskapen ved at fasadelivet skulle befinne seg i område under takkantene med en satt høyde over bakken. Dette gjør at trapper, sykkelstativ og eventuelt deler av andre objekt blir tatt med i klassifikasjonen. Det ser ikke ut til å være noen store forskjeller mellom “Fasadeliv fot 1” og Fasadeliv 1”, men noe mer støy for “Fasadeliv 2 -1.5m” sammenlignet med “Fasadeliv fot 2”. “Fasadeliv 3 - 1.5m” gir et klart bedre resultat enn “Fasadeliv fot 3”. Alt i alt ser “Fasadeliv 3 -1.5m” til å gi det beste resultatet hvis det sees bort fra noe av støyen. Dette er også til sammenligning en mye mindre kompleks flate enn de to andre.

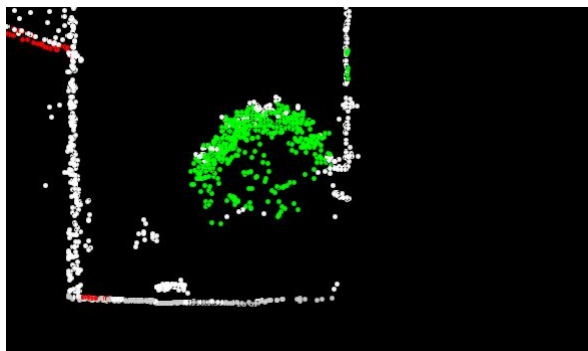


Figur 5.3: “Fasadeliv 3 - 1.5m” plottet mot fasitlinjen.

For forsøkene på detektering av fasadelivet ved bruk av LIS var det kun to av de totalt seks forsøkene som gav et fullstendig nok resultat for beregning av nøyaktigheten. Fra plot B.25 ser “Fasadeliv 2 - 1.5m” ut å ha enkelte segmenter som følger flaten, med noen områder som faller et stykke utenom. “Fasadeliv 3 -1.5m” gir på en annen side et tilfredsstillende resultat i denne sammenheng.

Når det gjelder fullstendigheten i dette tilfellet var det, som nevnt over, svært forskjellige resultater på de klassifiserte områdene. Fasadelivene fra TerraScan ga jevnt over en bedre fullstendighet enn LIS, der fire av de totalt seks forsøkene ble forkastet på grunn av for få punkt. Grunnen til at “Fasadeliv fot” ikke kom med i noen forsøkene fra LIS var nok fordi kravet til slope-verdien ble satt for høyt. De ser ut til at nedre delen av fasaden har en litt lavere slope-verdi enn lenger opp på veggen. For området 1.5m over bakken ser dette ut til å fungere bedre.

Ved bruk av LIS kom hverken “Fasadeliv 1 fot” eller “Fasadeliv 1 -1.5m” med i klassifiseringen. Ved en nærmere betraktning ser det ut til at vegetasjonen kombinert med flyretningen[57] fører at dette området er såpass ufullstendig.



Figur 5.4: Vegetasjon som blokkerer fasadelivet. På grunn av flyretningen er veggen til venstre mer fullstendig

For resultatene fra TerraScan kan det observeres en litt bedre fullstendighet for det “Fasadeliv 1” både oppe og nede, men det mistenkes at dette for det meste er støy.

I tillegg til nøyaktigheten og fullstendigheten til selve resultatet er det i dette tilfellet også knyttet en del usikkerhet til de fremstilte fasitlinjene for fasadelivet. Som nevnt i analysekapittelet manglet det et par punkt for at de skulle representere fasadelivet i tilstrekkelig grad og derfor ble det satt ut punkter for hånd, noe som medfører noe usikkerhet. Disse ble satt ut med bakgrunn i FKB-dataene for fasadelivet i området, som var gamle data “konstruert ved å trekke målt takskjegg (målt med en takskjeggmåler) fra takkant” [61]. Fasadelivet er også et svært komplekst element, så det kan diskuteres hvorvidt en slik fasitlinje beskriver dette elementet godt nok. Denne mistanken forsterkes videre når “Fasadeliv 3 - 1.5m” fra LIS ga et såpass bra resultat sammenlignet med de andre. Dette gjør at det ikke er riktig å trekke noen konklusjoner på bakgrunn av nøyaktigheten i dette tilfellet.

Vurdering av metodene

I tillegg til utfordringene med klassifisering av vegger, omtalt i Zhang *et al.* [58] og Vosselman *et al.* [59], medfører fasadeliv noen nye problemer. I dette tilfellet er det kun et avgrenset område av veggen som er av interesse og dette setter høyere krav til en jevn fordeling av punkter over hele veggen.

Metoden fremstilt ved bruk av TerraScan tar utgangspunkt i de klassifiserte bygningene, og definerer interesseområdet som det som befinner seg rett under. Dette gir en svært grov klassifisering av veggene med mye støy. I likhet med metoden for takkantene benyttes den samme måten å filtrere ut vegetasjon, noe som gjør at deler av bygningene i nærheten av høy vegetasjon blir filtrert bort.

Ved bruk av LIS derimot settes det strengere krav til hva som er definert som en vegg. Denne filtrerer først ut mulige områder med vegger, der videre punkter med en slope på mer enn 80 grader blir hentet ut. Punkter som ligger mellom 1 til 2 meter over bakken lagt til “Fasadelivet 1.5m” over bakken og punktene 0 til 0.5m over bakken før det ble foretatt en tynning.

Som det ble observert ga TerraScan et mer fullstendig resultat enn LIS, men det må videre vurderes hva av dette som er ren støy og hva som faktisk befinner seg på fasaden. På grunn av dette er det grunn til å tro at punktene klassifisert fra LIS faktisk befinner seg på fasaden.

Sammenligning med FKB-A

Av de totalt 12 forsøkene gav kun “Fasadeliv 3 -1.5m”, klassifisert med LIS, en indikasjon på at nøyaktigheten tilfredstilte kravene til FKB-A i grunnriss.

5.4 Samlet vurdering av metodene

Avslutningsvis var det også av interesse å gi en samlet vurdering av metodene som det var kommet frem til i denne oppgaven.

Likheten for alle metodene som er fremstilt er at de avhenger av fullstendige klasser som det videre skal foretas en analyse av. Metodene for fremstilling av fortauskanter blir med andre ord den mest robuste å regne i denne sammenheng, da disse avhenger i størst grad av en fullstendig bakkeklasse og ikke påvirkes så mye av en unøyaktig bygningsklasse. Takkantene og fasadelivet derimot avhenger på sin side av en fullstendig bakkeklasse, bygningsklasse og vegetasjonsklasse. Den sistnevnte har skapt en del trøbbel i denne oppgaven, da den har blitt gjort noe grovt i denne oppgaven.

Felles for metodene som ble fremstilt ved bruk av TerraScan var at de krevde noen flere litt spesielle mellomsteg for å komme frem til ønsket resultat. Dette gjelder også metoden for takkanter fra GRASS GIS. Metodene fremstilt ved LIS var derimot en del mer intuitive og rett fram.

Når det gjelder hvordan disse metodene ville fungere på andre datasett er det forsøkt å gjøre disse så lite “skreddersydde” som mulig. På bakgrunn av de verktøyene som er benyttet skal disse metodene i prinsippet fungere på andre høyoppløselige punktskyer fra urbane områder. Der det har blitt sett etter en avvik i høyde, foretatt en bufring eller punkt over en viss høyde har blitt inkludert i en klasse må det kanskje tilpasses litt det enkelte datasettet som benyttes. Testområdet i denne oppgaven var på grunn av fasitdataene svært avgrenset, noe som gjør at det ikke er mulig å trekke noen endelig konklusjon på bakgrunn av det som er gjort i denne oppgaven. Men når det er sagt kan dette argumenteres for å være et godt testområde på grunn av den høye vegetasjonen i nærheten bygninger.

5.5 Videre arbeid

Som det kommer frem i diskusjonsdelen over er det en rekke svakheter og begrensninger med metodene som er fremstilt i denne oppgaven. Metodene tar utgangspunkt i hva som er mulig i de forskjellige verktøyene, noe som snevrer inn valgmulighetene en del. Videre utforskning av en kombinasjon av de ulike metodene og verktøyene hadde derfor vært interessant. Dette gjelder særlig for takkantene, da det sannsynligvis kan fjernes en del støy ved en bedre filtrering av vegetasjonen og skille mellom de ulike takplanene som ligger i nærheten av hverandre ved en segmentering, som i Michelin *et al.*[54].

Fortauskantene fra LIS var det eneste tilfellet der begge objektene ga indikasjoner på en nøyaktighet som oppfyller FKB-A. En videre utforskning av muligheter for vektorisering tilsvarende Vosselman & Liang[49] hadde derfor vært interessant. En vektorisering gir også muligheter til å filtrere bort punkter som ikke oppfyller eventuelle krav om lineær sammenheng mellom punktene, noe som kan forbedre resultatet mer. Dette hadde også vært av interesse for eventuelt forbedrede takkanter.

Når det gjelder fasadelivet hadde vært interessant å se på mulighetene ved å detektere dette ved veien om en 3D-modellering av bygningen. På denne måten kan eventuelle ufullstendige områder dekkes igjen og et mer komplett fasadeliv kan hentes ut. I tillegg

hadde det vært interessant å se hva forskjellige skannemønstre medfører med tanke på fullstendigheten til vegger og vertikale fasader i urbane områder.

I Vosselman & Liang[49] blir det også sett på hvordan en lavere punktethet påvirker resultatet og dette hadde vært interessant for fortauskantene i dette tilfellet også. Metodene for takkantene forutsetter derimot en svært høy punktethet, så en slik sammenligning hadde vært lite hensiktsmessig.

En videre uttesting av metodene for fortauskanter og takkanter på andre områder med varierende egenskaper hadde også vært interessant.

Kapittel 6

Konklusjon

I denne oppgaven har det vært forsøkt å fremstille metoder, med utgangspunkt i valgte programvarer og tilnærminger, for klassifisering av utvalgte objekt i urbane områder ved bruk av høyoppløselige laserdata. Siden dette var objekter som vanligvis ble fremstilt ved bruk av fotogrammetriske metoder og landmåling var det også av interesse å sammenligne resultatet med kravet for FKB-A. I tillegg var det også av ønskelig å gi en enkel vurdering av metodene.

For fortauskantene var det fremstilt totalt tre metoder ved bruk av TerraScan, LIS og GRASS. Selv om alle metodene benytter seg av samme egenskap for å finne fortauskantene ble resultatet svært forskjellig. Metoden fremstilt i TerraScan er den som gir det mest fullstendige resultatet, men på en annen side gir den dårligste nøyaktigheten. I tillegg krever denne metoden en del spesielle mellomtrinn for å oppnå ønsket resultat. Ved bruk av GRASS derimot ble det gjort en relativt enkel rasteranalyse av bakkeklassen, som også gir en bedre nøyaktighet enn TerraScan. Derimot fører denne metoden med seg en del støy som det er nødt til å filtrere bort. Dette medfører et til tider svært ufullstendig resultat. Metoden fremstilt ved LIS er den som gir den beste nøyaktigheten og er i likhet med metoden fremstilt for GRASS relativt rett fram. Denne gir sammenlignet med GRASS et mer nøyaktig og fullstendig resultat og blir derfor å regne som den beste av disse tre i dette tilfellet.

For takkantene var det fremstilt to metoder ved bruk av TerraScan og GRASS. Begge disse metodene benytter seg av egenskapen at det vil bli generert to retursignal på kanten av en bygning, men en forskjellig måte å filtrere ut punktene som ligger på kanten av bygningene. Metoden fra GRASS tar utgangspunkt i den endringen i høyde som en takkant medfører i terrenget mens metoden fra TerraScan definerer takkanten som enden av hus som befinner seg over bygningsklassen. Ingen av de fremstilte metodene gir en ønsket nøyaktighet og en relativt lik fullstendighet. På bakgrunn av de fremstilte plottene blir metoden fra TerraScan å regne som litt bedre i dette tilfellet. Det ser også ut til at denne kan gi et tilfredsstillende resultat hvis det blir foretatt en bedre vegetasjonsklassifisering.

For fasadelivet var det fremstilt to metoder ved bruk av TerraScan og LIS. Metoden fremstilt ved TerraScan var såpass grov i dette tilfellet at denne velges å forkastes. Metoden fremstilt ved bruk av LIS satte derimot mer strengere krav til hva som skulle være punkter på fasaden og ga et mangefullt resultat. Det konkluderes med i dette tilfellet at til tross for den høye punkt tettheten i datasettet er det fortsatt vanskelig å få innsyn til hele vegger og vertikale fasader på hus grunnet hull som vegetasjonen og flyretningen fører med seg. Dette gjør seg enda mer gjeldene når utvalgte områder på veggene skal klassifiseres.

Av alle metodene fremstilt i denne oppgaven, gir kun metoden for fortauskantene fra LIS en indikasjon på at den befinner seg innenfor kravene til FKB-A for begge objektene

som ble klassifisert.

Bibliografi

- [1] **Crawford C.** (2013) *5 Ways to Use Lidar More Efficiently* [Internett] URL: <http://www.esri.com/esri-news/arcuser/summer-2013/5-ways-to-use-lidar-more-efficiently> [9. April 2014]
- [2] **Toth C.** (2009) The State-of-the Art in Airborne Data Collection Systems - Focused on LiDAR and Optical Imagery, *Photogrammetrische Woche 2009*
- [3] Fastest Growing Trend in Aerial LIDAR: Flying Slower, Lower Collecting Higher and Higher Point Densities [Internett] URL: <http://lidarcomm.com/id36.html>[3. Mars 2014]
- [4] LiDAR Pulse Densities Comparison - white paper [Internett] URL: <http://www.watershedsciences.com/about/news/lidar-pulse-densities-comparison-white-paper> [9. April 2014]
- [5] Granite Dells, Arizona Dataset Now Available [Internett] URL: http://www.opentopography.org/index.php/news/detail/granite_dells_arizona_dataset_now_available [12. mai 2014]
- [6] **Holtebekk T. & Ringvold A.** (2009). Laser: intens lyskilde. *Store norske leksikon*. [Internett] Tilgjengelig: http://snl.no/laser/intens_lyskilde [14. Januar 2014]
- [7] **Bharat L.** (2008) Airborne Altimetric LiDAR: Principle, Data collection, processing and Applications, [Internett] URL: http://home.iitk.ac.in/~blohani/LiDARSchool2008/Downloads/LiDAR_notes/LiDAR_Full_Notes.pdf [16. Januar 2014]
- [8] **Angelopoulou E. & Wright Jr J. R.** (1999) Laser Scanner Technology, [Internett] URL: http://repository.upenn.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1083&context=cis_reports [13. Januar 2014]
- [9] Point Cloud From Laser Scanning – A Useful Planning Tool, [Internett] URL: <http://blomasa.com/news/point-cloud-from-laser-scanning-a-useful-planning-tool.html> [16. Januar 2014]
- [10] **Tamás L.** (2010) Data acquisition and integration 4., Laser Scanning, [Internett] URL: http://www.tankonyvtar.hu/en/tartalom/tamop425/0027_DAI4/adatok.html [20. Februar 2014]
- [11] **Barstad B.** (2011) Laserskanning fra fly. Forelesningsnotat GMFO205, UMB Hausten 2011
- [12] Koherent, *Store norske leksikon 2009* [Internett] URL: <http://snl.no/koherent>. [17. april 2014]

- [13] Monokromatisk, *Store norske leksikon* 2009 [Internett] URL:<http://snl.no/monokromatisk>. [17. april 2014]
- [14] Kartverket (2013) Produktspesifikasjon Nasjonal modell for høydedata fra laserskanning (FKB-Laser)
- [15] **Linderberger J.** (1993) Laser-Profilmessungen zur topographischen Geländeaufnahme, *Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften. Reihe C Heft 400*, 1995
- [16] **Vosselman G.** (2000) Slope Based Filtering of Laser Altimetry Data, *IAPRS, Volume XXXIII 3b*, 2000
- [17] **Sithole G.** (2001) Filtering of laser altimetry data using a slope adaptive filter, *IAPRS, Volume XXXIV-3/W4*, 2001
- [18] **Weidner U. & Förstner W.** (1995). Towards automatic building reconstruction from high resolution digital elevation models, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing Volume 50 Issue 4*, 1995
- [19] **Axelsson, P.** (2000) DEM Generation From Laser Scanner Data using Adaptive TIN Models, *IAPRS, Volume XXXIII B4*, 2000
- [20] **Hansen W. & Vögtle T.** (1999) Extraktion der Geländeroberfläche aus flugzeuggetragenen Laserscanner-Aufnahmen, *Photogrammetrie und Fernerkundung Geoinformation*, 1999
- [21] **Sohn G. & Dowman I.** (2002) Terrain surface reconstruction by the use of tetrahedron model with the MDL Criterion, *Terrain surface reconstruction by the use of tetrahedron model with the MDL criterion*, 2002
- [22] **Vosselman G & Maas H-G** (2010) Airborne and Terrestrial Laser Scanning, *Whittles Publishing, Scotland*, 2010
- [23] **Akel N. Zilberstein O. & Doytsher Y.** (2003) Automatic DTM Extraction from Dense Raw LIDAR Data in Urban Areas, *Semaine Professionnelle et 125 Anniversaire de la FIG*
- [24] **Tóvári D. & Pfeifer N.** (2005). Segmentation based robust interpolation- A new Approach to laser data filtering, *ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop Laser scanning*, 2005
- [25] **Rottensteiner F. & Briese Ch.** (2003) Automatic Generation of building models from lidar data and the intergration of aerial images, *ISPRS Volume XXXIV*, 2003
- [26] **Song JH., Han J., Yu KY., & Kim Y. I.** (2002) Assessing the possibility of land-cover classification using lidar intensity data, *ISPRS Commission III, Symposium 2002 : PCV02 Photogrammetric computer vision*, 2002
- [27] **Risbøl O., Amundsen H. R., Bollandås O. M. & Nesbakken A.** (2011) Flybåren laserskanning til bruk i forskning og til forvaltning av kulturminner og kulturmiljøer, *NIKU Rapport 45*
- [28] **Mæhlum L.** (2011) Fkb. *Store norske leksikon*. [Internett] URL: <http://snl.no/FKB>. [3. mai 2014]

- [29] FKB - Felles kartdatabase [Internett] URL: <http://www.statkart.no/Kart/Kartdata/Vektorkart/FKB/> [16. april 2014]
- [30] Kartverket (2012) SOSI Del 3 Produktspesifikasjon for FKB - Veg
- [31] Kartverket (2013) SOSI Del 3 Produktspesifikasjon for FKB – Bygning
- [32] **Fladby K. M.** (2012) Er Mobile Mapping egnet til å komplettere FKB-data og andre objekttyper i byområder?, *Masteroppgave UMB, 2012*
- [33] **Soininen A.** (2009) TerraScan User's Guide
- [34] **Soininen A.** (2012) New Features in TerraScan
- [35] Laserdata LIS [Internett] URL: <http://www.laserdata.at/products/index.jsp> [18. mars 2014]
- [36] LAsTools: award-winning software for rapid LiDAR processing [Internett] URL: <http://www.cs.unc.edu/~isenburg/lastools/> [18. mars 2014]
- [37] v.lidar.edgedetection [Internett] URL: <http://grass.osgeo.org/grass65/manuals/v.lidar.edgedetection.html> [18. mars 2014]
- [38] v.lidar.growing [Internett] URL: <http://grass.osgeo.org/grass65/manuals/v.lidar.growing.html> [18. mars 2014]
- [39] v.lidar.correction [Internett] URL: <http://grass.osgeo.org/grass65/manuals/v.lidar.correction.html> [18. mars 2014]
- [40] **Brovelli M., Lucca S.,** (2012) Comparison of GRASS-LiDAR modules–TerraScan with respect to vegetation filtering, *Applied Geomatics Volume 4, June 2012*
- [41] **Sánchez R. A. & Brovelli M. A.** (2007) LiDAR data filtering with GRASS GIS for the determination of digital terrain models, *Servicio de Sistemas de Información Geográfica y Teledetección, 2007*
- [42] ArcGIS Help 10.1 - Using lidar in ArcGIS [Internett] URL: <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#/015w0000003z000000> [19. mars 2014]
- [43] OPALS - Orientation and Processing of Airborne Laser Scanning data [Internett] URL: <http://geo.tuwien.ac.at/opals/html/index.html> [19. mars 2014]
- [44] Package opalsGeomorph [Internett] URL: http://geo.tuwien.ac.at/opals/html/pkg_opalsGeomorph.html [19. mars 2014]
- [45] eCognition LiDAR [Internett] URL: <http://www.ecognition.com/solutions> [19. mars 2014]
- [46] **Awrangjeb M., Ravanbakhsh M. & Fraser C. S.,** (2010) Automatic Detection of Residential Buildings Using LIDAR Data and Multispectral Imagery, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 65, 2010*
- [47] **Awrangjeb, M.** (2012) Automatic Reconstruction of Building Roofs through Effective Integration of LIDAR and Multispectral Imagery, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXII ISPRS Congress, 2012*

- [48] CloudCompare [Internett] URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/CloudCompare> [21. mars 2014]
- [49] **Vosselman G. & Liang Z.** (2009) Detection of Curbstones in Airborne Laser Scanning Data, *ISPRS Workshop Laserscanning '09*
- [50] **Vosselman, G. & Liang, Z.** (2012) Mapping Curbstones in Airborne and Mobile Laser Scanning Data, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation Volume 18, 2009*
- [51] **El-Halawany S., Moussa A., Lichti D., & El-Sheimy N.** (2011) Detection of Road Curb From Mobile Terrestrial Laser Scanner Point Cloud, *IAPRS Volume XXXVIII-5/W12, 2011*
- [52] **Denis E., Burck E. & Baillard C.** (2010) Towards Road Modelling from Terrestrial Laser Points, *IAPRS Volume XXXVIII 3A, 2010*
- [53] **Grohmann C. H.** (2011) A very brief introduction to GRASS-GIS using the fishcamp dataset [Internett] URL: http://geomorphometry.org/system/files/workshop_gmorph2011.pdf [3. mars 2014]
- [54] **Michelin J. C., Mallet C., David N.** (2012) Building Edge Detection Using Small-Footprint Airborne Full-Waveform LiDAR Data, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXII ISPRS Congress 2012*
- [55] **Rutzinger M., Höfle B., Geist T. and Stötter J.** (2006) Object-Based Building Detection Based on Airborne Laser Scanning Data Within GRASS GIS Environment, *Proceedings UDMS 2006: Urban Data Management Symposium.*
- [56] **Li J., Lia Y., Chapman M. A.** (2007) Building Edge Detection Extraction from LiDAR Based on Jump Detection in Non-Parameter Regression Modell, *IPRS Volume XXXVI-5/C55, 2007*
- [57] **Elberink S. O.** (2008) Problems in automated building reconstruction based on dense airborne laser scanning data, *IAPRS Volume XXXVIII B3a, 2008*
- [58] **He Y., Zhang C., Awrangjeb M. & Fraser C. S.** (2012) Automated Reconstruction of Walls from Airborne LIDAR Data for Complete 3d Building Modelling, *IAPRS Volume XXXIX B3, 2012*
- [59] **Vosselman G., Rutzinger M., Elberink S. O., & Pu S.,** (2009) Automatic Extraction of vertical walls from mobile and airborne laser scanning data, *ISPRS Archives - Volume XXXVIII-3/W8, 2009, Laserscanning '09*
- [60] **Wichmann V.** (2013) LIS Command Reference
- [61] RMS-error [Internett] URL: <http://support.esri.com/en/knowledgebase/GISDictionary/term/RMS%20error> [30. april 2014]
- [62] **Mao H. X., Shi W. Z.** (2008) New Methodology of Representing the Positional Error of Non-Point Features in GIS, *IAPRS Volume XXXVII B7, 2008*
- [63] **Axelsson, P.** (1999) Processing of laser scanner data – Algorithms and applications, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54, 1999*

- [64] **Kjørmo, R.** RE: Tilgang til testdata, *Personlig mail til Morten Gammelby*. [27.01.2014]
- [65] Kartverket (2007) Kontroll av geodata [Internett] URL: <http://www.statkart.no/Documents/Standard/Bransjestandarder%20utover%20SOSI/Kontroll-av-geodata-08-01-2007.pdf>
- [66] **Wichmann V.** (2013) LIS DESKTOP Tutorial
- [67] RANSAC [Internett] URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/RANSAC>

Vedlegg A

Utskrift av skriptet til “naboer.py”

```
#   Sortering etter naermeste nabo           #
#       Morten Gammelby 2014                 #

from __future__ import division
from math import atan2, sqrt

def nabo():

    fil= open('veggliv_2.csv', 'r')
        line = fil.readlines()
        a = line[0].split(';')
        x=[]
        y=[]
        z=[]

    for i in range(len(line)):
        a=line[i].split(',')
        x+=[float(a[0])]
        y+=[float(a[1])]
        z+=[float(a[2])]

    x1=x[y.index(min(y))]
    y1=y[y.index(min(y))]
    z1=z[y.index(min(y))]

    del x[y.index(min(y))]
    del y[y.index(min(y))]
    del z[y.index(min(y))]

    res = open('veggliv_2_sortert.txt', 'w')
    res.write('ID'+';'+ 'X'+';'+ 'Y'+';'+ 'Z'+'\n'+ '0'+';'+str(x1)+
';'+str(y1)+';'+str(z1)+'\n')

    minst=[]
    for i in range(len(x)):
        l=[]
```

```
for j in range(len(y)):
    x2=x[j]
    y2=y[j]
    dist=sqrt((x1-x2)**2+(y1-y2)**2)
    l+=[dist]

for k in range(len(l)):
    if l[k]==0.0:
        l[k]=999

ind = l.index(min(l))
minst+=[x[ind]]+[y[ind]]
x1=x[ind]
y1=y[ind]

res.write(str(i+1)+';'+str(x[ind])+';'+str(y[ind])+';'+str(z[ind])+'\n')

x[ind]=9999
y[ind]=9999
z[ind]=9999

res.close()
```

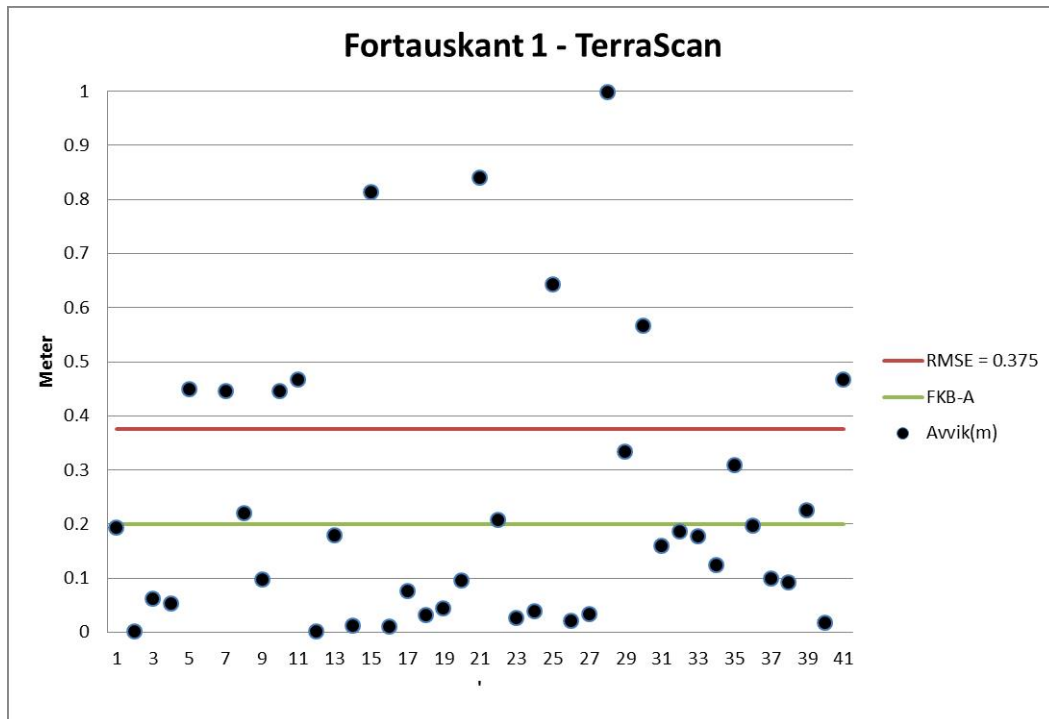
Vedlegg B

Plottene fra Excel

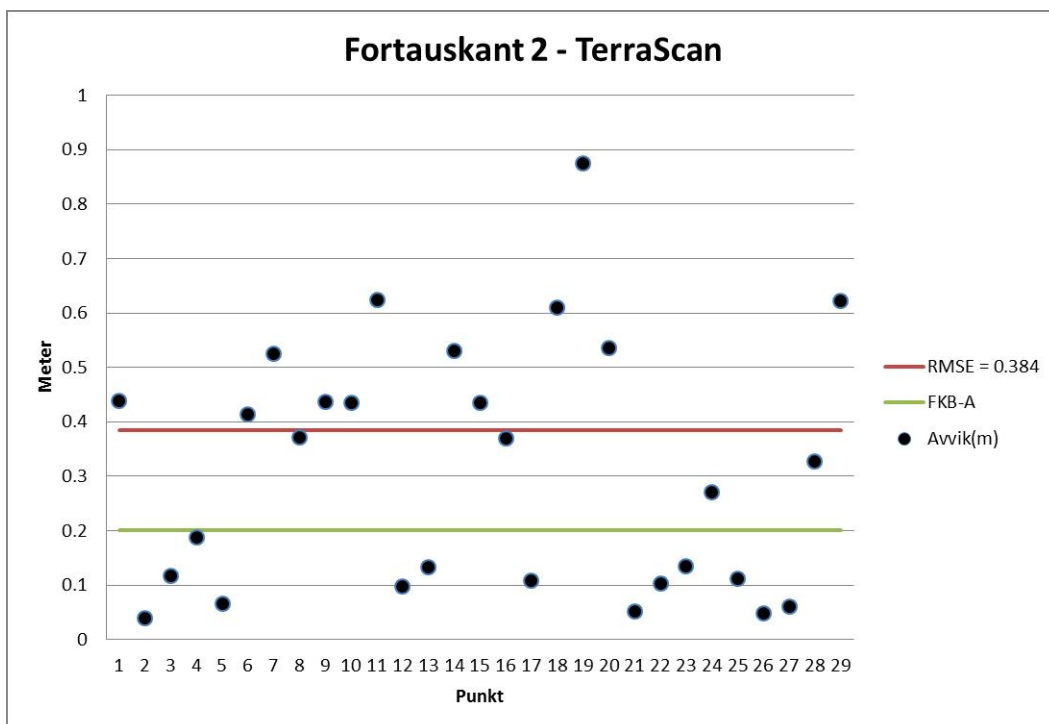
Plottene nedenfor viser avvikene fra de fremstilte punktene plottet mot fasitlinjene. Total RMSE er vist i rødt og kravet for stedfestingsnøyaktigheten er vist i grønt.

På grunn av stor forskjell i avvikene mellom de klassifiserte objektene går y-aksen fra 0m til 1m for fortauskantene mens for takkanter og fasadeliv går den fra 0m til 5m.

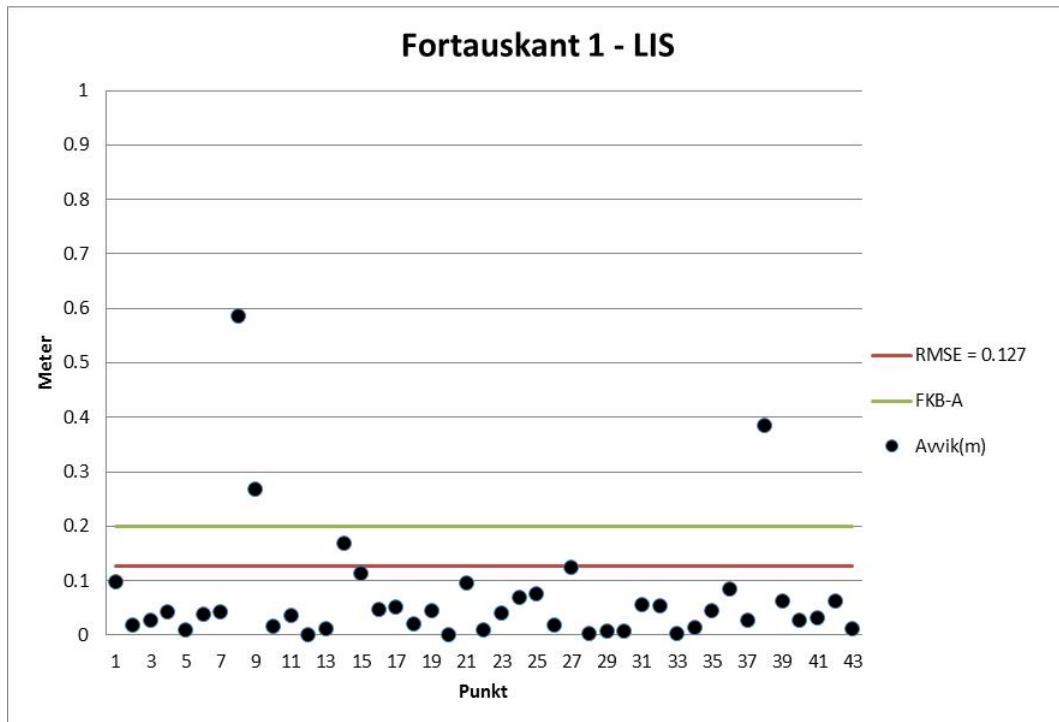
Fortauskanter



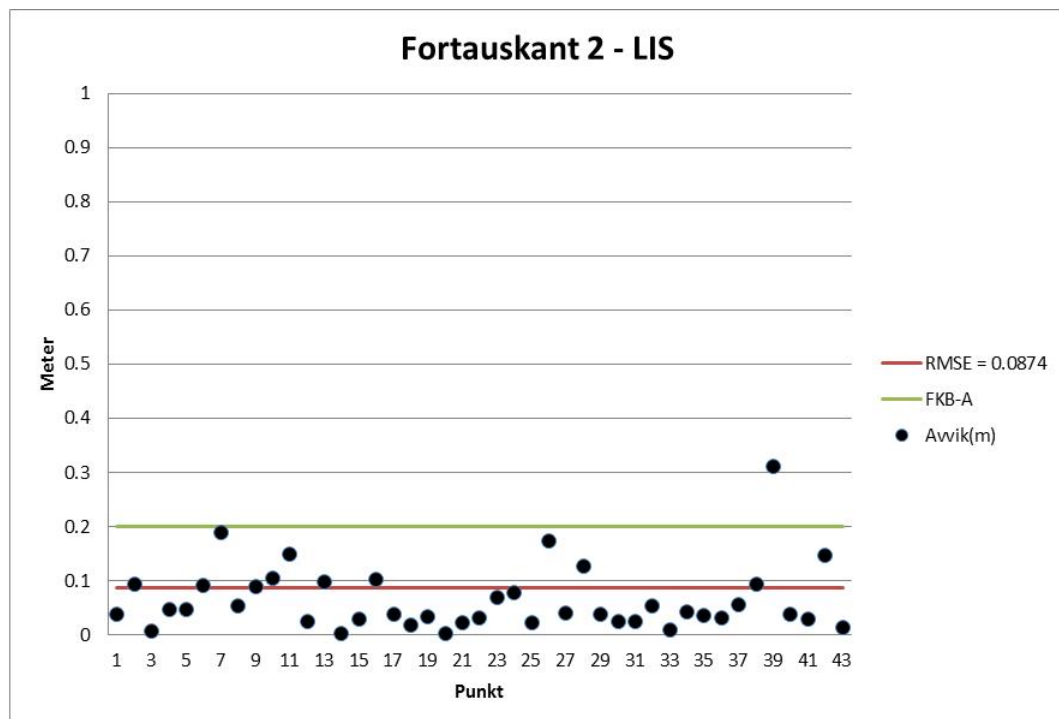
Figur B.1: Avvikene ved "Fortauskant 1" fra TerraScan plottet mot fasitlinjene.



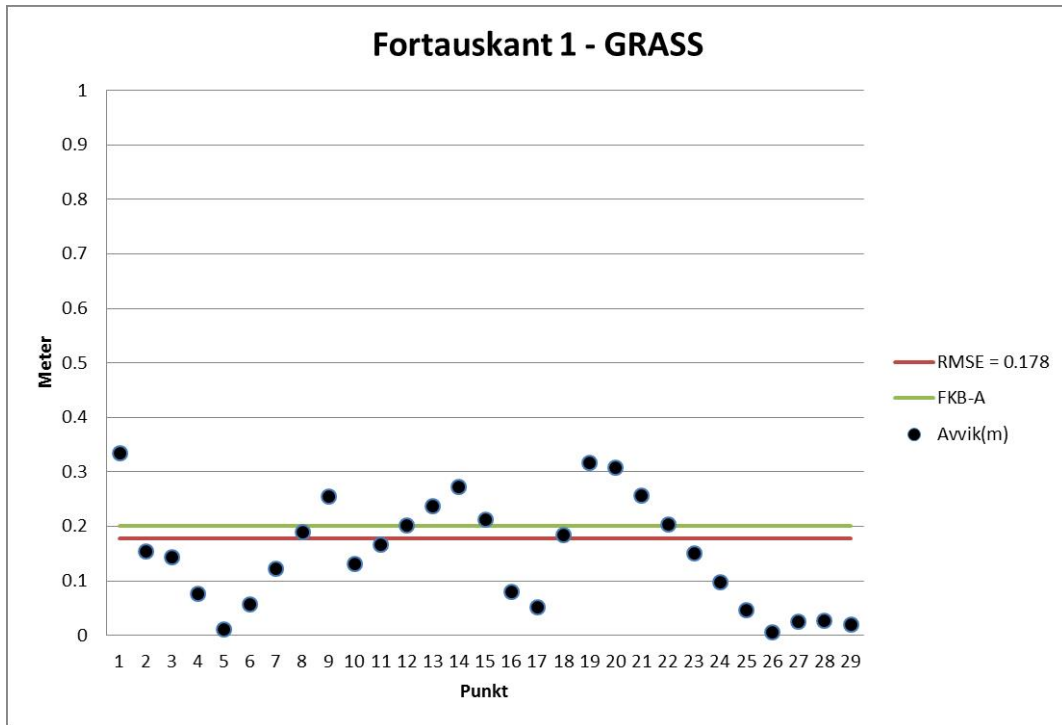
Figur B.2: Avvikene ved "Fortauskant 2" fra TerraScan plottet mot fasitlinjene.



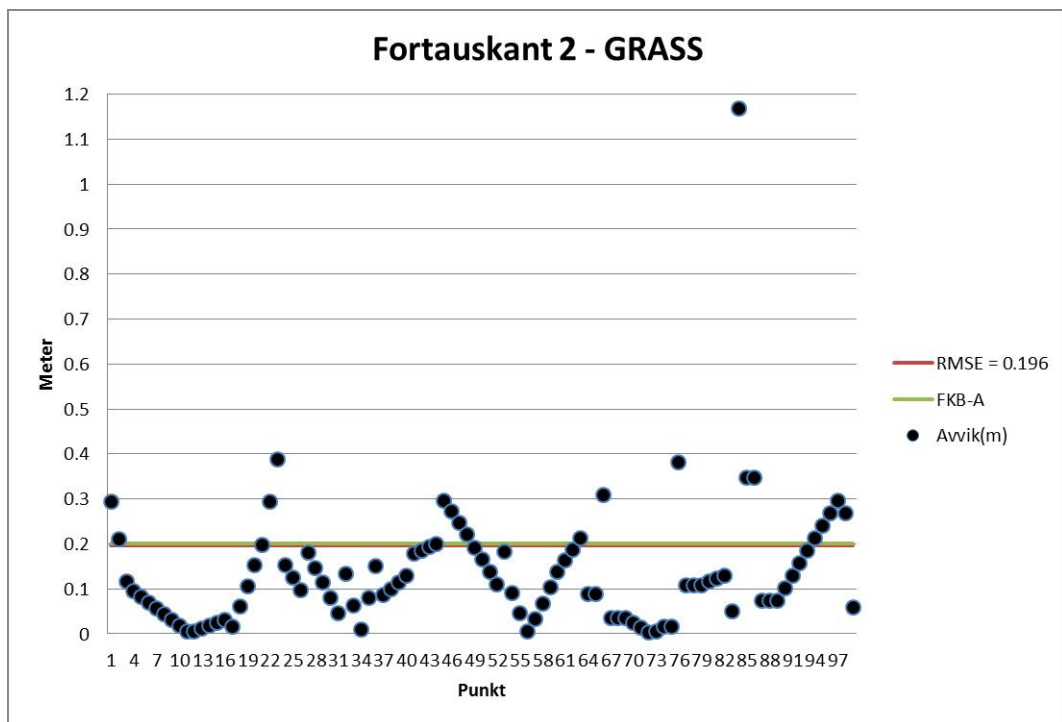
Figur B.3: Avvikene ved "Fortauskant 1" fra LIS plottet mot fasitlinjene.



Figur B.4: Avvikene ved "Fortauskant 2" fra LIS plottet mot fasitlinjene.

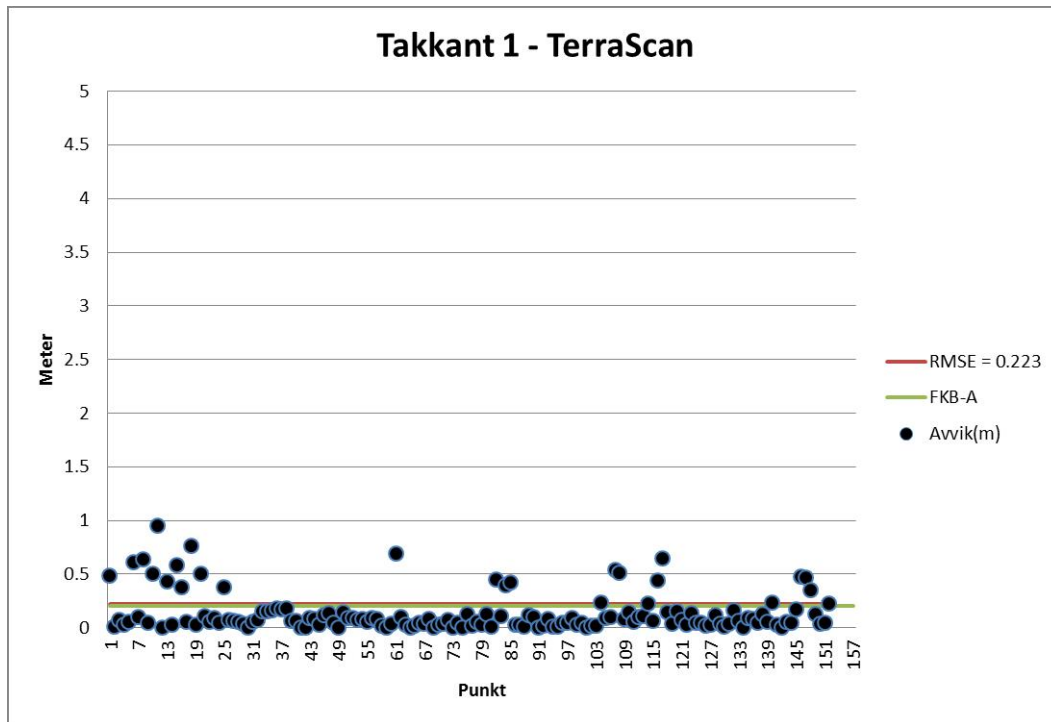


Figur B.5: Avvikene ved "Fortauskant 1" fra GRASS plottet mot fasitlinjene.

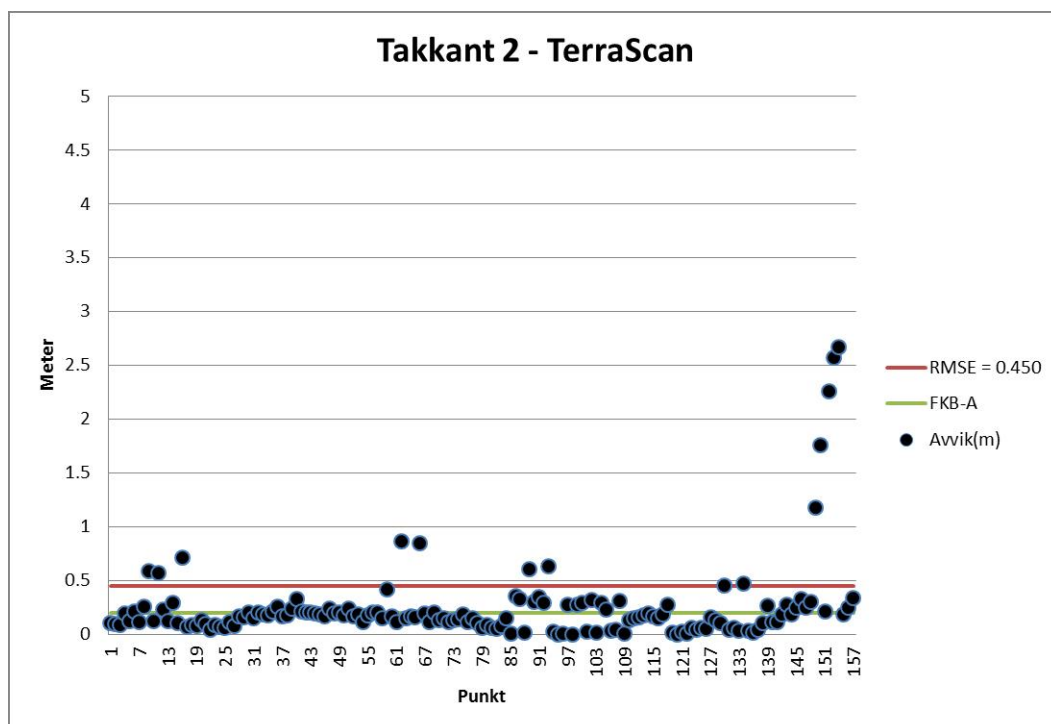


Figur B.6: Avvikene ved "Fortauskant 2" fra GRASS plottet mot fasitlinjene.

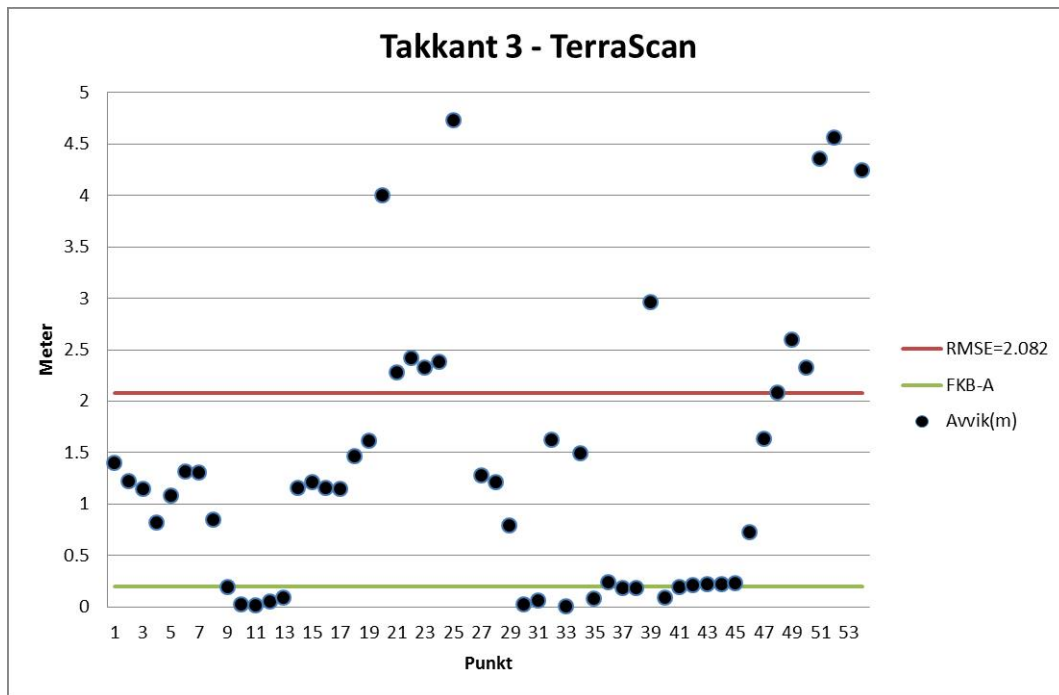
Takkanter



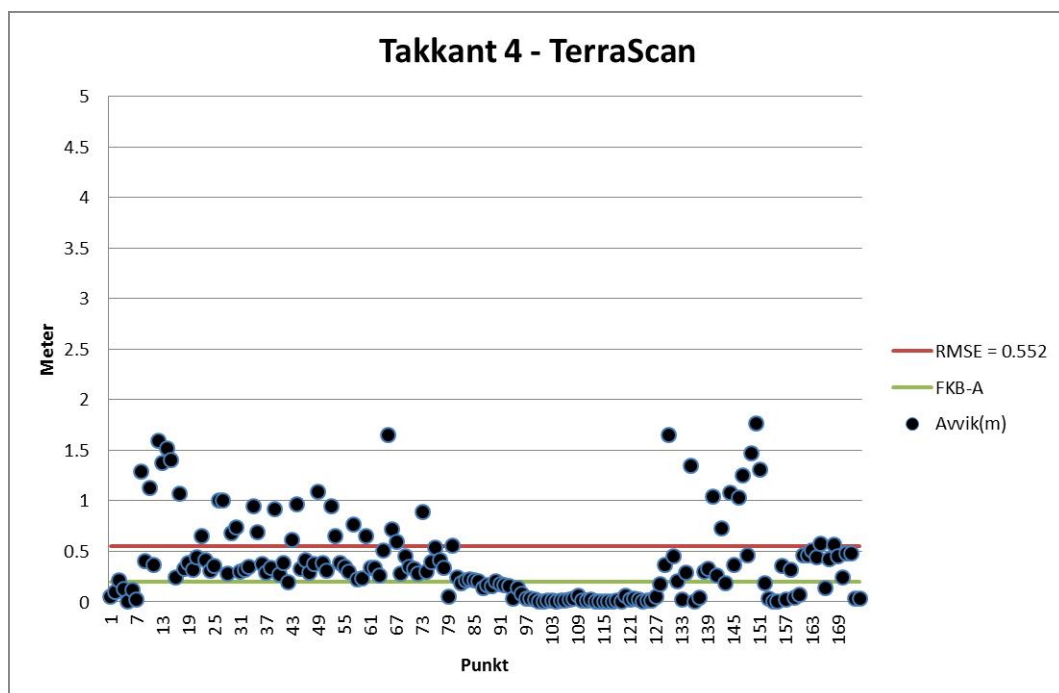
Figur B.7: Avvikene ved "Takkant 1" fra TerraScan plottet mot fasitlinjene.



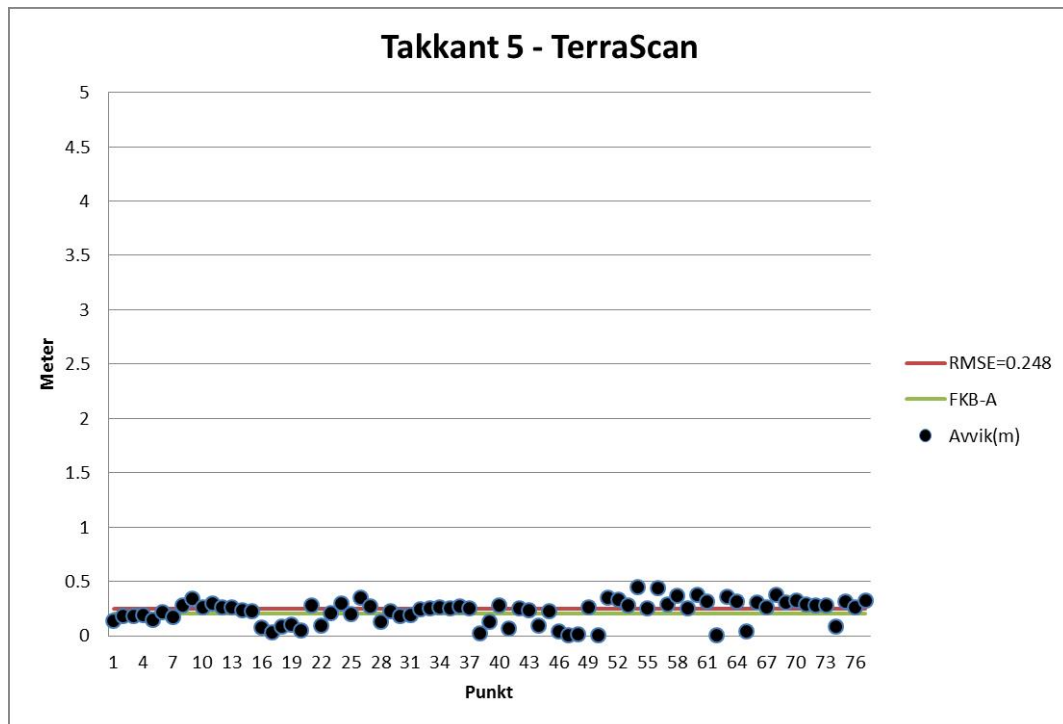
Figur B.8: Avvikene ved "Takkant 2" fra TerraScan plottet mot fasitlinjene.



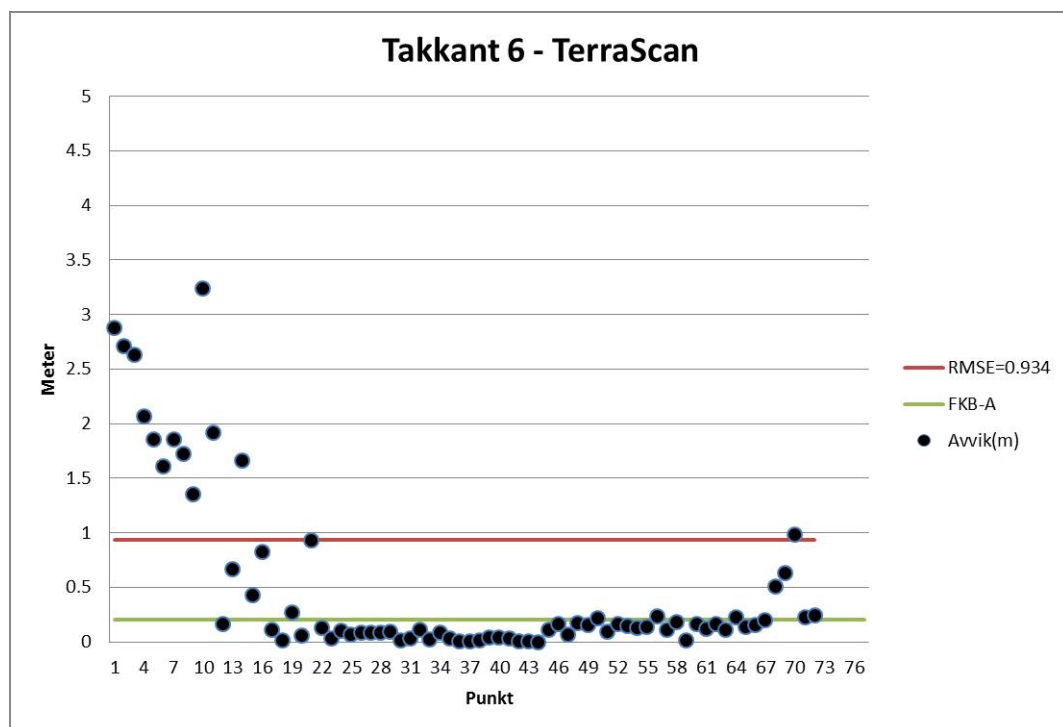
Figur B.9: Avvikene ved "Takkant 3" fra TerraScan plottet mot fasitlinjene.



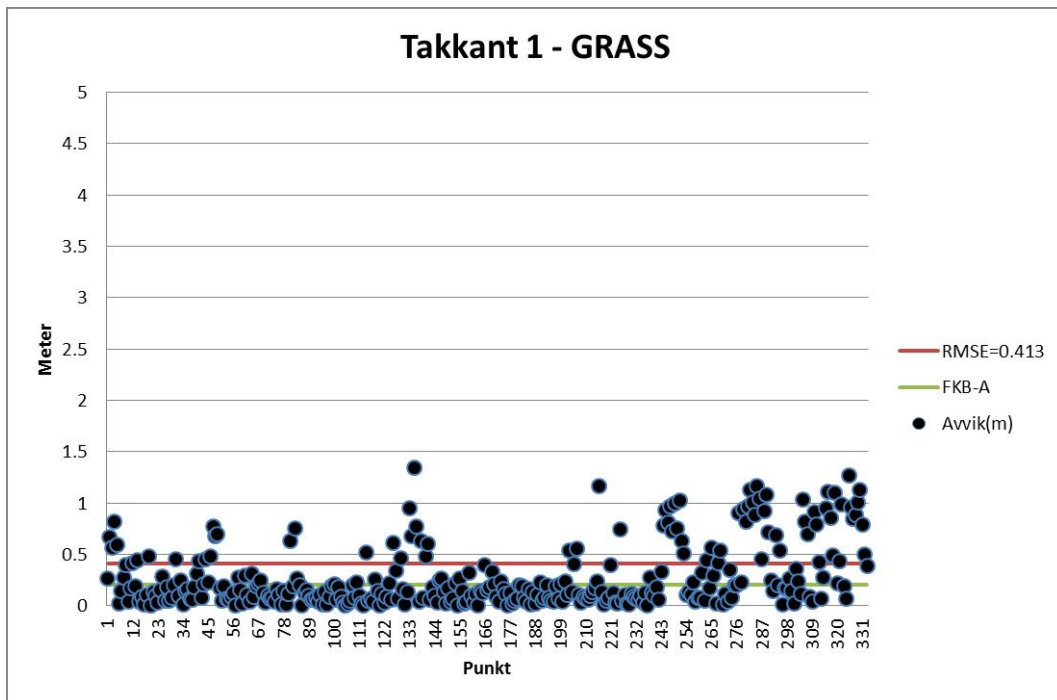
Figur B.10: Avvikene ved "Takkant 4" fra TerraScan plottet mot fasitlinjene.



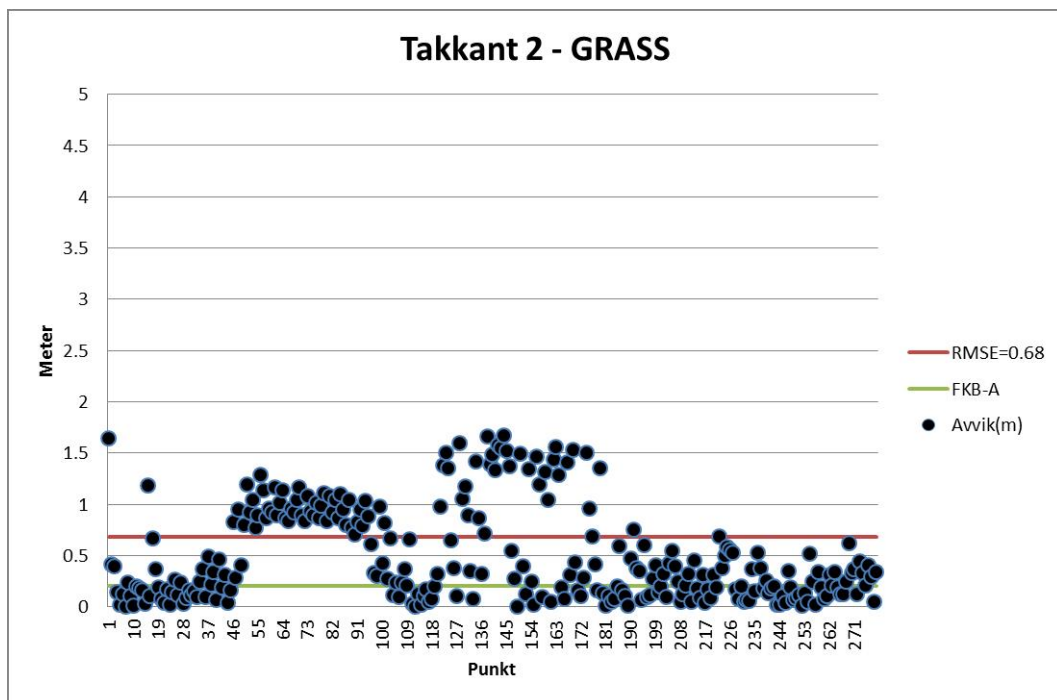
Figur B.11: Avvikene ved "Takkant 5" fra TerraScan plottet mot fasitlinjene.



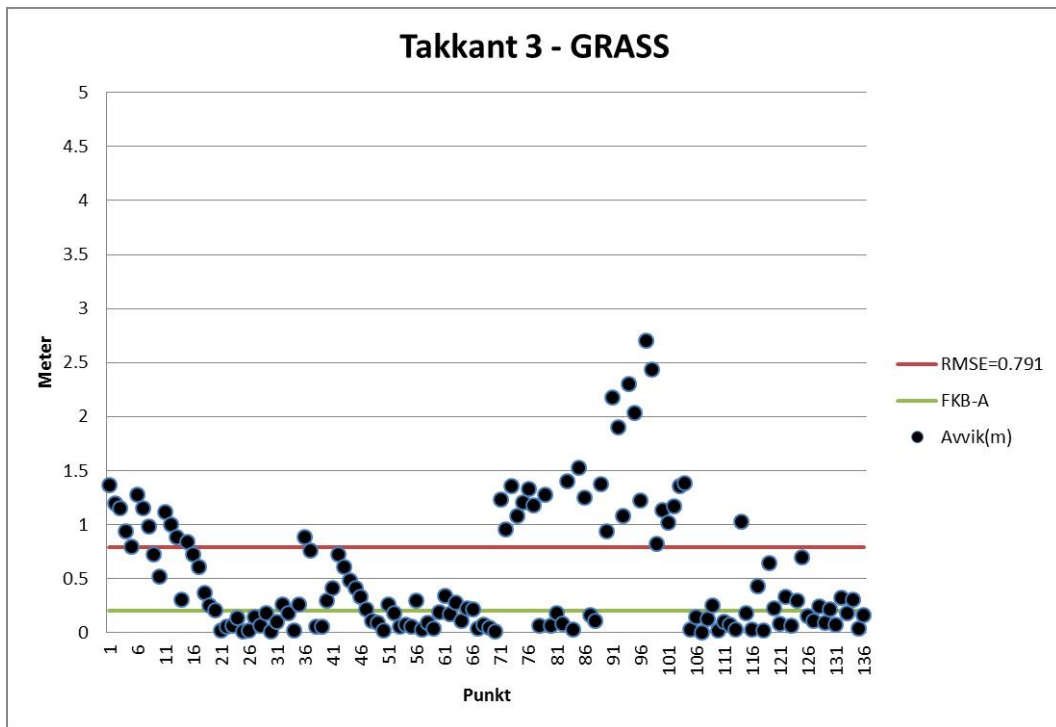
Figur B.12: Avvikene ved "Takkant 6" fra TerraScan plottet mot fasitlinjene.



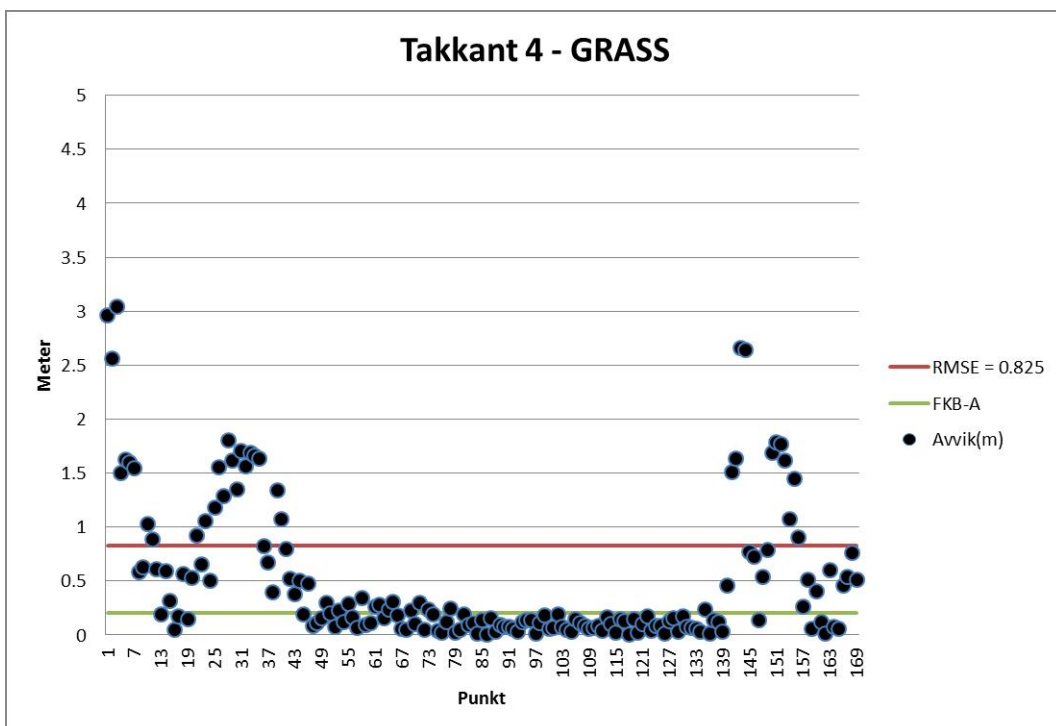
Figur B.13: Avvikene ved "Takkant 1" fra GRASS plottet mot fasitlinjene.



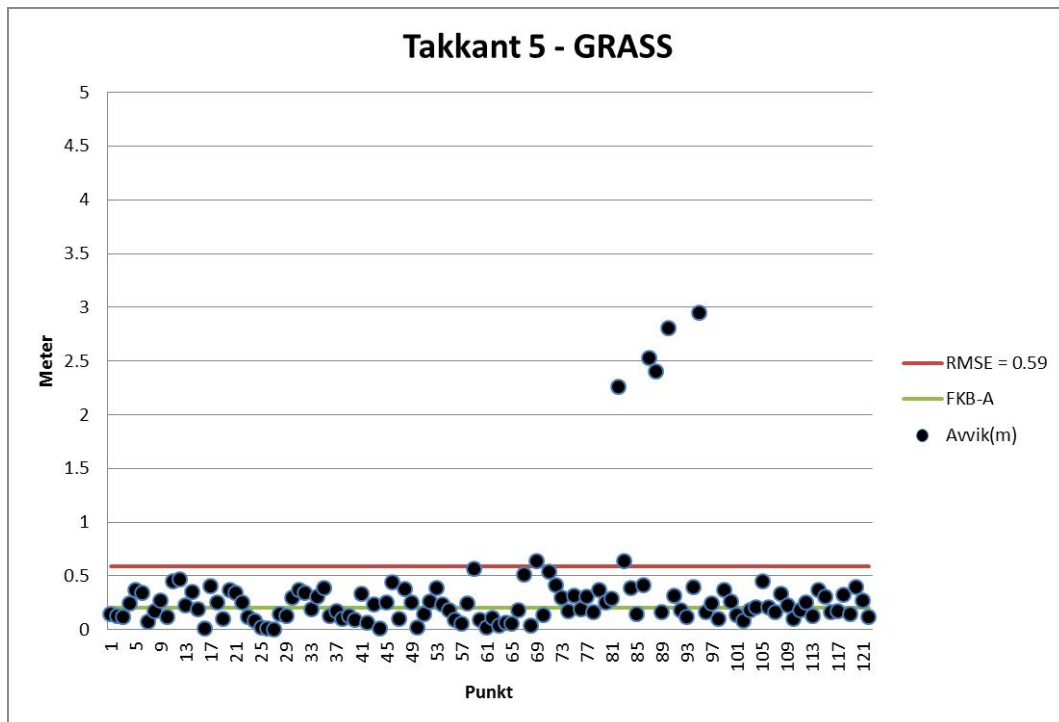
Figur B.14: Avvikene ved "Takkant 2" fra GRASS plottet mot fasitlinjene.



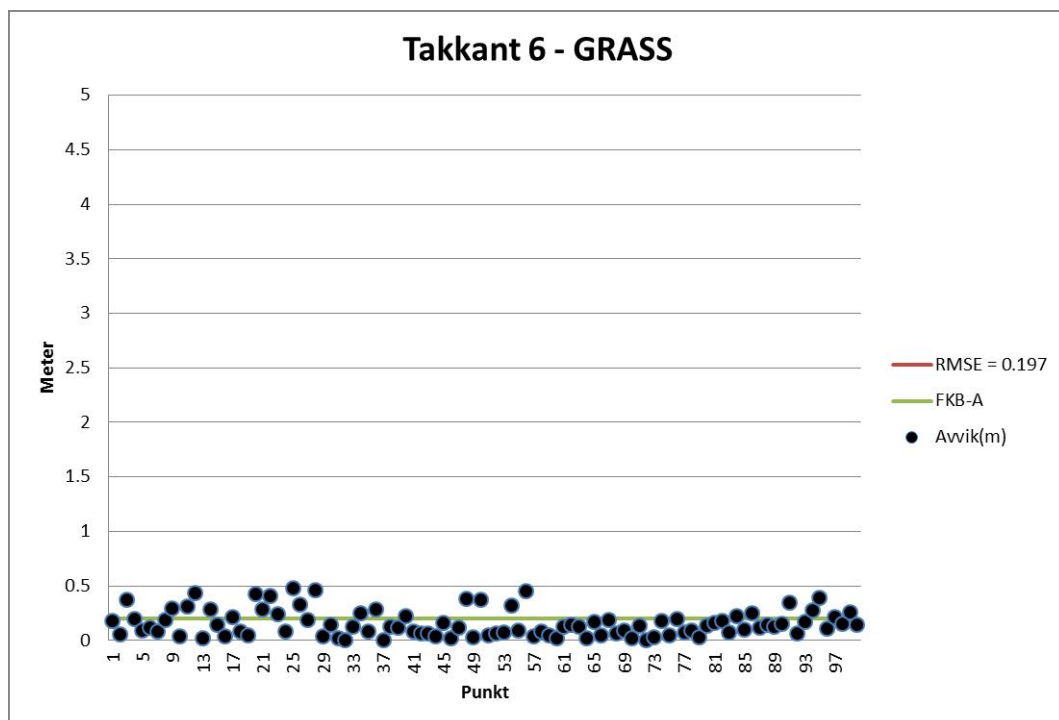
Figur B.15: Avvikene ved "Takkant 3" fra GRASS plottet mot fasitlinjene.



Figur B.16: Avvikene ved Takkant 4" fra GRASS plottet mot fasitlinjene.

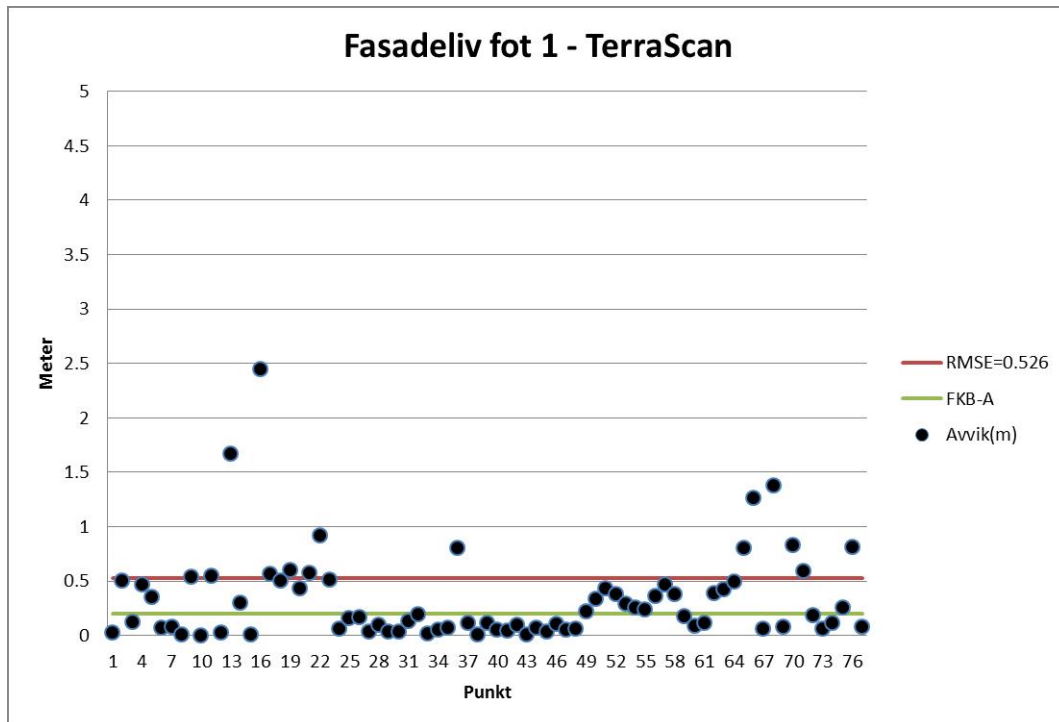


Figur B.17: Avvikene ved "Takkant 5" fra GRASS plottet mot fasitlinjene.

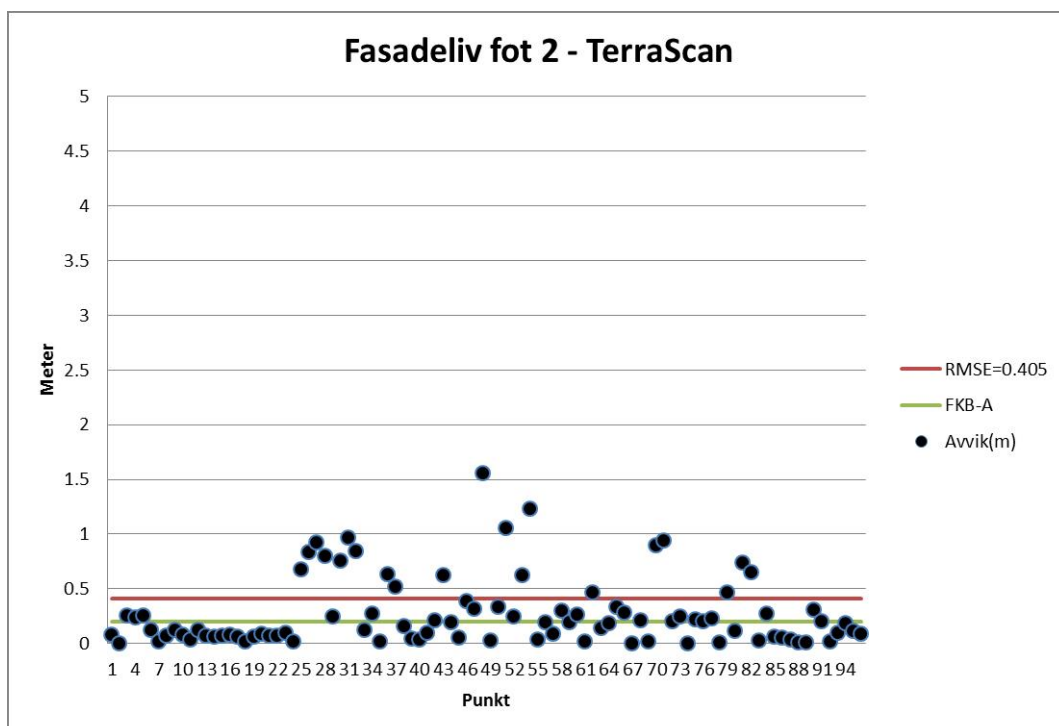


Figur B.18: Avvikene ved "Takkant 6" fra GRASS plottet mot fasitlinjene.

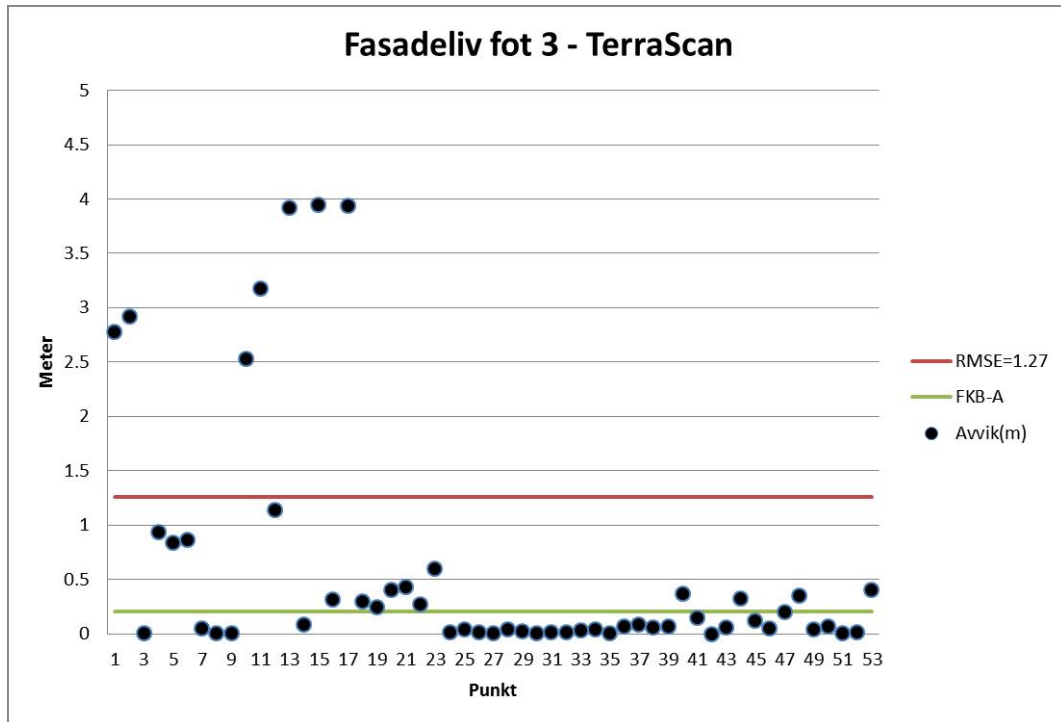
Fasadeliv



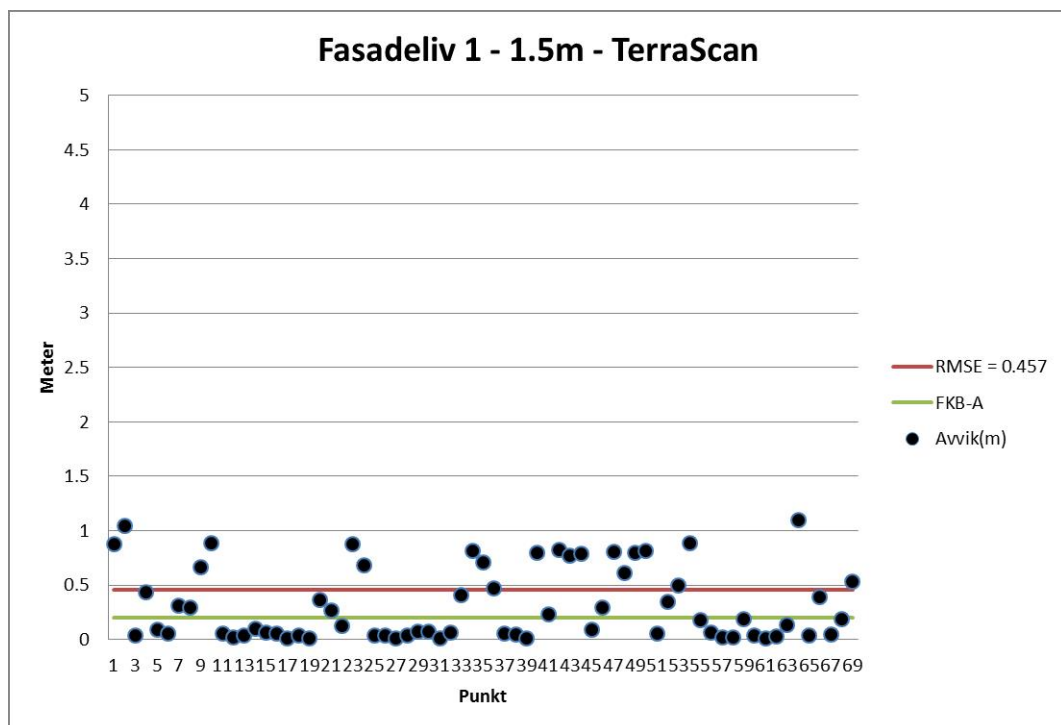
Figur B.19: Avvikene ved "Fasadeliv fot 1" fra TerraScan plottet mot fasitlinjene.



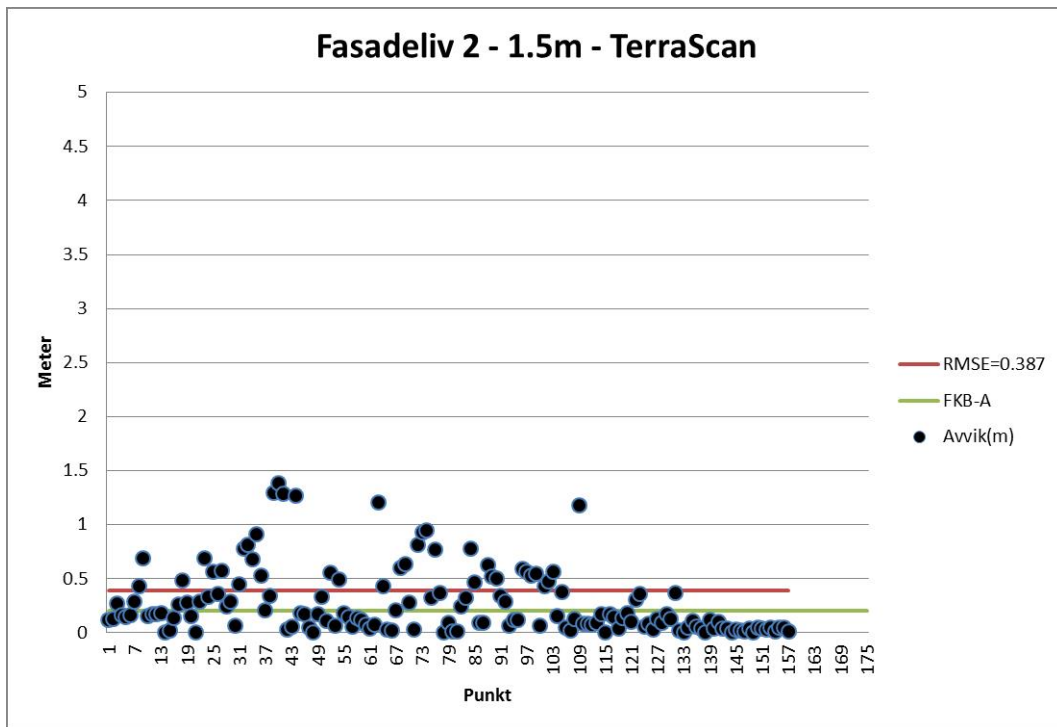
Figur B.20: Avvikene ved "Fasadeliv fot 2" fra TerraScan plottet mot fasitlinjene.



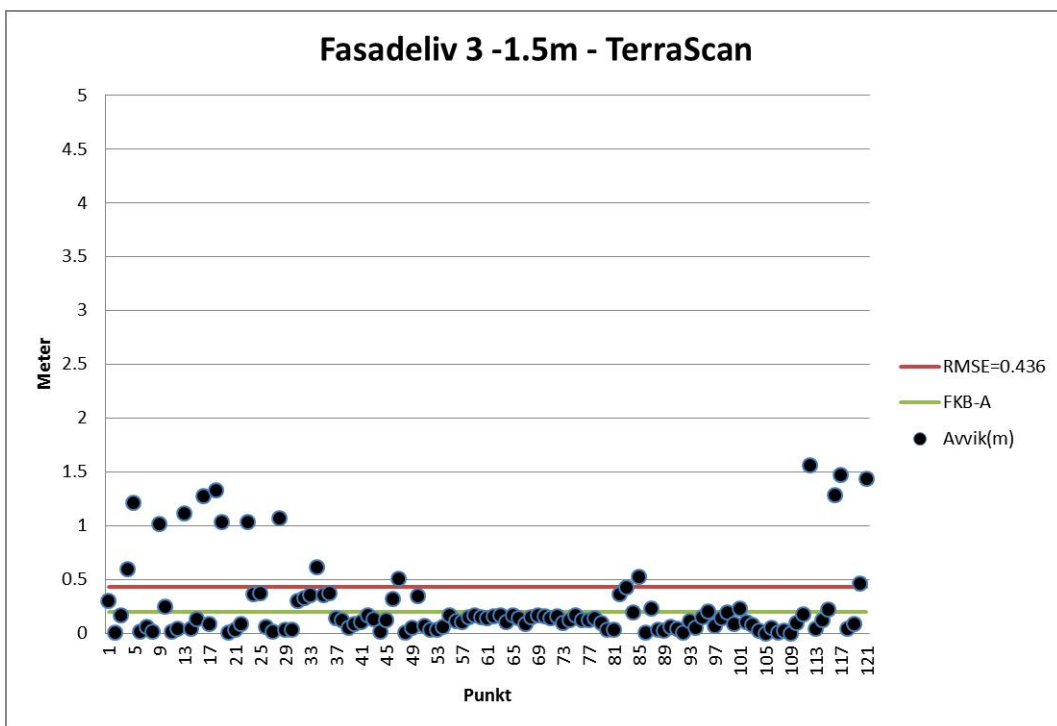
Figur B.21: Avvikene ved "Fasadeliv fot 3" fra TerraScan plottet mot fasitlinjene



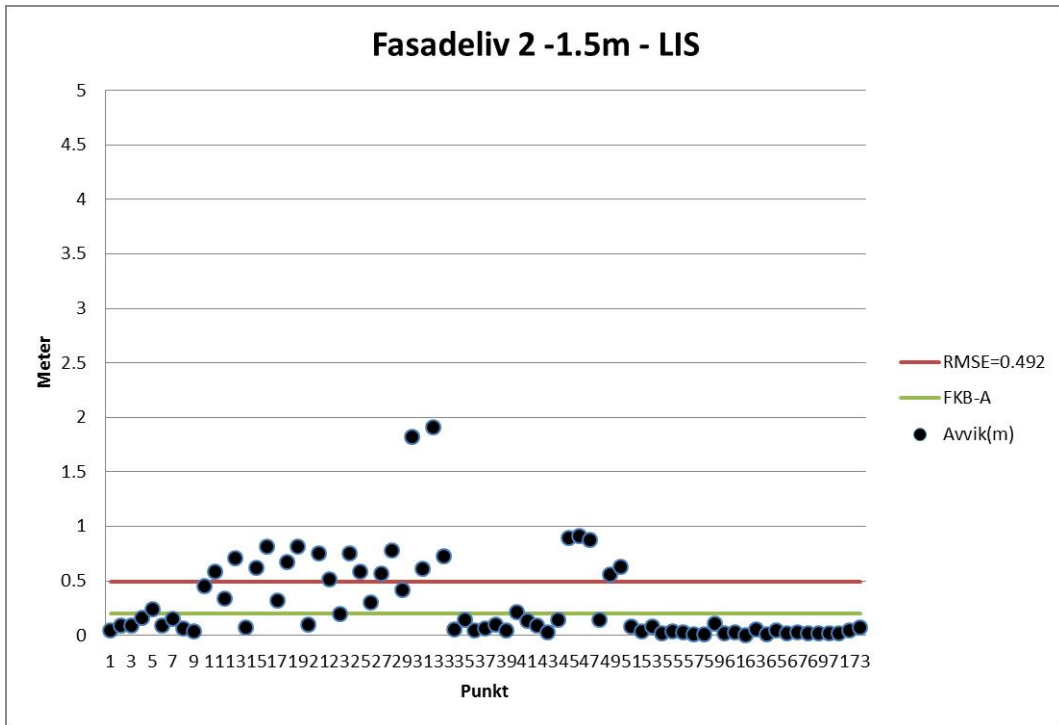
Figur B.22: Avvikene ved "Fasadeliv 1 - 1.5m" fra TerraScan plottet mot fasitlinjene.



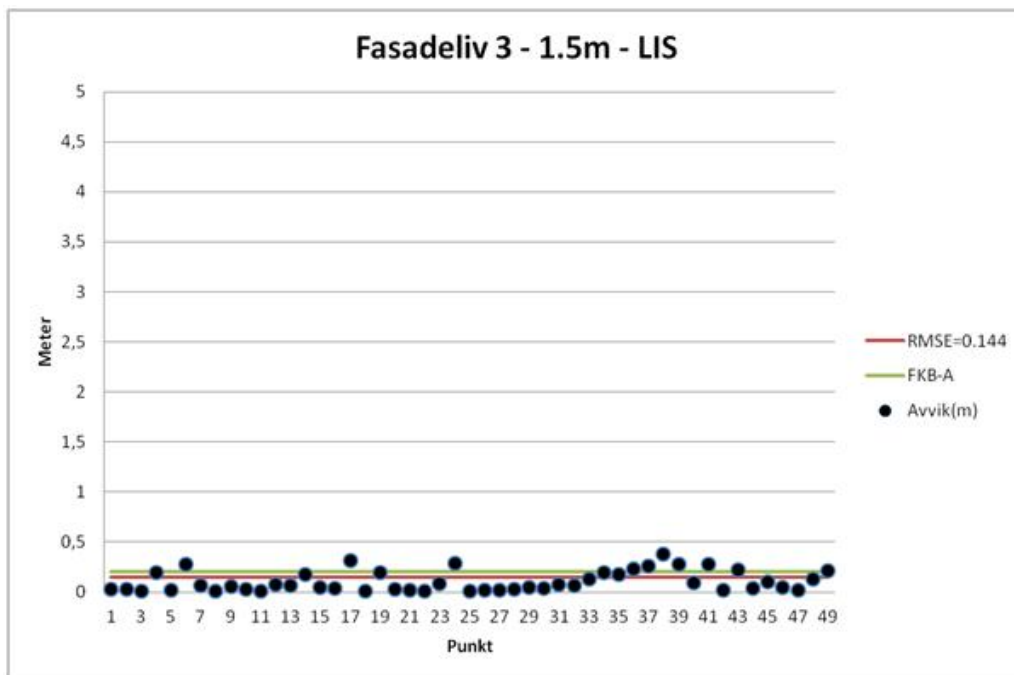
Figur B.23: Avvikene ved "Fasadeliv 2 - 1.5m" fra TerraScan plottet mot fasitlinjene.



Figur B.24: Avvikene ved "Fasadeliv 3 - 1.5m" fra TerraScan plottet mot fasitlinjene



Figur B.25: Avvikene ved "Fasadeliv 2 - 1.5m" fra LIS plottet mot fasitlinjene.



Figur B.26: Avvikene ved "Fasadeliv 3 - 1.5m" fra LIS plottet mot fasitlinjene.



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Postboks 5003
NO-1432 Ås
67 23 00 00
www.nmbu.no