



Høgskulen
på Vestlandet

BACHELOROPPGAVE

Laserskanning fra drone – Forventet nøyaktighet og optimalisering av kontrollpunkt og parameterinnstillinger for vegeterte områder

UAV laser scanning – Expected accuracy and optimizing control points and parameter settings for vegetated areas

Eivind Vikane Stemsverk, Martin Belsnes Lirhus og Eivind Ehnebom Tønnessen

Landmåling og eiendomsdesign

Institutt for byggfag

Stig Frode Samnøy

30.05.2022

Vi bekrefter at arbeidet er selvstendig utarbeidet, og at referanser/kildehenvisninger til alle

kilder som er brukt i arbeidet er oppgitt, jf. Forskrift om studium og eksamen ved Høgskulen på Vestlandet, § 12-1.

Sammendrag

Oppgaven er en undersøkelse av LiDAR-teknologi (DJI Zenmuse L1) benyttet på ubemannede luftfartøy, også kalt drone. LiDAR-teknologien er raskt voksende og har et enormt potensial innen ulike bruksområder. Datafangstmetoden har mulighet til å skaffe svært nøyaktige og høy-oppløselige data av store områder, på en rask og kostnadseffektiv måte. For å kontrollere at man har oppnådd nøyaktige data, benyttes uavhengige kontrollpunkter. For å gjennomføre slik kontroll, som har som hensikt å kontrollere for grove og systematiske feilkilder i instrumentet, må kontrollpunkt plasseres i området som kartlegges. I etterprosesseringen er man avhengig av å kunne finne disse kontrollpunktene med høy presisjon i punktskyene, som vil si at kontrollpunktene må skille seg tydelig ut. For å håndtere dette problemet har oppgaven fokusert på testing og evaluering av ulike kontrollpunkt (på engelsk: «*Ground control point*» eller forkortet: «*GCP*»). Løsningen har vært GCP-er som vises tydelig igjen i punktskyen, ved kontraster både på RGB- og intensitets-verdi. Det er også gjort kvalitetsvurderinger av de ulike GCP-ene som er testet, slik at oppgavens anbefalte løsning skal kunne levere et nøyaktig resultat.

I tillegg til at punktskyer fra dronebasert laserskanning er nøyaktige, har de også meget høy oppløsning. Dette gir en realistisk gjengivelse av objektet som skannes, på en digital plattform. Ved topografisk skanning av områder med tett vegetasjon kan det derimot være problematisk å oppnå en høy oppløsning for terrenget som ligger under vegetasjonen. Punkter i punktskyen som representerer terrenget, såkalte bakkepunkt, må altså maksimeres for å gi så realistisk gjengivelse av terrenget som mulig. Dette oppnås ved å bruke optimaliserte parameterinnstillinger for flyvningen, slik at laserpulsene som brukes for å utføre målingen når gjennom vegetasjon, og returneres til LiDAR-sensoren. I våre tester har lav flyhøyde vist seg å være den viktigste faktoren for å oppnå høy oppløsning, og vi har på bakgrunn av dette foreslått å undersøke modusen «*Terrain follow*» i videre forskning for å kunne oppnå en homogen, høy punkttetthet.

Vi har også sammenlignet LiDAR med fotogrammetri, som er en veletablert datafangstmetode. Fotogrammetri er den foretrukne metoden for digitalisering av terreng for svært mange. Oppgaven har derfor fokusert på å vise den store gevinsten ved å bruke LiDAR fremfor fotogrammetri, spesielt når det kommer til vegetasjonsfylte områder. Funnene viser at punktskyer konstruert fra fotogrammetri oppnår en lav punkttetthet av bakkepunkt i områder med vegetasjon. LiDAR-teknologien vil i motsetning kunne oppnå langt høyere punkttetthet med tilsvarende parameterinnstillinger.

Oppgaven er skrevet i samarbeid med Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE), som nylig har tatt i bruk LiDAR-teknologien fra drone. Datafangstområdet ligger ved utløpsområdet for kvikkleireskredet som gikk på Gjerdrum vinteren 2020. Datafangsten, i form av laserskanning er utført i to omganger, den ene høsten 2021 og den andre våren 2022. Dette for å ha et datagrunnlag hvor det ene settet med punktskyer inneholder løvverk på trærne, mens det andre datasettet er innhentet før løvverket var vokst frem på våren.

Abstract

This thesis is a study of LiDAR technology (DJI Zenmuse L1) used on UAVs, also called a drone. LiDAR technology is growing rapidly and has enormous potential in various applications. The measurement method can obtain very accurate and high-resolution data of large areas, in a fast and cost-effective way. In order to check that accurate data has been obtained, one is reliant on independent control points. To carry out such quality control, which is aimed to check for gross and systematic sources of error in the instrument, the checkpoint must be located in the area being mapped. In post-processing, one is dependent on being able to find these control points with high precision in the point clouds, which means that the control points must stand out clearly. To deal with this problem, the thesis has focused on testing and evaluating various control points («Ground control point», abbreviated: «GCP»). The solution has been GCPs that are clearly visible in the point cloud, with contrasts on both RGB and intensity value. Quality assurance has also been made of the various GCPs that have been tested so that the task's recommended solution can deliver an accurate result.

In addition to the fact that point clouds from drone-based laser scanning are accurate, they also have a very high resolution. This provides a realistic reproduction of the object being scanned on a digital platform. When topographically scanning areas with dense vegetation, it can be problematic to achieve a high resolution for the terrain below the vegetation. Points in the point cloud that represent the terrain, so-called ground points, must therefore be maximized to provide as realistic a representation of the terrain as possible. This is achieved by using optimized parameter settings for the flight, so that the laser pulses used to perform the measurement reaches through vegetation and are returned to the LiDAR sensor. In our tests, low altitude has proven to be the key factor in achieving high resolution, and on this basis, we have proposed to investigate the "Terrain follow" mode in further research to achieve a homogeneous, high point density.

We have also compared LiDAR with photogrammetry, which is a well-established data capture method. Photogrammetry is the preferred method for digitizing terrain for very many, and the thesis has therefore focused on showing the great benefit of using LiDAR over photogrammetry, especially when it comes to vegetation-filled areas we have focused on. Here, the findings show that point clouds constructed from photogrammetry achieve a low point density of ground points in areas with vegetation, while LiDAR technology will be able to achieve a much higher point density with corresponding parameter settings.

The thesis is written in collaboration with the Norwegian Water Resources and Energy Directorate (NVE), which has recently taken UAV LiDAR technology into use. The data capture area is located in the outlet area for the quick clay landslide that hit Gjerdrum in the winter of 2020. The data capture, in the form of laser scanning, was carried out in two rounds, one in the autumn of 2021 and the other in the spring of 2022. The reason for this was to have a database where one set of point clouds containing foliage on the trees, while the other data set was obtained before the foliage had grown in the spring.

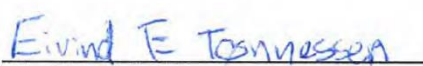
Forord

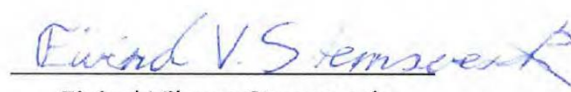
Oppgaven er skrevet som et avsluttende arbeid for studiet Landmåling og eiendomsdesign ved Høgskulen på Vestlandet. Forfattere av oppgaven tok kontakt med NVE etter et webinar august 2021. Webinaret tok for seg tema om laserskanning fra drone og den praktiske bruken av dette. NVE påpekte noen interessante utfordringer som senere har blitt formet som problemstillinger til denne bacheloroppgaven.

I arbeidet med oppgaven har vi fått god hjelp og veiledning. Vi vil derfor rette en stor takk til Stig Frode Samnøy, vår veileder fra Høgskulen på Vestlandet som har gitt oss gode råd og tips underveis. Fra Høgskulen på Vestlandet har vi også mottatt mye god hjelp fra emneansvarlig i industrimåling og laserskanning, Trond Nordvik.

Det må også rettes en stor takk til NVE/v Kjetil Indrevær og Simon Oldani for hjelp til utarbeiding av problemstilling og datainnsamling, samt faglig og økonomisk støtte. I tillegg vil vi rette en takk til Brødrene Dahl AS avdeling Bergen, som har bidratt med utarbeidelse av material.

Bergen, mai 2022


Eivind Ehnebom Tønnessen


Eivind Vikane Stemsverk


Martin Belsnes Lirhus

Begrepsavklaring

AGL	Above Ground Level
AM	Amplitudemodulasjon
CPOS	Centimeter Posisjon
CSF	Cloth Simulation Filter
DTM	Digital terrengmodell
fps	Bilder i sekundet
GCP	Ground Control Points
GIS	Geografisk informasjonssystem
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPRS	General Packet Radio Service
IMU	Inertial Measurement Unit
INS	Inertial Navigation System
kHz	Kilohertz
klx	Kilolux
LAS	Filtype for LiDAR data
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LiDAR	Light Detection and Ranging
LiPo	Litium Ion Polymer
m/s	Meter per sekund
NSM	Norsk sikkerhetsmyndighet
NVE	Norges vassdrags- og energidirektorat
PPM	Parts per million
PRF	Point Repetition Frequency
PVC	Polyvinylklorid
RGB	Fargemodell (Rød, grønn og blå)
RMSE	Root Mean Square Error
RTK	Realtids kinematisk måling
ToF	Time-of-Flight
UAV	Unmanned Aerial Vehicles (drone)

Innhold

Sammendrag	2
Abstract.....	3
Forord.....	4
Begrepsavklaring.....	5
1. Introduksjon.....	7
2. Teori	9
2.1 Drone	9
2.2 Oppbygningen av en luftbåren laserskanner	9
2.3 Grunnleggende om luftbåren laserskanning	12
2.4 Konfigurering av laserskanner fra drone	23
2.5 Kontrollpunkt og kontroll av punktskyer	26
2.6 Generering av digital terrengmodell (DTM).....	29
2.7 Utstyr og programvare.....	30
3. Metode.....	36
3.1 Gjerdrum oktober 2021	37
3.2 Gjerdrum april 2022.....	40
3.3 Dataprosessering	43
4. Resultat	49
4.1 Presentasjon av punktskyer	49
4.2 Kvalitetsvurdering av punktskyer.....	52
4.3 Sammenligning av fotogrammetri og LiDAR.....	55
4.4 Analyse av bakkepunkt og punkttetthet.....	58
4.5 Analyse av GCP-er	63
5. Diskusjon	67
5.1 Evaluering av LiDAR fra drone og sammenligning med fotogrammetri	67
5.2 Evaluering av parameterinnstillinger for maksimalt antall bakkepunkt.....	70
5.3 Evaluering av egnethet for GCP-er.....	73
5.4 Konklusjon.....	77
6. Figurliste.....	79
7. Tabelliste	81
8. Litteraturliste	82
9. Vedlegg	86

1. Introduksjon

Laserskanning, også kjent som LiDAR, er en raskt voksende teknologi med mange bruksområder. Mulighetene vokser stadig da utstyret blir mer kompakt, billigere og brukervennlig, noe som blant annet har gjort det mulig å bruke LiDAR-sensor fra drone. Utviklingen av teknologien har også gjort metoden til en anerkjent datafangstmetode innen landmålingen, for å blant annet digitalisere terreng og objekter i 3D. Laserskanning benyttes i dag innen en rekke andre næringer i tillegg til den tradisjonelle landmålingen, i alt fra skogbruket, til dokumentasjon for politi og arkeologer, videre til miljøovervåking av for eksempel isbreer eller skredområder.

Grunnet den store økningen i bruksområder, er det i de senere årene også kommet mange nye brukere av teknologien. Selv om utstyret blir stadig mer brukervennlig, må man fortsatt ha noen bakgrunnskunnskaper om landmåling for å kunne oppnå et resultat med god nøyaktighet. Spesielt når det kommer til tolkning og evaluering av resultatet er det viktig med slike bakgrunnskunnskaper. Formålet med denne oppgaven blir derfor å gjøre en generell evaluering, samt undersøke og opplyse om arbeidsmetodikk knyttet til to problemer som vil dukke opp når man jobber med LiDAR fra drone; bruk av GCP og problematikk knyttet til vegetasjonsfylte områder. Begge disse problemene kan knyttes til fotogrammetri, noe som er relevant da det antas at nye brukere av LiDAR-droner sannsynligvis har noe bakgrunnskunnskap om fotogrammetri fra drone. Den generelle evalueringen av LiDAR fra drone er også meget relevant i denne sammenheng, da LiDAR i mange tilfeller kan erstatte fotogrammetri fra drone.

Problematikken knyttet til vegetasjonsfylte områder dreier seg om å oppnå tilstrekkelig med bakkepunkt i punktskyen som skapes, slik at man har et godt grunnlag for å kunne generere en presis terrengmodell av området som skannes. Tilstrekkelig er et relativt uttrykk, og hva som er tilstrekkelig med bakkepunkt vil variere for alle oppdrag. I oppgaven fokuseres det på å oppnå maksimalt antall bakkepunkt, hvor man da eventuelt har mulighet til å tynne ut dataene i etterkant ved behov. For å oppnå maksimalt med bakkepunkt er valg av parameterinnstillinger slik som flyhøyde, flyhastighet, overlapp og skannefrekvens essensielt.

Da LiDAR fra drone er et relativt nytt fagfelt, har ikke utviklingen av den komplette teknologien blitt fullstendig enda. Dette gjenspeiles også i forskningen, da mye av det som er forsket på innen området enten gjelder laserskanning fra fly/helikopter eller fotogrammetri fra drone. Noe forskning på GCP-er for LiDAR fra drone har blitt utført av blant annet Wilkinson et al. (2019) og Csanyi & Toth (2007), men utfordringen her er at resultatene vil være avhengige av utstyrets egenskaper. Vi har gjennomført tester med DJI sin Zenmuse L1, som vi opplever blir brukt av flere på det norske markedet, og håper derfor at resultatene våre kan brukes av mange.

Oppgavens problemstillinger er utarbeidet i samarbeid med NVE, basert på utfordringer de selv har støtt på ved bruken av LiDAR. Problemstillingene er derfor relevante, og er formulert som følger:

- 1. Evaluering av LiDAR fra drone og sammenligning med fotogrammetri fra drone i vegetasjonsfylte områder**
- 2. Undersøke hvilke parameterinnstillinger som egner seg best for vegetasjonsfylte områder**
- 3. Teste og evaluere egnethet til ulike GCP-er for bruk av LiDAR fra drone**

Med oppgaven håper vi å hjelpe nye brukere av LiDAR med å få en innsikt i teknologien, samt å finne gode løsninger for å oppnå ønsket resultat hva kommer til punkttetthet i skog og absolutt nøyaktighet på punktskyen. I oppgaven er det brukt open-source programvare der det er mulig, for å gjøre metodene anvendbare for alle, uten å måtte betale for dyr programvare.

2. Teori

2.1 Drone

Drone blir definert som et ubemannet luftfartøy som også kalles for UAV (*Unmanned Air Vehicle*). Drone kan være av typen «multirotor» eller «drone med faste vinger». Multirotordrone har rotor med propeller som lager løft. Den kan manøvrere seg i forskjellige retninger og er derav lettere å bruke i ulendt terreng. Den lette manøvreringen på en multirotor-drone gjør det også lettere å komme tettere på objekter. Den begrensede rekkevidden for slike droner gjør at de egner seg for mindre områder. Droner med faste vinger, har lik utforming som fly og skaper fremdrift gjennom en eller to motorer. Ettersom dronen bruker vingene til oppdrift, kan de holde seg i luften i lengre perioder før batteriet må skiftes. Dette gjør at de kan dekke større områder på kun ett batteri.

En UAV fjernstyres fra bakken ved hjelp av radiokommunikasjon. Radiokommunikasjonen skjer mellom dronen og en kontroller på en bestemt frekvens. På selve kontrolleren finnes programvare som sørger for oversikt over dronens status. På kontrolleren er det i tillegg styrespaker og knapper som sørger for å kunne manøvrere dronen. På selve dronen er det mulighet for påmontering av forskjellig utstyr. Kamera eller laserskanner er eksempel på slikt utstyr.

2.2 Oppbygningen av en luftbåren laserskanner

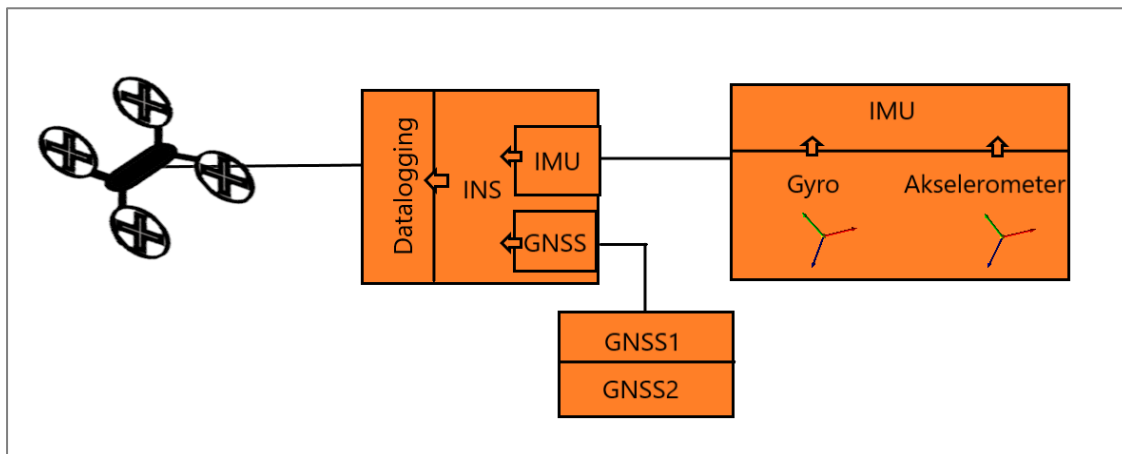
En luftbåren laserskanner defineres ved at laserskanneren er påmontert et luftfartøy. Dette kan for eksempel være et fly, helikopter eller en drone. En luftbåren laserskanner kan med fordel kartlegge et større område på en effektiv måte. Ettersom fartøyet vil være i luften, vil det alltid være bevegelse. For å imøtekomme og korrigere for disse bevegelsene, finnes en rekke komponenter som samhandler med hverandre.

2.2.1 Skanner

Skanneren er et instrument som vanligvis befinner seg under flykroppen. Skanneren sender ut laserpulser mot bakken. Laserpulsen går gjennom et roterende speil, som gjør at laserpulsen dekker bakken på tvers av flyretningen (Dick, 2020). Laserpulsen reflekteres og sendes opp igjen til en sensor i skanneren. Det roterende speilet og laserpulsene sørger for at laserskanneren foretar polare innmålinger i avstand og vinkler.

2.2.2 INS og IMU

INS (inertial navigation system) er et system som bruker bevegelsesinformasjon fra IMU-komponenten for å korrigere laserpunktets posisjon. IMU (inertial measurement unit) er dronens treghetsnavigasjon, og består av flere sensorer og sørger for å gi korreksjoner til flyets orientering i lufta. IMU tar inn rotasjons- og akselerasjonsbevegelser og gir korreksjonsdata til INS-systemet (Vosselman & Maas, 2010. s. 23). Bevegelsene for både gyroskopet og akselerometeret strekker seg i tre akser. Gyroskopet logger rotasjonsbevegelser rundt aksene og akselerometeret logger de lineære bevegelsene langs aksene.



Figur 1: Egendefinert figur som viser samhandling av komponenter for datalogging

Når et punkt blir registrert med laserskanneren, foretar INS-systemet korreksjoner for bevegelsene og beregner seg fram til gitte koordinater ved hjelp av GNSS-antennen. Dette skjer ved at INS-systemet bruker de polare innmålingene til laserskanneren og korrigerer for bevegelsene i fartøyet før de endelige dataene logges.

Gyro

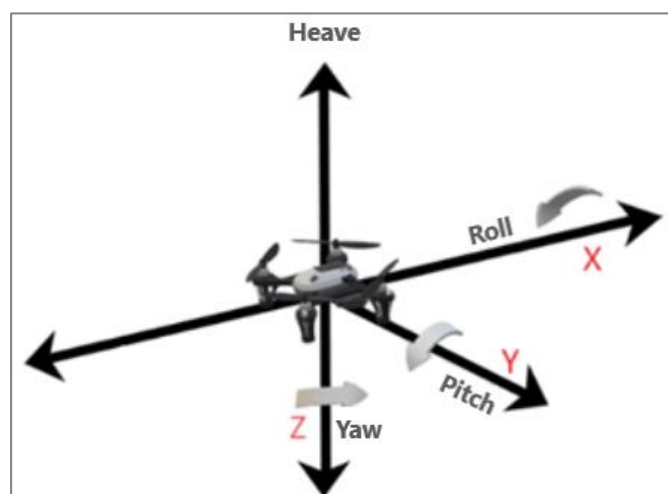
En gyro-sensor sørger for å gi korreksjoner for flymaskinens vinkel og rotasjon. Dette innebærer å ha styring på flymaskinens vinkel eller rotasjon og korrigerer skanneren for dette. Slik sørger man for stabilitet i skanneren. Et eksempel kan være at en drone vinkler seg for imøtekomme vind. En gyro skal dermed korrigerer for dette og holde skanneren i samme vinkel både før og etter vindkastet.

Akselerometer

Et akselerometer måler akselerasjonen eller kraften til flymaskinen og korrigerer for dette. Kraftøkningen skjer langs de tre aksene og kan for eksempel skape bevegelse i skanneren. Sammen med gyro-enheten skapes stabilitet i skanneren som motvirker kraftøkningen i de forskjellige aksene.

Roll, pitch, yaw og heave

Dronen beveger seg i tre forskjellige retninger; roll, pitch og yaw. Figuren til høyre viser bevegelsene i dronens lokale koordinatsystem. Roll er vugging, pitch er gynging og yaw er bevegelse i høyde. Roll og pitch er rotasjons-bevegelser rundt henholdsvis x- og y-aksen. Disse bevegelsen kombineres når dronen gjør en hastighetsendring, eller skal stabilisere seg om det er mye vind. Den tredje bevegelsen, yaw, er rotasjon rundt z-aksen. Denne bevegelsen forekommer når dronen svinger. Heave er den siste bevegelsen som defineres for dronen, og kombineres om dronen skal klatre eller stupe i høydemeter.



Figur 2: Egendefinert figur som viser bevegelser rundt x-, y- og z-akser

2.2.3 GNSS

GNSS (Global Navigation Satellite System) er et system som bruker satellitter til å bestemme koordinater for fartøyet. GNSS-antennene sitter normalt montert på oversiden av fartøyet og beregner koordinater i lengdegrad, breddegrad og høyde. Målemetoden er i sanntid, også kalt RTK (realtids kinematisk måling) slik at fartøyet hele tiden har oppdaterte koordinater. Dette skjer ved hjelp av differensiell posisjonsbestemmelse. Differensiell posisjonsbestemmelse forklares ved at systemet bruker observasjoner fra satellittene og får korreksjonsdata direkte via internett eller GPRS. Korreksjonsdata er hentet fra virtuelle basestasjon i nærheten, som korrigerer for observasjonene fra satellittene (Mæhlum, 2022). På denne måten kan man oppnå posisjonsnøyaktighet på få centimeter.

På en drone (for eksempel DJI Matrice 300), er GNSS-systemet bestående av to antenner for RTK-målinger. Den ene antennen er til måling av posisjon og den andre antennen er til orientering av fartøyet (Ekaso, Nex & Kerle, 2022. s. 2). GNSS-systemet er videre knyttet til INS-systemet. Kombinasjonen av disse systemene gjør at punkt-data fra laserskanneren får posisjonsdata fra GNSS-systemet og korreksjoner fra de interne bevegelsene i fartøyet fra IMU-komponenten.

2.3 Grunnleggende om luftbåren laserskanning

Laserskanning har de siste tiårene blitt en veletablert metode innen landmåling for innsamling av geodata (Vosselman & Maas, 2010, s. ix). Metoden baseres på innsamling av en stor mengde punkter med xyz-koordinater, som settes sammen til en punktsky. Avhengig hva slags instrument som blir brukt, er det ikke uvanlig at man kan oppnå skannerater opp til 4 000 000 punkt/s (Riegl, 2022). Den høye skanneraten fører til at man oppnår svært detaljerte modeller av området man skanner på kort tid. I tillegg er luftbåren laserskanning en datafangstmetode som kan oppnå god nøyaktighet.

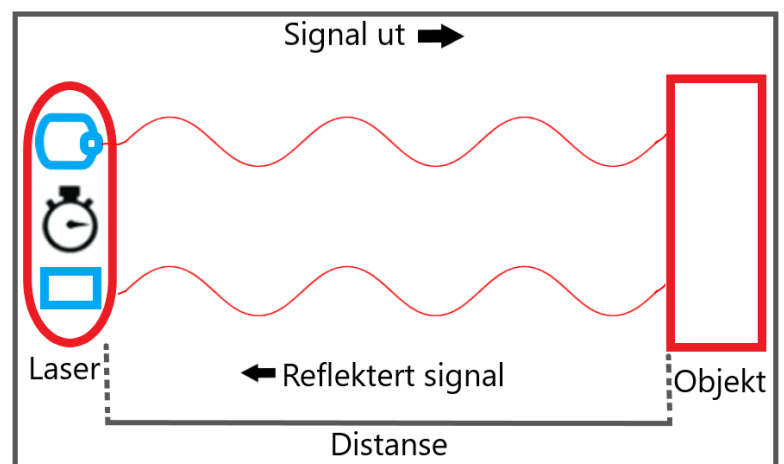
Luftbåren skanning gjennomføres gjerne med en skanner montert under et helikopter/fly, eller drone slik som i denne oppgaven. Den store fordelen med luftbåren skanning kontra terrestrial skanning er at man kan dekke store arealer på kort tid, noe som gjør luftbåren skanning egnet til kartlegging av blant annet eiendommer, byggeplasser og vegetasjonsområder. Slik kartlegging av landområder kalles for topografisk skanning. Skanning av grunne vassdrags- og havbunnsområder kan også gjennomføres med flybåren laserskanning, dette kalles for batymetrisk skanning. Oppgaven vil fokusere på topografisk skanning av vegetasjonsområder.

2.3.1 Prinsipper for avstandsmåling

For laserskanning kan man skille mellom to ulike prinsipper for hvordan avstandsmålinger gjennomføres; LiDAR og triangulering (Vosselman & Maas, 2010, s. 2). LiDAR står for Light Detection and Ranging, og er en fjernmålingsteknikk hvor man gjør polare 3D målinger som baserer seg på måling med tilbakespredning av lys (Holtet, 2022). Triangulering er en metode som baserer seg på cosinussetningen for å beregne avstanden til objektet man skal måle. Triangulering er uegnet for avstander større enn 5 meter, og er derfor ikke noe som benyttes i luftbåren laserskanning. Videre tar vi for oss to ulike metoder som kan benyttes innen LiDAR. Metodene kalles for time-of-flight, og fasedifferensiering.

2.3.1.1 Time-of-flight (ToF)

Time-of-Flight (ToF), også kalt for pulse ranging, kan oversettes til flytid på norsk. ToF-metoden baseres på at man bruker kunnskapen man har om det utsendte lysets hastighet under de rådende forholdene, og hvor lang tid lyset bruker frem og tilbake, for å kunne bestemme hvor lang avstand det er til overflaten man måler. Time-of-flight har lang rekkevidde, noe som er grunnen til at den brukes i de fleste laserskannere, spesielt luftbåren skanning. Rekkevidden for noen systemer når lengder på 800 meter (Vosselman & Maas, 2010, s. 8).



Figur 3: Skjematisk figur av en ToF-sensor. Egenprodusert figur basert på Zheng et al., (2019, s.4).

Avstander beregnes i altså ToF-metoden ved at man finner halve tiden laserpulsen bruker frem og tilbake til objektet, korrigert for en refraksjonsindeks.

Dette fører til følgende formel:

$$\rho = \frac{c}{n} \frac{\tau}{2} \quad (\text{Formel 2.1})$$

ρ = Skråavstand fra skanner til objekt
 c = Lysets hastighet i vakuum (299 792 458 m/s)
 n = Refraksjonsindeks (korreksjon for atmosfæriske forhold i luft, som regel 1.00025)
 τ = Tiden lyssignalet bruker frem og tilbake mellom skanner og objekt

2.3.1.2 Fasedifferensiering

En annen måte å måle avstander ved bruk av LiDAR, kalles for fasemåling. Det finnes mange ulike metoder for fasemåling, hvor en av de mest brukte er amplitudemodulasjon (AM) (Vosselman & Maas, 2010, s. 5). Fasemålinger bygger på mye av de samme prinsippene som ToF-metoden, hvor forskjellen er at man ved fasemålinger måler faseforskjellen ($\Delta\varphi$) mellom utsendt og mottatt laserpuls. Denne faseforskjellen kan gi oss tidsforsinkelsen mellom utsendt og mottatt puls, ved å bruke følgende formel:

$$\tau = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \frac{\lambda_m}{c} \quad (\text{Formel 2.2})$$

Avstanden mellom laserskanner og overflaten som skannes (ρ), kan så beregnes ved å bruke formel 2.1.

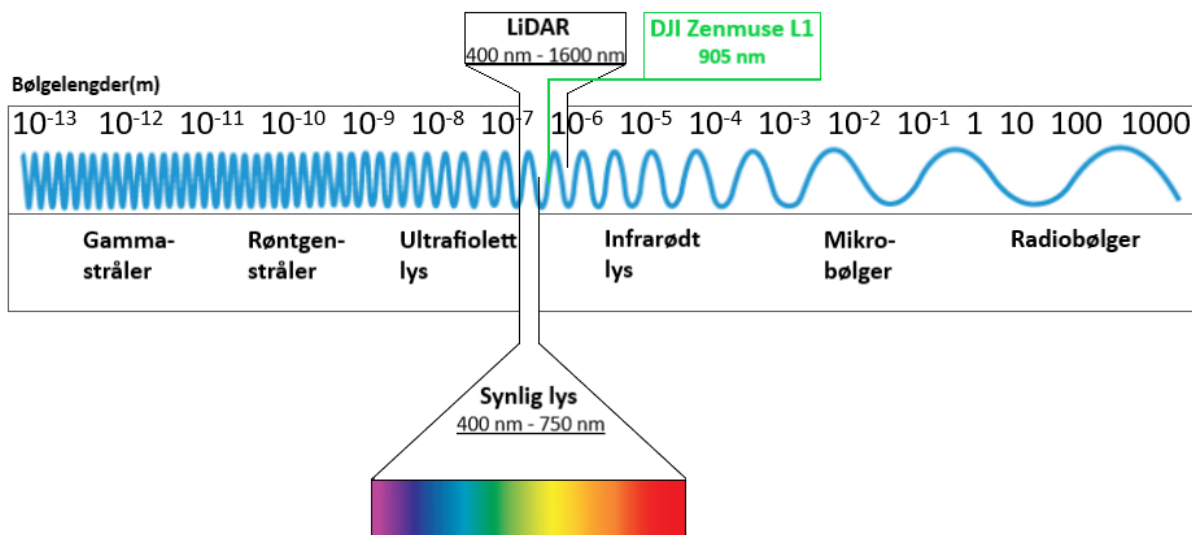
Sammenligning av ToF og fasedifferensiering

Avstandsmålinger basert på at man registrerer fasedifferansen, har en rekkevidde begrenset til rundt 100 meter (Vosselman & Maas, 2010, s. 8). Til gjengjeld kan man enklere oppnå en mye høyere pulsrate ved å bruke systemer basert på fasemålinger. Dagens ToF-systemer er allikevel så velutviklet at man kan oppnå pulsrater opptil flere millioner punkt i sekundet, noe som i mange tilfeller vil være tilstrekkelig for å oppnå ønsket punkttetthet. Når det kommer til nøyaktighet har instrumenter som måler på fasedifferanse lenge vært regnet som mer nøyaktige (Suchocki, 2020). Utviklinger i teknologien for både time-of-flight og fasedifferanser har derimot utlignet forskjellene mellom de to teknologiene, i form av at fasedifferanse-systemer får lengre rekkevidde, og time-of-flight systemer får bedre nøyaktighet (San José Alonso et al., 2012).

2.3.2 Bølgelengde og energi

LiDAR benytter lys av typen laser for å måle avstand. Laser er en forkortelse for «light amplification by stimulated emission of radiation». Laserpulser er altså sterkt lys (elektromagnetisk stråling) som har spesielle egenskaper i forhold til annet lys. Pulsene er monokromatiske, som vil si at de beholder den samme bølgelengde hele tiden. Pulsene har også liten divergens, som vil si at laserstrålen beholder omtrent den samme bredden, noe avhengig av hvor langt den går. Det er dette som gjør at laserstrålen kan ha et lite fotavtrykk på bakken ved lav flyhøyde, noe man ønsker for å kunne oppnå en detaljert punktsky.

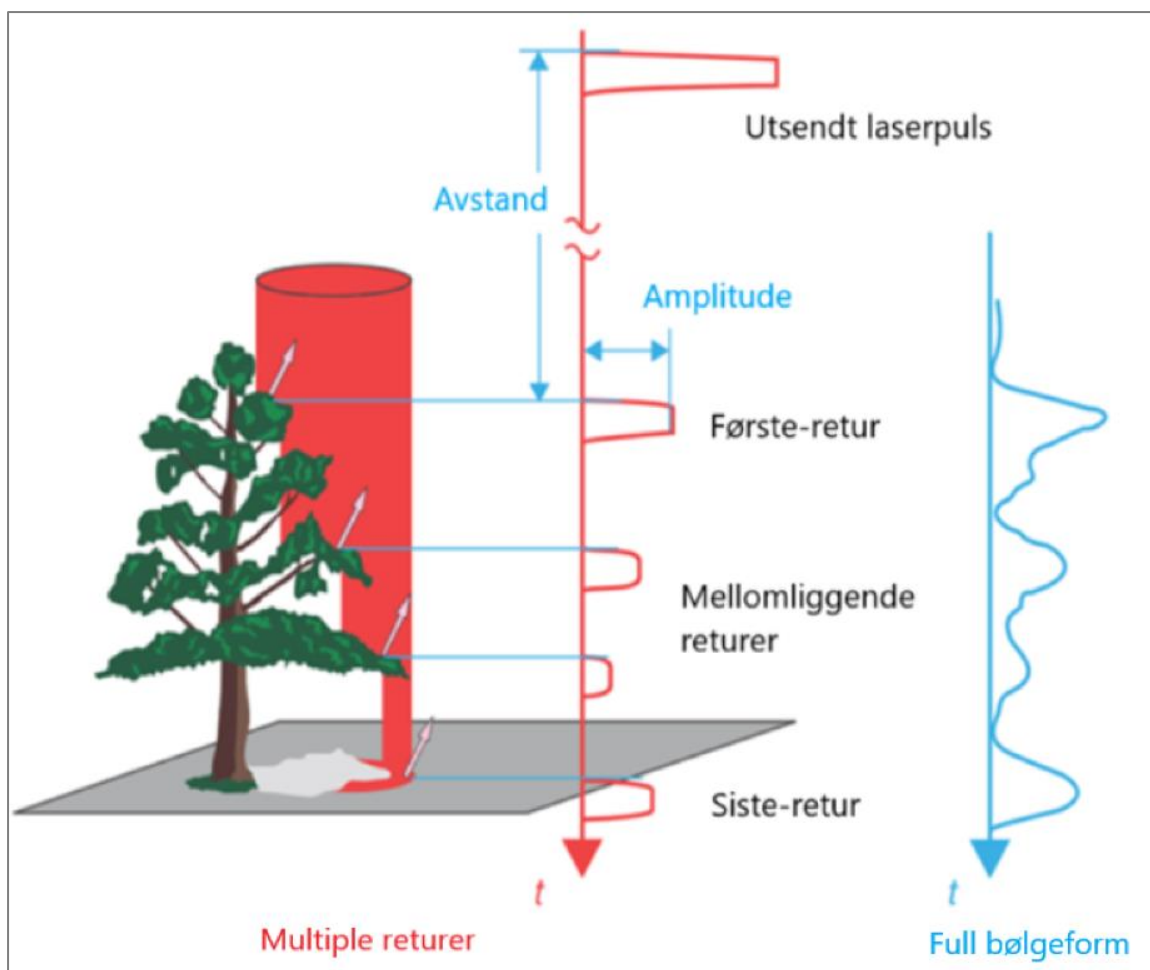
Ved LiDAR kan laser med ulik bølgelengde benyttes. For lysbølger er bølgelengden det som bestemmer lysets farge, hvor det for LiDAR gjerne benyttes laserpulser som er utenfor det synlige spekteret. Infrarødt og nær-infrarødt lys med bølgelengder mellom 400 og 1600 nm brukes som regel i LiDAR, hvor $\sim 905\text{ nm}$ og $\sim 1550\text{ nm}$ er det vanligste (Wojtanowski et al., 2014). Laserpulser med ulike bølgelengde har ulike egenskaper, og valg av bølgelengde avhenger derfor av hva laserskanneren skal brukes til. Faktorer man må ta hensyn til her er blant annet ønsket rekkevidde, refleksivetsverdier for overflaten, overflatens tilstand (fuktig/tørr), batteriforbruk og støy fra solstråling (Wojtanowski et al., 2014).



Figur 4: Det elektromagnetiske spekteret. Egenprodusert figur.

2.3.3 Returpulser (multiple returer og full bølgeform)

Som beskrevet baserer LiDAR seg på utsendte og mottatte laserpulser. Den reflekterte pulsen kan gi oss informasjon om hva slags overflate den har truffet, blant annet ved at man kan se på hvor mange retursignaler den utsendte pulsen er delt opp i (Vosselman & Maas, 2010, s. 28). Om overflaten man skanner for eksempel er dekket av vegetasjon, vil man oppleve at den utsendte laserpulsen deles opp i flere retursignaler (avhengig av instrumentets egenskaper). Dette er en meget nyttig egenskap som danner grunnlag for å analysere den skannede overflaten. Et eksempel kan være å undersøke om overflaten består av vegetasjon eller er en flat overflate.



Figur 5: "Multiple retur" og "full bølgeform". Fra *Airborne and Terrestrial Laser Scanning* (s. 29), av Vosselman & Maas. Benevnelser er endret fra engelsk til norsk.

Figur 5 viser hvordan en utsendt puls kan oppføre seg i områder med vegetasjon. Her gir treet fire returpulser, hvor kun den siste kommer helt ned til terrenget. Den ene utsendte laserpuls ender altså med å gi fire punkter i punktskyen. Som nevnt kan informasjon om returpulsene benyttes for å si noe om den skannede overflaten. Dette kan gjøres ved at man deler punktskyen opp i første-returer, enkelt-returer og siste-returer. Første-returer er den første returpuls i tilfeller hvor man oppnår flere retur på en utsendt laserpuls. Dette kan for eksempel være toppen av treet i figur 5. Siste-returer er den siste returpuls fra en utsendt laserpuls, og representerer gjerne terrengoverflaten. Enkelt-returer er laserpulser som kun gir en returpuls. Disse har sannsynligvis truffet en solid overflate, som kun gir én tydelig returpuls. I tilfeller hvor man har enkelt-returer, vil returpulsene også kunne kalles for første- og siste-returer.

For at skanneren skal klare å skille mellom to ulike returpulser, er man avhengig av en viss avstand mellom de to overflatene som pulsene returnerer fra. Avstanden må minst være lik halve pulslengden, for at to ulike returpulser kan registreres. Det vil si at om greinene på et tre står for tett på hverandre, vil man ikke klare å definere en returpuls på hver grein.

I tillegg til de "vanlige" multiplere retur skannerne, finnes det såkalte "full bølgeform" skannere. Disse lagrer bølgeformene for hele den mottatte laserpuls, og brukeren kan da selv analysere det mottatte signalet. Dronen vi bruker i denne oppgaven har ikke mulighet for full bølgeform registrering, så dette dekkes ikke i mer detalj.

2.3.4 Registrerte egenskaper

En laserskanner registrerer punkt med xyz-koordinater, som settes sammen til en punktsky. I tillegg til koordinatene for punktene registreres en rekke tilhørende egenskaper. Disse egenskapene inneholder informasjon som igjen kan brukes for ulike formål ved laserskanning.

Intensitet

Intensitet er en verdi på hvor sterkt laserpuls reflekterer tilbake til LiDAR-sensoren (Vosselman & Maas, 2010. s. 14). Intensiteten som kommer av refleksjon avhenger av blant annet avstand, innfallsvinkel fra laserskanneren og objektets egenskaper. Intensitetsverdiene kan brukes for å skille mellom ulike objekter (segmentering) eller for å lokalisere GCP-er. Intensiteten er relativ, noe som innebærer at verdier kan variere fra et datasett til et annet (Esri, 2022). Intensitetsverdiene kan omregnes til reflektansverdier, hvor man har korrigert for avstand og innfallsvinkel, og man skal da i teorien kunne få homogene intensitetsverdier på samme type objekter (Terratec, 2021).

Høyde

Høydeverdien er beregnet basert på laserskannerens avstandsmåling, og kan visualiseres gjennom et fargespekter, hvor fargene indikerer hvilken høyde punktene er registrert i. Høyden er gjerne en lokal høyde relativ til de andre punktene i punktskyen, eller en global høydeverdi som er relativ til en geoidmodell, for eksempel NN2000.

Returnnummer

Den emitterte laserpuls kan oppnå flere returpulser. Dette avhenger av hva laserpuls blir reflektert fra og hva slags laserskanner som blir brukt (Esri, 2022). Returene blir nummerert etter returpulsene som registreres. I praksis blir første retur registrert som retur nummer én, andre retur som nummer to, tredje retur som nummer tre, også videre. En laserpuls vil vanligvis motta flere refleksjoner, multiple returer er en egenskap som kan visualisere flere refleksjoner i en og samme laserpuls.

Skannevinkel

Ved skanning står laserskanneren i en bestemt vinkel i forhold til objektet/overflaten som skannes. Denne vinkelen defineres som skannevinkel og er en parameterinnstilling som settes før skanningen. Ved luftbåren laserskanning kan vinkelen settes mellom 0° til -90°. 0° vil være på skannerens horisontalplan, altså at man skanner rett frem. Mens -90° vil peke rett ned for horisontalplanet, dette kalles normalt «nadir» (GIM, 2014). Dersom skannevinkelen skråstilles til -45°, kalles dette «oblique». Ved skanning av høye objekter slik som bygninger kan gjerne en oblique vinkel benyttes, mens ved skanning av landskapsterreng brukes gjerne nadir.

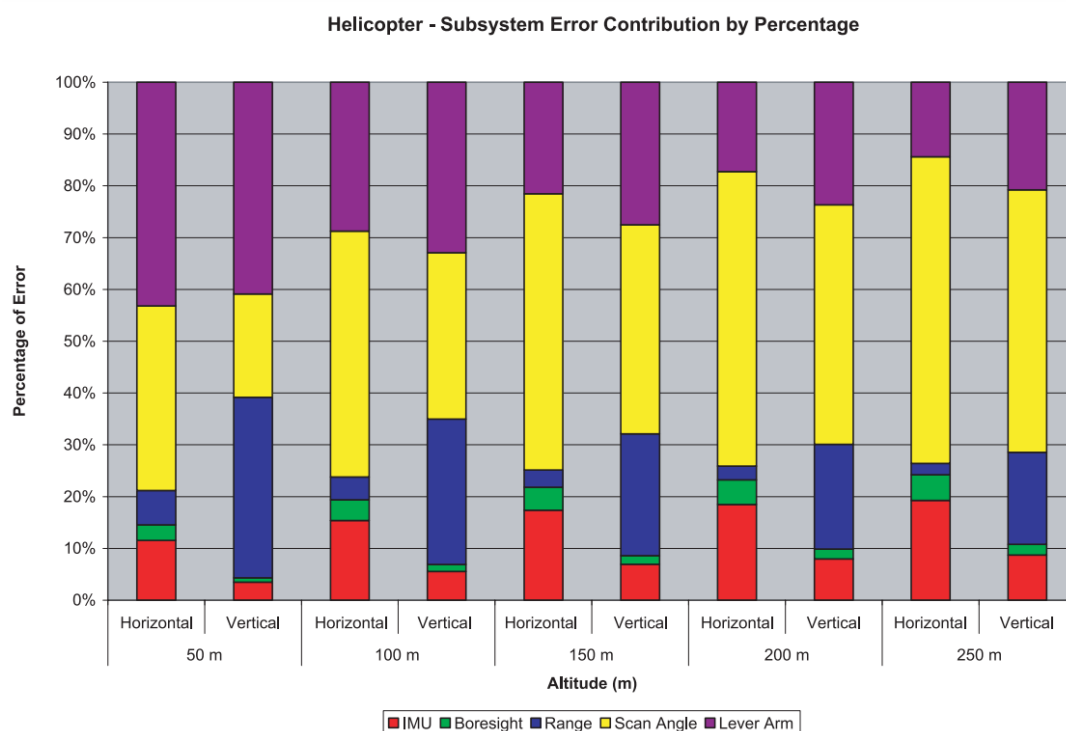
RGB

I samme øyeblikk som laserpuls reflekteres fra bakken, tas det også bilder som kan visualisere punktene med RGB. Ved visualisering brukes et spekter av rødfarge, grønnfarge og blåfarge der en kombinasjon av disse fargene gjenspeiler den opprinnelige fargen punktet består av.

2.3.5 Feilkilder og kalibrering

Systematiske feilkilder finnes i alle landmålingsinstrumenter, og laserskannere er ingen unntak. Kalibrering av instrumentet er justeringer for systematiske feil. Kalibreringen er en kompleks oppgave, hvor målet er at man skal definere de systematiske feilene i instrumentet, og påføre korreksjoner til rådataene slik at man kun sitter igjen med tilfeldige avvik (Schenk, 2001). Vosselman og Maas (2010) har definert en rekke feilkilder for luftbåren laserskanning. Her kan man skille mellom interne og eksterne påvirkninger på nøyaktigheten, hvor systematiske feilkilder slik som feilkalibrering internt mellom GNSS, IMU og skannerenheten kan sies å være den største feilkilden internt i instrumentet. Ved å kalibrere for interne feilkilder, vil målingenes nøyaktighet kun begrenses av små tilfeldige avvik i sammenheng med instrumentets opprinnelige nøyaktighetsoppnåelse. Av eksterne påvirkninger kan man blant annet nevne kompleksiteten av overflaten som skannes og geometrien for skanningen.

Glennie og Eng gjorde i 2007 en undersøkelse av ulike LiDAR-systemers feilforplantning. I artikkelen defineres flere systematisk feilkilder som kan påvirke nøyaktigheten på punktskyens koordinater; IMU, boresight, lever arm forskyvninger og feil knyttet til avstandsmålingen og skannevinkelen. Tabellen under som viser fordelingen av feilkildene for en Riegl LMS-Q240 fra et helikopter. Feilkildene for en drone vil være noe annerledes, men bygger på de samme prinsippene.



Figur 6: Feilkilder fordelt prosentvis for Riegl LMS-Q240. Fra «Rigorous 3D error analysis of kinematic scanning LIDAR systems» av Glennie & Eng, 2007. Journal of Applied Geodesy, 1, s. 154. Gjengitt med tillatelse.

IMU-enheten beregner luftfartøyets roll, pitch og yaw (IMU er nærmere beskrevet i 2.2.2). Disse retningene brukes i beregningen av xyz-koordinater, og for at punktene skal kunne plasseres riktig i forhold til skanneren må retningsverdiene fra IMUen være nøyaktige (nøyaktige IMU-korreksjoner forutsetter også gode posisjoneringsdata fra GNSS-enheten). Her er det viktig at man er klar over at eventuelle orienteringsfeil fra IMUen er proporsjonale med flyhøyden, som vil si at større flyhøyder krever en mer nøyaktig IMU.

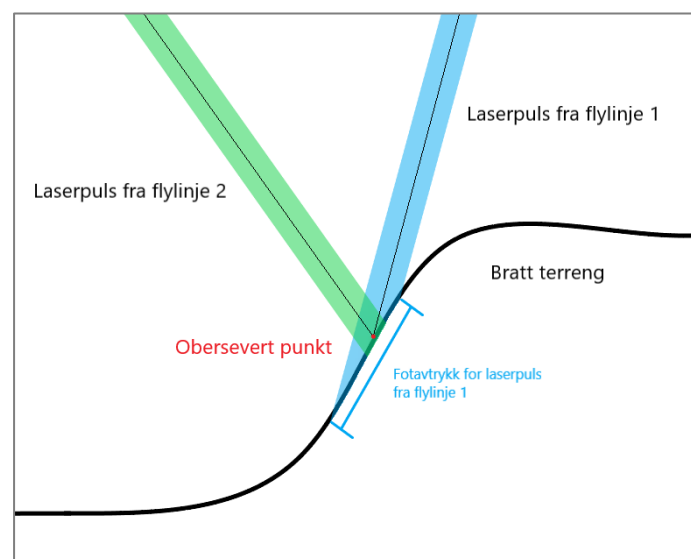
En annen sentral feilkilde når det kommer til kalibreringen av forholdet mellom komponentene i instrumentet, er **boresight** (Vosselman & Maas, 2010, s. 106). Boresight tilsvarer orienteringen mellom IMU og skanner-komponentenes plan. Dersom man ikke har riktig korreksjonsverdi for differansen i orienteringen mellom de to planene, vil man oppleve at skanneren er skjevstilt, noe som kan påvirke målingene i både roll, pitch og yaw-retningene. I tillegg til orienteringen mellom komponentene, er også avstanden mellom dem viktig å ha nøyaktige verdier for. Disse avstandene kalles for «**lever arm**» på engelsk, og i større luftfartøy hvor komponentene kan flyttes på, må avstandene måles hver gang komponentene flyttes. For mindre, mer kompakte laserskannere som er tilpasset til bruk fra drone er komponentene fastmontert til enhver tid. Avstandene mellom komponentene defineres derfor under produksjonen av instrumentet, og kalibreringsverdiene skal i teorien være konstante under hele instrumentets levetid. Eventuelle feil i lever arm-verdiene er ikke avstandsavhengige, og har derfor størst innvirkning ved lave flyhøyder, i motsetning til boresight som får større innvirkning med økende flyhøyde.

Feil som er knyttet til avstandsmålingen og skannevinkelen er to av hovedfaktorene som påvirker nøyaktigheten på LiDAR-målinger. **Avstandsmålingen** som gjøres på ToF-metoden, er i størst grad en funksjon av nøyaktigheten til klokken som måler tiden laserpuls bruker frem og tilbake til objektet som måles (Glennie & Eng, 2007). Målingen må også korrigeres for atmosfæriske forhold og signalstyrke for laserpuls.

Når det kommer til **skannevinkelen** påvirkes denne av to faktorer; vinkelopplosningen til LiDAR-modulen og usikkerheten knyttet til stråledivergensen. Grunnen til at det er knyttet usikkerhet til stråledivergensen er fordi laserpulsene gjerne får store fotavtrykk i luftbåren laserskanning. Instrumentet vil anta at det faktiske målte punktet ligger midt i fotavtrykket, men i teorien kan det egentlig ligge hvor som helst innen laserpulsens fotavtrykk. Usikkerheten beskrives av Lichti & Gordon (2004) som $\frac{1}{4}$ av fotavtrykkets diameter, oppgitt i grader.

Som nevnt er nøyaktigheten på punktskyen også i stor grad avhengig av luftfartøyets GNSS-målinger. GNSS-målingene beskrives nærmere i 2.2.3, men det må her nevnes at nøyaktigheten av målingene påvirkes av faktorer som atmosfæriske forhold (hovedsakelig i ionosfæren), geometrien for benyttede satellitter i forhold til GNSS-mottakeren og banefeil og klokkefeil i satellittene. Signalbrudd/cycle slip og forskyvning av fasesenteret er mulige feilkilder som kan oppstå i selve GNSS-mottakeren.

En annen feilkilde som må nevnes er geometrien til overflaten som skannes og innfallsvinkelen. Spesielt for overflater med bratte skråninger og terrengforskjeller kan man risikere å få unøyaktighet i målingene, særlig i vertikalplanet. Dette skyldes det store fotavtrykket til laserpulsene, og usikkerheten knyttet til stråledivergensen. Denne usikkerheten vil økes for punktets z-koordinat, da fotavtrykket vil dekke et område med varierende høyde. For å minimere effekten i ulendte områder er skanning av det samme punktet fra ulike vinkler en løsning, som vil si at man må benytte større overlapp mellom flylinjene.



Figur 7: Eksempel på utfordring med bratt terreng. Egenprodusert figur.

Metningsfeil

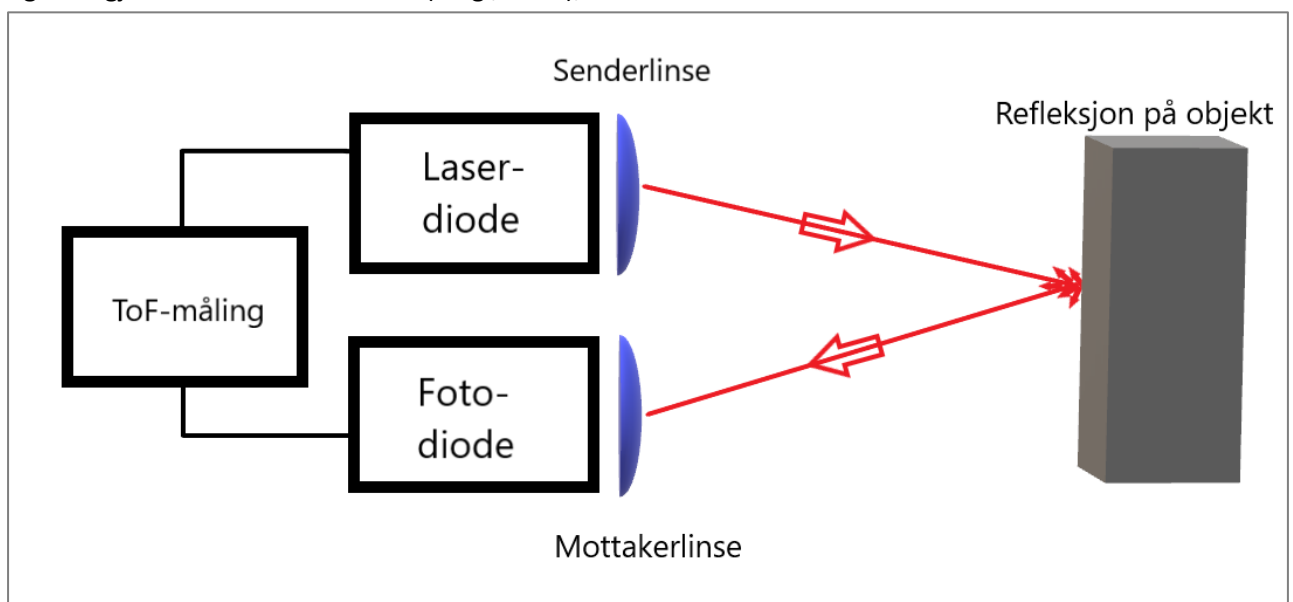
Ved laserskanning kan det forekomme ulike effekter som kan påvirke punktregistreringen. Dette kommer blant annet av hvordan laserpulsene reagerer på objektets eller terrengets egenskaper. Et tilfelle hvor laserpulsene blir påvirket, er når man opplever metnings-effekt (på engelsk: «*saturation-effect*»). Denne effekten oppstår dersom laserpulsene treffer noe som gir sterkere signal fra refleksjonen på kort avstand (Vosselman & Maas, 2010. s. 97). Når retursignalet reflekterer et sterkere signal, betyr dette at bølgeformen på signalet påvirkes. Når signalet forårsaker en endring i bølgene, vil dette oppfattes annerledes og sørge for feilregistrering av avstandmålingen og punktregistrering (Pesci & Teza, 2008. s. 5761).

Blooming/halo-effekt

«*Blooming*» eller «*halo*» er en effekt som påvirker punktregistreringen og som kan relateres til metningsfeil. Effekten oppstår når laserpulsene treffer et objekt og objektet framtrer større i punktskyen enn det er i virkeligheten. Bakgrunnen for dette er at signalet vil reflektere i noe som sender sterkere retur tilbake til sensoren. Et eksempel på dette er ved retroreflektivt materiale. Signalet som returnerer til sensoren vil være av høyere energi enn ved diffuse refleksjoner. På den måten vil sensoren oppfatte et bredere spekter av punkt og dermed registrere flere punkt utover i bredden (Vosselman & Maas, 2010. s. 99).

2.3.6 Refleksjon

Refleksjon handler om at lyset sendes tilbake. Ved laserskanning vil laserpulsene reflektere i overflaten (terrenget, vegetasjonen eller andre objekter) før den sendes tilbake. Når laserpulsene blir mottatt blir det registrert som et punkt. Dette forklares ved å illustrere to typer komponenter i en laserskanner; en sender og en mottaker. En laserpuls blir sendt ut via en diode og en senderlinse. Når laserpulsene reflekterer blir signalet sendt tilbake i lysets hastighet, og en fotodiode vil motta signalet gjennom en mottakerlinse (Riegl, 2006);



Figur 8: Utsendelse og mottakelse av laserpuls gjennom laser-diode og foto-diode. Egenprodusert figur basert på Riegel sitt informasjonsdokument om avstandsmåling (2006, s. 1).

Laserpulsene som blir reflektert, avhenger av egenskapene til overflatematerialet og bølglengden av laseren. Laserpulsen vil returnere med en mengde lys, hvor mengden måles i refleksjonskoeffisient [r]. Riegl (2006) viser noen eksempler hvor refleksjonskoeffisienten varierer mellom forskjellige overflate/materialer. Refleksjonsverdiene i tabellen er gitt med en bølglengde på 900nm (@ $\lambda=900\text{nm}$);

Materialer/overflater med diffus refleksjon

Material	Reflektivitet	Material	Reflektivitet
Hvitt papir	opp til 100%	Grov trepall (ren)	25%
Bartre treverk (furu, rent, tørt)	94%	Betong, glatt	24%
Snø	80 - 90%	Asfalt med småstein	17%
Ølskum	88%	Lava	8%
Hvitt murverk	85%	Svart neopren	5%
Kalkstein, leire	opp til > 75%	Svart gummidekkvegg	2%
Avispapir med trykk	69%		
Tørkepapir, tolags	60%		
Løvtre	vanligvis 60%		
Skjellsand (tørr)	57%		
Skjellsand (våt)	41%		
Strandsand, åpne områder i ørken	vanligvis 50%		

Refleksjon i speilaktige/glatte eller retroreflektive materialer/overflater

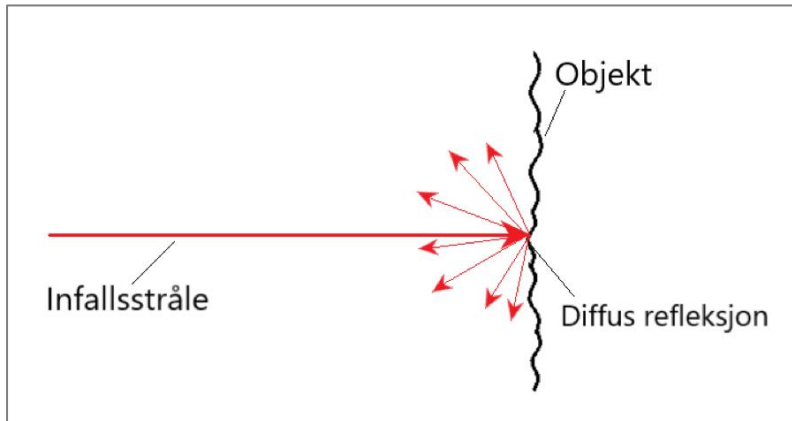
Material	Reflektivitet
Retroreflektiv folie (3M 2000X)	1250%
Ugjennomsiktig hvit plast	110%
Ugjennomsiktig svart plast	17%
Gjennomsiktig plast	50%

Figur 9: Oversikt av overflater/materialer med forskjellig reflekskoeffisient (Riegl, 2006. s. 3).

Refleksjonskoeffisienten varierer mellom ulike måter laserpulsene reflekteres på. Vi skiller mellom diffus refleksjon, refleksjon i speilaktige/glatte flater og retrorefleksjon.

Diffus refleksjon

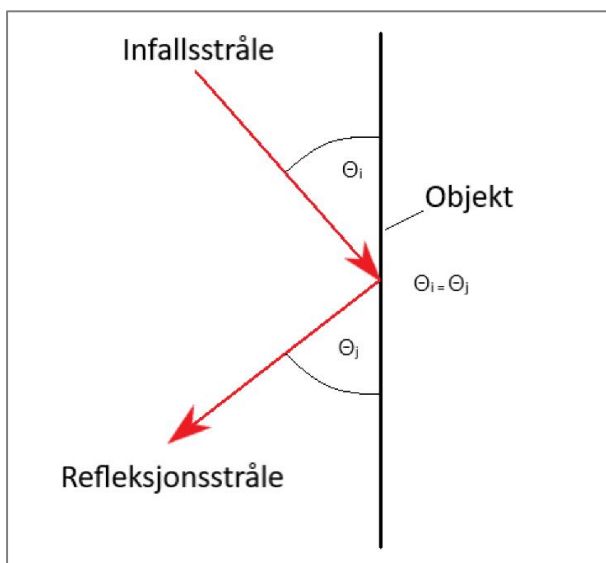
Ved matte eller ru flater kan lyset reflekteres i forskjellige retninger. Lyset kan eksempelvis treffe en terrengoverflate eller form for vegetasjon. Når lyset treffer blader, trær eller bakke vil lyset reflekteres i forskjellige retninger. Denne egenskapen gjør at vi mennesker kan se objekter med øyne. Slik refleksjon kalles for «diffus refleksjon» og refleksjonskoeffisienten $[r]$ vil her variere etter egenskapene til det reflekterte stoffet.



Figur 10: Strålen spres i flere retninger ved diffuse refleksjon. Egenprodusert figur basert på Rigel sitt informasjonsdokument om refleksjon (2006, s.4).

Refleksjon i speilaktige/glatte flater

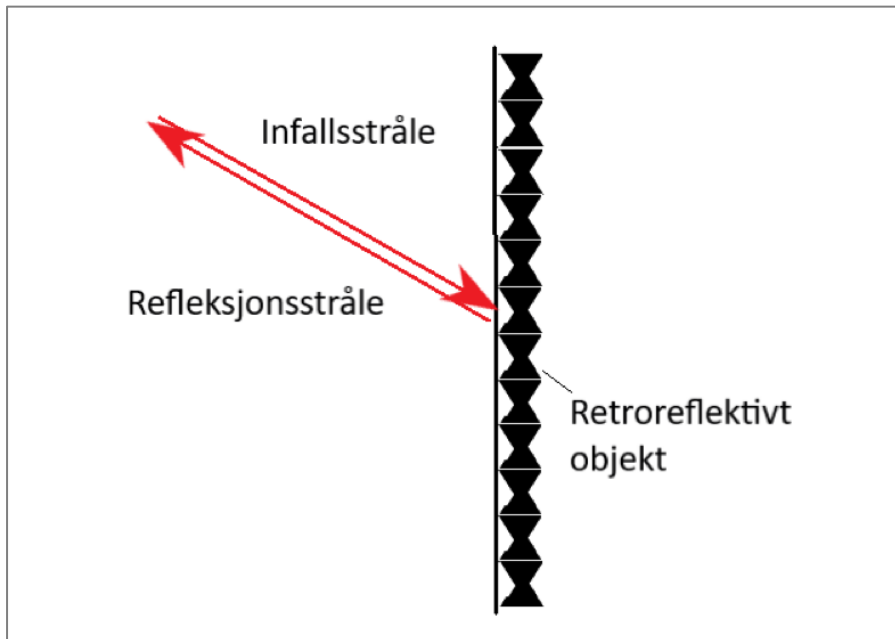
Refleksjonen varierer etter overflatens glatthet og ruhet. Flater som er glatte og kan virke speilaktige, har en egenskap som sender reflekterende lys ut igjen i en «bestemt» vinkel. Vinkelen til den reflekterende strålen baserer seg på innfallsstrålens vinkel. Innfallsvinkelen er da avgjørende for hvilken retning refleksjonen går. Et eksempel på dette kan være at vi lyser 45° mot et speil. Speilet vil da reflektere lyset og sende dette ut igjen i retningen 135° . Innfallsvinkelen er i dette tilfellet lik refleksjonsvinkelen.



Figur 11: Innfallstrålen reflekterer og gir en reflektert stråle med lik innfallsvinkel og refleksjonsvinkel. Egenprodusert figur basert på Rigel sitt informasjonsdokument om refleksjon (2006, s.4).

Retrorefleksjon

Retrorefleksjon er refleksjon hvor lyset sendes tilbake til lyskilden (Stori, 2020). Dette betyr at refleksjonen sender lysbølgen tilbake til utgangspunktet. Retrorefleksjon oppnås ved å bruke hjørnereflekser eller kattøye-refleksjon gravert ned i overflaten. Hjørnereflekser består av vinkelrette flater som reflekterer innfallsstrålen tre ganger før den reverserer strålen tilbake til utgangspunktet. Ved kattøye-refleksjon brytes strålen i en kule eller i et sfærisk speil. Videre blir innfallsstrålen reflektert, og strålen får samme brytning på veg tilbake. På denne måten vil strålen reflektere samme veg tilbake. Figuren under viser et eksempel på retrorefleksjon;



Figur 12: Den retroreflektive strålen returnerer i det samme retningen som innfallsstrålen. Egenprodusert figur basert på Rigel sitt informasjonsdokument om refleksjon (2006, s.4).

2.4 Konfigurering av laserskanner fra drone

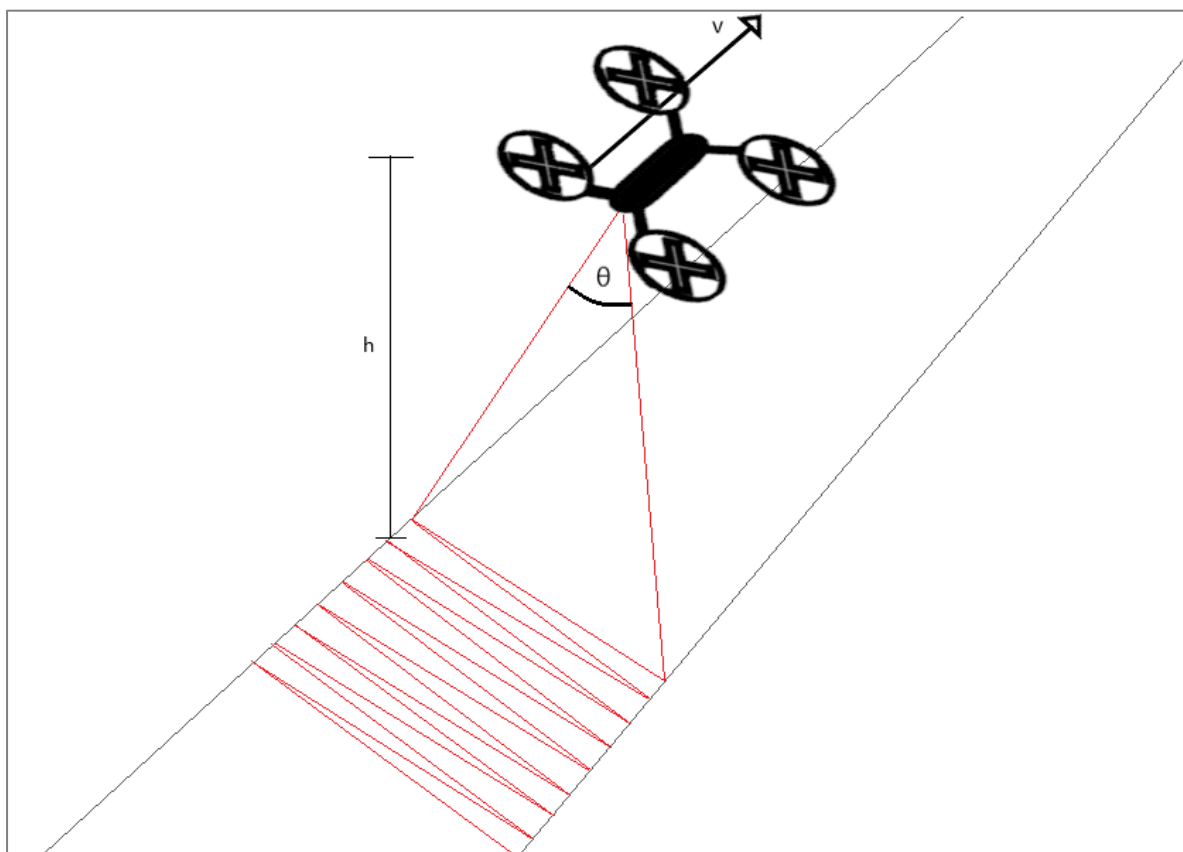
Ved konfigurering av laserskanneren og dronen, sørger man for at skanningen foregår med en bestemt oppløsning. Selve oppløsningen defineres ut fra parameterinnstillinger både for laserskanneren og selve dronen. Sammen gjør disse parameterne utslag for blant annet punkttetthet.

2.4.1 Punkttetthet

Punkttetthet defineres som antall punkt innenfor et bestemt område i punktskyen. Punkttetthet oppgis normalt som punkt/m². Sammen med andre variabler som definerer opptaksparametere, kan punkttetthet beregnes med følgende uttrykk (Vosselman & Maas, 2010. s. 26);

$$P_M = \frac{PRF}{2vh * \tan(\theta/2)} \quad (\text{Formel 2.3})$$

Slik som uttrykker over viser, vil større hastighet på fartøyet [v] sørge for at punkttettheten blir mindre. Dette kommer av at fartøyet vil gå raskere slik avstanden mellom punktene blir større.



Figur 13: Egenprodusert figur med viktige parametere som påvirker punkttetthet.

Hastighet [v]

Endring på fartøyets hastighet [v] påvirker punkttettheten slik at avstanden mellom punktene blir enten større eller mindre. Dersom man øker hastigheten på fartøyet, fører dette til at punktavstanden blir større. Punkttettheten vil dermed være mindre, ettersom det er større avstand mellom hvert punkt.

Høyde over terrenget [h]

Høyde over terrenget [h] blir også omtalt på engelsk som «*Above Ground Level*» (AGL). I luftbåren laserskanning er det vanlig at høyden er bestemt gjennom hele skanneperioden for å få en mest mulig homogen punktsky. Punkttettheten påvirkes av hvilken høyde som er satt. Dette kommer av hvordan laserpulsene sprer seg fra laserskanneren. Ved at høyden over terrenget øker, vil dette føre til redusering av punkttetthet og økning av avstand mellom punktene.

Skannebredde [θ]

Skannebredden [θ] (på engelsk: «*Swath width*»), defineres som den bredden laserskanneren sender ut laserpulser i. Skanneren «sveiper» frem og tilbake på tvers av lengderetningen, og dekker denne definerte skannebredden. Dersom skannebredden økes, vil skanneren bruke lenger tid på å «sveipe» over hele bredden, men til gjengjeld dekkes et større område på bakken. Med forutsetning i at skannefrekvensen [PRF] forblir den samme, vil dette føre til at punkttettheten blir lavere. Det motsatte vil forekomme dersom bredden kortes ned.

Skannefrekvens [PRF]

Pulsrepetisjonsfrekvens eller «PRF» (på engelsk: «*Point Repetition Frequency*»), er et mål på antall laserpulser som blir sendt ut per sekund (Vosselman & Maas, 2010. s. 26). Pulsrepetisjon angis i Hz og angir en svingning mellom hver pulsutsendelse. Når pulsrepetisjonsfrekvensen brukes i formelen, vil denne avgjøre hvor stor eller liten punkttettheten skal være. Et eksempel på dette er at større frekvens sørger for at skanneren genererer flere laserpulser i sekundet. Med større frekvens vil det føre til høyere punkttetthet og mindre avstand mellom punktene.

Beregningen for punkttetthet er kun et teoretisk gjennomsnitt på estimert antall punkt per kvadratmeter, men er nyttig for planlegging av en kartlegging. I praksis vil punkttettheten være avhengig av andre faktorer som overlapping eller antall returpulser og skannemønster i laserskanneren (Vosselman & Maas, 2010. s. 27). For å beregne reell punkttetthet i en punktsky vil følgende formel være egnet:

$$P_M = \frac{\text{antall punkt}}{\text{areal av punktsky}} \quad (\text{Formel 2.4})$$

2.4.2 Flyplan

Bruk av konfigureringsprogram danner grunnlaget for en flyplan. En flyplan viser hvor dronen skal fly og hvilke innstillinger selve flyvningen skal ha (høyde, fart eller orientering). Når det gjelder laserskanneren, kan en flyplan også inneholde opptaksparametere for skanneren (skannevinkel, skannefrekvens, skannemodus, etc.). På denne måten sørger man for en autonom flyvning. Den autonome flyvningen påvirker nøyaktigheten ved å holde dronen stabil i høyde, fart og fly-retning (Siebert og Teizer, 2014. s. 3).

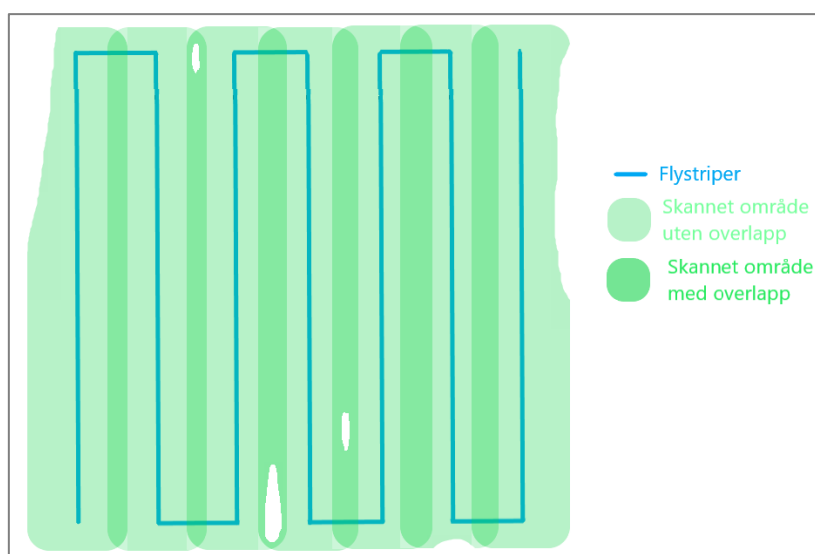
For de fleste konfigureringsprogram blir flyvningen bestemt i en geografisk avgrensning og med en bestemt orientering. En geografisk avgrensning blir fastsatt som et område som flyvningen skal kartlegge. Orienteringen fastsettes ved å angi hvilken retning fartøyet skal ha under skanningen. Figuren under viser et eksempel på en flyvning innenfor et oppgitt areal. Flyvningen dekker område som skal kartlegges og flyretningene går fram og tilbake i en gitt orientering.



Figur 14: Utklipp av flyrute for DJI Matrice 300, fra datafangst av HVL2 i Gjerdrum april 2022. ArcGIS Pro.

2.4.3 Overlapping

Overlapping er en innstilling i konfigureringsprogrammet som lar skanning fra flystriper overlappe hverandre. Bruk av overlapping sikrer helhetlig datainnsamling over et område. Dersom overlapping ikke benyttes i flyplanen, kan man risikere å få «hull» i datasettet. Som regel blir det satt inn 20 % overlapping i konfigureringsprogrammet ved luftbåren laserskanning. Dette er for å unngå hull og kompensere for mindre avvik som kan forekomme ved flyets bevegelse ved skanning, eller ved større terrengforskjeller (Vosselman & Maas, 2010. s. 30). Nedenfor vises et illustrativt eksempel på overlapping av flystriper;



Figur 15: Utklipp som viser overlapping. Egenprodusert figur.

Et mål på overlapping forekommer i prosent. Hvor mye overlapping som flyvningen skal ha, kan legges inn i konfigureringsprogrammet.

2.5 Kontrollpunkt og kontroll av punktskyer

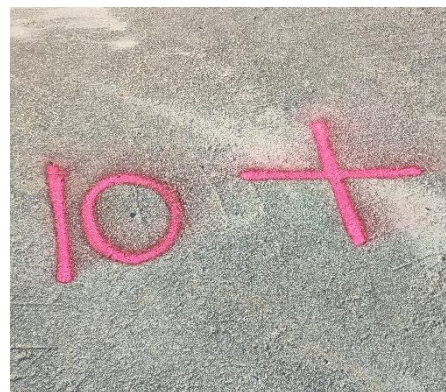
2.5.1 Kontrollpunkt

Kontrollpunkt er tydelig definerte punkt i terrenget med kjente koordinater som kan brukes for geometrisk kontroll. Kontrollpunkt er et generelt begrep som omfatter flere fagfelt innenfor landmåling. Andre begrep som brukes er for eksempel «*targets*» i terrestrial laserskanning eller «*fastmerker*» ved måling i bygg og anlegg. Innenfor luftbåren fotogrammetri eller luftbåren laserskanning, blir disse kalt for «*blinker*», «*markører*» eller «*ground control point*» (GCP). Kontrollpunktets koordinater kan etableres med innmåling fra statisk GNSS, sanntids GNSS eller med totalstasjon. Valg av instrument og metode for innmåling sørger for at kontrollpunktet blir fastsatt med en viss nøyaktighet. Kontrollpunktets koordinater håndteres som kjente og kan brukes til å kontrollere målinger for å avdekke systematiske og grove feil. Slik geometrisk kontroll gir økt redundans av punktene.

2.5.2 Ground control point (GCP) med fotogrammetri

Ground control points (GCP) defineres som markører på bakken og blir brukt som kontrollpunkt innenfor luftbåren fotogrammetri og laserskanning.

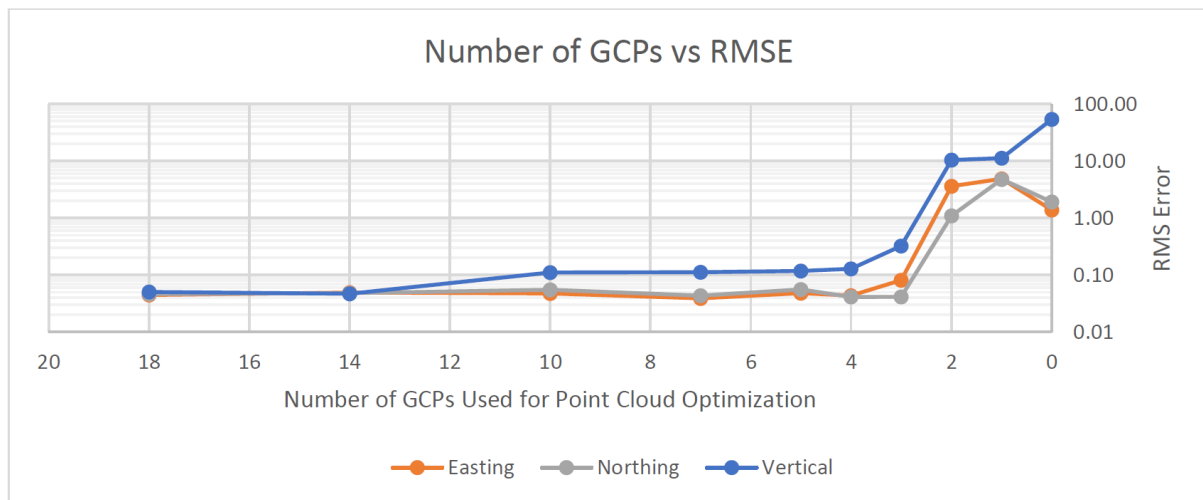
I fotogrammetri blir GCP-er lagt ut eller markert i terrenget for å knytte bildene ned til terrengets overflate. Dette skjer ved at GCP-ene måles inn på forhånd, slik at de får kjente koordinater i horisontalt (x og y) og vertikalt datum (z). Innmålingen av GCP-ene må være nøyaktig, for å kunne oppnå god nøyaktighet ved videre bruk av GCP-ene som kjentpunkt. I etterprosesseringen markeres disse GCP-ene gjennom georeferering. Dette innebærer at geografiske koordinater knyttes til bildene, slik at bildene følger terrenget. Når bildene sammenfaller med terrenget, kan man videre prosessere en terrengmodell. Prosessen benytter dermed beregna høydeverdier for pikslene og danner en terrengmodell ut fra dette.



Figur 16: Eksempel på markør brukt til fotogrammetri, Øygarden 8. mars 2022.

Når man georefererer GCP-ene, peker man ut midtpunktet av markøren. Forutsetningen for å gjøre dette, er at GCP-ene er tydelige (for eksempel ikke grønn GCP på en grønn plen) og store nok til å pekes ut fra en viss flyhøyde. Når midtpunktet er funnet, kan disse kontrollere bildene opp mot innmålingene som ble gjort før flyvning. Det kan sørge for å avdekke systematiske feil som foreligger i instrumenter eller avdekke avvik som foreligger i datasettet.

For at grove feil skal kunne oppdages, har standarden for Kart og Geodata (2009, s. 58) oppgitt et minimum for antall kontrollpunkt som skal brukes. Standarden poengterer at det generelt skal være minimum 5 kjentpunkt per kartleggingsområde. Videre anbefales det at man bruker flere punkt, desto større kartleggingsområde er. En undersøkelse foretatt av Pix4D understøtter bruken av antallet GCP-er og hvordan dette påvirker nøyaktigheten. Undersøkelsen viser til at RMSE (Root Mean Square Error) øker, jo færre GCP-er som blir tatt i bruk (Pix4D, 2018). Dette synliggjøres i figuren under. RMSE er et mål på differansen mellom predikerte verdier og observerte verdier. Et slikt mål bruker differansen for å måle avviket mellom GCP-koordinatene og de målte dataene foretatt med fotogrammetri. Et slikt avvik kalles residualer og kan gi et estimat på standardavviket av dataene (Ghilani, 2018. s. 29).



Figur 17: Grafen viser antall GCP-er og hvor dette påvirker RMSE. Fra «Do more GCPs equal more accurate drone maps?», av Pix4D, 2018. (<https://www.pix4d.com/blog/GCP-accuracy-drone-maps>). Gjengitt med tillatelse.

2.5.3 Ground control point med luftbåren laserskanning

I luftbåren laserskanning, som i fotogrammetri, benyttes også GCP som et begrep for kontrollpunkt. Bruk av GCP-er i luftbåren laserskanning, danner grunnlag for å kontrollere punkttskyen opp mot horisontalt og vertikalt datum (Federal Emergency Management Agency, 2003. s. 13). Ved laserskanning har man altså ikke det samme behovet for GCP-er som ved fotogrammetri når det kommer til georeferering av punkttsky, da en punkttsky fra laserskanning georefereres direkte under datafangsten.

Kontrollen av punkttskyen er derfor GCP-enes oppgave ved laserskanning, hvor kontrollen er et grunnlag for absolutt nøyaktighet (Csanyi & Toth, 2005. s. 386). Dette innebærer at man kan undersøke hvor god absolutt nøyaktighet punktene i punkttskyen har i forhold til et gitt koordinatsystem (Skogseth og Norberg, 2014. s. 260). Videre er GCP-ene også et grunnlag for å kontrollere den relative nøyaktigheten. Dersom en komponent i laserskanneren utgjør systematiske feil på skanningen, kan det forårsakes avvik både på absolutt og relativ nøyaktighet. Bruk av GCP vil altså sørge for å avdekke systematiske feil som foreligger i instrumenter eller som foreligger i datasettet.

Nøyaktigheten til GCP-posisjonen i punkttskyen er avhengig av flere faktorer (Csanyi og Toth, 2007. s. 388). Dersom det foreligger en lav punkttetthet i datasettet, vil dette medføre færre punkt som vil dekke GCP-en. Det er dermed mindre sannsynlighet for at en av punktene representerer GCP-ens senterpunkt, noe som gjør at man ikke vil oppnå like god nøyaktighet for GCP-posisjonen i punkttskyen. LiDARens nøyaktighet for innmåling av punktene i punkttskyen, samt genereringen av senterpunktet på GCP-ene under registreringen er også viktige faktorer til GCP-ens nøyaktighet.

2.5.4 Konfigurasjon av Ground control points (GCP)

Ved luftbåren laserskanning skal kontrollpunktene registreres fra en viss flyhøyde med en gitt punkttetthet. Konfigurasjonen er derfor vesentlig for at selve prosessen skal kunne være effektiv. Dette gjelder blant annet størrelse, materialvalg og form på kontrollpunktet. Slike egenskaper er avgjørende for hvor tydelige kontrollpunktene blir i punkttskyen og hvor nøyaktig man kan peke ut det innmålte midtpunktet ved georeferering.

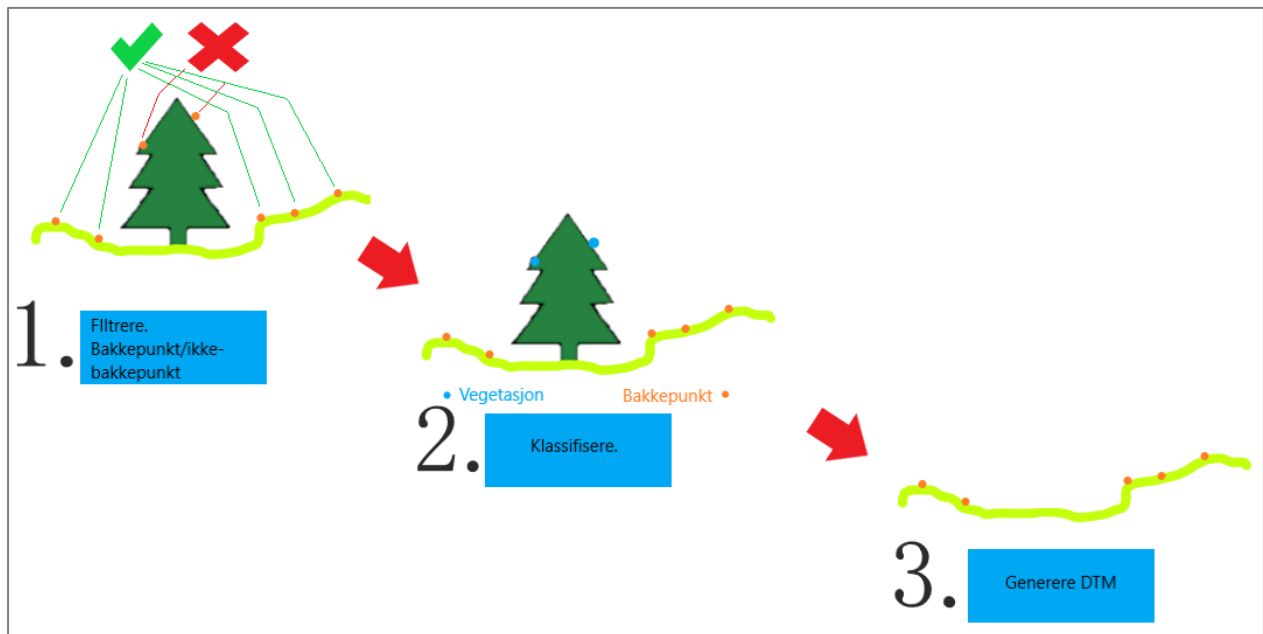
For at GCP-er skal kunne brukes på en effektiv måte, må utformingen også optimaliseres gjennom egenskapene. Vekt, materialbruk og visualisering er vesentlig faktorer. GCP-ene legges ut i terrenget og bør ikke være for tunge med tanke på frakt. I tillegg bør de være konfigurert til å kunne stå fastmontert i samme område over lenger tid. Dette innebærer at de bør tåle vann, ettersom det kan regne eller være fuktig på bakken. Materialet bør ikke være fleksibelt, da man ønsker en jevn og bein overflate (*Pix4d, 2019*).

2.5.5 Registrering av GCP-er

GCP-er som blir brukt i luftbåren laserskanning bygger på samme prinsipp som for fotogrammetri, men skiller seg når det kommer til hvordan laseren registrerer punkter. Ved fotogrammetri benyttes piksler og bilder i RGB for å markere GCP-ene. Med luftbåren laserskanner får man direkte punkttsky som datasett. Punktene innehar egenskaper som kan benyttes til registrering av GCP-ene (mer om punkt-egenskaper i kap. 2.3.4). Et eksempel på egenskaper som kan brukes til registrering, er RGB-, intensitets- eller høydeverdier.

2.6 Generering av digital terrengmodell (DTM)

For å visualisere data fra en punktsky, lager man en digital terrengmodell (DTM). En DTM er en overflate som følger terrengets helning og form. Denne overflaten vil man typisk kunne se i programvaren i 3D, og gir oss et svært realistisk syn på hvordan kartlagte områder ser ut i virkeligheten. Denne prosessen inneholder tre steg som er vist på figuren under.



Figur 18: Prosess for generering av DTM. Egenprodusert figur.

2.6.1 Filtrering og klassifisering

Filtrering av datasett er en essensiell del av prosesseringen. Datainnsamlingen av et område inneholder visuelt sett det samme som man kan se med øynene fra et fugleperspektiv. I enkelte tilfeller ønsker man å skape en DTM over området. Utfordringer her vil være at vegetasjonen kan skape et urealistisk syn av terrenget, fordi laserstrålen treffer busker og trær som ligger over terrenget. Ved hjelp av filtrering kan man fjerne vegetasjonen og skape en terrengoverflate basert på bakkepunkt. Dette innebærer at man utelukker punkt som representerer vegetasjon som greiner, trestammer eller andre objekter. Når man har funnet bakkepunkt og ikke-bakkepunkt må man klassifisere dataene. Da vil det være greit å skille mellom klassene vegetasjon og terreng. Punktene som klassifiseres som vegetasjon fjernes, og man har da et godt grunnlag for å generere selve DTM-en.

2.6.2 Genering av DTM

Generering av DTM er en viktig del av prosessen dersom man ønsker å skape en 3D-modell av et område. DTM er en kontinuerlig overflate som følger punkt-til-punkt i punktskyen, som vi sitter igjen med etter at vi har filtrert bort ikke-bakkepunktene. Det finnes flere varianter av verktøy som lager terrengmodeller, som baserer seg på ulike algoritmer. Verktøyet vi har brukt er Mesh -> Delaunay 2.5D (XY plane) i CloudCompare. Her foretas det en trianguleringsprosess mellom grunnrisspunktene, som man deretter syr sammen med 3D-punktene (CloudCompare, 2015).

2.7 Utstyr og programvare

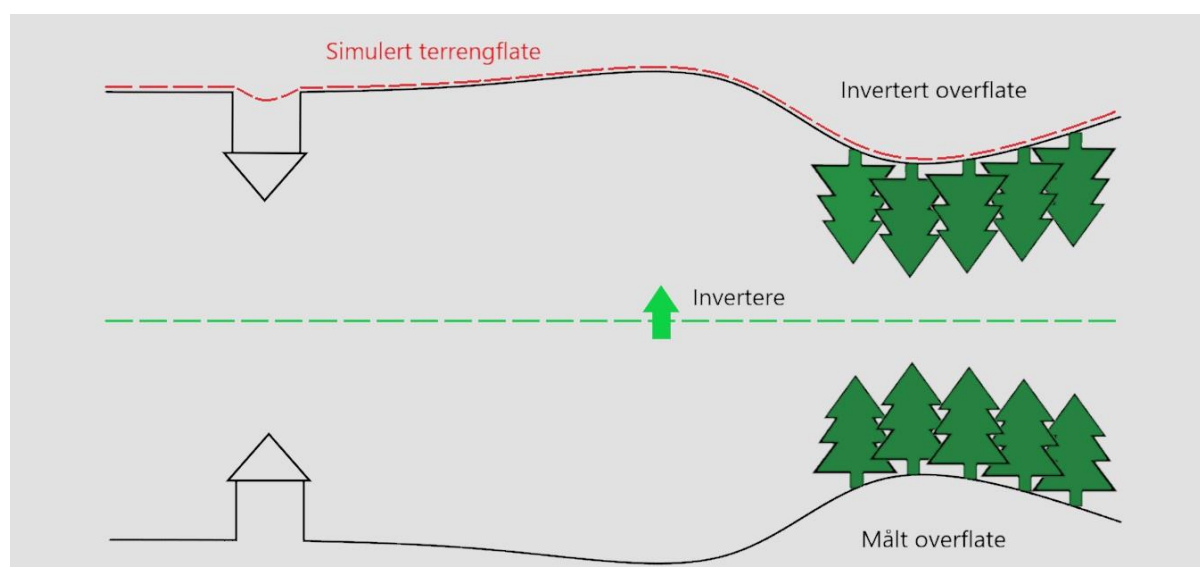
Kapitlet inneholder oversikt over utstyr og programvare som er benyttet under arbeidet med oppgaven.

2.7.1 CloudCompare v2.12

CloudCompare er en gratis, open-source programvare som kan brukes til editering og prosessering av 3D-punktskyer (CloudCompare, 2016). CloudCompare har mulighet til å lese blant annet filformatene BIN, ASCII og LAS. Programvaren ble i utgangspunktet utviklet for å kunne sammenligne store punktskyer, men har i dag utviklet seg til å få en rekke andre nyttige algoritmer, slik som verktøy for registrering, segmentering og statistiske analyser;

2.7.1.1 Cloth Simulation Filter (CSF)

CSF-filteret er en programvareutvidelse og et filtreringsverktøy som brukes for å skille mellom bakkepunkter og ikke-bakkepunkter i en punktsky (Zhang et al., 2016). Filteret er ønskelig å bruke i situasjoner hvor man skal generere en terrengmodell (DTM) av en punktsky, da man i slike situasjoner ønsker å ekskludere ikke-bakkepunkt fra analysen. Metoden som benyttes i CSF baserer seg på at man snur punktskyen på hodet, og legger en tenkt duk over. I parameterinnstillingene bestemmer man blant annet hvor følsom/løs denne duken skal være for endringer i terrenget. Ved større terrengforskjeller slik som større bygninger, vil duken falle i en bue, og dermed inkludere eventuelle punkt som ligger i området. Her er det også mulig å definere en terskelverdi mellom punkt og en simulert terrengmodell, hvor terskelverdien definerer i hvilket område punkter skal inkluderes.



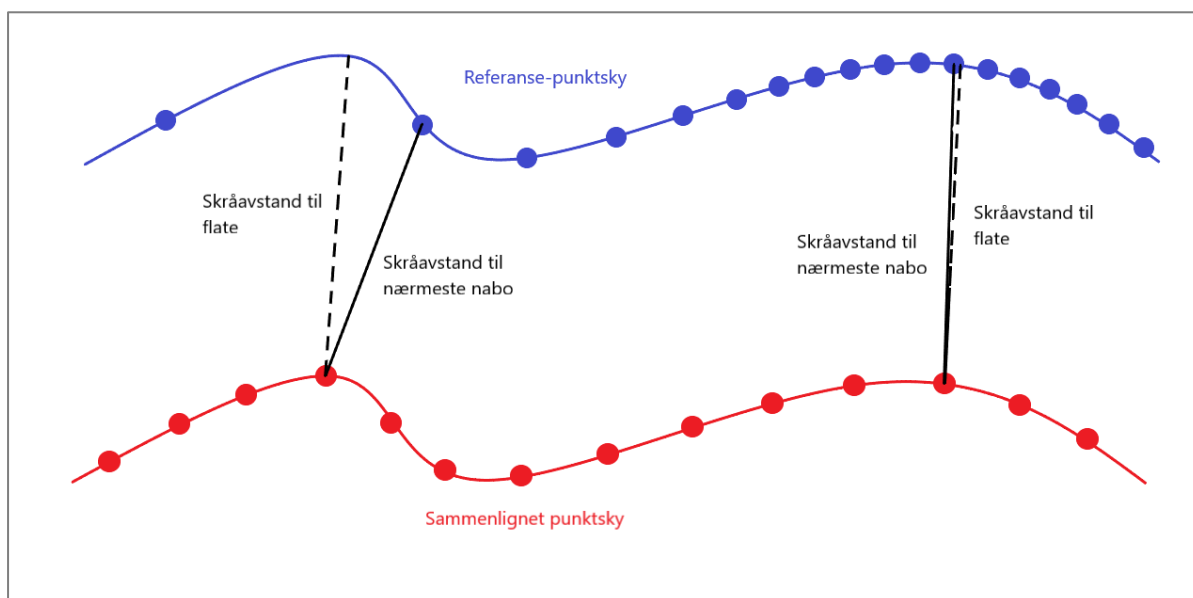
Figur 19: Oversikt over CSF. Egenprodusert figur basert på «An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation» av Zhang et al., 2016, *Remote Sensing*, 8(6), s 3.

2.7.1.3 Sammenligning av punktskyer

Som nevnt er CloudCompare utviklet med hensikt i å kunne sammenligne punktskyer. Programvaren har flere ulike sammenligningsmetoder, hvor hver metode har ulike egenskaper som gjør dem egnet i ulike tilfeller.

Cloud/cloud og cloud/mesh distance

Siden punktskyer ikke danner kontinuerlige overflater, er punkttettheten og punktenes koordinater i forhold til hverandre noe man må ta hensyn til ved sammenligning av punktskyer. Den naturlige måten å sammenligne punktskyer på er ved å se på skråavstanden mellom de "nærmeste naboene" i begge punktskyene (CloudCompare 2021). Dette er en metode som egner seg godt i tilfeller hvor man har høy punkttetthet, da man som regel vil finne et nabopunkt som samsvarer relativt bra i slike tilfeller. I tilfeller hvor man har lav punkttetthet, eller en av punktskyene inneholder hull, kan det være nødvendig å benytte seg av andre sammenligningsmetoder. Cloud/cloud distance-verktøyet tilbyr sammenligning ved at det beregnes flater rundt de nærmeste nabopunktene i referanse-punktskyen, og at det er skråavstanden til disse flatene som da brukes i sammenligningen. I utgangspunktet vil metoden hvor det beregnes flater gi det beste resultatet, men den er også mye mer tidkrevende. Om man har høy punkttetthet, kan derfor "nærmeste nabo"-sammenligning være det beste valget.



Figur 20: Sammenligning av punktskyer. Egenprodusert figur.

En annen, lignende sammenligningsmetode som finnes i CloudCompare er Cloud/mesh distance. Dette egner seg best når en av datasettene som skal brukes i sammenligningen har lav punkttetthet. Et mesh dannes basert på punktskyen med lav punkttetthet, og man har dermed en kontinuerlig overflate å sammenligne punktskyen sin med. Ved å se på figur 20 vil Cloud/mesh distanser beregnes ved at man finner skråavstanden til flaten, fremfor skråavstand til nærmeste nabo slik som ved Cloud/cloud metoden.

2.7.3 DJI Terra v3.3.4

Terra er DJI sitt eget drone-kartleggingsprogram (DJI, u.å.a). I programmet kan man planlegge flyvninger, og prosessere datafangsten. Hensikten med programmet er å gjøre det enkelt for brukeren å behandle data slik at man ikke er avhengig av andre program i løpet av den hele og fulle prosessen. Man skal enkelt kunne se digitaliseringen av datafangsten i et «real-world scenario». Vi brukte programmet til å hente ut laz filer fra flyvningen.

2.7.4 ArcGIS v2.8.3

ArcGIS er programvare utviklet av Esri, og er en av verdens ledende programvarer for geografiske informasjonssystemer (GIS) (Geodata, u.å). ArcGIS har en rekke ulike bruksområder og funksjoner, blant annet kobling av data med kart, samt analyse av innhentede data. ArcGIS deles opp i flere ulike programvarer, hvor ArcGIS Pro og ArcGIS Online er det som benyttes i denne oppgaven. ArcGIS Pro benyttes til analyse og bearbeiding av punktskyer, mens ArcGIS Online har blitt benyttet til visualisering og deling av disse dataene.

2.7.5 Gemini Terreng v16 og Gemini Oppmåling v5.4

Gemini Terreng og Gemini Oppmåling er programvarer utviklet av norske Powel (nå Volue ASA). Gemini Terreng er en markedsledende programvare på infrastrukturprosjekter i Norge. Programvaren kan benyttes i flere deler av et prosjekt og egner seg til de fleste oppgaver fra prosjektering til geometrisk kontroll. Gemini Oppmåling er en programvare som håndterer både innlesing, bearbeiding, beregning og dokumentasjon av landmålingsdata.

2.7.6 Landmålingsutstyr

2.7.6.1 GNSS

Under feltarbeidet på Gjerdrum er det benyttet en Leica GS18 T, denne benytter seg av differensielle GNSS-målinger med sanntidskorreksjoner ved hjelp av korreksjonstjenesten CPOS fra Kartverket. Leica oppgir i instrumentets datablad at GS18 har en nøyaktighet på 8mm + 0.5 ppm i grunnriss, og 15mm + 0.5ppm i høyde (Leica Geosystems, 2021). Dette gjelder ved bruk av nettverks RTK, slik som CPOS.

2.7.6.2 Totalstasjon + reflektor

Totalstasjon er et instrument som kan foreta avstandsmålinger og vinkelmålinger (Mæhlum og Ørstavik, 2020). Instrumentet er kjent for å oppnå god nøyaktighet og kan brukes der hvor GNSS-utstyr ikke får dekning fra satellitter eller ikke oppnår tilstrekkelig nøyaktighet. Under feltarbeidet i Gjerdrum ble det benyttet en Leica Viva TS15. Dette er en totalstasjon med 1 mm + 1.5 ppm i avstandsnøyaktighet og 1" (0,3 mgon) i vinkeløyaktighet. Sammen med totalstasjonen ble det benyttet en reflektor (GPR111), også kalt rundprisme. En reflektor brukes ved avstandsmåling og sørger for at retursignalet blir returnert med minst mulig avvik.

2.7.7 Drone

Til innsamlingen av datagrunnlaget for oppgaven er det brukt en DJI Matrice 300 RTK med LiDAR-modul fra DJI.

DJI Matrice 300 RTK har en teoretisk rekkevidde på 15km fra fjernkontrollen som er koblet til dronen. Med sine to LiPo 12S batterier på 5935mAh, kan dronen oppnå en flytid på 55 minutter. Dette tilsvarer et område på 2 km² som kan kartlegges med LiDAR i en enkelt flyvning (basert på tester gjennomført av DJI). Batteribytter er også gjort enkelt med «Hot-swappable battery», som vil si at man kan bytte batteri uten at dronen skrur seg av, og man kan dermed i teorien kartlegge så store områder man vil, så lenge man har tilgang på flere batterier.



Figur 21: DJI Matrice 300 RTK, Gjerdrum 6. oktober 2021.

For å styre dronen benyttes DJI Smart Controller Enterprise, som har en integrert 5.5" berøringsskjerm. Skjermen er tilpasset bruk i alle forhold, og har en luminansverdi på 1000 cd/m², som vil si at man kan se skjermen ekstra godt under lyse forhold. Dronen støtter også tilkobling av to kontroller samtidig, som gjør det mulig å fly dronen over større områder. På kontrollen benyttes applikasjonen DJI Pilot, som er DJIs offisielle app til bruk på denne dronen.

Dronens posisjoneringssystem kan benytte seg av GNSS-systemene GPS+GLONASS+BeiDou+Galileo. GNSS mottakere er montert på to av dronens "armer". Den ene mottakeren registrerer dronens posisjon, mens den andre mottakeren registrerer dronens retning. Oppgitt posisjoneringsnøyaktighet når fix-løsning for RTK er oppnådd, er på 1cm + 1ppm i grunnriss og 1.5cm + 1ppm i høyde (DJI, november 2021). Fix-løsningen oppnås i vårt tilfelle ved å benytte seg av Kartverkets korreksjonstjeneste CPOS.

Matrice 300 RTK har mulighet for tilkobling av flere ulike sensorer. Med to festemuligheter på undersiden og en på toppen, kan dronen utstyres med alt fra lyskaster til infrarødt kamera (maks lastekapasitet er 2.7 kg). Maks totalvekt er 9 kg, som gjør at dronen havner i underkategorien A3 ved operasjoner i åpen kategori etter europeisk regelverk (Luftfartstilsynet, 2021). Til vår oppgave er kun LiDAR-modulen Zenmuse L1 benyttet, denne er nærmere beskrevet i neste delkapittel.

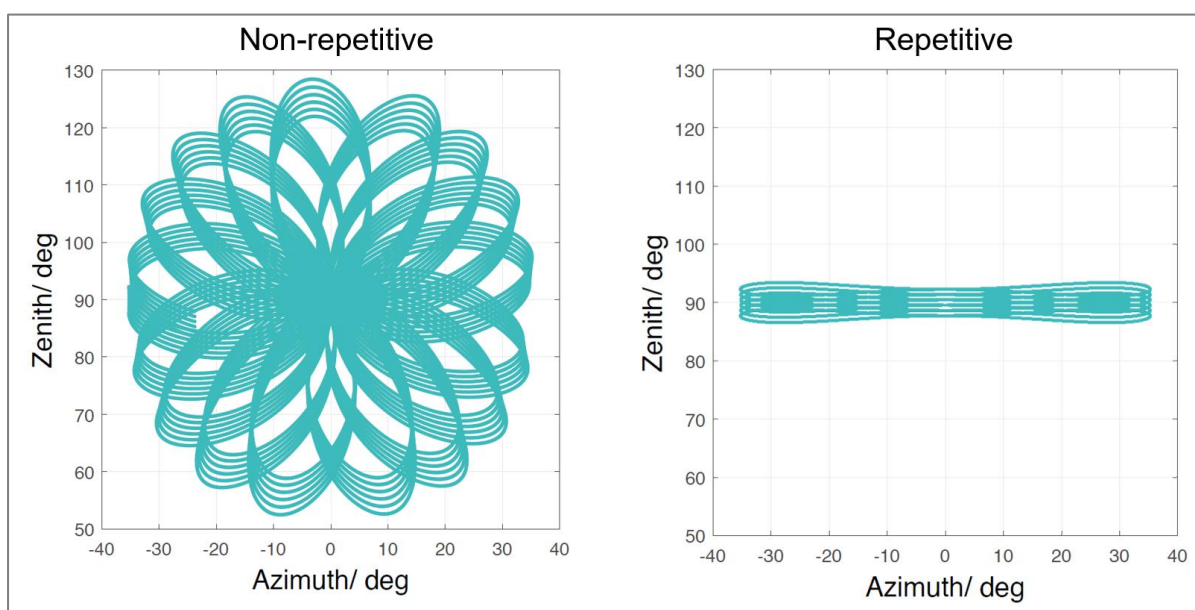
2.7.7.1 DJI Zenmuse L1

Sensoren som er benyttet til datainnsamlingen er en DJI Zenmuse L1. L1 er en komplett sensor med integrert LiDAR-sensor, RGB kamera og IMU-enhet.

Den integrerte LiDAR-sensoren er en Livox Avia. Skanneren er en ToF-sensor, som har en teoretisk rekkevidde på 450m (ved 80 % refleksivitet, 0 klx). Anbefalt arbeidsavstand fra DJI er derimot på 50 til 120 meter (DJI, u.å.b). Skanneren har mulighet til å registrere opptil tre returpulser, og har en skannehastighet på opptil 240 000 punkt i sekundet. L1 har mulighet for både non-repetitive og repetitive skannemodus. Non-repetitive er en unik modus for L1, som benytter et nær-sirkulært synsfelt (på engelsk: «Field of View») på $77.2^\circ \times 70.4^\circ$. Skannemodusen danner høyest punkttetthet i senter av synsfeltet, og anbefales til skanning av objekter. Repetitive skannemodus er en mer tradisjonell modus med et synsfelt på $70.4^\circ \times 4.5^\circ$, som fører til mer uniforme og presise resultater (DJI, september 2021). Til topografisk skanning er derfor repetitive skannemodus best egnet. Skannemodusene er skissert i figuren under:



Figur 22: DJI Zenmuse L1, Gjerdrum 6. oktober 2021



Figur 23: Non-repetitive (venstre) og repetitive (høyre) skannemodus. Fra «ZENMUSE L1 – User Manual», av DJI 2021a. (<https://www.dji.com/no/zenmuse-l1/downloads>).

Nøyaktigheten for den endelige punktskyen påvirkes av IMU-enheten. Den integrerte IMU-enheten har en oppdateringsfrekvens på 200 Hz, samt en nøyaktighet på 0.15° for yaw og 0.025° for pitch/roll (RMS 1σ). I instrumentets datablad er det oppgitt en samlet systemnøyaktighet med RMS 1σ på 10cm i grunnriss og 5cm i høyde. Disse nøyaktighetsverdiene gjelder for en flyhøyde på 50 meter.

Kalibrering av sensoren er viktig for å justere for systematiske feil, slik at man oppnår et nøyaktig resultat. Kalibreringen gjelder i hovedsak IMU-enheten, men også for å unngå problemer som unøyaktig fargelegging og lagdeling av punktskyen. DJI oppgir i instrumentets datablad (2021a) at kalibrering burde gjøres i starten og slutten av hver flyvning, i tillegg til minst hvert 100. sekund. Kalibreringen underveis i flyvningen foretas i enden av flystriper, hvor en flyhastighet på 10 m/s fører til at man må kalibrere hver 1000m (noe som vil si at hver flystripe kan ha en maks lengde på 1000m). Så lenge kalibrering er påskrudd under planleggingen, vil dronen automatisk gjennomføre nødvendige kalibreringer. Kalibrering kan gjennomføres på to ulike måter, avhengig av hva slags type flyvning man gjør. For en tradisjonell kartleggingsflyvning (på engelsk: «*Mapping mission*») gjennomføres kalibreringen ved at dronen kjører frem og tilbake, mens kalibreringen for en oblique-flyvning gjøres ved at dronen kjører i et åttetall, som vist i figur 24. I tillegg til kalibrering, er det anbefalt at LiDAR-modulen varmes opp i 3-5 minutt før flyvning, dette er også en automatisk prosess hvor man får beskjed når oppvarmingen er fullført.

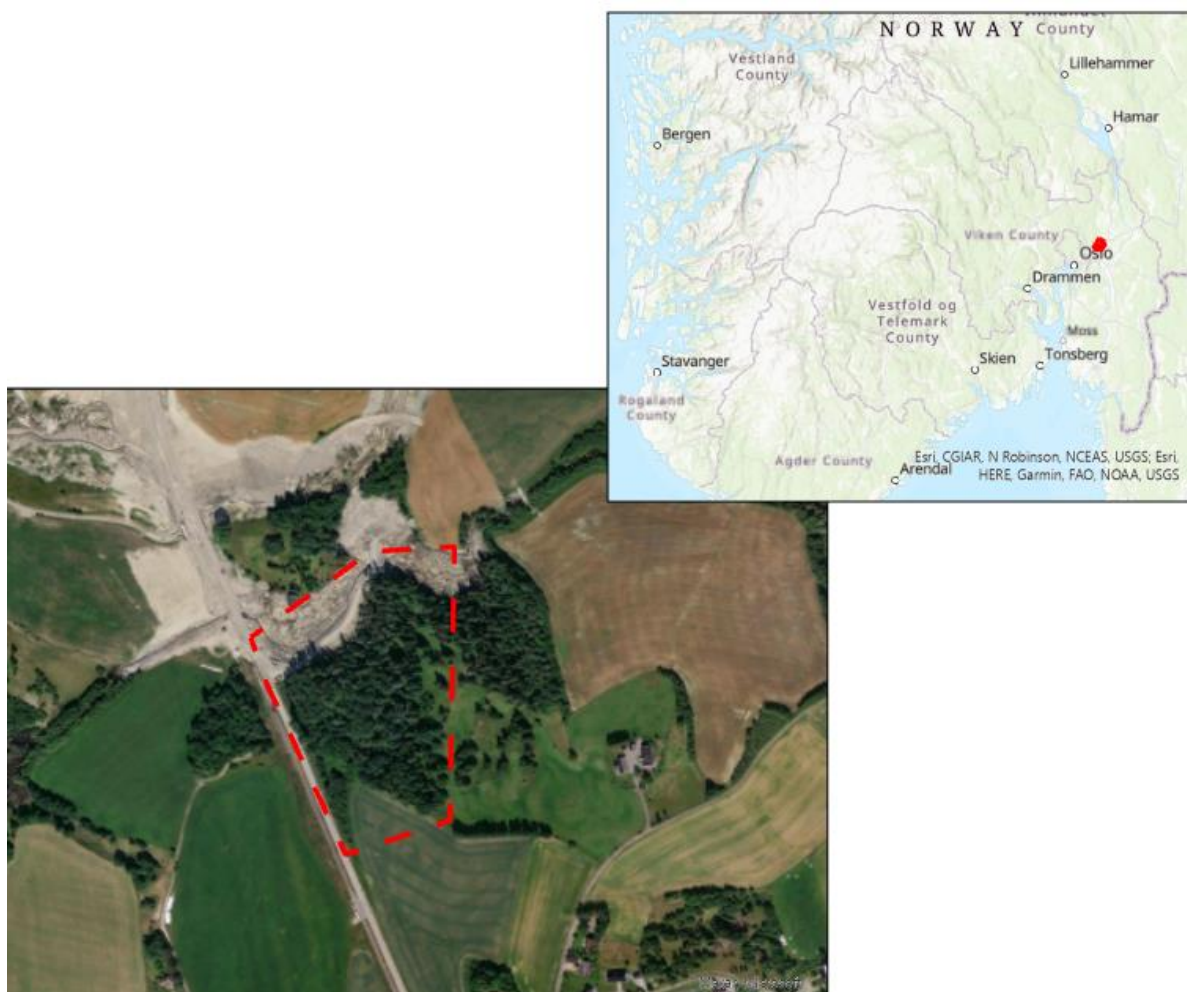


Figur 24: Kalibrering i åttetall under "HVL6", Gjerdrum 6. oktober 2021

Flyhøyde	Overlapp	Hastighet	Skannemodus	IMU kalibrering
50-100m	50%	8-12 m/s	Repetitive	Aktivert

Tabell 1: Anbefalte innstillinger for kartleggingsflyvninger fra DJI.

3. Metode



Figur 25: Bilde til venstre viser avgrensa område for datainnsamling i stiplet rød linje. Bilde til høyre viser oversiktskart. Gjerdrum er markert i rødt, nord for Oslo. ArcGIS Pro.

Som et grunnlag for å svare på problemstillingene, ble det fastsatt et avgrensa område for datainnsamlingen. Det avgrensa området er lokalisert i Gjerdrum kommune, nærmere bestemt ved utløpssonen til kvikkleireskredet som gikk i desember 2020. Fastsettelsen av området ble foretatt av NVE, med tanke på sikkerhet og i tråd med problemstillingene.

Egenskapene for området kan defineres som vegetasjonsfylt. Vegetasjonen har diffus refleksjon og består av trær med løvverk av typen bjørk, osp og løv. I tillegg finnes et fåtall av typen gran. Videre er terrenget bestående av en bakketopp som strekker seg ca. 24 meter opp fra omkringliggende terreng. Nord for vegetasjonen ligger en anleggsvei hvor massene er jevnet ut mot en elv. Vegetasjonen og terrenget har vært nødvendige egenskaper for å undersøke hvilke optimale parameterinnstillinger som gir flest bakkepunkt. De åpne og jevne områdene i utkanten av området dannet grunnlag for å teste ut konfigurerte GCP-er.

3.1 Gjerdrum oktober 2021

Det ble foretatt utarbeiding av GCP-er og datainnsamling i starten av oktober 2021. Dette var et feltarbeid på tre dager, hvorav to av disse gikk til produksjon av GCP-er og den siste dagen gikk til datainnsamling med drone. Feltarbeidet høsten 2021, var ett av to feltarbeid for å kunne sammenligne og bearbeide datainnsamlingen.

3.1.1 Bruk av GCP – Gjerdrum oktober 2021

Under feltarbeidet ble det produsert totalt 10 GCP-er. Fokuset var at GCP-ene skulle ha varierende egenskaper i form av fargevalg, geometrisk form, størrelse og materialvalg. I feltarbeidet ble det produsert GCP-er av kryssfinerplater, plast- og aluminiumsplater. Det ble utformet kontrastfigurer i svart-hvitt og enkelte figurer med retroreflektiv teip (mer om produksjonen av GCP-er ligger som vedlegg 4).

De egenproduserte GCP-ene ble plassert ut i det avgrensa området med geometrisk spredning. Noen plater ble plassert i ytterkant av områdets avgrensning, og noen ble plassert langs anleggsveien. Ved å plassere enkelte GCP-er i utkanten, skulle dette sørge for å dekke områdets utstrekning. Ved plassering av GCP-ene ble det foretatt vatring av platene. På den måten skulle man sørge for å skape mest mulig homogen høyde for hele GCP-overflaten.

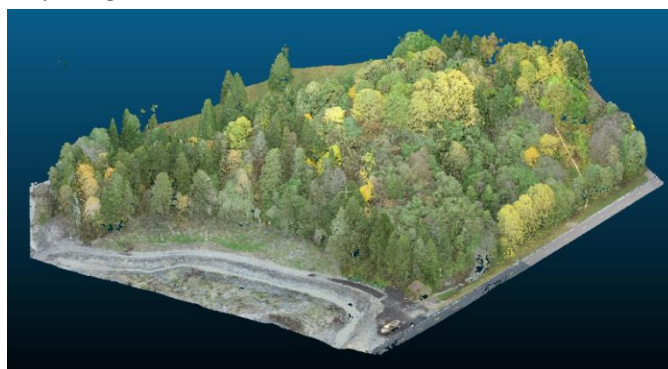
Videre ble GCP-platene målt inn med sanntids GNSS. Innmålingen ble foretatt i midtpunktet av platene, som på forhånd ble definert ut fra målinger med tommestokk og vinkelmålinger. Nøyaktighetskravet til GNSS-mottakeren ble satt til å være 3cm både i grunnriss og høyde. Innmålingene ble også midlet for å sikre uavhengige målinger. Dette var for å kvalitetssikre koordinatene med tanke på grove eller systematiske feil.



Figur 26: Utklippet til venstre illustrerer posisjonen til de utsette GCP-ene (Gemini Oppmåling). Figuren til høyre viser nærbilde av en av de 10 GCP-ene (Gjerdrum 6. oktober 2021).

3.1.2 Flyvninger med forskjellige parameterinnstillinger – Gjerdrum oktober 2021

Høsten 2021 var det meste av løvverket fortsatt på trærne i det avgrensa området. Ved å fly over området med laserskanner, dannet dette grunnlag for sammenligning mellom punktskyer med og uten vegetasjon (løvverk). Det ble foretatt skanning av området med en DJI Matrice 300 RTK drone med DJI Zenmuse L1 laserskanner. På forhånd definerte vi en flyplan basert på ulike parameterinnstillinger vi ønsket å teste ut. Ved planlegging av flyplanene, var det vesentlig å tydeliggjøre hvilke parametere som forårsaket hvilket resultat. Det ble derfor gjort justering av kun én parameter for hver flyvning.



Figur 27: Utklipp fra punktsky som viser det vegetasjonsfylte område. CloudCompare.

Det ble totalt foretatt seks flyvninger med ulike parameterinnstillinger. De viktigste endringene som ble gjort mellom de ulike flyvningene i oktober var endringer av flyhøyde, overlapp og hastighet. HVL4 og HVL5 er to like flyvninger bortsett fra at himmelretningen er rotert 90°. Dette har NVE fått foreslått fra Terratec AS som en optimal løsning, ettersom området blir kartlagt med forskjellig orientering av himmelretning og deretter slått sammen. HVL4 og HVL5 skal i etterprosessering settes sammen til en punktsky. I tillegg ble det til slutt gjort en såkalt "oblique"-flyvning (se HVL6 i tabellen under). Denne flyvningen bestod av totalt fem flyvninger som ble slått sammen til én. For den første av disse flyvningene var skanneren innstilt i vinkelen «*nadir*», mens resterende flyvninger ble vinkelen justert til «*oblique*». I tillegg hadde hver av flyvningene i HVL6 forskjellige himmelretninger. Andre innstillinger som kan nevnes, som ikke ble endret mellom flyvningene er at skannefrekvensen var satt til 160 kHz og at skannemodusen var på «*Repetitive*».

Navn	Flyhøyde	Overlapp	Hastighet	Himmelretning	Kameravinkel
HVL1	100 m	50 %	10 m/s	271°	90°
HVL2	50 m	50 %	10 m/s	271°	90°
HVL3	100 m	50 %	5 m/s	271°	90°
HVL4	100 m	20 %	10 m/s	271°	90°
HVL5	100 m	20 %	10 m/s	1°	90°
HVL6	80 m	20 %	10 m/s	Ulik vinkel for alle 5 flyvninger	90°
					45°
					45°
					45°
					45°

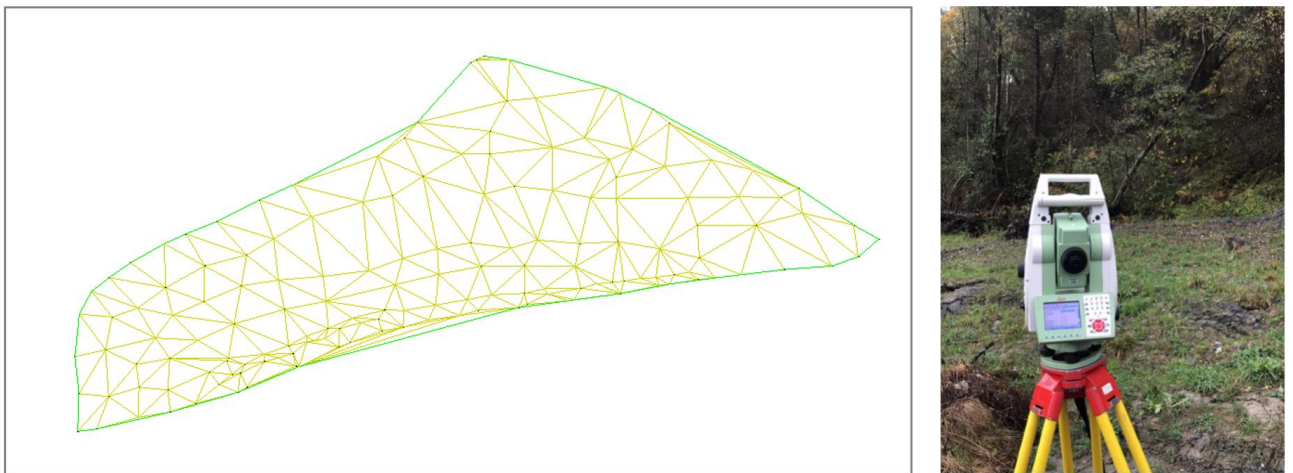
Tabell 2: Oversikt over hver flyvning med endringer av parameterinnstillinger i oktober.

For å kunne gjennomføre flyvningene, ble dronen klargjort med batterier, propeller og LiDAR-sensor. Fra kontrolleren ble det lastet opp flyplan direkte til dronen. Herunder ble de ulike parameterinnstillingene (tabell 2) tastet inn. Videre ble tilkobling til satellitter opprettet og fix-løsning initialisert. Da dronen var i luften ble det i tillegg gjennomført kalibrering av IMU-sensoren. Dronen kalibrerte ved å fly frem og tilbake i omtrent 15-30 sek. Slik kalibrering ble gjennomført i starten og slutten av hver flyvning, samt minst hvert 100. sekund. Prosessen var automatisk, og man trenger derfor ikke å gjøre noen manuell kalibrering så lenge alt er i orden.

3.1.3 Totalstasjonsmålinger

For å kunne si noe om datakvaliteten på laserskanning fra drone, ble det laget en terrengmodell (DTM) av i totalstasjonsmålinger. På denne måten kunne totalstasjonsmålingene være et sammenligningsgrunnlag med data fra luftbåren laserskanner.

Med totalstasjon ble det foretatt målinger av et mindre avgrenset område. På forhånd ble det etablert tre fastmerker med sanntids GNSS. Deretter ble det gjort en frioppstilling med totalstasjonen, hvor det ble siktet til fastmerkene. På denne måten fikk totalstasjonen kjente koordinater. Med totalstasjonen ble det målt inn punkter som viste endringer i terrenget. Det ble fokusert på å dekke terrengkonturene, ved å få med seg topper og bunner i terrenget. På denne måten dannet punktene en form for rutenett over terrenget og kunne dermed brukes til å lage terrengmodell (DTM).



Figur 28: Til venstre: Triangulering av punkter fra totalstasjonsmålinger (Gemini Terreng). Til høyre: Oppstilling av totalstasjon (Gjerdrum 5. oktober 2021).

3.2 Gjerdrum april 2022

Som et sammenligningsgrunnlag ble det foretatt datainnsamling i starten av april 2022. Dette feltarbeidet strakk seg over to dager, hvor den første av disse gikk til oppsett og utsetting av GCP-er. Den siste dagen gikk til flyvninger med gitte parameterinnstillinger.

3.2.1 Bruk av GCP – Gjerdrum april 2022

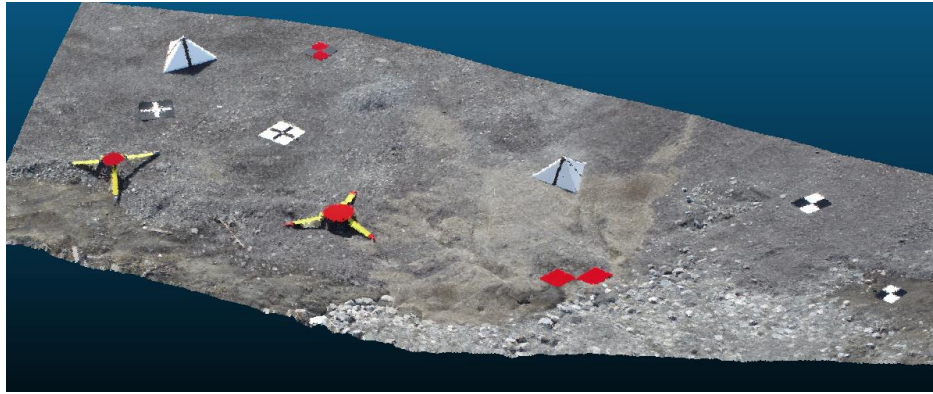
Basert på tidligere produserte GCP-er, ble det foretatt bearbeiding og konfigurering av nye GCP-er til datainnsamlingen. Frem til feltarbeidet ble det produsert og kjøpt inn totalt 14 GCP-er av forskjellig form, farge, størrelse og materiale. Det ble produsert tre sammenleggbare pyramider av kanalplast som ble dekket av hvit maling med svart elektriker-teip. Brødrene Dahl AS bidro med produksjon av fire aluminiumsplater med retroreflektivt folie. Videre ble det kjøpt inn tre PVC-presenninger i svart-hvitt-kontrast fra O.B.Wiik AS og tre sammenleggbare GCP-er fra Rotbucher Systeme (mer om produksjon og detaljer av GCP-er i vedlegg 4).



Figur 29: Figuren til venstre viser de tre hovedområdene hvor vi plasserte ut GCP-ene (Gemini Terreng). Figuren til høyre viser nøyaktig plassering (Gemini Oppmåling).

GCP-ene ble plassert i tre hovedområder. Hvert hovedområde inneholdt forskjellige GCP-er, slik at de ulike produktene ble fordelt. Plasseringen ble foretatt i ytterkant av områdets utstrekning og med hensyn til geometrisk kontroll. De fleste GCP-ene ble festet med teltplugger, mens GCP-ene med retroreflektiv overflate ble plassert på stativ slik at de sto over terrenget. Alle GCP-ene ble også vatret opp, for å ha en horisontal overflate.

Midtpunktene av enkelte GCP-er ble på forhånd målt opp ved hjelp av tommestokk, vinkelmåler og vannfast tusj. GCP-ene som for eksempel pyramiden og GCP-er med kontrast, hadde derimot naturlig midtpunkt som ble benyttet. I feltarbeidet ble midtpunktet av GCP-ene målt inn med sanntids GNSS, på samme måte som høsten 2021. Det betyr at nøyaktighetskravet var stilt inn likt og midlingen foregikk med samme metode.



Figur 30: Utklipp fra finskanning (HVL8a) som viser et utvalg av GCP-ene samlet i en punktsky. Ved finskanningen ble de fleste GCP-ene flyttet til hovedområde 2. CloudCompare.

3.2.2 Flyvninger med forskjellige parameterinnstillinger – Gjerdrum april 2022

I starten av april 2022 var store deler av snøen smeltet, og løvverket var ikke begynt å spire. Med utgangspunkt i dette ble det foretatt nye flyvninger over det avgrensa området. For at datainnsamlingen kunne sammenlignes med høsten 2021, ble det benyttet samme utstyr og samme parameterinnstillinger for flyvningene. Ettersom flyplanen fra høsten 2021 ble brukt, var det også hensiktsmessig å benytte samme startposisjon for flyvningene. Dette gjorde at utgangspunktet og høyden over terrenget skulle bli mest mulig lik høsten 2021.

Som et tillegg ble det foretatt ekstra flyvninger for å undersøke skannefrekvensen (HVL7), finskanning (HVL8a og b), samt skannemodus (HVL9). Flyvningene foregikk autonomt, bortsett fra manuell styring ved letting og landing i forbindelse med batteribytte og ved finskanningen.

Navn	Flyhøyde	Overlapp	Hastighet	Himmelretning	Kameravinkel	Skannefrekvens (PRF)	Skannemodus
HVL1	100 m	50 %	10 m/s	271°	90°	160 kHz	Repetitive
HVL2	50 m	50 %	10 m/s	271°	90°	160 kHz	Repetitive
HVL3	100 m	50 %	5 m/s	271°	90°	160 kHz	Repetitive
HVL4	100 m	20 %	10 m/s	271°	90°	160 kHz	Repetitive
HVL5	100 m	20 %	10 m/s	1°	90°	160 kHz	Repetitive
HVL6	80 m	20 %	10 m/s	Ulik vinkel for alle 5 flyvninger	90°	160 kHz	Repetitive
					45°		
					45°		
					45°		
					45°		
HVL7	100m	20 %	10 m/s	271°	90°	80 kHz	Repetitive
HVL8a	16m	-	-	-	90°	160 kHz	Repetitive
HVL8b	16m	-	-	-	90°	80 kHz	Repetitive
HVL9	100 m	50 %	10 m/s	271°	90°	160 kHz	Non-repetitive

Tabell 3: Oversikt over hver flyvning med endringer av parameterinnstillinger i april.

3.2.3 Fotogrammetri – Gjerdrum april 2022

Som dokumentering av skredgropen i Gjerdrum og for å oppdatere terrengmodeller, foretar NVE jevnlig fotogrammetri over skredgropen hver andre uke. Dette innebærer å fly over et større område som dekker skredgropen og utløpssoner. Kartleggingen strekker seg også over det avgrensede området som er definert over. Samme dag som det ble foretatt flyvninger med laserskanning, ble det også foretatt fotogrammetri over området. For denne flyvningen ble det brukt en DJI Phantom 4 RTK drone med følgende parameterinnstillinger;

	Flyhøyde	Overlapp sideveis	Overlapp i flyretning	Hastighet	Kameravinkel
Fotogrammetri	100m	80 %	70 %	10 m/s	90°

Tabell 4: Parameterinnstillinger for flyvning med fotogrammetri fra april.

Etter flyvningen foretok NVE prosessering av dataene i Pix4D. Herunder ble bildene satt sammen gjennom triangulering og prosessert videre til en punktsky.

3.3 Dataprosessering

3.3.1 Fra rådata til punktsky i LAS-format

Rådata fra dronen ble hentet ut ved hjelp av dronens mikro SD-kort. Mapestrukturen vises i figur 31, og består av flere ulike filtyper. Mange av filene her trenger man som regel ikke å ta i bruk, men kan brukes til blant annet kontroll av korreksjoner som har blitt påført av IMU-enheten. De viktigste filene man finner i rådataene er LDR-filen og JPG-filene. LDR-filen er selve punktskyen som importeres til DJI Terra, mens JPG-filene tilknyttes LDR-filen slik at punktskyen fargelegges.

Navn	Dato	Type	Størrelse
DJI_2022040510504...	05.04.2022 10:50	CLC-fil	1 kB
DJI_2022040510504...	05.04.2022 10:50	CLI-fil	1 kB
DJI_2022040510504...	05.04.2022 10:50	CMI-fil	1 kB
DJI_2022040510504...	05.04.2022 10:57	IMU-fil	4 197 kB
DJI_2022040510504...	05.04.2022 10:55	LDR-fil	1 003 520 kB
DJI_2022040510504...	05.04.2022 10:56	RTB-fil	150 kB
DJI_2022040510504...	05.04.2022 10:57	RTK-fil	2 310 kB
DJI_2022040510504...	05.04.2022 10:57	RTL-fil	650 kB
DJI_2022040510504...	05.04.2022 10:57	RTS-fil	430 kB
DJI_2022040510504...	05.04.2022 10:50	JPG-fil	7 504 kB
DJI_2022040510505...	05.04.2022 10:50	JPG-fil	7 371 kB

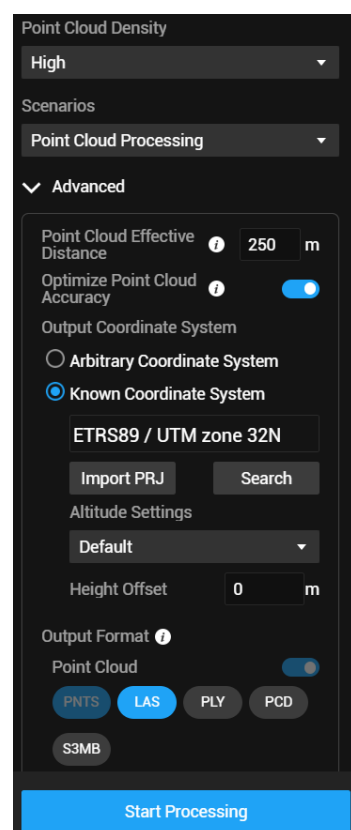
Figur 31: Mapestruktur på rådata fra drone.

Rådataene ble importert i DJI Terra. Programmet importerer hele mapestrukturen og lar brukeren definere hvilke innstillinger man ønsker i prosesseringen. Det viktigste her er at man legger inn riktig koordinatsystem. For det horisontale datumet, ble «EUREF89 UTM 32N» valgt som referansesystem. Det norske vertikale datumet «NN2000» er derimot ikke tilgjengelig i programvaren, og «Default», som er ellipsoidiske høyder ble derfor valgt. Høydereferansen kan endres i annen programvare i etterkant.

Videre benyttes "Optimize Point Cloud Accuracy" for å oppnå best mulig relativ nøyaktighet av punktskyen. Til slutt ble det huket av for at programmet skulle eksportere filen til LAS-format. Leveransen fra Terra vil være en zippet mappe hvor selve punktskyen finnes under mappene "lidars -> terra_las".

Transformasjon fra ellipsoidisk høyde til NN2000

Som nevnt har ikke DJI Terra alternativer som støtter det vertikale datumet «NN2000». Det ble derfor gjennomført en transformasjon av datasettene fra ellipsoidisk høyde til «NN2000». Dette ble gjort i TerraScan. Punktskyene ble importert i programmet for så å bli definert med nytt vertikalt datum.



Figur 32: Innstillinger for prosessering av punktskyer. DJI Terra

3.3.2 Kvalitetskontroll av punktsky

Etter prosessering av punktskyene, ble det foretatt kvalitetskontroll. Dette gikk ut på å undersøke differansen mellom GNSS observasjoner og punktskyens senterpunkt på GCP-ene. Differansen kunne dermed gi en indikasjon på nøyaktigheten til punktskyen og om punktskyene hadde et avvik fra GNSS-innmålingene.

For å kunne beregne senterpunkt for GCP-ene i en punktsky, ble det benyttet en prosess i *CloudCompare*. Prosessen omfatter bruk av forskjellig verktøy for å klippe ut og beregne flater for GCP-er. Senterpunktet for flatene beregnes deretter etter flatens utstrekning.

Prosesen er basert på metoder som benyttes av ulike programvarer for estimering av senterkoordinat for kontrollpunkt. Disse metodene er utviklet for terrestrial laserskanning, men siden vi i våre punktskyer har høy punkttetthet, har vi valgt å benytte oss av en lignende prosess. Risikoen med metoden er at man gjør et skjevt utvalg når man skal klippe ut punkter som dekker GCP-overflaten. Man er avhengig av at fargeleggingen av punktskyen med RGB-verdier er nøyaktig, samtidig som at man setter riktige grenser for polygonen som klipper ut GCP-ene.

Forskning utført av blant annet Štroner et.al (2021) tyder på at RGB-fargeleggingen fra DJI Zenmuse L1 har en viss systematisk forskyvning i den endelige punktskyen, og at utvelging av senterpunkt derfor ikke burde baseres på RGB-verdier. Vi ser i våre punktskyer at mange av GCP-ene vises tydeligere med RGB-verdiene enn ved å bruke intensitetsverdiene, og vi har derfor utført et par tester for å se om det er mulig å bruke RGB-verdiene i vår metode for kvalitetskontroll av punktskyene. Basert på punktskyer fra HVL1 og HVL8a fra april har vi gått gjennom metoden som utføres nedenfor, først ved bruk av RGB, og deretter ved bruk av intensitets-fargelegging. Ved å sammenligne resultatene fra testen, ser vi at de to metodene gir relativt lik nøyaktighet i grunnriss.

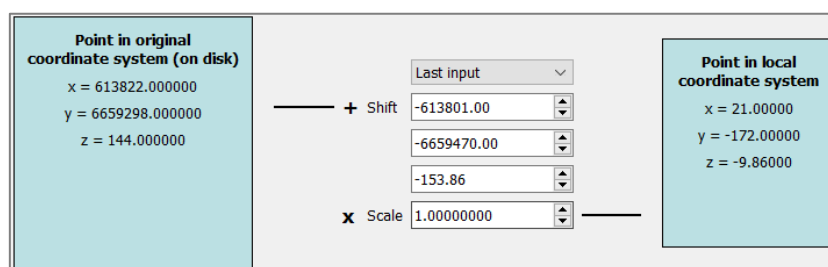
	HVL1 RGB	HVL1 Intensitet		HVL8 RGB	HVL8 Intensitet
Nøyaktighet - Grunnriss (m)	0.091	0.103		0.036	0.034

Tabell 5: Undersøkelse av kvalitetskontroll ved bruk av RGB og intensitet.

Da GCP-ene rent visuelt i de fleste tilfeller vises tydeligere i punktskyene ved å bruke RGB-farger, har vi valgt å bruke RGB-farger for beregningen av senterpunkt til kvalitetskontroll. Bakgrunnen for dette er hvordan RGB-verdiene tydeliggjøres i punktskyen og viser hvilke punkt som dekker GCP-overflaten.

Import av punktsky

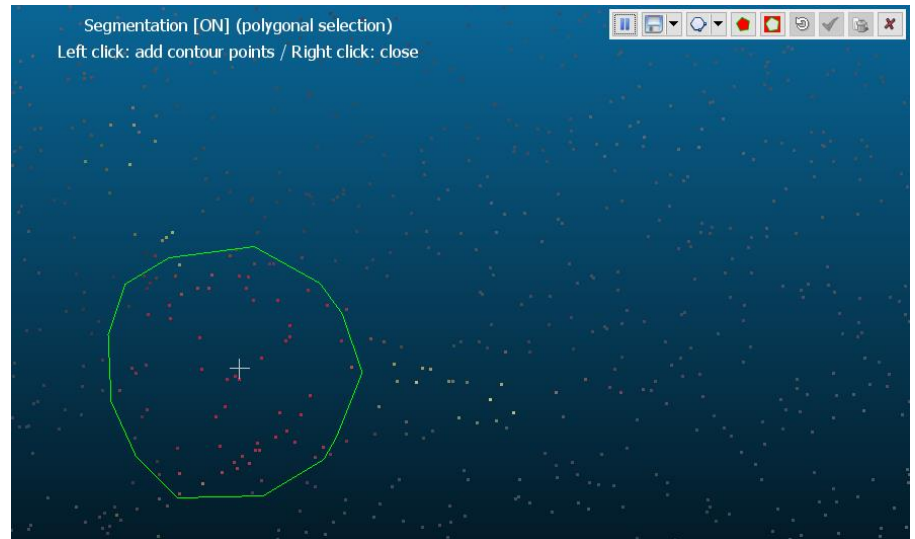
Punktskyen ble importert i *CloudCompare* hvor translasjonsparametere ble brukt for å endre punktskyens geodetiske koordinater til lokale koordinater. Translasjonsparameterne er viktig å notere seg da de brukes for å translere tilbake til globale koordinater senere.



Figur 33: Til venstre vises globale koordinater, translasjonsparametere i midten og lokale koordinater til høyre. *CloudCompare*.

Utklipp av punkter på GCP

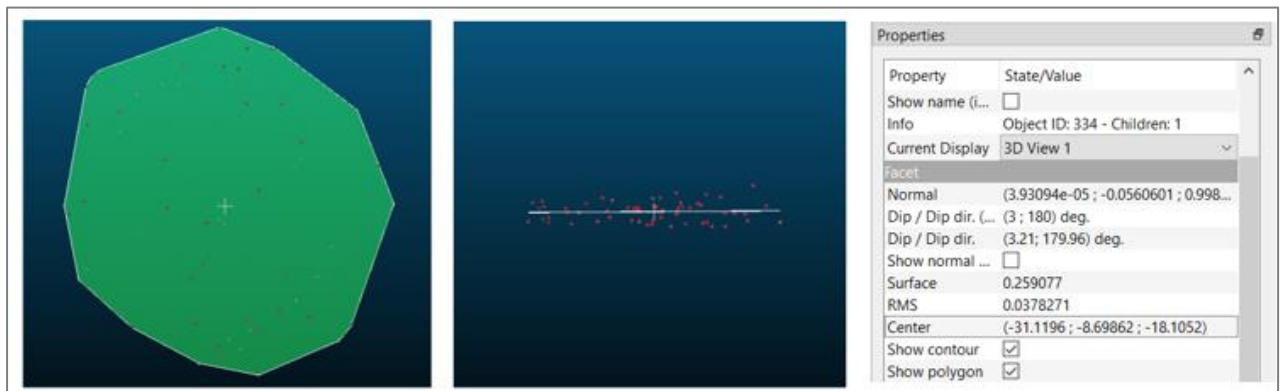
I punktskyen ble det foretatt et utklipp av punktene som tilhørte GCP-ene. Selve punktskyen ble stilt inn på å visualisere RGB-farger. Deretter ble det tegnet en polylinje som dekket GCP-ene. Etter at utklippet var foretatt, var det mulighet for å kontrollere punktene. Kontrolleringen foregikk ved å fjerne punkter som ikke tilhørte GCP-ene. Dette var særlig lettere å gjøre ved GCP-er som stod på stativ, da disse skilte seg tydelig fra punktene som representerer terrenget vedsiden av.



Figur 34: Avgrenset polylinje som representerer punkt for GCP-en. GCP9 fra HVL1 i april. CloudCompare

Beregning av flate med senterpunkt

Punktene som representerte GCP-ene, ble opprettet som et eget lag. Deretter ble verktøyet «Fit 2D polygon» brukt på dette laget. Verktøyet danner en flate i 2D basert på punktene som finnes i laget. Egenskaper for denne 2D-flaten vises i programmets sidepanel. Herunder oppgis det en vektor med koordinater for senterpunktet $[x, y, z]$. I tillegg blir det oppgitt en nøyaktighet (RMS) for beregningen av flaten.



Figur 35: Bildet til venstre viser flaten sett ovenfra. Bildet i midten viser flaten sett fra siden. Bildet til høyre viser egenskapene til den beregna flaten. CloudCompare.

Sammenligning av flatens senterpunkt og GNSS måling av senterpunktet

For å kunne sammenligne flatens senterpunkt med GNSS-observasjonene, ble det foretatt en translasing av senter-koordinatene (Lokal x, y, z) tilbake til globale koordinater (Global x, y, z). Her ble de noterte translasingparameterne brukt for å beregne senter-koordinater i det globale koordinatsystemet. Videre ble det beregnet en differanse mellom GNSS-observasjonene (GNSS x, y, z) og de globale koordinatene for senterpunktet (Global x, y, z). Differansen ble oppgitt som delta(Δ) i grunnriss og høyde. Selve differansen skal her kunne gi en indikasjon på avstanden mellom senterpunktet i punktskyen og med GNSS.

GCP14 - Skilt ø60cm			185	Punkt/m ² = 655					
Lokal x	Lokal y	Lokal z		GNSS x	GNSS y	GNSS z		Offsett lokal-global	
76.5772	-155.694	3.47899		6659314.249	613877.536	157.318		x	613801
Global y	Global x	Global z		Δx	Δy	Δz		y	6659470
613877.5772	6659314.3060	157.339		0.057	0.041	0.021		z	153.86

Figur 36: Første tabell viser lokale og globale senter-koordinater for GCP-en. Andre tabell viser koordinater for GNSS-målinger og beregna differanse i delta x, y, z. Siste tabell viser translasingparameterne mellom lokal og globalt koordinatsystem. Excel.

Etter hvert som differansen ble beregnet for hver GCP, ble det foretatt en gjennomsnittsberegning av differanser for alle GCP-ene. Bakgrunnen for dette, er at differansene for én GCP kan variere mellom hver punktsky. Hver punktsky har forskjellige parameterinnstillinger som påvirker punktettheten. Dette gjør også at beregningen og differansene vil være noe ulikt fra punktsky til punktsky. En GCP må i slike tilfeller kunne være optimal under alle forhold. Beregningen av gjennomsnittet tar utgangspunkt i differansen i x-, y- og z-koordinat for de ulike GCP-ene. Deretter vises et gjennomsnitt av punktskyene fra høsten 2021 og våren 2022. Gjennomsnittsberegningen ble foretatt i Excel og ligger som vedlegg 2 – Kvalitetsrapport.

3.3.3 Filtrering av bakkepunkt

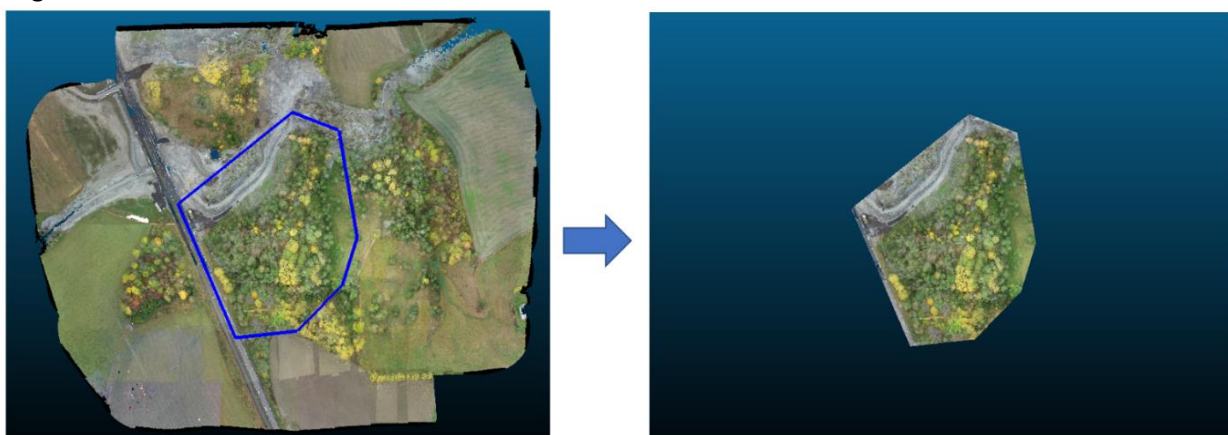
For å svare på problemstillingen om hvilke parameterinnstillinger som egner seg best for å oppnå maksimalt med bakkepunkt, skal vi nå gå gjennom prosessen med hvordan bakkepunktene filtreres ut av en punktsky.

Beskrivelse av hvordan bakkepunktene filtreres ut

Det finnes flere ulike metoder og algoritmer man kan benytte seg av for å filtrere ut bakkepunkt fra en punktsky. Valg av fremgangsmetode avhenger av punktskyens oppbygning, med tanke på kompleksitet og utforming. Siden vårt område består av mye skog og ulendt terreng har vi valgt følgende fremgangsmetode;

Steg 1 – Avgrense punktskyer

Siden det er gjort flere ulike flyvninger med ulike parameterinnstillinger, har vi mange punktskyer som skal sammenlignes. For å kunne gjøre en sammenligning av antall punkt, må vi være sikre på at punktskyene har nøyaktig lik geografisk utstrekning. Til dette har vi benyttet oss av polylinje-funksjonen i CloudCompare, som lar oss definere en polylinje, som brukes for å klippe punktskyene likt. Grunnen til at så mye av den opprinnelige punktskyen klippes bort er fordi denne inneholder mye unødvendig data, og det er skogen i midten av skyen som er hovedfokuset vårt. Metoden er vist i figur 37.



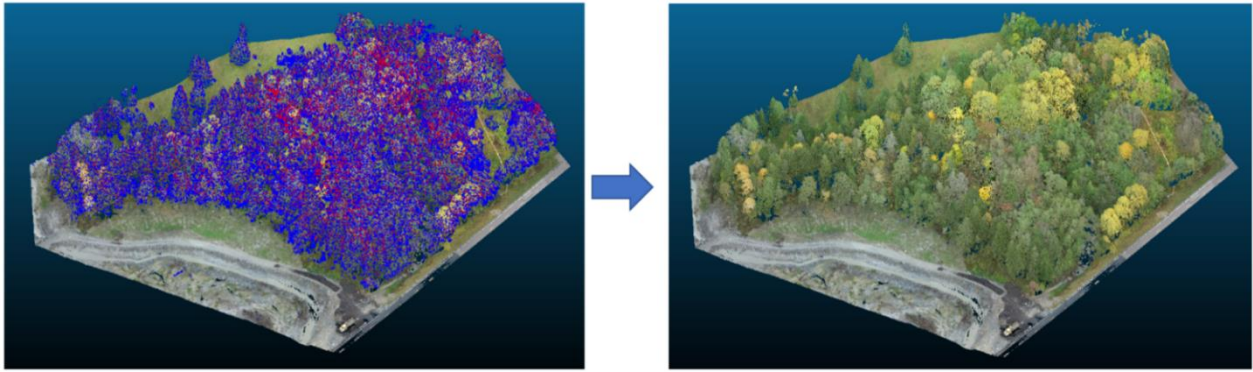
Figur 37: Til venstre vises hele punktskyen med polylinje i blått. Til høyre er punktskyen avgrenset. CloudCompare.

Steg 2 – Finne siste-returer

Basert på kunnskapen om utsendt laserpuls, er det kun siste-returene som er benyttet for å danne bakkepunkt. Med bevissthet om at siste-returene ikke nødvendigvis vil være bakkepunkt i alle tilfeller, benyttes dette som en del av prosessen. Dette er ikke et nødvendig steg for å få et godt resultat, men det kan i noen tilfeller gi et mer riktig resultat, og gjøre prosesseringen i steg 3 raskere. Siste-returene finnes ved å bruke attributtene som er lagret for hvert enkelt punkt.

Metode:

- Oppretter ny Scalar Field med "Number of Returns" minus "Return number"
- Velger ut punktene med verdien 0 i Filter by value, og splitter punktskyen
- Sletter gjenværende punktsky som består av punkt som ikke er siste-returer



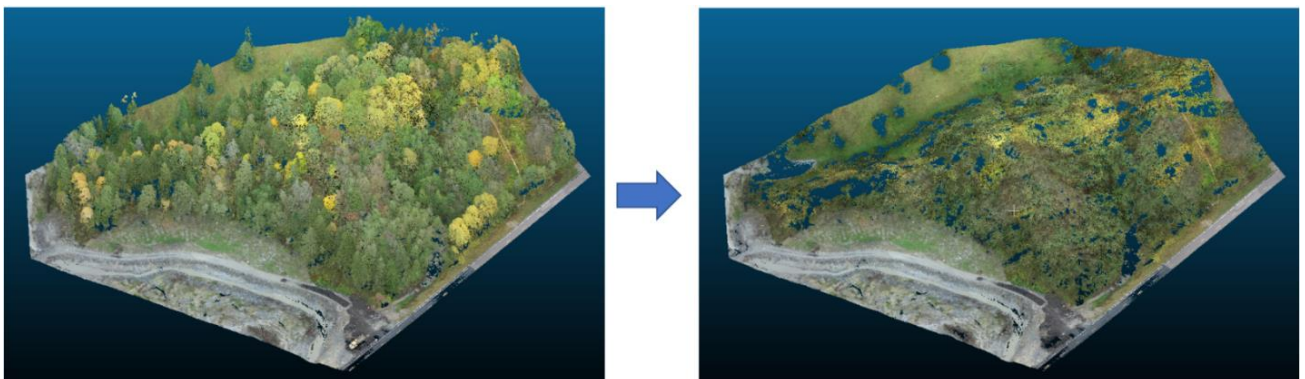
Figur 38: Punkt som filtreres bort er markert med blått og rødt. Som vi ser til høyre, er det fortsatt mange ikke-bakkepunkt igjen i punktskyen, men herunder er det nå kun siste-returer. CloudCompare.

Steg 3 – Filtrere bort vegetasjon

For å filtrere bort vegetasjonen, slik at vi kun sitter igjen med bakkepunktene, har vi benyttet oss av CSF-fileret i CloudCompare. Verktøyet filtrerer ut resterende ikke-bakkepunkt, slik at vi kun sitter igjen med punktene som representerer terrengoverflaten. Parameterinnstillingene vi har valgt å bruke i oppgaven;

Scenes	Steep slope
Cloth resolution	0.2
Max iterations	500
Classification threshold	0.3

Hvilke innstillinger som vil fungere best varierer fra område til område. Her må man prøve seg frem med fornuftige parametere, til man ser at man får et bra resultat. Det er viktig å tenke på at man ikke ønsker å fjerne bakkepunkt, samtidig som man ikke ønsker for mye arbeid med manuell editering i etterkant.



Figur 39: Endelig prosess som viser CSF-filer som filtrerer ut bakkepunkt. CloudCompare.

4. Resultat

4.1 Presentasjon av punktskyer

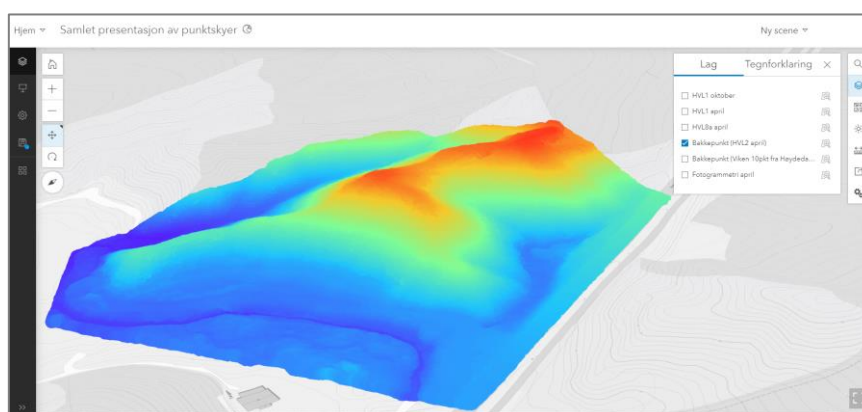
Som resultat er det innhentet totalt 16 punktskyer fra feltarbeidet. Disse er prosessert og bearbeidet som omtalt i metodekapittelet. Punktskyene er visuelt like, men skiller seg naturligvis mellom oktober og april. Blant punktskyene er det også to flyvninger som skiller seg ut ved finskanning av et mindre område. Alle punktskyene ligger som vedlegg til oppgaven (vedlegg 1), mens et utvalg presenteres i dette kapittelet. I tillegg til våre punktskyer er det lastet ned en punktsky fra Høydedata.no for området.

Figur 40 - 45 viser skjermtklipp fra CloudCompare av punktskyer og DTM. Da punktskyer er tredimensjonale data, vil det være vanskelig å visualisere punktskyene kun gjennom skjermbilder. Tjenesten ArcGIS Online har derfor blitt benyttet for presentasjon av et utvalg av punktskyene fra Gjerdrum. Det er laget en «Web Scene» hvor flere punktskyer visualiseres sammen med et bakgrunnskart, samt et «StoryMap», som viser interaktive modeller av hver enkelt utvalgte punktsky for seg. Det må påpekes at punktskyene som finnes på ArcGIS har en begrenset oppløsning i forhold til originalfilene.

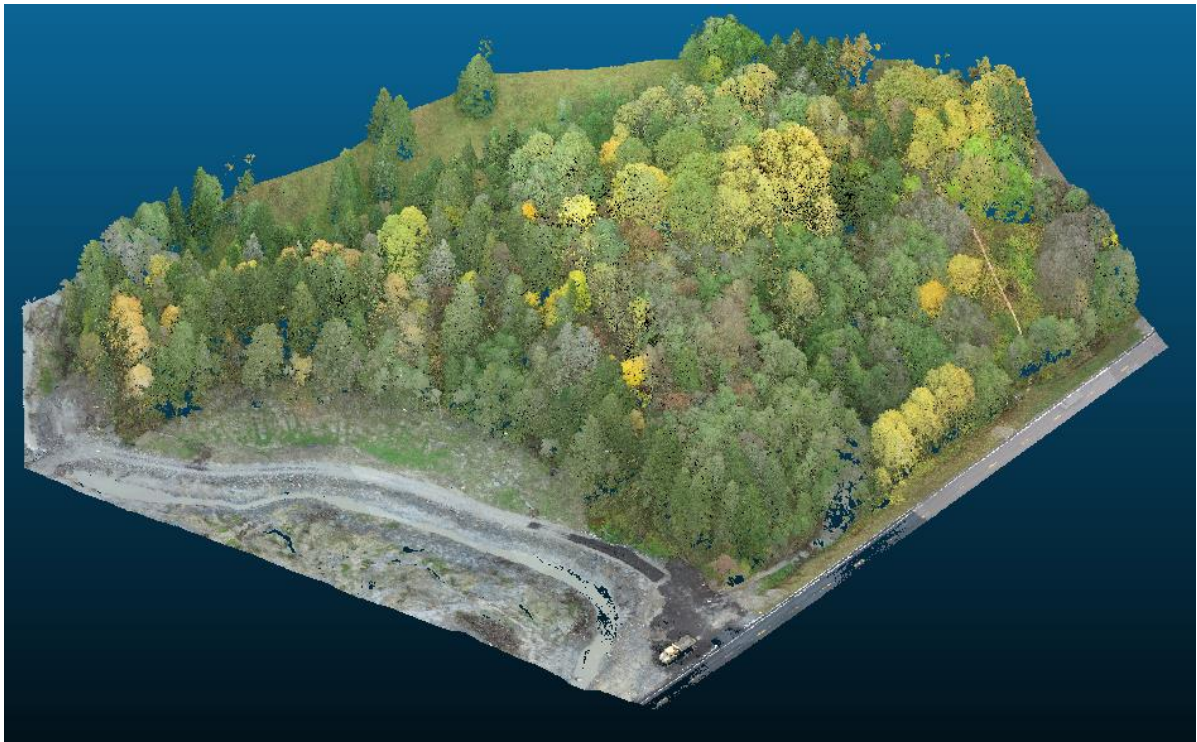
Lenke til StoryMap: <https://arcg.is/10yuXu> (lenke videre til Web Scene finnes i StoryMap).



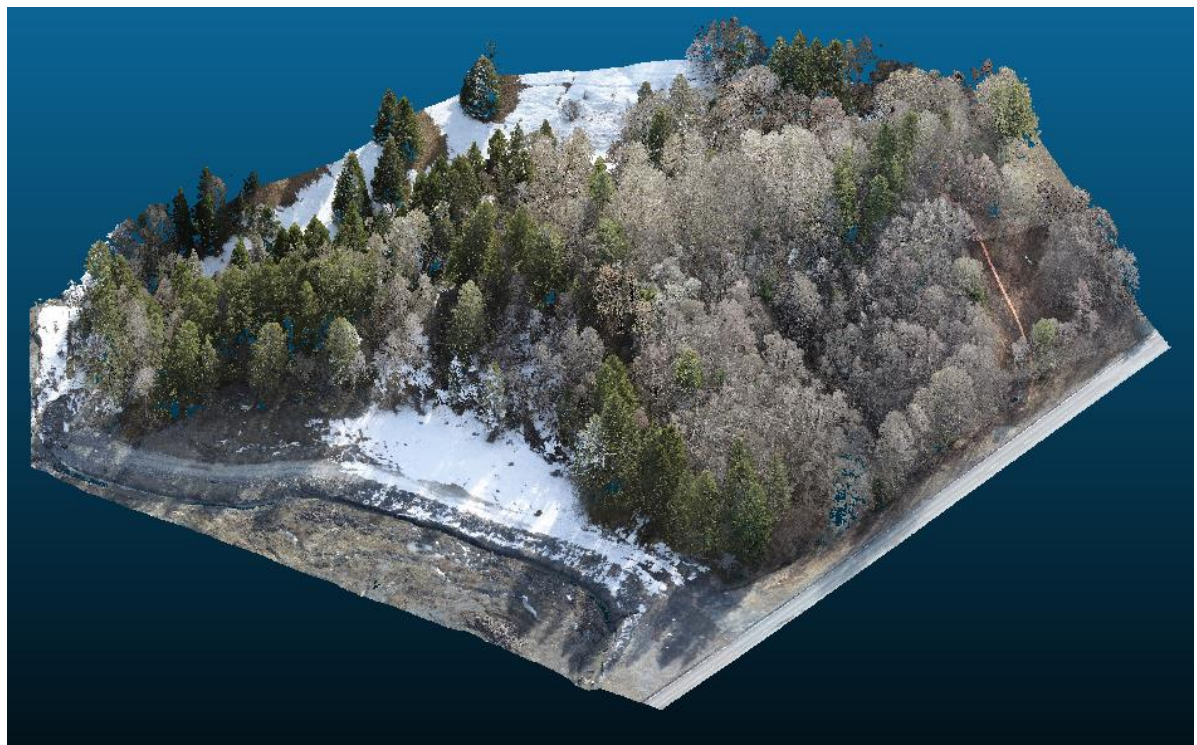
Figur 40: Interaktiv punktsky fra HVL1 i StoryMap. ArcGIS Online.



Figur 41: Punktsky klassifisert etter høyde, visualisert i Web Scene. ArcGIS Online.

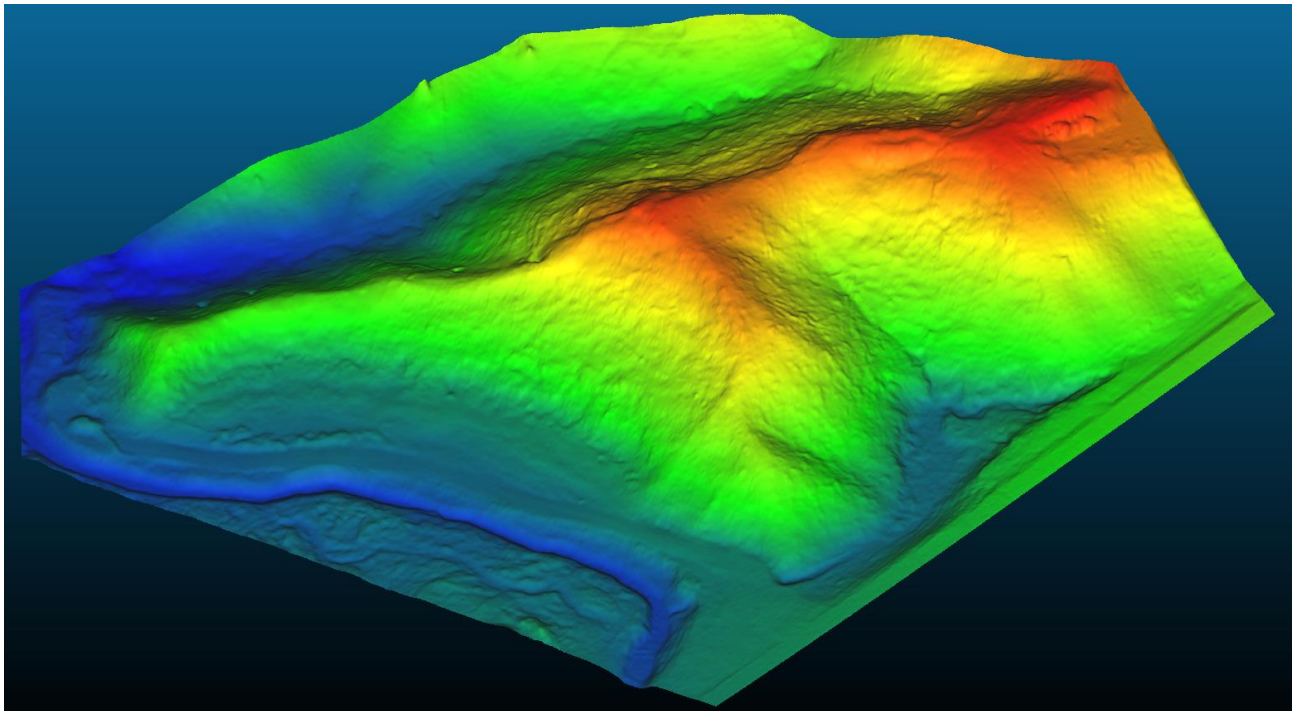


Figur 42: Punktsky fra HVL1 i oktober 2021. CloudCompare.

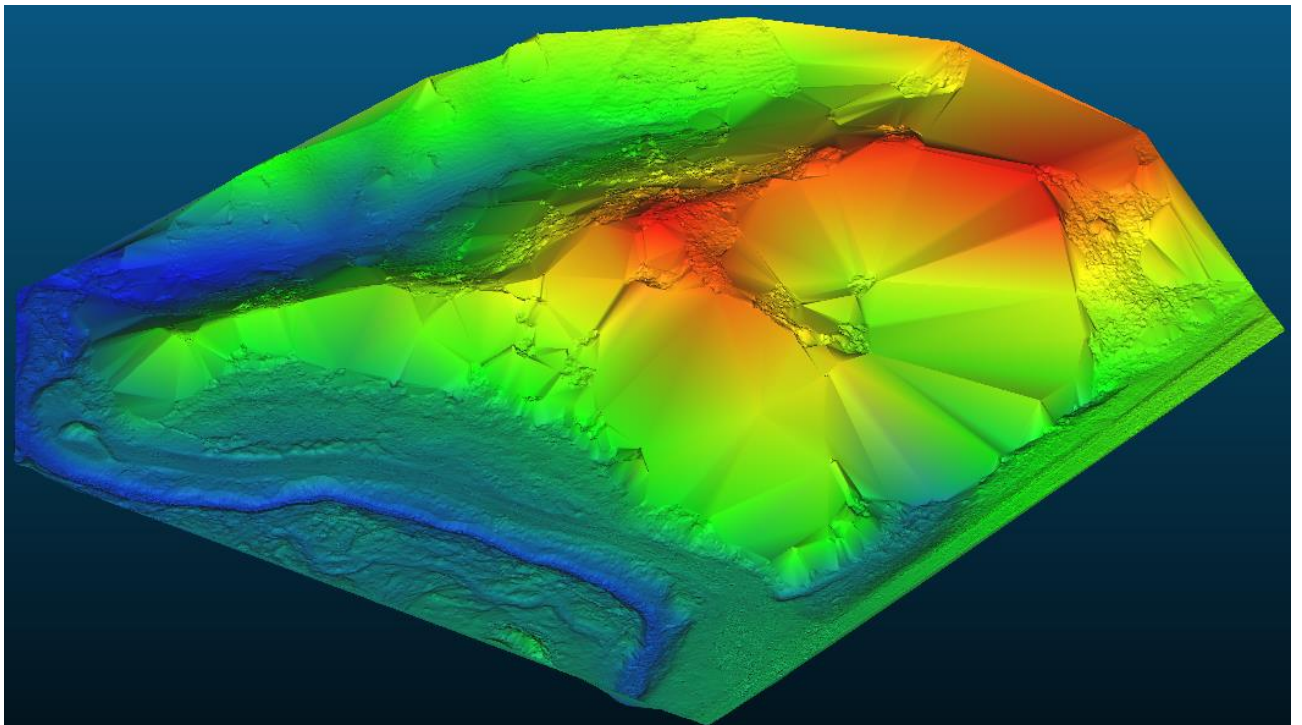


Figur 43: Punktsky fra HVL1 i april 2022. CloudCompare.

Basert på punktskyene er det også generert terrengmodeller av området:



Figur 44: DTM fra HVL1 i april, klassifisert etter høyde. CloudCompare.



Figur 45: DTM fra fotogrammetri i april, klassifisert etter høyde. CloudCompare.

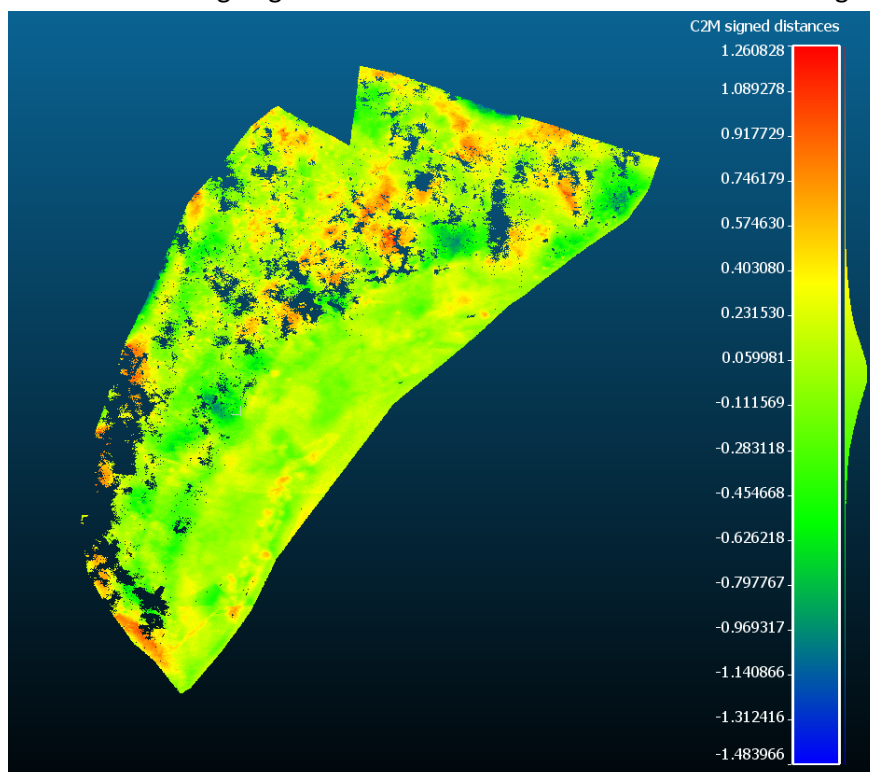
4.2 Kvalitetsvurdering av punktskyer

For å kunne si noe om hvordan kvaliteten av resultatet vårt er, har vi gjort sammenligninger med andre datasett. Den ene er en terrengmodell basert på punkt vi selv har målt med totalstasjon, og det andre en terrengmodell basert på data fra Kartverkets plattform for åpne terrengdata, Høydedata (Kartverket, 2022). Denne kvalitetsvurderingen gjøres i tillegg til kvalitetskontrollen med GCP-ene, for å kunne få uavhengige kontroller for grove eller systematiske feil i resultatet. I tillegg blir sammenligningen med Høydedata en kontroll av kvaliteten for hele punktskyen vår, mens kvalitetskontroll ved bruk av GCP kun kontrollerer noen få enkeltpunkt. Sammenligningen gjøres også for å vise hva som er alternativet å bruke, dersom man ikke har mulighet til å foreta egen datainnsamling med LiDAR.

4.2.1 Sammenligning med totalstasjonsmålinger

Målingene gjort med totalstasjon dekker et lite område nord for skogen. Slike målinger ble kun gjennomført i oktober, og man har derfor ikke en modell som man forventer skal samstemme 100 % med punktskyene fra april, men disse inkluderes også for å få en viss peiling på kvaliteten av resultatet. Det må også nevnes at totalstasjonsmålingene våre har en lavere punkttetthet (0.02 punkt/m²) enn LiDAR-punktskyene (140-350 punkt/m²), og at det derfor må forventes å være små forskjeller i sammenligningen. Basert på totalstasjonsmålingene er det laget en DTM, som kan brukes i en cloud/mesh sammenligning i CloudCompare.

Som man ser i figuren og tabellen under, viser sammenligningene av punktskyene og totalstasjonsmålingene våre relativt små avvik. For punktskyene fra april ser vi generelt noe større avvik, hvor punktskyene våre ligger 27-72mm høyere enn totalstasjonsmålingene i gjennomsnitt, noe som sannsynligvis skyldes noe snø i området og løvverk som ligger på bakken. Basert på denne sammenligningen kan man altså ikke konkludere med verken grove eller systematiske feil i utstyret.



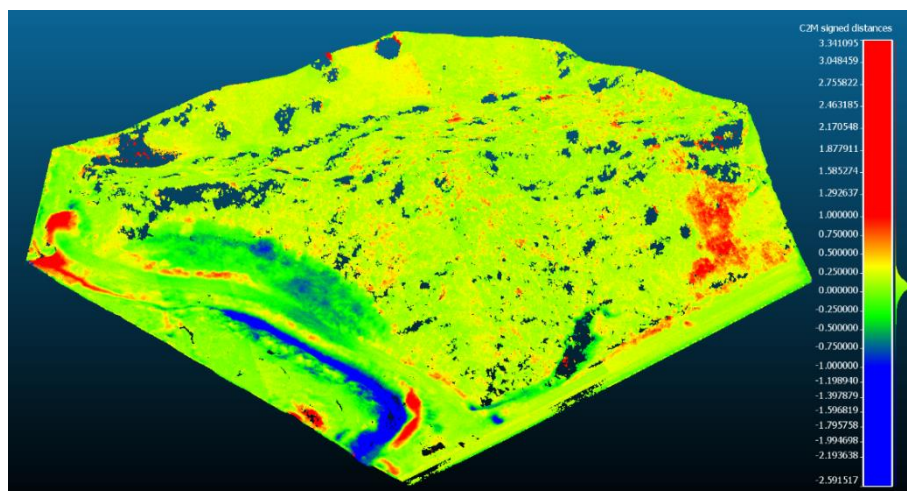
	Cloud/mesh gjennomsnittsavstander
HVL1 oktober	-0.001m
HVL2 oktober	-0.017m
HVL3 oktober	0.000m
HVL4&5 oktober	-0.026m
HVL6 oktober	-0.077m
HVL1 april	+0.072m
HVL2 april	+0.052m
HVL3 april	+0.069m
HVL4&5 april	+0.052m
HVL6 april	+0.027m

Tabell 6: Cloud/mesh gjennomsnittsavstander fra sammenligning av utvalgte punktskyer og DTM fra totalstasjonsmålinger.

Figur 46: HVL1 fra oktober fargelagt med differanser mellom punktsky og DTM fra totalstasjonsmålinger. CloudCompare.

4.2.2 Sammenligning med Høydedata

For å sammenligne hele området har vi brukt en punktsky fra datasettet «Viken 10pkt 2021», som er en LiDAR-kartlegging gjennomført av Terratec AS 23. april 2021. Prosjektet har et punkttetthetskrav på 10 punkt/m² (hvor 99.1 % av området oppfylte kravet). Punktskyen er filtrert på samme måte som våre egne punktskyer, hvor vi velger siste-returer, og bruker CSF-fileret med like innstillinger. Begrunnelsen for at vi ikke benytter oss av Terratecs klassifisering, er at vi ser at en god del av punktene i klassen «Uklassifisert», faktisk er bakkepunkt. For å kunne foreta en god sammenligning har vi generert en DTM basert på punktskyen fra Høydedata. Deretter er cloud/mesh-verktøyet i CloudCompare brukt for å beregne differansen mellom våre punktskyer og punktsky fra Høydedata.



Figur 47: Resultat av cloud/mesh verktøyet vist på HVL1 fra oktober 2021. CloudCompare.

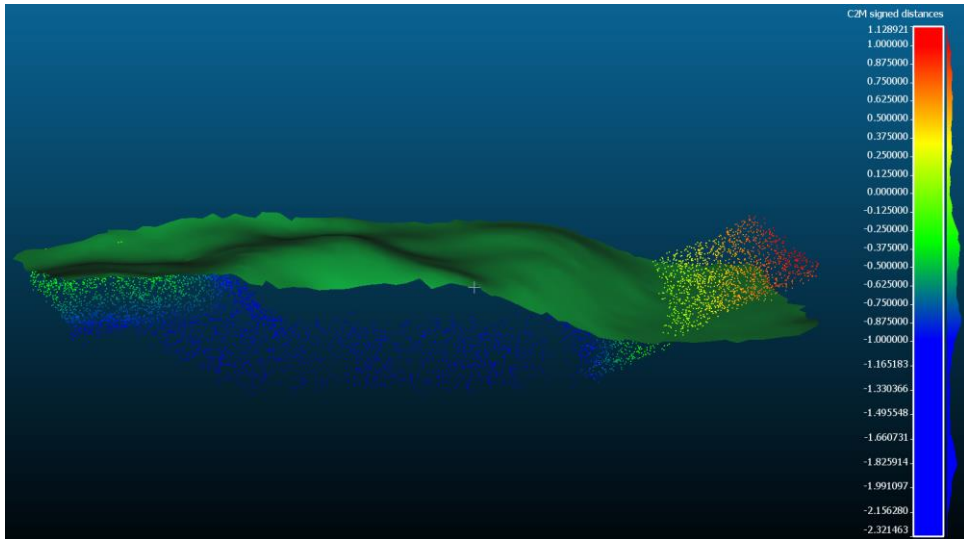
	Cloud/mesh gjennomsnittsavstander
HVL1 oktober	-0.004m
HVL2 oktober	-0.031m
HVL3 oktober	-0.003m
HVL4&5 oktober	-0.011m
HVL6 oktober	-0.063m
HVL1 april	+0.023m
HVL2 april	-0.005m
HVL3 april	+0.027m
HVL4&5 april	+0.022m
HVL6 april	-0.011m

Tabell 7: Cloud/mesh gjennomsnittsavstander fra sammenligning av utvalgte punktskyer og DTM fra Høydedata.

Under denne sammenligningen er det forventet at vi vil finne områder hvor det er større forskjeller. Forskjellene skyldes endringer i terrenget da dataene ikke er samlet inn samtidig.

Dette er også et område med ekstra store endringer, hovedsakelig knyttet til leirskredet. Det vi ønsker å kontrollere er derimot om vi ser større differanser mellom våre punktskyer og punktskyen fra Høydedata, i områder hvor det i utgangspunktet ikke skal være forskjeller. Om slike forskjeller oppdages, kan det tyde på at det finnes systematiske feil i en av datasettene.

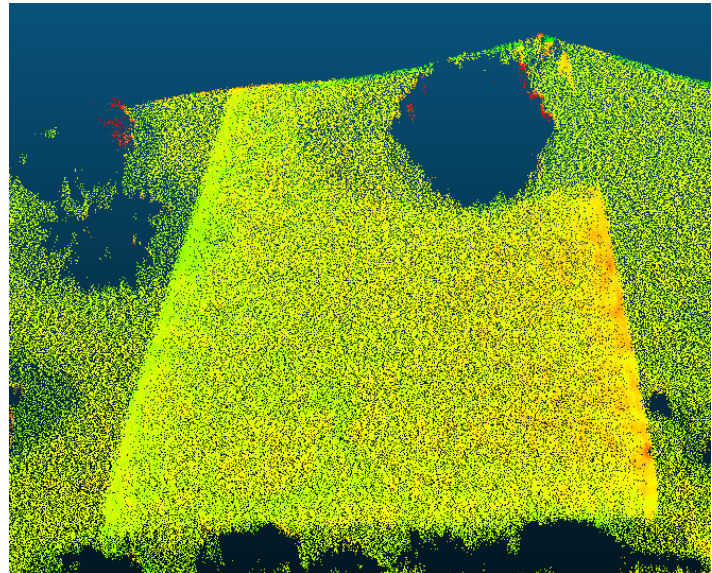
Generelt kan vi se at våre punktskyer har små differanser i forhold til terrengmodellen fra Høydedata. Mye av differansen som vi har mellom vår sky og modellen fra Høydedata skyldes sannsynligvis vannstanden i elva som renner gjennom området. Figuren under viser et tverrsnitt av elva hvor vi ser DTM fra Høydedata i grønt og HVL1 fra oktober fargelagt med avstander fra DTM-flaten.



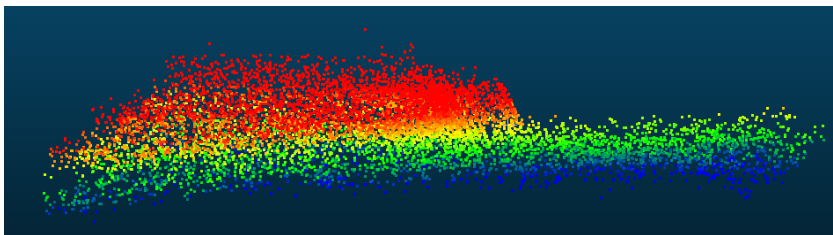
Figur 48: Avstander mellom DTM fra Høydedata og vår punktsky HVL1 fra oktober. CloudCompare.

Ved å se på punktskyen med farger fra cloud/mesh-verktøyet, kan vi se etter områder som kan indikere systematiske feil i en av datasettene. Resultatene antyder lite slike feil, men et område lengst øst i punktskyen, viser tydelige differanser på omtrent 20-40cm (se figur 49). Disse differansene ser ut til å være knyttet til dronens flystriper, og kan være en systematisk feil som kan være knyttet til at det er en stund siden dronen har blitt kalibrert når dette området ble skannet.

En nærmere undersøkelse av et utklipp fra området til høyre i figur 49, viser den tydelige kanten. Kanten vises fra siden i figur 50, hvor fargeskalaen er endret for å vise forskjellene tydeligere.



Figur 49: Område med tydelig differanse mellom DTM fra høydedata og HVL1. CloudCompare.



Figur 50: Mulig systematisk feilkilde i punktsky HVL1 fra oktober. CloudCompare.

4.3 Sammenligning av fotogrammetri og LiDAR

Som et grunnlag for å evaluere LiDAR fra drone, er det gjort en sammenligning av fotogrammetri og LiDAR. Sammenligningen tar utgangspunkt i fotogrammetri og LiDAR fra drone i områder med vegetasjon. Dette går ut på å bruke teori og data for å skille mellom de to ulike instrumentene.

Først vises en sammenligning av utstyr og programvare som er benyttet i denne oppgaven i tabellen under, før en sammenligning av resultat i form av oppløsning på punktskyer fra begge metoder presenteres. Sammenligning i tabellen tar for seg noen av de viktigste fordelene og ulempene med de to instrumentene.

	Fotogrammetri	LiDAR
Utstyr	DJI Phantom 4 RTK	DJI Matrice 300 RTK DJI Zenmuse L1
Tidsforbruk forberedelser	Forberedelser slik som tegning av flyplan tar like lang tid.	
	Behov for flere GCP-er. Prosessen tar lengre tid jo flere GCP-er man har.	LiDAR trenger færre GCP-er enn fotogrammetri. Søknad til NSM for å bruke LiDAR i luftrom.
Tidsforbruk flyvning	Omtrent likt, 5-10 min fra take-off til landing for våre flyvninger	
Tidsforbruk prosessering	Generering av punktsky kan ta lang tid da det er mange prosesser som skal bearbeides.	Ingen behov for prosessering, kun kvalitetskontroll.
Pris	Drone: 70 000 NOK Programvare: 25 000 NOK/år (Pix4Dmapper) Dette er en relativt dyr fotogrammetri-drone. Finnes også gratis programvarer.	Drone: 140 000 NOK LiDAR: 145 000 NOK Programvare: Gratis (CloudCompare) Dette er et relativt billig LiDAR-oppsett.
Brukervennlighet	Autonom flyvning med kollisjonssensorer	
	Foto-droner er ofte små/lav vekt og enkle. Dette er noe som kan gjøre det lettere for piloten å fly.	LiDAR-droner er som regel en del større enn foto-droner. Dette medfører at man som bruker har et større ansvar. Ved tekniske feil kan det være nødvendig å nødlande, i verste fall kan dronen falle ned.

4.3.1 Sammenligning av punkt og bakkepunkt for fotogrammetri og LiDAR

For å sammenligne punktsky fra fotogrammetri med punktsky fra LiDAR, har vi valgt ut den LiDAR-flyvningen som har likest mulig parameterinnstillinger som det ble brukt for fotogrammetri. Dette er HVL1 fra april, som har en lik flyhøyde og hastighet. Da det ikke har vært fokus på fotogrammetri i oppgaven har vi kun en flyvning med denne metoden, og sammenligningen som gjøres her kan derfor ikke regnes som fullverdige undersøkelser. Tabellene under viser oversikt over totalt antall punkt og bakkepunkt for området vi har kartlagt:

	LiDAR (HVL1) [100m 50 % 10m/s]	Fotogrammetri [100m 80/70 % 10m/s]
Punkt	11 599 736	937 511
Punkt/m²	264.82	21.40

Tabell 8: Totalt antall punkt, inkludert bakkepunkt og vegetasjon.

	LiDAR (HVL1) [100m 50 % 10m/s]	Fotogrammetri [100m 80/70 % 10m/s]
Bakkepunkt	7 579 050	569 493
Bakkepunkt/m²	173.03	13.00

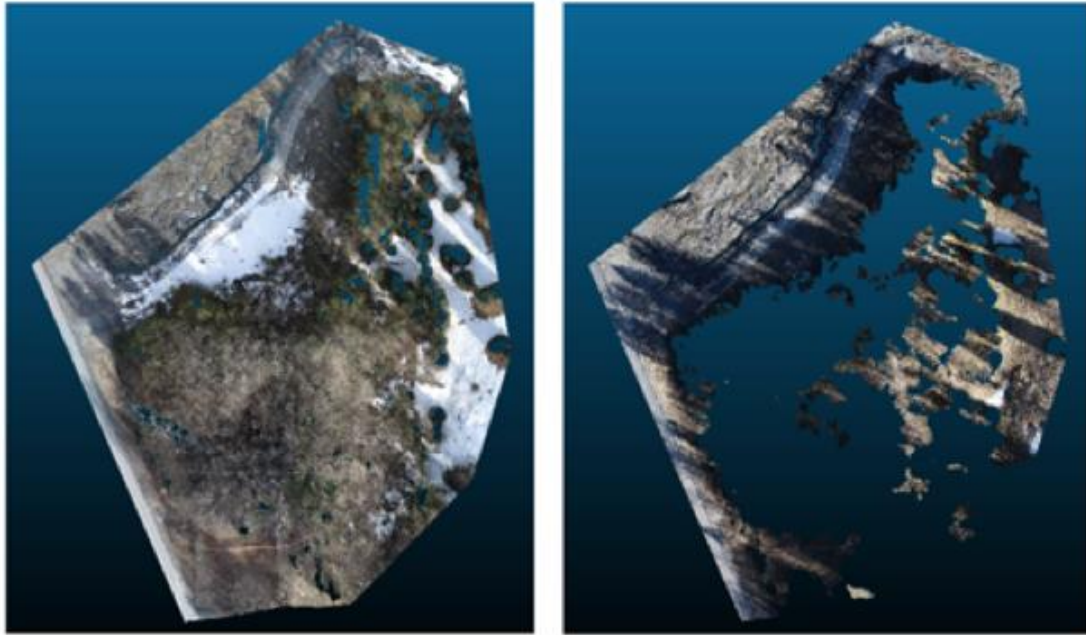
Tabell 9: Antall bakkepunkt, uten vegetasjon.

For å undersøke nærmere hvor store forskjeller det er mellom LiDAR og fotogrammetri i vegetasjonsfylte områder, har vi gjort to utklipp i datasettene fra fotogrammetri og HVL1 fra april. Det første utklippet er fra et område helt uten vegetasjon, mens det andre utklippet er for hele skogen som finnes i datasettene våre. Resultatene vises i tabell 10 under, hvor vi ser at for områder uten vegetasjon er forskjellen mellom fotogrammetri og LiDAR på 605 %. 605 % er en signifikant forskjell, men vi ser også at fotogrammetri klarer å levere en relativt grei punkttetthet i dette området uten vegetasjon. For området i vegetasjonen ser vi derimot en betydelig økning i forskjellen mellom de to metodene, hvor vi har 3548 % flere punkt for LiDAR enn for fotogrammetri.

	Fotogrammetri punkt/m ²	LiDAR punkt/m ²	Prosentvis forskjell
Utenfor vegetasjon	29.58	208.74	605.68 %
Bakkepunkt i vegetasjon	4.27	155.8	3548.71 %

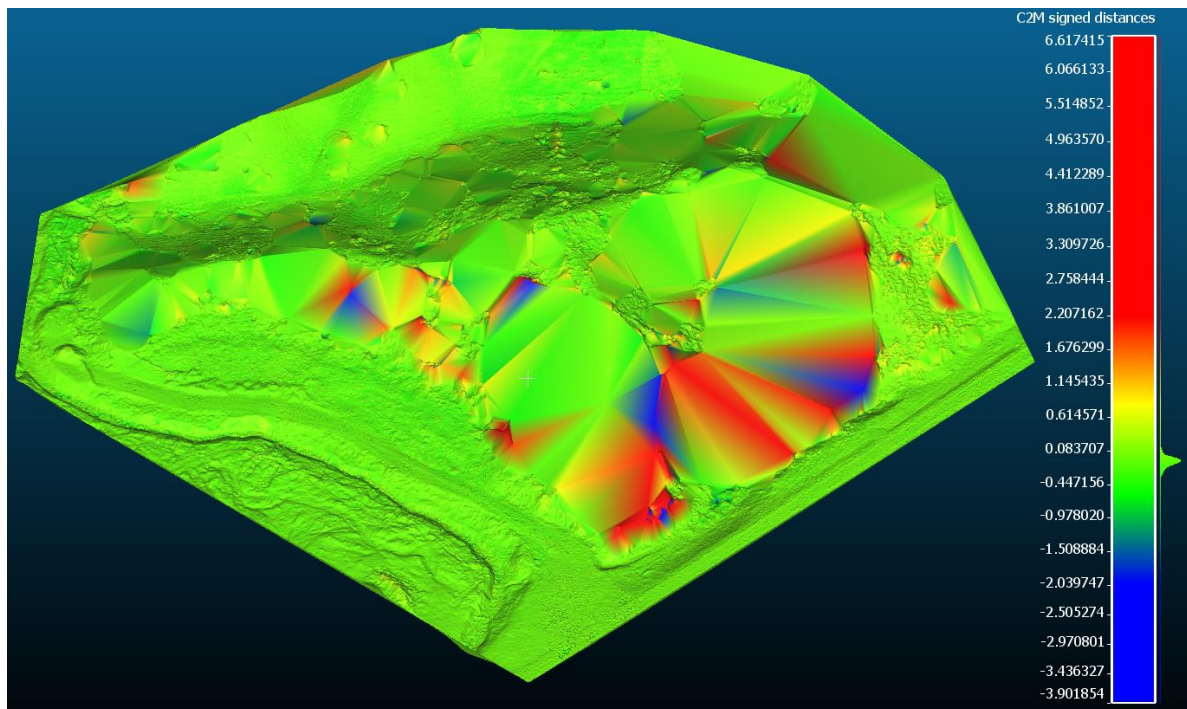
Tabell 10: Sammenligning av punkttetthet for fotogrammetri og LiDAR i områder med og uten vegetasjon.

Bildene under viser området i fugleperspektiv, der modellen til venstre er en punktsky fra LiDAR og modellen til høyre er fra fotogrammetri (en modell med mulighet til å sveipe mellom de to modellene for å se forskjellen vises i [ArcGIS StoryMap](#)).



Figur 51: Bakkepunkt fra HVL1 (LiDAR) til venstre og fotogrammetri til høyre. CloudCompare.

Videre har vi laget en modell som viser en mesh av dataene fra fotogrammetrien. Det man ser på bildet under er distanser mellom flatene etter trianguleringsprosessen fra foto-dataene, sammenlignet med HVL1 april punkttskyen. Vi får tydelig fram at store deler av skogpartiet inneholder få punkter. På bakgrunn av dette skaper det en urealistisk, kantete overflate, særlig der det er ujevnt terreng. På det verste ligger terrenget 6.6 meter over terrenget, og 3.9 meter under. Cloud/mesh avstandsberegningen viser en gjennomsnittsavstand på 8cm mellom de to punktskyene.



Figur 52: Mesh laget av fotogrammetri-punkttsky. Fargelagt med differanser fra HVL1 fra april. CloudCompare.

4.4 Analyse av bakkepunkt og punkttetthet

Basert på kapittel 3.3.3 hvor bakkepunkt ble filtrert ut av punktskyene, kan vi se hvilke punktskyer som har flest bakkepunkt. For å svare på problemstillingen om hvilke parameterinnstillinger som er mest egnet for å oppnå bakkepunkt i vegetasjonsfylte områder, gjøres det en enkel sammenligning av antall bakkepunkt i hver punktsky. Først sammenlignes hele området som er skannet, og deretter tre mindre, avgrensede områder i skogen. Det er også beregnet en generell punkttetthet for hver punktsky. Punkttettheten er generell fordi den vil variere lokalt i punktskyen, avhengig av faktorer som dronens høyde over terrenget, overflatens refleksjonsevne og reell verdi for overlapp mellom flylinjer. Punkttetthetsverdiene som oppgis er altså et gjennomsnitt.

Sammenligning av hele området

Totalt antall punkt er ufiltrerte punktskyer som inkluderer både bakkepunkt og ikke-bakkepunkt (for eksempel vegetasjon, bygninger osv). Tabellen under viser totalt antall punkt fra alle datasett som sammenlignes. Her kan vi blant annet legge merke til at det generelt er flere punkt i oktober enn i april, noe som sannsynligvis skyldes flere punkt som representerer vegetasjon i oktober enn i april. Punkttettheten for mange av punktskyene er meget høy, hvor HVL6 fra oktober peker seg ut med 1056.16 punkt/m². Sammenlignet med et datasett fra Høydedata (Viken 10pkt 2021), har HVL6 over 2 000 % mer punkt, hvor Høydedata ligger på kun 37.86 punkt/m².

Navn	Totalt antall punkt oktober	Totalt antall punkt april	Punkt/m ² oktober	Punkt/m ² april
HVL1 [100m 50 % 10m/s]	13 568 894	11 599 736	309.77	264.82
HVL2 [50m 50 % 10m/s]	38 383 197	36 780 848	876.27	839.69
HVL3 [100m 50 % 5m/s]	25 704 979	23 768 380	586.83	542.62
HVL4&5 [100m 20 % 10m/s]	16 177 658	16 074 655	369.33	366.98
HVL6 Oblique [100m 20 % 10m/s]	46 262 956	35 507 050	1056.16	810.61
HVL7 80 kHz PRF [100m 20 % 10m/s]	-	3 540 062	-	80.82
HVL9 Non-repetitive [100m 50 % 10m/s]	-	6 723 279	-	153.49
Fotogrammetri [100m 80/70% 10m/s]	-	937 511	-	21.40
Høydedata	1 658 481		37.86	

Tabell 11: Totalt antall punkt og punkttetthet per flyvning for oktober og april.

Når ikke-bakkepunktene filtreres ut fra punktskyene, sitter man igjen med sammenligningsgrunnlaget for å svare på hvilke parameterinnstillinger som fungerer best. Da vi ønsker å finne ut hvilke parameterinnstillinger som fungerer best uavhengig av årstid, vil den flyvningen som gir flest bakkepunkt i både oktober og april være en god kandidat. I tabellen under er det derfor lagt til en kolonne som viser prosentvis økning av bakkepunkt fra oktober til april. Minst mulig økning tilsvarer mindre differanse mellom oktober og april, og er derfor ønskelig. Økningen, sett sammen med antall bakkepunkt viser hvilke parameterinnstillinger som er best egnet.

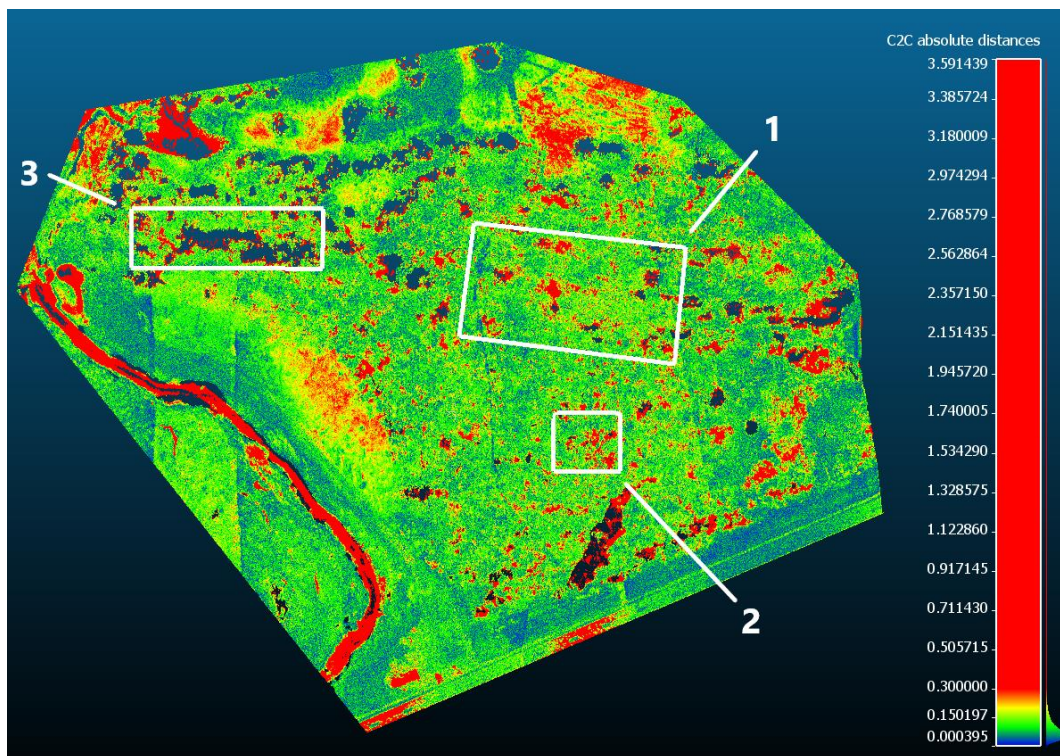
HVL2 skiller seg ut med kun 6.79 % flere punkt i april enn i oktober, samtidig som den har en høy punkttetthet. Den viktigste endringen som ble gjort for HVL2 i forhold til resten av flyvningene er at flyhøyden var på 50 meter. HVL2 var den eneste flyvningen som ble gjennomført med 50 meter flyhøyde, hvor resten var på 100 m bortsett fra HVL6 på 80 meter.

Navn	Antall bakkepunkt oktober	Antall bakkepunkt april	Punkt/m ² oktober	Punkt/m ² april	Prosentvis økning i april
HVL1 [100m 50% 10m/s]	6 156 679	7 579 050	140.55	173.03	23.10 %
HVL2 [50m 50% 10m/s]	14 648 623	15 642 803	334.42	357.12	6.79 %
HVL3 [100m 50% 5m/s]	11 586 794	15 026 966	264.52	343.06	29.69 %
HVL4&5 [100m 20% 10m/s]	7 270 626	10 658 437	165.98	243.33	46.60 %
HVL6 Oblique [100m 20% 10m/s]	14 577 638	17 656 011	332.80	403.08	21.12 %
HVL7 80 kHz PRF [100m 20% 10m/s]	-	2 270 840	-	51.84	-
HVL9 Non-repetitive [100m 50% 10m/s]	-	4 488 726	-	102.48	-
Fotogrammetri [100m 80/70% 10m/s]	-	569 493	-	13.00	-
Høydedata	994 480		22.70		-

Tabell 12: Antall bakkepunkt for hele området, oppgitt som total antall bakkepunkt og punkt/m². I tillegg er det oppgitt en prosentvis økning fra oktober til april per flyvning.

Sammenligning av avgrensede områder

I tillegg til at antall bakkepunkt for hele området ble studert, ble også mindre, avgrensede områder av punktskyene undersøkt. Dette ble gjort for å verifisere resultatet vårt, og for å undersøke om det var faktorer med ulik vegetasjonstype eller terrenghelning som førte til forskjeller i resultatet. For å velge ut de avgrensede områdene, ble det forsøkt å finne områder med store forskjeller i antall bakkepunkt mellom tilsvarende punktskyer fra oktober og april. Cloud/cloud distance-verktøyet ble benyttet, hvor analysen påfører en klassifiseringsverdi på den ene punktskyen, som gir en visuell visning av hvor man finner størst forskjeller på skyene som sammenlignes. Resultatet av en slik analyse vises i figur 53, hvor man ser områder med størst forskjeller fargelagt i rødt (noen av forskjellene skyldes faktorer som vannstand i elven, snø og objekter som er flyttet på). De tre hvite boksene viser hvilke områder vi har valgt å undersøke nærmere som avgrensede områder.



Figur 53: Cloud/cloud distance mellom HVL1 fra oktober og april. Hvite firkanter viser avgrensede områder. CloudCompare.

Avgrenset område 1 (39.5x70m = 2765m²)

Område 1 er det største området, hvor det er observert stort sett løvtrær. Dette er altså et område hvor vi kan forvente en forbedring i antall bakkepunkt i april, siden trærne i området ikke har løvverk på denne tiden av året. Av tabellen under ser vi at HVL2 skiller seg meget tydelig ut, slik som under sammenligningen av hele området.

Navn	Antall punkt i oktober	Antall punkt i april	Punkt/m ² oktober	Punkt/m ² april	Prosentvis økning i april
HVL1 [100m 50% 10m/s]	302 512	448 157	109.41	162.08	48.15%
HVL2 [50m 50% 10m/s]	636 873	669 810	230.33	242.25	5.17%
HVL3 [100m 50% 5m/s]	542 116	894 105	196.06	323.37	64.93%
HVL4&5 [100m 20% 10m/s]	414 613	650 875	149.95	235.40	56.98%
HVL6 Oblique [100m 20% 10m/s]	738 531	1 064 766	267.10	385.09	44.17%
HVL7 80 kHz PRF [100m 20% 10m/s]	-	154 506	-	55.88	-
HVL9 Non-repetitive [100m 50% 10m/s]	-	201 417	-	72.85	-
Fotogrammetri [100m 80/70% 10m/s]	-	18 812	-	6.80	-
Høydedata	62 482		22.59		-



Figur 54: Skjermtklipp av avgrenset område 1 med vegetasjon fra oktober. CloudCompare.

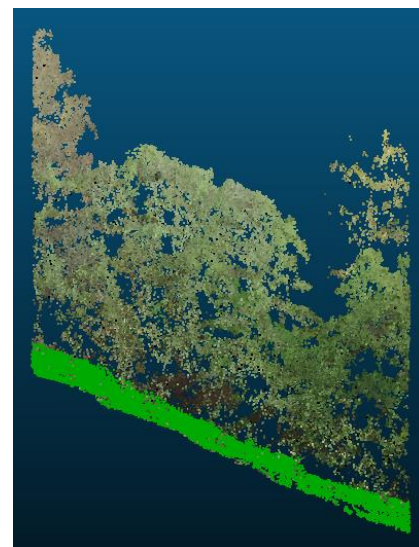
Tabell 13: Bakkepunkt for avgrenset område 1, oppgitt som total antall punkt og punkt/m². I tillegg er det oppgitt en prosentvis økning fra oktober til april per flyvning.

Avgrenset område 2 (20x24m = 480m²)

Område nummer 2 er det minste av de avgrensede områdene. Dette er også et område med tett vegetasjon i form av løvtrær. I tillegg har området en relativt bratt helning (omtrent 27°). Av tabellen under ser vi at forskjellene på oktober og april er høyere enn for hele området og avgrenset område 1. Dette skyldes sannsynligvis den tette vegetasjonen i det avgrensede området. Bildet til høyre er et skjermutklipp som viser område 2 sett fra siden, hvor de grønne punktene nederst er bakkepunkt, og punktene over er den tette vegetasjonen. Også for dette området skiller HVL2 seg ut som den flyvningen med minst forskjeller mellom oktober og april.

Navn	Antall punkt i oktober	Antall punkt i april	Punkt/m ² oktober	Punkt/m ² april	Prosentvis økning i april
HVL1 [100m 50% 10m/s]	33 411	53 820	69.61	112.13	61.08%
HVL2 [50m 50% 10m/s]	116 910	148 362	243.56	309.09	26.90%
HVL3 [100m 50% 5m/s]	66 526	115 776	138.60	241.20	74.03%
HVL4&5 [100m 20% 10m/s]	42 777	70 013	89.12	145.86	63.67%
HVL6 Oblique [100m 20% 10m/s]	75 513	103 842	157.32	216.34	37.52%
HVL7 80 kHz PRF [100m 20% 10m/s]	-	20 773	-	43.28	-
HVL9 Non-repetitive [100m 50% 10m/s]	-	22 370	-	46.60	-
Fotogrammetri [100m 80/70% 10m/s]	-	890	-	1.85	-
Høydedata	9 028		18.81		-

Tabell 14: Bakkepunkt for avgrenset område 2, oppgitt som totale antall punkt og punkt/m². I tillegg er det oppgitt en prosentvis økning fra oktober til april per flyvning.

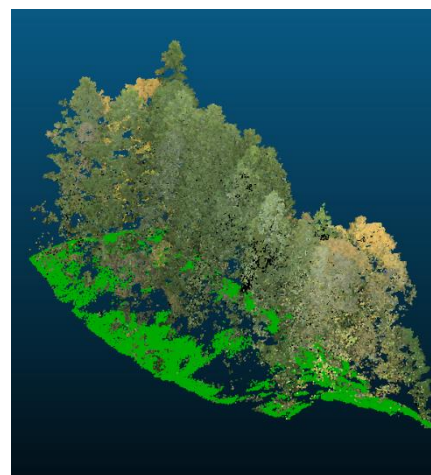


Figur 55: Skjermutklipp av avgrenset område 2 med vegetasjon fra oktober. CloudCompare.

Avgrenset område 3 (20x63m = 1260m²)

Det siste området som ble valgt ut for å undersøke antall bakkepunkt, kalles for område 3. Området ligger på en liten åsrygg som består av flere grantrær, et tettvokst treslag som vi har erfart at det er utfordrende å oppnå bakkepunkt under. Dette gjenspeiles i at område 3 har lavest samlet punkttetthet av alle. Bildet til høyre viser hull i bakkepunktene (grønne punkt nederst), spesielt under grantrærne.

En annen ting å legge merke til, slik som for område 2, er større forskjeller mellom punktskyer fra oktober og april. Det er likevel også her HVL2 som utpeker seg som den flyvningen som har minst forskjeller.



Figur 56: Skjermtutklipp av avgrenset område 3 med vegetasjon fra oktober. CloudCompare.

Navn	Antall punkt i oktober	Antall punkt i april	Punkt/m ² oktober	Punkt/m ² april	Prosentvis økning i april
HVL1 [100m 50% 10m/s]	79 759	100 903	63.30	80.08	26.51%
HVL2 [50m 50% 10m/s]	188 243	235 500	149.40	186.90	25.10%
HVL3 [100m 50% 5m/s]	140 796	216 780	111.74	172.05	53.97%
HVL4&5 [100m 20% 10m/s]	108 317	175 738	85.97	139.47	62.24%
HVL6 Oblique [100m 20% 10m/s]	189 421	291 249	150.33	231.15	53.76%
HVL7 80 kHz PRF [100m 20% 10m/s]	-	34 536	-	27.41	-
HVL9 Non-repetitive [100m 50% 10m/s]	-	55 322	-	43.91	-
Fotogrammetri [100m 80/70% 10m/s]	-	4 489	-	3.56	-
Høydedata	19 860		15.76		-

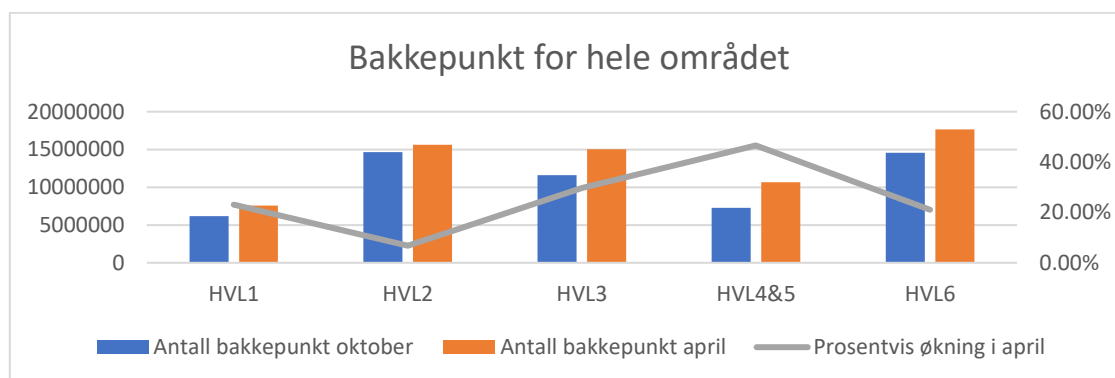
Tabell 15: Bakkepunkt for avgrenset område 3, oppgitt som totale antall punkt og punkt/m². I tillegg er det oppgitt en prosentvis økning fra oktober til april per flyvning.

Oppsummering av bakkepunkt

Oppsummert ser vi at punktskyene våre generelt oppnår høy punkttetthet, også i områder med tett vegetasjon. Sammenlignet med tradisjonell laserskanning fra fly, klarer LiDAR fra drone på det meste å oppnå punkttetthet som er 2000 % høyere enn datasettet fra Høydedata.

For å visualisere undersøkelsen av antall bakkepunkt, er det satt opp et søylediagram (figur 57).

Diagrammet viser tydelig sammenheng mellom bakkepunkt for både oktober og april, i tillegg til en graf som viser prosentvis økning i bakkepunkt fra oktober til april.



Figur 57: Søylediagram som viser sammenheng mellom antall bakkepunkt og forskjellen mellom oktober og april. Excel.

4.5 Analyse av GCP-er

Resultatene fra kvalitetskontrollen danner grunnlag for å vurdere egnetheten av GCP-ene under forskjellige parameterinnstillinger for dronen.

Med utgangspunkt i kvalitetskontrollen av punktskyene, er det foretatt beregning av differanse mellom GNSS-kordinater og senter-kordinater for GCP-ene (metode fra kap. 3.3.2). For å vurdere egnetheten for GCP-ene, sammenlignes denne differansen med standardavviket fra dronen. Standardavviket er nøyaktighetsverdier i grunnriss og høyde, og angir hvilken nøyaktighet man kan oppnå i punktskyen fra dette LiDAR-systemet. Siden ingen av våre flyvninger har lavere flyhøyde enn 50 meter forventer vi at resultatet for GCP-ene våre skal være innenfor disse verdiene.

	Grunnriss	Høyde
Systemnøyaktighet (RMS 1σ)	10 cm @ 50 m	5 cm @ 50 m

Tabell 16: Tabelloversikt med oppgitt nøyaktighet for grunnriss og høyde av DJI Matrice 300 RTK med Zenmuse L1 laserskanner (DJI, 2021. s. 23).

Ved å sammenligne differansene fra kvalitetskontrollen, med oppgitte standardavvik fra droneprodusenten, muliggjør dette å vurdere om GCP-ene er egnet til bruk. Tabellen under viser et utdrag fra kvalitetsrapporten med differanser mellom GNSS-kordinater og beregna senter-kordinater til GCP9. I dette tilfellet er verdiene for differansen lave og holder seg innenfor standardavviket som oppgis av droneprodusenten. En vurdering av slike tilfeller gjør det mulig å si at GCP-en er egnet for bruk.

	GCP9 - skilt ø60cm, folieklasse 1		
	Δx	Δy	Δz
HVL1	0.001	0.040	0.004
HVL2	0.015	0.008	0.031
HVL3	0.019	0.057	0.004
HVL4&5	0.087	0.003	0.022
HVL6	0.041	0.042	0.001



Figur 58: Til venstre: Utklipp fra kvalitetskontrollen (vedlegg 2) som viser differanser i GCP 9. Til høyre: GCP9 plassert i terrenget, Gjerdrum 5. april 2022.

Der hvor kvalitetskontrollen viser differanse som overskrider standardavviket til dronen, vil det være grunnlag for å vurdere GCP-en som mindre egnet. Et eksempel på dette er hvor kvalitetskontrollen viser at GCP8 har høye verdier i grunnriss og høyde (figur 59). Egnetheten ved slike tilfeller er derfor ikke tilstrekkelig, ettersom verdiene strekker seg over standardavviket til dronen. I slike tilfeller kan det være utfordrende å avdekke eventuelle grove eller systematiske feil når GCP-en skal brukes til kvalitetskontroll.

	GCP8 - pyramide		
	Δx	Δy	Δz
HVL1	0.124	0.173	0.148
HVL2	0.036	0.040	0.073
HVL3	0.049	0.073	0.120
HVL4&5	0.066	0.005	0.125
HVL6	0.010	0.004	0.049



Figur 59: Til venstre: Utklipp fra kvalitetskontrollen (vedlegg 2) som viser differanser i GCP 8. Til høyre: GCP8 plassert i terrenget, Gjerdrum 5. april 2022.

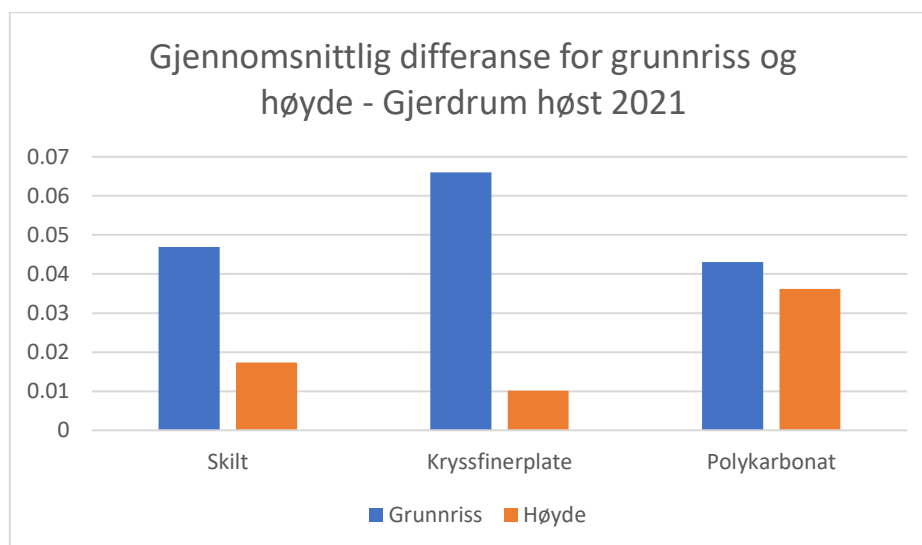
Med utgangspunkt i resultatene for hver punktsky, viser kvalitetskontrollen at det er flere tilfeller hvor GCP-er er egnet ettersom de er innenfor nøyaktighetsverdiene til droneprodusenten. En slik vurdering er under enkeltforhold for hver punktsky og sier lite om hvordan GCP-en egner seg under flere forhold (med justering av parameterinnstillinger som for eksempel; høyde, hastighet eller overlapp).

4.5.1 Gjennomsnittlig differanse

For å kunne måle egnetheten av GCP-ene under flere forhold, er det benyttet data som viser gjennomsnittlige differanse mellom GNSS-koordinater og beregna senter-koordinater. Herunder er det foretatt en todimensjonal vektorberegning for differansen i grunnriss (x- og y-koordinat). For høydeverdiene, er det derimot tatt utgangspunkt i den gjennomsnittlige høydedifferansen. På denne måten kan gjennomsnittlig grunnriss og høyde sammenlignes med nøyaktigheten som dronesystemet oppdriver.

Gjennomsnittlig differanse – Gjerdrum høsten 2021

GCP-ene som ble brukt under datainnsamlingen høsten 2021 var bestående av polykarbonplater, kryssfinerplater og skilt med retroreflektiv folie. En gjennomsnittlig differanse fra denne datainnsamlingen viser at de tre forskjellige hovedproduktene holder seg innenfor en nøyaktighet på 10cm i grunnriss og 5cm i høyde;

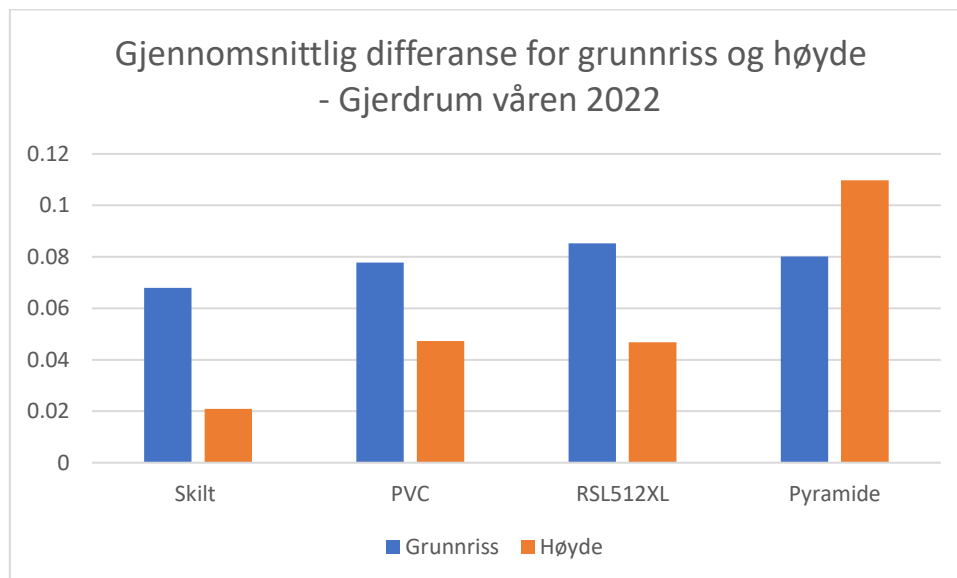


Figur 60: Gjennomsnittlig differanse for GCP-er benyttet oktober 2021. Excel.

En nærmere titt på resultatet viser noen variasjoner blant produktene. For grunnriss viser resultatene at det er polykarbonplaten som har de laveste differanseverdiene, med et gjennomsnitt på 4,3cm. En motsetning til dette er kryssfinerplater med høyeste differanseverdier på 6,5cm. Når det gjelder høydeverdiene (differanse i z-koordinat), er det kryssfinerplatene som har den laveste gjennomsnittsverdien på 1cm. I en motsetning viser resultatene at polykarbonplatene har høyeste gjennomsnittsverdi på 3,6cm.

Gjennomsnittlig differanse – Gjerdrum våren 2022

GCP-ene som ble produsert til datainnsamling våren 2022, varierte mellom pyramider, GCP-er i svart hvitt fra Rothbucher (RSL512XL), PVC-presenninger i svart hvitt-kontrast og retroreflektive skilt. Med utgangspunkt i resultatet for gjennomsnittlig differanse i grunnriss og høyde, er det enkelte GCP-er som ikke lever opp til nøyaktigheten som dronesystemet operer med;



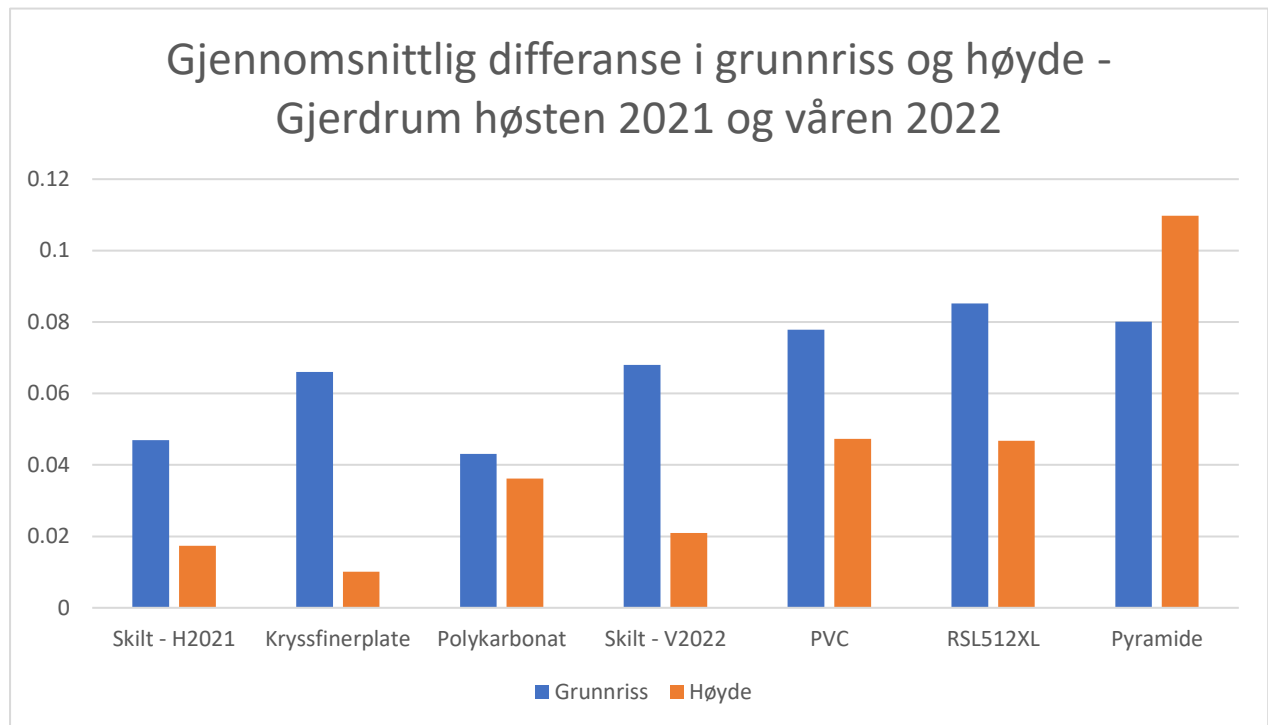
Figur 61: Gjennomsnittlig differanse for GCP-er benyttet april 2022. Excel.

Diagrammet over viser resultatet for gjennomsnittlig differanse i grunnriss og høyde. For grunnriss viser resultatene at de retroreflektive skiltene har den laveste gjennomsnittlige differansen i grunnriss på 6,7cm. Den høyeste gjennomsnittsverdien finner man hos blinkene til Rothbucher. Her ligger gjennomsnittlig differanse i grunnriss på 8,5cm. Mellom den laveste og høyeste gjennomsnittsverdien ligger PVC-presenningene og pyramidene. Totalt sett er alle innenfor dronesystemets nøyaktighet i grunnriss på 10cm.

Når det gjelder høydeverdiene (gjennomsnittlig differanse i z-koordinat) viser resultatene mer variasjon mellom hovedproduktene. Resultatet viser at de retroreflektive skiltene har den laveste gjennomsnittlige høydedifferanse på 2,1cm. Sammenlignet med de andre produktene, har pyramidene den høyeste verdien på 11cm. Dette gjør at pyramiden faller utenfor nøyaktigheten på 5cm som droneprodusenten oppgir for dronesystemet. I nærheten av denne nøyaktigheten, finner vi PVC-presenningene og blinkene fra Rothbucher. Disse produktene har en gjennomsnittsverdi på 4,7cm og ligger tett opp mot nøyaktigheten som er oppgitt fra dronesystemet.

4.5.2 Samlet vurdering av egnetheten for GCP-ene

Metoden har vist seg å gjøre en god beregning av GCP-enes senterpunkt når det sammenlignes med GNSS-målingene. Dette kommer frem ved at de fleste GCP-ene har en differanse som er innenfor nøyaktighetsrammene til dronesystemet. Her varierer egnetheten av de forskjellige GCP-ene. Blant flyvninger med forskjellige parameterinnstillinger for dronen, viser resultatene at det finnes egnethet for alle GCP-ene, bortsett fra pyramiden som faller utenfor nøyaktighetsverdien til dronesystemet. Graden av egnethet er derimot høyest for GCP-er som blant annet retroreflektivt skilt, kryssfinerplate og for polykarbonplate;



Figur 62: Gjennomsnittlig differanse i grunnriss og høyde for alle GCP-er som er testet under arbeidet med oppgaven. Excel.

5. Diskusjon

Opgaven har tatt for seg en bred undersøkelse av LiDAR fra drone og ulike problemstillinger som kan dukke opp ved bruk av teknologien. Dette kapittelet vil ta for seg resultatene vi har fått fra våre undersøkelser, hvor vi vil tolke og diskutere betydningen av resultatene våre.

5.1 Evaluering av LiDAR fra drone og sammenligning med fotogrammetri

LiDAR-system er ingen ny metode for skanning av objekter og områder. Det som er nytt, er derimot LiDAR fra drone. Måten man kan bruke et så presist og godt instrument montert på en drone er nykomment og revolusjonerende for landmålingsindustrien. En evaluering av LiDAR fra drone vil vise til hvilket potensial teknologien klarer å oppdrive, sammenlignet med andre uavhengige målemetoder. Med utgangspunkt i resultatene, blir LiDAR fra drone representert både gjennom kvalitetsvurdering av punktskyer (4.2), i sammenligning mellom fotogrammetri og LiDAR (4.3), ved analyse av bakkepunkt og punkttetthet (4.4) og ved analyse av GCP-er (4.5). Der hvor LiDAR fra drone blir representert er dette også grunnlag for å kunne evaluere.

5.1.1 Evaluering av LiDAR fra drone

Ved evaluering av LiDAR fra drone, kan de forskjellige resultater fortelle noe om instrumentets egenskaper når det kommer til nøyaktighet og punkttetthet. Fra kvalitetskontrollen viser resultatene eksempler på differanser mellom GNSS-koordinater og beregna senter-koordinater for GCP-ene i punktskyene. Differansen mellom GNSS-innmålinger og punktskyen viser til at LiDAR fra drone kan levere data innenfor dronesystemets nøyaktighet. Dette avhenger selvsagt av egnetheten på GCP-ene. Likevel er det en indikasjon på at LiDAR fra drone kan levere innenfor spesifikasjonene.

Gjennom en kvalitetsvurdering av punktskyene, viser resultater en sammenstilling mellom LiDAR fra drone og andre uavhengige instrument. Deriblant totalstasjonsmålinger og data fra Høydedata. Data fra totalstasjonsmålinger og Høydedata er to forskjellige måter å samle data på. Igjen er dette gjort på en bestemt metode med bestemte parameterinnstillinger. I evalueringen har det derfor vært vesentlig å ta dette i betraktning og sammenligne på et generelt grunnlag.

Med utgangspunkt i kvalitetsvurderingen viser resultatet en sammenstilling av terrengmodellene fra totalstasjonsmålingene og LiDAR fra drone. Resultatet viser den minste differansen på 0 mm og største på 77 mm. Differansen synes å skyldes flere faktorer. Blant annet kan det være variasjon mellom terrengmodell fra totalstasjonsmålinger og punktskyer fra våren 2022. Ettersom området hadde noen snøpartier, kan dette være en av årsakene til differansen. Videre kan differansen skyldes antall punkt som er blitt brukt til prosessering av terrengmodeller. Punkttetthet er definert ulikt gjennom totalstasjonsmålingene og målinger fra LiDAR fra drone. Selve punkttettheten er helt klart avgjørende for hvordan terrengmodellen blir. Flere punkt vil gi en mer detaljert terrengmodell enn hva færre punkt vil gjøre. Dette kommer av hvordan algoritmer blir brukt til å definere selve terrengmodellen. I tilfellet hvor LiDAR fra drone er brukt, foreligger det data med stor punkttetthet (>140 punkt/m²). Dette gjør at algoritmen som definerer terrengmodell benytter flere kjentpunkt for å definere modellen. En motsetning til dette er hvor punkttettheten er lav, slik som totalstasjonsmålingene (0,02 punkt/m²). I dette tilfellet vil det knytte seg en usikkerhet til terrengmodellen. Store avstander mellom punktene gjør at det blir beregnet store flater. Disse flatene vil dekke terrenget uten hensyn til terrengdetaljene. LiDAR fra drone vil i dette tilfellet effektivt kunne samle inn og prosessere data til en detaljert terrengmodell, sammenlignet med bruk av totalstasjon.

Resultatene fra kvalitetsvurderingen gir også en sammenstilling mellom punktdata fra LiDAR fra drone og LiDAR fra fly. Data fra LiDAR fra fly, er en datainnsamling hvor det kun er foretatt én flyvning. Herunder er det bestemte parameterinnstillinger som er brukt for selve flyvningen. I en sammenligning med LiDAR fra drone, er det derfor forutsetninger fra LiDAR fra fly som kan føre til andre resultat. På lik linje som totalstasjonsmålingene, må dette tas i betraktning under evalueringen.

Etter hva resultatene viser, er det store forskjeller mellom punkttettheten fra LiDAR fra fly og LiDAR fra drone. Med utgangspunkt i det avgrensede område og med gitte parameterinnstillinger, viser LiDAR fra drone å kunne oppnå en punkttetthet på 1056.16 punkt/m² (for den av våre punktskyer med høyest punkttetthet). LiDAR fra fly viser derimot en punkttetthet på 37.86 punkt/m². Forskjellene viser en punkttetthet som øker med 2000 %. Ettersom dette er en sammenligning med åpne data fra Høydedata, vil det være mulig å argumentere for at LiDAR fra drone gir en mer detaljert punktsky enn alternativet, som gjerne er å bruke åpne data fra Høydedata. En slik forskjell fører også til en langt mer detaljert terrengmodell.

Både totalstasjonsmålinger og LiDAR fra fly er to metoder som krever tid og store kostnader. Med totalstasjon vil man bruke langt mer tid, dersom man skal være i nærheten av å imøtekomme punkttettheten til LiDAR fra drone. Det vil også være krevende i områder med mye terrengvariasjoner, hvor totalstasjonen eventuelt må flyttes ofte for å kunne dekke området med målinger. Her vil LiDAR fra drone fremstå som fleksibel og effektiv, ettersom datainnsamlingen foretas fra luften.

Når det gjelder LiDAR fra fly, er dette en metode som ofte forbindes med store kostnader. Skanning fra fly eller helikopter er en dyr prosess som må bestilles fra profesjonelle aktører. LiDAR fra drone vil ha en langt mer billigere prosess. I tillegg vil en drone kunne gjennomføre flyvning og foreta datainnsamling mer effektivt. Dersom det er store områder som skal kartlegges vil derimot fly eller helikopter være bedre alternativ, da de mer effektivt kan dekke store områder på en enkelt flyvning.

5.1.2 LiDAR sammenlignet med fotogrammetri

En sammenligning mellom LiDAR og fotogrammetri tar utgangspunkt i innsamlet data med bestemte parameterinnstillinger. Data fra LiDAR fra drone er innsamlet med flere flyvninger og har et varierende utfall av punktdata. Data som er samlet inn ved fotogrammetri, er derimot kun foretatt med én flyvning og med bestemte parameterinnstillinger. I dette tilfellet kan det tenkes at parameterinnstillingene kunne vært optimalisert for datainnsamling i det avgrensede testområdet. Data fra fotogrammetri er derimot en flyvning foretatt av NVE for å dokumentere et større område. Det er derfor ikke gjort særegne innstillinger for fotogrammetri tilpasset vegetasjonsfylte områder. Det kan dermed tenkes at andre parameterinnstillinger kunne gitt oss et bedre resultat for fotogrammetri. Ved vår enkle sammenligning har vi sagt oss fornøyd med dette ene datasettet fra fotogrammetri, men ved mer fokusert forskning på sammenligning av de to metodene LiDAR og fotogrammetri, burde flere flyvninger med ulike parameterinnstillinger brukes.

Gjennom sammenligningen av LiDAR og fotogrammetri fra drone, viser resultatene antall punkt som begge instrumentene kan oppdrive under gitte parameterinnstillinger. Differansen mellom de to instrumentene er tilsynelatende stor for hele det avgrensede testområdet. LiDAR viser i dette tilfellet å kunne oppdrive 12 ganger flere punkt enn fotogrammetri for hele området. Mye av dette skyldes vegetasjonen i området hvor fotogrammetri får utfordring med å registrere punkt. Dersom man ser på et område som ligger utenfor vegetasjonen, viser resultatet at LiDAR kan oppdrive sju ganger flere punkt enn fotogrammetri. Bruk av fotogrammetri over vegetasjonsfylte områder har sine utfordringer når det kommer til å knytte bilder sammen i prosesseringen. I tilfeller hvor det er utfordrende å knytte bilder av vegetasjon, blir det etterlatt et hull i datasettet. Det er derimot muligheter for å knytte bildene sammen manuelt, men det krever også en god del tid og arbeid. Ved bruk av LiDAR blir denne problematikken håndtert annerledes. Antall punkt i et vegetasjonsområde blir direkte georeferert som en punktsky. I tillegg vil LiDAR registrere flere multiple returer og sørge for å kunne skille mellom vegetasjon og bakkepunkt.

Da fotogrammetri i vegetasjonsfylte områder har utfordringer med å oppnå bakkepunkt, vil det også brukes færre bakkepunkt til beregning av terrengmodeller. Fotogrammetri vil i slike situasjoner gi en mindre detaljert terrengmodell sammenlignet med LiDAR. I en motsetning, vil det være forskjell på bakkepunkt utenfor og i vegetasjonsfylte områder. Utenfor vegetasjonsfylte områder, klarer fotogrammetri å oppnå 30 punkt/m² på et relativt flatt område. I mange tilfeller vil dette være tilstrekkelig antall bakkepunkt for å kunne lage en god terrengmodell. Terrengmodellen vil også være tilstrekkelig detaljert til flere bruksområder. Uansett vil en LiDAR klare å oppnå 605 % flere bakkepunkt utenfor vegetasjonen og 3500 % flere bakkepunkt i vegetasjonsfylte områder. Sammenlignet med fotogrammetri, kan LiDAR danne en mer helhetlig detaljert modell.

Tidsbruk er en viktig faktor som vektlegges arbeidsoppgaver med LiDAR og fotogrammetri fra drone. Herunder er det et ulikt antall GCP-er som blir brukt for LiDAR og fotogrammetri, noe som er avgjørende for tidsbruken. LiDAR har i utgangspunktet ikke behov for like mange GCP-er som ved fotogrammetri. I tillegg er GCP-bruk knyttet til LiDAR kun for å kvalitetssjekke punktskyen og ikke georeferere. Dette gjør at LiDAR fortrinnsvis bruker mindre tid på GCP-er, og at punktskyen blir direkte georeferert, som også er tidsbesparende.

Fleksibilitet er en annen faktor som også kan knyttes til arbeidsoppgavene. Herunder er det forskjell på når og under hvilke forhold LiDAR og fotogrammetri kan brukes. Med LiDAR er man ikke avhengig av dagslys og kan i teorien drive datafangst på natten, basert på kunnskapen om at LiDAR opererer utenfor menneskets synlige lysspekter. Ved fotogrammetri derimot, vil skygge og dårlig lys påvirke resultatene da bildene blir utydelige. Dette gjør LiDAR mer fleksibelt, noe som under oppdrag med tidspress kan være en viktig egenskap.

For brukeren er det også noen ulemper man må ta stilling til. Det at LiDAR-utstyr koster mer enn fotogrammetri, er en av ulempene. Som nevnt tidligere har piloten også andre krav å ta stilling til dersom det flys med andre sensorsystem enn video og bilde. Varslingsskjema til NSM må sendes inn før flyvning. Dette må gjøres med hensyn til forbudsområder som ikke er offentliggjort (Norsk sikkerhetsmyndighet, u.å.). Andre utfordringer kan være parameterinnstillinger for finjusteringer. Det er rekke innstillinger som kan justeres, som overlapping, flyhøyde, hastighet, skannevinkler og skannefrekvens. Dette kan være utfordrende for brukeren å sette seg inn i.

5.2 Evaluering av parameterinnstillinger for maksimalt antall bakkepunkt

Problemstillingen som omhandler hvilke parameterinnstillinger som egner seg best for vegetasjonsfylte områder, dreier seg om å oppnå mest mulig bakkepunkt. For å svare på denne problemstillingen er det gjennomført en rekke flyvninger med ulike parameterinnstillinger. Flyvningene er gjennomført både med og uten løvverk på trærne, slik at man kan sammenligne, og finne de innstillingene som er best egnet uavhengig av årstid. Det må bemerkes at punktskyene som sammenlignes ikke alltid er helt like, selv om det er brukt de samme parameterinnstillingene. Siden laserskanning gir diskrete punkt spredt «tilfeldig» spredt utover området som skannes, kan man ikke forvente at punktene fra oktober og april vil ha like plasseringer. Dette «problemet» håndteres ved at en overflate dannes av en av punktskyene som sammenlignes. En annen ting man må være klar over er at parameterinnstillingene vi finner som optimale her ikke nødvendigvis er det som er optimalt for andre områder med annen topografi og vegetasjonstype. Våre flyvninger ble gjort på et bestemt område, og vi kan derfor ikke garantere for at innstillingene vil fungere like bra på andre områder.

Resultatene i form av antall bakkepunkt er strukturert i tabeller. Tabellen med antall bakkepunkt må sees i sammenheng med tabellen som viser oversikt over parameterinnstillinger for hver flyvning, slik at man kan se sammenhenger om hvilke innstillinger som fører til høyt antall bakkepunkt.

Navn	Antall bakkepunkt oktober	Antall bakkepunkt april	Punkt/m ² oktober	Punkt/m ² april	Prosentvis økning i april
HVL1 [100m 50% 10m/s]	6 156 679	7 579 050	140.55	173.03	23.10 %
HVL2 [50m 50% 10m/s]	14 648 623	15 642 803	334.42	357.12	6.79 %
HVL3 [100m 50% 5m/s]	11 586 794	15 026 966	264.52	343.06	29.69 %
HVL4&5 [100m 20% 10m/s]	7 270 626	10 658 437	165.98	243.33	46.60 %
HVL6 Oblique [100m 20% 10m/s]	14 577 638	17 656 011	332.80	403.08	21.12 %
HVL7 80 kHz PRF [100m 20% 10m/s]	-	2 270 840	-	51.84	-
HVL9 Non-repetitive [100m 50% 10m/s]	-	4 488 726	-	102.48	-
Fotogrammetri [100m 80/70% 10m/s]	-	569 493	-	13.00	-
Høydedata	994 480		22.70		-

Tabell 17: Oversikt over antall bakkepunkt og punkt/m² for flyvningene foretatt oktober 2021 og april 2022. I tillegg er det oppgitt en prosentvis økning fra oktober til april per flyvning.

Flere av datasettene inneholder et høyt antall bakkepunkt, samtidig som det er liten forskjell på om det er løvverk på trærne eller ikke. I tillegg til hvilke flyvninger som gir best resultat, må man også veie resultatet opp mot tidsforbruk for gjennomføring av flyvningene. Dersom det er store områder som skal skannes, har parameterinnstillingene ekstra mye å si for tidsforbruket. Man må derfor vurdere hva som er praktisk mulig å få til, da man gjerne kan ha begrenset med batterier med seg, eller at man har begrenset med tid for å få gjennomført kartleggingen.

Som kommentert i kapittel 4.4 er det HVL2 som skiller seg ut med flest bakkepunkt, samtidig som det er liten forskjell i oktober og april. De avgrensede områdene som ble benyttet under sammenligningen av punktskyene ser ut til å hovedsakelig gi samme resultat som vi kan se i sammenligningen av hele området vårt. Det er HVL2 som skiller seg ut med et høyt antall bakkepunkt, samtidig som vi ser minst forskjell mellom oktober og april for denne flyvningen. Også HVL6 viser seg å gi et høyt antall bakkepunkt i mange tilfeller. Dette er derimot en flyvning som tar lang tid da fem ulike flyvninger skal gjennomføres og settes sammen. I mange tilfeller vil en slik «Oblique-flyvning» være upraktisk å gjennomføre.

Også lavere flyhastighet, i form av HVL3 flyvningen, gir et høyt antall bakkepunkt. I teorien skal en halvering av hastighet ha like stor effekt på punktettheten som en halvering av flyhøyden har. Dette ser ikke ut til å være tilfelle i våre punktskyer, hvor vi ser at lavere hastighet har mindre innvirkning enn det lavere flyhøyde har. Hastigheten ser derfor ikke ut til å være det viktigste å fokusere på.

Når det kommer til HVL4&5, som var foreslått løsning fra Terratec AS, ser vi et relativt lavt antall bakkepunkt i forhold til de andre flyvningene, spesielt med tanke på at HVL4&5 er sammensatt av to flyvninger. Det er også HVL4&5 som viser størst differanse mellom oktober og april, noe som kan tyde på at metoden er mindre egnet for områder med vegetasjon.

HVL1 er det datasettet som inneholder færrest antall bakkepunkt, både i oktober og april, samtidig som det er relativt stor forskjell med og uten løvverk. Dette gjør at HVL1 er mindre egnet. Til gjengjeld er dette den flyvningen som tar kortest tid å gjennomføre, noe som i mange tilfeller kan være praktisk. Det er også disse innstillingene som ligner mest på de anbefalte innstillingene fra DJI for et kartleggingsoppdrag.

HVL7 og HVL9 er flyvninger som kun ble gjennomført i april, og vi har derfor ikke noe sammenligningsgrunnlag fra oktober for disse. Flyvningene ble tatt inn i oppsettet hovedsakelig med tanke på problemstillingen med testing av GCP-er, men er tatt med i vurderingen for oppnåelse av bakkepunkt også. Begge flyvningene gir et lavt antall bakkepunkt, og vurderes derfor som uegnet når det kommer til skanning av vegetasjonsområder. En fordel med HVL7 kan være at den bruker en lavere skannefrekvens (PRF), som gjør at LiDAR-modulen har et lavere strømforbruk. Ved kartlegging av store områder kan derfor denne innstillingen vurderes. Når det kommer til HVL9 hvor non-repetitive skannemodus er testet, har sannsynligvis 10 m/s vært en for stor hastighet til at man oppnår et ønsket resultat. Denne teorien forankres også i at non-repetitive modus ikke anbefales for topografisk kartlegging.

Navn	Flyhøyde	Overlapp	Hastighet	Himmelretning	Kameravinkel	Skannefrekvens (PRF)	Skannemodus
HVL1	100 m	50 %	10 m/s	271°	90°	160 kHz	Repetitive
HVL2	50 m	50 %	10 m/s	271°	90°	160 kHz	Repetitive
HVL3	100 m	50 %	5 m/s	271°	90°	160 kHz	Repetitive
HVL4&5	100 m	20 %	10 m/s	271° og 1°	90°	160 kHz	Repetitive
HVL6	80 m	20 %	10 m/s	Ulik vinkel for alle 5 flyvninger	90°	160 kHz	Repetitive
					45°		
					45°		
					45°		
					45°		
HVL7	100 m	20 %	10 m/s	271°	90°	80 kHz	Repetitive
HVL9	100 m	50 %	10 m/s	271°	90°	160 kHz	Non-repetitive

Tabell 18: Parameterinnstillinger for flyvninger gjennomført i oktober 2021 og april 2022.

Oppsummert sett ser vi at alle datasett inneholder en høy punkttetthet, også når bakkepunktene er filtrert ut. På bakgrunn av dette kan man ikke forkaste noen av flyvningene som er gjennomført, siden alle gir et godt resultat. Det er derimot noen av flyvningene som er mer egnet, både hva kommer til resultat, men også hva kommer til praktisk gjennomføring.

5.3 Evaluering av egnethet for GCP-er

Ved test av egnethet til ulike GCP-er viser resultatet differanser i grunnriss og høyde. Differansene er sammenlignet med nøyaktigheten for dronesystemets nøyaktighet. Dersom verdiene har vært innenfor disse verdiene, er det gitt en indikasjon på egnetheten til GCP-ene. Videre vil den GCP-en med laveste differanseverdier være aktuell til videre bruk eller utvikling.

Resultatet fra kvalitetskontrollen viser en gjennomsnittlig differanse, og dette brukes som en pekepinn for egnetheten. Data som er brukt for å beregne gjennomsnittlig differanse skiller seg derimot noe fra høsten 2021 og våren 2022. For høsten 2021 er det brukt totalt tre flyvninger i beregningen av gjennomsnittlig differanse. Sammenlignet med våren 2022, er det brukt ni flyvninger. Dette gjør at gjennomsnittsdifferansene for GCP-ene inkluderer flere flyvninger for våren 2022 enn for høsten 2021. Igjen betyr også dette at det foreligger ulik bakgrunn for gjennomsnittsberegningen. Bakgrunnen for denne forskjellen er at GCP-ene fra høsten 2021 ble brukt som et utgangspunkt for videreutvikling. Slike forskjeller må likevel tas i betraktning ved sammenligning og når resultatene evalueres.

Når det gjelder variasjon av parameterinnstillinger, viser justeringer at dette også påvirker den gjennomsnittlige differansen mellom GNSS-kordinater og senter-kordinater for GCP-ene. Resultatet viser blant annet at flyvninger med større flyhøyde kan assosieres med større differanse. Dette kan forklares ved at avstanden fra laserskanneren og bakken øker, som igjen gjør at selve fotavtrykket øker. Når fotavtrykket blir større, vil punktet dekke et større område og sørge for en mer unøyaktig senter-beregning av GCP-ene. Justering av parameterinnstillinger viser at differansen kan øke 20-30mm mellom en flyhøyde på 50 og 100 meter. For de fleste GCP-er har ikke slike endringer ført til at differansen mellom GNSS-kordinater og senter-kordinater blir høyere enn dronesystemets nøyaktighet på 50 meter. I tillegg vil dronesystemets nøyaktighet også øke i betraktning av at flyhøyden øker.

Med utgangspunkt i betraktningene over er det foretatt evaluering av GCP-ene. Evalueringen knytter GCP-ene opp mot resultatene fra kvalitetsrapporten og de funksjonelle egenskapene foreligger hos hvert av hovedproduktene. På denne måten er det benyttet både kvantitative tallverdier fra resultatene og kvalitative egenskapeverdier.

Pyramider

Med utgangspunkt i kvalitetsrapporter, viser pyramidene til høye verdier for gjennomsnittlig høyde-differanse mellom GCP-kordinatene og senter-kordinatene. Dette kommer av sammenligningen mellom gjennomsnittlig differanse og nøyaktigheten som dronesystemet kan oppdrive.

Oppbygningen av selve pyramidene er annerledes enn de andre GCP-ene. Pyramidene har en tredimensjonal utstrekning som går i høyden. Ved kvalitetskontroll ble midtpunktet kontrollert som det høyeste punktet av pyramidene. Herunder må det rettes kritikk til utregningsmetoden for senterpunktet, ettersom denne metoden er noe annerledes enn utregning for de andre GCP-ene. Ettersom pyramidene bestod av flere flater i en høydeutstrekning, førte dette til at beregningsmetoden som ble benyttet for de andre GCP-ene ikke kunne benyttes for pyramidene. Løsningen ble å bruke en «*plukke-metode*». Herunder ble det høyeste punktet på pyramidene plukket manuelt. Tanken her var at punktet som lå høyest, var det nærmeste punktet for senterpunktet av pyramidene. Dersom dette

kunne løst seg på en annen måte, ville det mest sannsynlig vært å benytte en matematisk beregning for senterpunktet i toppen av pyramiden.

Når det gjelder egenskapene av pyramidene, viser pyramidene seg å være noe redusert i form av stabilitet. Mye av dette synes å komme fra selve materialvalg og oppbygning av pyramidene. Dette svekker noe av egenskapen GCP-en har til å stå ute over lenger tid. På en annen side er pyramidene lett håndterlige ved at de er sammenleggbare og lave i vekt.

Rothbucher (RSL512XL)

Resultatene har vist at blinkene fra Rothbucher har en gjennomsnittlig differanse som ligger innenfor nøyaktigheten for dronesystemet. På bakgrunn av dette kan man gjerne si at GCP-ene er egnet til bruk, men at høyde-verdiene grenser mot nøyaktigheten som dronesystemet oppdriver.

I feltarbeidet ble det brukt GNSS for innmåling av senterpunktet. Under innmålingene ble det observert at GCP-en kunne bli presset ned i terrenget av GNSS-stangen. Dersom GNSS-stangen presset GCP-en ned i terrenget, ville dette mest sannsynlig resultere i et avvik i punktshøyden. For å unngå dette, ble vekten kompensert ved å holde GNSS-stangen forsiktig på GCP-ens flate.

De funksjonelle egenskapene ved denne type GCP, viser at de er lett håndterlige. Dette kommer blant annet av at de er sammenleggbare og lette å ta med seg i feltarbeid.

PVC-presenninger

PVC-presenningene har en omtrentlig lik status som GCP-ene fra Rothbucher. Resultatene fra kvalitetsrapporten viser at høyde-verdiene grenser mot dronesystemets nøyaktighet. For PVC-presenningene foreligger det også utfordringer når det kommer til innmåling av senterpunkt med GNSS. Bakgrunnen for dette er at PVC-presenningene og blinkene fra Rothbucher er for mjuke slik at innmålingene blir krevende. For å løse dette problemet kan det være mulig å legge slike GCP-er på hardt underlag. Utfordringen igjen blir at terrenget ikke alltid består av et slikt underlag.

Rent praktisk er PVC-presenningene lett håndterlig, slitesterke og sammenleggbare. Det er et produkt som gjerne kan stå ute over lenger tid, men krever tilstrekkelig forankring i bakken, ettersom produktet er mjukt og påvirkes av vind.



Figur 63: Eksempel på hvordan PVC-presenningene kan oppføre seg på hardt underlag (bilde til venstre) og mjukt underlag (bilde til høyre). Gjerdrum 5. april 2022.

Kryssfinerplate

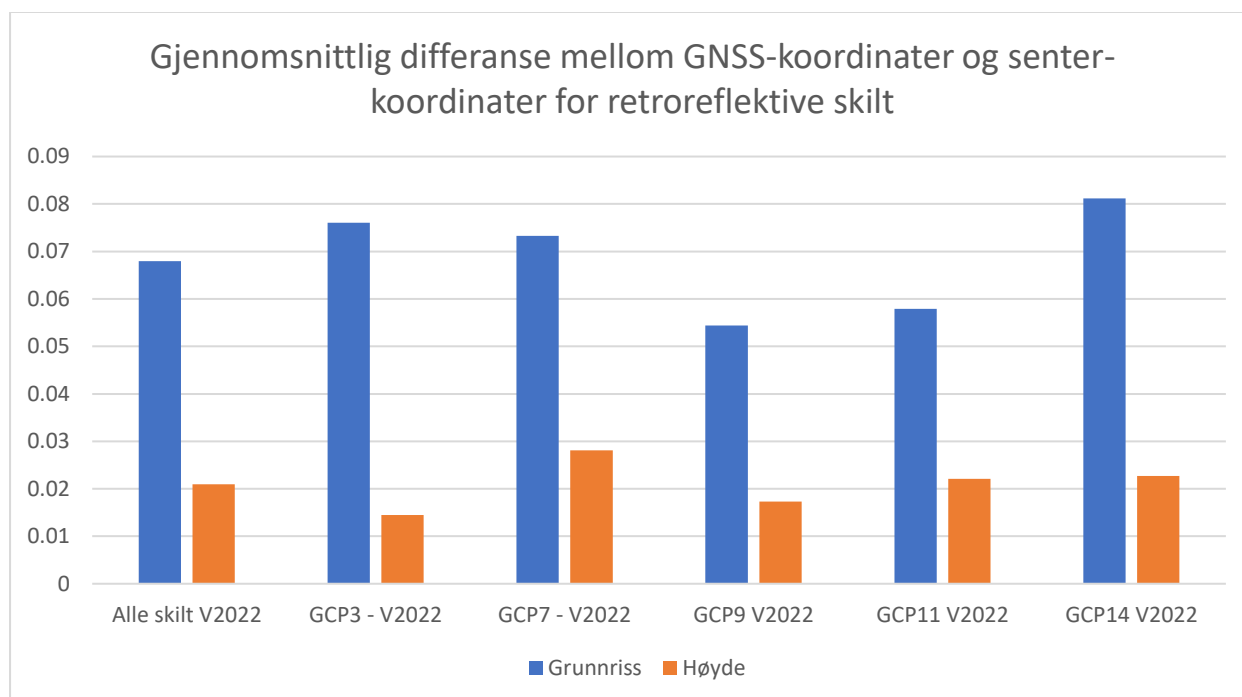
kryssfinerplatene som ble brukt under feltarbeidet høsten 2021, viser til resultater som er innenfor dronesystemets nøyaktighetsverdier. Dette gjelder både for grunnriss og høyde, noe som gjør at produktet har en akseptabel egnethet.

Kryssfinerplatene er de største produktene som er blitt testet og har en flate på 1000x500mm. En kryssfinerplate på denne størrelsen er nok for tung til å kalles lett håndterlig. Den er derfor ikke godt egnet til å frakte med seg ut i terrenget. I tillegg tåler kryssfinerplaten kun kortvarig fukt og vil derfor være mindre egnet til å stå ute over lenger tid. Slik sett vil kryssfinerplaten være mindre egnet sammenlignet med andre produkter som tåler fukt og er lettere håndterlig.

Retroreflektive skilt

Resultatene fra kvalitetskontrollen viser at retroreflektive skilt har gjennomsnittsverdier i grunnriss og høyde som er innenfor dronesystemets nøyaktighet. Sammenlignet med andre produkter som er testet, viser resultatene til relativt lave verdier. Dette er særlig i sammenligning med PVC-presenningene, blinkene fra Rothbucher og pyramidene.

Blant de retroreflektive skiltene, foreligger det forskjellige former og mønster. Disse består av runde og firkanta skilt med og uten kontrastsett i gummi. Blant skiltene foreligger det forskjellige folieklasser som er blitt benyttet. Fem av disse består av folieklasse 3 og ett av folieklasse 1. Ved beregning av gjennomsnittlig differanse viser kvalitetskontrollen noe forskjell internt mellom de forskjellige skiltene. Et eksempel på dette er hvor hvert skilt fra våren 2022 avviker noe fra gjennomsnittet;



Figur 64: Diagram som viser gjennomsnittlig differanse mellom GNSS-koordinater og senter-koordinater for retroreflektive skilt bruk under feltarbeidet Gjedrum våren 2022. Excel.

Diagrammet over viser at GCP9 har de laveste høyde-verdiene internt mellom produktene. Denne GCP-en består av et sirkulært skilt ($\varnothing=60$ cm) med retroreflektiv folieklasse 1. Videre er det GCP3 som har de laveste verdiene for grunnriss. Dette skiltet er firkanta med kontrastsett i gummi og retroreflektivt folieklasse 3. Mellom GCP9 og GCP3 er det kun 0,28 cm som skiller høydeverdiene.

For grunnriss foreligger det hele 2,16 cm. Ettersom det er større forskjell i grunnriss, synes GCP9 å være et fordelaktig valg av egnethet blant GCP-er med retroreflektiv folie.

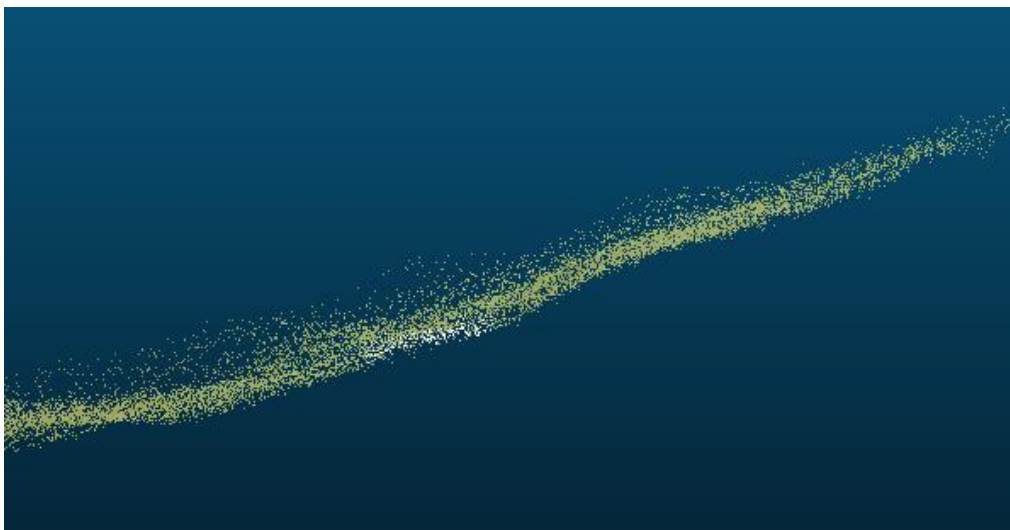
Ved beregning av senterkoordinater for skiltene, var det vesentlig å bruke RGB-verdier i punktskyen. Bruk av intensitetsverdier viste at skiltene økte i størrelse i form av blooming-effekt. Dette var særlig gjeldende for skilt med folieklasse 3. Blooming-effekten var derimot noe redusert med folieklasse 1. Bakgrunnen for dette synes å skyldes refleksjonsverdiene som ligger til grunn for de forskjellige folieklassene. Statens Vegvesens håndbok om trafikksikkerhetsutstyr (2014, s. 12) opplyser at folieklasse 3 gir over fire ganger mer refleksjonsverdier enn folieklasse 1. Dette betyr også at Blooming-effekten øker med folieklassen. Slik sett vil folieklasse 1 stille seg bedre ved at den avgir mindre forstyrrelser enn folieklasse 3. Likevel er det kun én GCP som har folieklasse 1, og vi kan derfor ikke med sikkerhet si at folieklassen påvirker graden av blooming-effekten.

Skiltene har vist seg å være funksjonelle når det kommer til stabilitet ved oppsett og ved innmåling med GNSS. I produksjonsfasen har skiltene blitt modifisert slik at de kunne stilles opp med stativ. I tillegg er disse bestående av aluminiumsplate som sørger for et stabilt underlag for innmåling med GNSS. Vekten på platene er relativt lav, ettersom aluminium er blitt benyttet.

Polykarbonplater

Resultatet fra kvalitetskontrollen viser at polykarbonplater har lave verdier for gjennomsnittlig differanse i grunnriss og høyde. Med verdier under 5cm i grunnriss og høyde, viser denne GCP-en en egnethet innenfor nøyaktigheten som dronesystemet oppgir.

Ved beregning av senter-koordinater for polykarbonplaten, ble det benyttet RGB-verdier. Den hvite flaten viste seg å være godt synlig i punktskyen. Mye av dette synes å være refleksjonen av den hvite glatte flaten. Dette samstemmer også med refleksjonsverdiene som Riegl oppgir i sin tabell om glatte flater (figur 9). Ettersom platen har en tynn hvit folie og består av transparent plastikk, virker det som at laserpulsen trenger gjennom platen og registrerer punkt i ett med terrenget. Dersom laserpulsen går gjennom GCP-en, vil ikke punktene kunne representere GCP-platen. Dette skaper et usikkerhetsmoment knyttet til bruk av platen.



Figur 65: Utklipp av HVL2 som viser terreng i helning og en polykarbonplate som går i ett med terrenget. CloudCompare.

5.4 Konklusjon

Oppgaven har tatt for seg tre problemstillinger knyttet til LiDAR fra drone, utfordringer knyttet til områder med tett vegetasjon og GCP-utvikling. Konklusjonen av hver problemstilling finnes under problemstillingen.

1. Evaluering av LiDAR fra drone og sammenligning med fotogrammetri fra drone i vegetasjonsfylte områder

LiDAR fra drone har en fordelaktig mulighet til å oppnå betydelig flere punkt og bakkepunkt enn ved totalstasjonsmålinger og åpne data fra Høydedata. Dette er med utgangspunkt i tidsbruken datainnsamlingen tar og datamengden som blir innhenta. Mange oppdrag har krav om oppdaterte terrengmodeller, og åpne data fra Høydedata vil i slike tilfeller være mindre egnet. LiDAR vil ha en stor fordel ved å oppnå en oppdatert modell av kartlagt område. LiDAR har også vist seg å oppnå god nøyaktighet, og leverer resultat som er godt innenfor dronesystemets nøyaktighet.

Med utgangspunkt i oppgavens resultater og diskusjon, viser LiDAR fra drone seg å være effektiv ved datainnsamling og prosessering av data. LiDAR har egenskaper som multiple returer, som gjør det mulig å skille mellom hva som er vegetasjon og bakkepunkt. Klassifiseringen av bakkepunkt og ikke-bakkepunkt, samt høy punkttetthet, fører til å effektivt kunne lage en detaljert terrengmodell.

Fra resultatene viser også fotogrammetri fra drone å ha egenskaper til å kunne lage terrengmodeller basert på en gitt punkttetthet. Likevel vil det være utfordringer med å dekke vegetasjonsfylte områder med tilstrekkelig antall bakkepunkt, som også medfører utfordringer med å lage en detaljert terrengmodell. Arbeidet med fotogrammetri er mer tidkrevende og mindre effektivt sammenlignet med LiDAR. Ved fotogrammetri har man behov for flere GCP-er, oppnår færre bakkepunkt og etterprosesseringen er mer tidkrevende. Herunder viser LiDAR seg å være et fortrinnsvis bedre alternativ dersom man vil oppnå et høyt antall bakkepunkt i vegetasjonsfylte områder.

2. Undersøke hvilke parameterinnstillinger som egner seg best for vegetasjonsfylte områder

Da de fleste parameterinnstillingene som ble benyttet ga oss et tilfredsstillende resultat med tanke på punkttetthet for bakkepunkt, har vi ikke grunnlag for å forkaste noen av flyvningene. Vi ser likevel at en lav flyhøyde gir best resultat når det kommer til bakkepunkt i vegetasjonsfylte områder. Da vi kun utførte en flyvning på 50 meter flyhøyde, kan variasjon i andre parameterinnstillinger på lav flyhøyde være noe å teste ut i videre forskning.

Basert på oppgavens resultater kan vi anbefale følgende parameterinnstillinger:

Flyhøyde	Overlapp	Hastighet	Kameravinkel	Skannefrekvens (PRF)	Skannemodus	IMU kalibrering	Returmodus
50 m	50%	10 m/s	Nadir (90°)	Maks (160 kHz)	Repetitive	Aktivert	Maks (3 returer)

Tabell 19: Anbefalte parameterinnstillinger for skanning av vegetasjonsfylte områder med DJI Zenmuse L1.

Våren 2022 kom droneprodusenten med en oppdatering som muliggjorde «terrain follow» som flymodus. Dette lar brukeren laste opp høydemodell av kartleggingsområdet. På denne måten vil dronen følge en fast flyhøyde som følger terrenget, fremfor en fast flyhøyde fra start til slutt. Ved å benytte seg av «terrain follow» vil man sannsynligvis oppnå homogent resultat med tanke på punktetthet. I videre forskning anbefales det derfor å undersøke bruken av «terrain follow», samt å finne en optimal flyhøyde når det kommer til laserskanning av vegetasjonsfylte områder.

3. Teste og evaluere egnethet til ulike GCP-er for bruk av LiDAR fra drone

Med utgangspunkt i oppgavens resultater og evaluering, kan vi konkludere med hvilke GCP-er som er mindre og hvilke som er mer egnet for bruk av LiDAR fra drone. Pyramidene er mindre egnet grunnet dens tredimensjonale form, som gjør at det ikke ble registrert punkter på toppen, altså der hvor senterpunktet befinner seg. PVC-presenningene og blinkene fra Rothbucher viser seg å være utfordrende å bruke på mjukt underlag, i tillegg til at høydenøyaktigheten for disse er helt på toleransegrensen, noe som gjør dem mindre egnet. Kryssfinerplatene viser gode nøyaktighetsverdier, men er mindre egnet grunnet høy vekt og dårlig sliteevne over lengre tid.

Polykarbonplatene viser seg å være tydelige i punkttskyene med sin hvite farge på RGB-visningen, samtidig som de viser gode nøyaktighetsverdier. Platene er meget lette og billige, men ulempen er at laserpulsene fra LiDAR går gjennom det transparente materialet.

Også de retroreflektive skiltene viser gode, stabile nøyaktighetsverdier. Skiltet med folieklasse 1 har pekt seg ut med det beste resultatet i kvalitetskontrollen. Den røde fargen på den retroreflektive folien har derimot vist seg å være noe utfordrende å skille fra omkringliggende terreng, sammenlignet med den hvite fargen fra polykarbonplaten. Likevel viser skiltene meget tydelige kontraster når det klassifiseres med intensitetsverdier.

Ved å benytte seg av egnethets-egenskaper fra både polykarbonplaten og de retroreflektive skiltene, kan vi anbefale videre forskning på skilt med hvit retroreflektiv folie i folieklasse 1.

6. Figurliste

Figur 1: Egendefinert figur som viser samhandling av komponenter for datalogging	10
Figur 2: Egendefinert figur som viser bevegelser rundt x-, y- og z-akser	10
Figur 3: Skjematisk figur av en ToF-sensor. Egenprodusert figur basert på Zheng et al., (2019, s.4)...	12
Figur 4: Det elektromagnetiske spekteret. Egenprodusert figur.....	14
Figur 5: "Multiple returere" og "full bølgeform". Fra Airborne and Terrestrial Laser Scanning (s. 29), av Vosselman & Maas. Benevnelser er endret fra engelsk til norsk.	15
Figur 6: Feilkilder fordelt prosentvis for Riegl LMS-Q240. Fra «Rigorous 3D error analysis of kinematic scanning LIDAR systems» av Glennie & Eng, 2007. Journal of Applied Geodesy, 1, s. 154. Gjengitt med tillatelse.....	17
Figur 7: Eksempel på utfordring med bratt terreng. Egenprodusert figur.	18
Figur 8: Utsendelse og mottakelse av laserpuls gjennom laser-diode og foto-diode. Egenprodusert figur basert på Rigel sitt informasjonsdokument om avstandsmåling (2006, s. 1).	19
Figur 9: Oversikt av overflater/materialer med forskjellig reflekskoeffisient (Riegl, 2006. s. 3).....	20
Figur 10: Strålen spres i flere retninger ved diffuse refleksjon. Egenprodusert figur basert på Rigel sitt informasjonsdokument om refleksjon (2006, s.4).....	21
Figur 11: Innfallstrålen reflekterer og gir en reflektert stråle med lik innfallsvinkel og refleksjonsvinkel. Egenprodusert figur basert på Rigel sitt informasjonsdokument om refleksjon (2006, s.4).	21
Figur 12: Den retroreflektive strålen returnerer i det samme retningen som innfallsstrålen. Egenprodusert figur basert på Rigel sitt informasjonsdokument om refleksjon (2006, s.4).....	22
Figur 13: Egenprodusert figur med viktige parametere som påvirker punkttetthet.....	23
Figur 14: Utklipp av flyrute for DJI Matrice 300, fra datafangst av HVL2 i Gjerdrum april 2022. ArcGIS Pro.....	25
Figur 15: Utklipp som viser overlapping. Egenprodusert figur.	25
Figur 16: Eksempel på markør brukt til fotogrammetri, Øygarden 8. mars 2022.	26
Figur 17: Grafen viser antall GCP-er og hvor dette påvirker RMSE. Fra «Do more GCPs equal more accurate drone maps?», av Pix4D, 2018. (https://www.pix4d.com/blog/GCP-accuracy-drone-maps). Gjengitt med tillatelse.....	27
Figur 18: Prosess for generering av DTM. Egenprodusert figur.....	29
Figur 19: Oversikt over CSF. Egenprodusert figur basert på «An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation» av Zhang et al., 2016, Remote Sensing, 8(6), s 3.	30
Figur 20: Sammenligning av punktskyer. Egenprodusert figur.....	31
Figur 21: DJI Matrice 300 RTK, Gjerdrum 6. oktober 2021.	33
Figur 22: DJI Zenmuse L1, Gjerdrum 6. oktober 2021	34
Figur 23: Non-repetitive (venstre) og repetitive (høyre) skannemodus. Fra «ZENMUSE L1 – User Manual», av DJI 2021a. (https://www.dji.com/no/zenmuse-l1/downloads).	34
Figur 24: Kalibrering i åttetall under "HVL6", Gjerdrum 6. oktober 2021	35
Figur 25: Bilde til venstre viser avgrensa område for datainnsamling i stiplet rød linje. Bilde til høyre viser oversiktskart. Gjerdrum er markert i rødt, nord for Oslo. ArcGIS Pro.	36
Figur 26: Utklippet til venstre illustrerer posisjonen til de utsette GCP-ene (Gemini Oppmåling). Figuren til høyre viser nærbilde av en av de 10 GCP-ene (Gjerdrum 6. oktober 2021).	37
Figur 27: Utklipp fra punktsky som viser det vegetasjonsfylte område. CloudCompare.	38
Figur 28: Til venstre: Triangulering av punkter fra totalstasjonsmålinger (Gemini Terreng). Til høyre: Oppstilling av totalstasjon (Gjerdrum 5. oktober 2021).	39
Figur 29: Figuren til venstre viser de tre hovedområdene hvor vi plasserte ut GCP-ene (Gemini Terreng). Figuren til høyre viser nøyaktig plassering (Gemini Oppmåling).	40

Figur 30: Utklipp fra finskanning (HVL8a) som viser et utvalg av GCP-ene samlet i en punktsky. Ved finskanningen ble de fleste GCP-ene flyttet til hovedområde 2. CloudCompare.....	41
Figur 31: Mappedstruktur på rådata fra drone.....	43
Figur 32: Innstillinger for prosessering av punktskyer. DJI Terra.....	43
Figur 33: Til venstre vises globale koordinater, translasjonsparametere i midten og lokale koordinater til høyre. CloudCompare.	44
Figur 34: Avgrenset polylinje som representerer punkt for GCP-en. GCP9 fra HVL1 i april. CloudCompare	45
Figur 35: Bildet til venstre viser flaten sett ovenfra. Bildet i midten viser flaten sett fra siden. Bildet til høyre viser egenskapene til den beregna flaten. CloudCompare.	45
Figur 36: Første tabell viser lokale og globale senter-koordinater for GCP-en. Andre tabell viser koordinater for GNSS-målinger og beregna differanse i delta x, y, z. Siste tabell viser translasjonsparametere mellom lokal og globalt koordinatsystem. Excel.	46
Figur 37: Til venstre vises hele punktskyen med polylinje i blått. Til høyre er punktskyen avgrenset. CloudCompare.	47
Figur 38: Punkt som filtreres bort er markert med blått og rødt. Som vi ser til høyre, er det fortsatt mange ikke-bakkepunkt igjen i punktskyen, men herunder er det nå kun siste-returer. CloudCompare.	48
Figur 39: Endelig prosess som viser CSF-filte som filtrerer ut bakkepunkt. CloudCompare.	48
Figur 40: Interaktiv punktsky fra HVL1 i StoryMap. ArcGIS Online.....	49
Figur 41: Punktsky klassifisert etter høyde, visualisert i Web Scene. ArcGIS Online.....	49
Figur 42: Punktsky fra HVL1 i oktober 2021. CloudCompare.....	50
Figur 43: Punktsky fra HVL1 i april 2022. CloudCompare.	50
Figur 44: DTM fra HVL1 i april, klassifisert etter høyde. CloudCompare.	51
Figur 45: DTM fra fotogrammetri i april, klassifisert etter høyde. CloudCompare.....	51
Figur 46: HVL1 fra oktober fargelagt med differanser mellom punktsky og DTM fra totalstasjonsmålinger. CloudCompare.	52
Figur 47: Resultat av cloud/mesh verktøyet vist på HVL1 fra oktober 2021. CloudCompare.	53
Figur 48: Avstander mellom DTM fra Høydedata og vår punktsky HVL1 fra oktober. CloudCompare.....	54
Figur 49: Område med tydelig differanse mellom DTM fra høydedata og HVL1. CloudCompare.	54
Figur 50: Mulig systematisk feilkilde i punktsky HVL1 fra oktober. CloudCompare.	54
Figur 51: Bakkepunkt fra HVL1 (LiDAR) til venstre og fotogrammetri til høyre. CloudCompare.....	57
Figur 52: Mesh laget av fotogrammetri-punktsky. Fargelagt med differanser fra HVL1 fra april. CloudCompare.	57
Figur 53: Cloud/cloud distance mellom HVL1 fra oktober og april. Hvite firkanter viser avgrensede områder. CloudCompare.	60
Figur 54: Skjermtutklipp av avgrenset område 1 med vegetasjon fra oktober. CloudCompare.	60
Figur 55: Skjermtutklipp av avgrenset område 2 med vegetasjon fra oktober. CloudCompare.	61
Figur 56: Skjermtutklipp av avgrenset område 3 med vegetasjon fra oktober. CloudCompare.	62
Figur 57: Søylediagram som viser sammenheng mellom antall bakkepunkt og forskjellen mellom oktober og april. Excel.	62
Figur 58: Til venstre: Utklipp fra kvalitetskontrollen (vedlegg 2) som viser differanser i GCP 9. Til høyre: GCP9 plassert i terrenget, Gjerdrum 5. april 2022.	63
Figur 59: Til venstre: Utklipp fra kvalitetskontrollen (vedlegg 2) som viser differanser i GCP 8. Til høyre: GCP8 plassert i terrenget, Gjerdrum 5. april 2022.	63
Figur 60: Gjennomsnittlig differanse for GCP-er benyttet oktober 2021. Excel.....	64
Figur 61: Gjennomsnittlig differanse for GCP-er benyttet april 2022. Excel.	65

Figur 62: Gjennomsnittlig differanse i grunnriss og høyde for alle GCP-er som er testet under arbeidet med oppgaven. Excel.....	66
Figur 63: Eksempel på hvordan PVC-presenningene kan oppføre seg på hardt underlag (bilde til venstre) og mjukt underlag (bilde til høyre). Gjerdrum 5. april 2022.	74
Figur 64: Diagram som viser gjennomsnittlig differanse mellom GNSS-koordinater og senterkoordinater for retroreflektive skilt bruk under feltarbeidet Gjedrum våren 2022. Excel.....	75
Figur 65: Utklipp av HVL2 som viser terreng i helning og en polykarbonplate som går i ett med terrenget. CloudCompare.	76

7. Tabelliste

Tabell 1: Anbefalte innstillinger for kartleggingsflyvninger fra DJI.	35
Tabell 2: Oversikt over hver flyvning med endringer av parameterinnstillinger i oktober.	38
Tabell 3: Oversikt over hver flyvning med endringer av parameterinnstillinger i april.	41
Tabell 4: Parameterinnstillinger for flyvning med fotogrammetri fra april.	42
Tabell 5: Undersøkelse av kvalitetskontroll ved bruk av RGB og intensitet.	44
Tabell 6: Cloud/mesh gjennomsnittsavstander fra sammenligning av utvalgte punktskyer og DTM fra totalstasjonsmålinger.	52
Tabell 7: Cloud/mesh gjennomsnittsavstander fra sammenligning av utvalgte punktskyer og DTM fra Høydedata.	53
Tabell 8: Totalt antall punkt, inkludert bakkepunkt og vegetasjon.	56
Tabell 9: Antall bakkepunkt, uten vegetasjon.	56
Tabell 10: Sammenligning av punkttetthet for fotogrammetri og LiDAR i områder med og uten vegetasjon.	56
Tabell 11: Totalt antall punkt og punkttetthet per flyvning for oktober og april.	58
Tabell 12: Antall bakkepunkt for hele området, oppgitt som total antall bakkepunkt og punkt/m ² . I tillegg er det oppgitt en prosentvis økning fra oktober til april per flyvning.	59
Tabell 13: Bakkepunkt for avgrenset område 1, oppgitt som total antall punkt og punkt/m ² . I tillegg er det oppgitt en prosentvis økning fra oktober til april per flyvning.	60
Tabell 14: Bakkepunkt for avgrenset område 2, oppgitt som totale antall punkt og punkt/m ² . I tillegg er det oppgitt en prosentvis økning fra oktober til april per flyvning.	61
Tabell 15: Bakkepunkt for avgrenset område 3, oppgitt som totale antall punkt og punkt/m ² . I tillegg er det oppgitt en prosentvis økning fra oktober til april per flyvning.	62
Tabell 16: Tabelloversikt med oppgitt nøyaktighet for grunnriss og høyde av DJI Matrice 300 RTK med Zenmuse L1 laserskanner (DJI, 2021. s. 23).	63
Tabell 17: Oversikt over antall bakkepunkt og punkt/m ² for flyvningene foretatt oktober 2021 og april 2022. I tillegg er det oppgitt en prosentvis økning fra oktober til april per flyvning.	70
Tabell 18: Parameterinnstillinger for flyvninger gjennomført i oktober 2021 og april 2022.	72
Tabell 19: Anbefalte paramterinnstillinger for skanning av vegetasjonsfylte områder med DJI Zenmuse L1.	77

8. Litteraturliste

- CloudCompare. (2021, 11. november). *Distances Computation*. CloudCompareWiki. Hentet 19. april 2022 fra:
https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/Distances_Computation
- CloudCompare. (2016, 17. november). *Introduction*. CloudCompareWiki. Hentet 25. mars 2022 fra:
<https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php?title=Introduction>
- CloudCompare. (2015, 20. februar). *Mesh\Delaunay 2.5D (XY plane)*. CloudCompareWiki. Hentet 22. april 2022 fra:
[https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/Mesh%5CDelaunay_2.5D_\(XY_plane\)](https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/Mesh%5CDelaunay_2.5D_(XY_plane))
- Csanyi, N. & Toth, C. K. (2007). *Improvement of Lidar Data accuracy Using Lidar-Specific Ground Targets*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing Vol. 73, nr. 4, s. 385 – 396.
<https://doi.org/10.14358/PERS.73.4.385>
- Dick, Ø. B. (2020). *Laserskanning av terreng*. Store norske leksikon. Hentet 21. mars 2022 fra:
https://snl.no/laserskanning_av_terreng
- DJI. (u.å.a). *DJI Terra*. DJI. Hentet 02. mai 2022 fra:
<https://www.dji.com/no/dji-terra>
- DJI. (u.å.b). *FAQ – General*. DJI. Hentet 28. mars 2022 fra:
<https://www.dji.com/no/zenmuse-l1/faq>
- DJI. (2021a). *Zenmuse L1 – User Manual*. DJI. Hentet 29. mars 2022 fra:
<https://www.dji.com/no/zenmuse-l1/downloads>
- DJI. (2021b). *Matrice 300 RTK – User Manual*. DJI. Hentet 28. mars 2022 fra:
https://dl.djicdn.com/downloads/matrice300/20220129UM/M300_RTU_User_Manual_EN_v3.2.pdf
- Ekaso, D., Nex, F. & Kerle, N. (2020). *Accuracy assessment of real-time kinematics (RTK) measurement on unmanned aerial vehicles (UAV) for direct geo-referencing*.
<http://dx.doi.org/10.1080/10095020.2019.1710437>
- ESRI. (2022). *What is lidar intensity data?*. ArcGIS Desktop. Hentet 1. april 2022 fra:
<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.7/manage-data/las-dataset/what-is-intensity-data-.htm>
- Federal Emergency Management Agency (2003). *Guidelines and Specifications for Flood Hazard mapping partners, Appendix A: Guidance for Aerial Mapping and Surveying*. Hentet 20. april 2022 fra:
https://www.fema.gov/sites/default/files/nepa/Guidelines_and_Specifications_for_Flood_Hazard_Mapping_Partners_Appendix_A_Guidance_for_Aerial_Mapping_and_Surveying_Apr_2003_.pdf
- Geodata. (u.å). *ArcGIS fra Esri*. Geodata. Hentet 12. mai 2022 fra:
<https://geodata.no/produkter-og-tjenester/arcgis-fra-esri>
- Ghilani, C. D. (2018). *Adjustment computations – Spatial data analysis* (6. utgave). John Wiley & Sons, Inc. New Jersey, U.S.

- GIM International. (2014). *Digital Oblique Aerial Cameras (1)*. GIM Internartional. Hentet 3. april 2022 fra:
<https://www.gim-international.com/content/article/digital-oblique-aerial-cameras-1>
- Glennie, C. & Eng, P. (2007). Rigorous 3D error analysis of kinematic scanning LIDAR systems. *Journal of Applied Geodesy*. 1. s. 147-157.
<https://doi.org/10.1515/jag.2007.017>
- Holtet, J. A. (2022, 1. april). *lidar*. Store norske leksikon. Hentet 2. mai 2022 fra:
<https://snl.no/lidar>
- Kartverket. (2022, 23. februar). *Høgdedata og djupnedata*. Kartverket. Hentet 14. mai 2022 fra:
<https://www.kartverket.no/api-og-data/terrengdata>
- Kartverket. (2009). *Standard for «Kart og geodata»*. (Versjon 2). Hentet 28. april 2022 fra:
<https://kartverket.no/globalassets/geodataarbeid/standardisering/standarder/standarder-geografisk-informasjon/kart-og-geodata-2.0-standarder-geografisk-informasjon.pdf>
- Leica Geosystems. (2021a). *Leica GS18 T Data Sheet*. Leica Geosystems. Hentet 28. mars 2022 fra:
<https://leica-geosystems.com/products/gnss-systems/smart-antennas/leica-gs18-t>
- Lichti, D. & Gordon, S. (2004). *Error Propagation in Directly Georeferenced Terrestrial Laser Scanner Point Clouds for Cultural Heritage Recording*.
https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/athens/papers/wsa2/WSA2_6_Lichti_Gordon.pdf
- Luftfartstilsynet. (2021). *Oversiktstabell for åpen kategori*. Luftfartstilsynet. Hentet 15. mai 2022 fra:
<https://luftfartstilsynet.no/droner/nytt-eu-regelverk/apen-kategori/>
- Mæhlum, L. (2022). *RTK*. Store norske leksikon. Hentet 30. april 2022 fra:
<https://snl.no/RTK>
- Mæhlum, L. og Ørstavik, E. (2020). *Totalstasjon*. Store norske leksikon. Hentet 16. mai 2022 fra:
<https://snl.no/totalstasjon>
- Norsk sikkerhetsmyndighet. (u.å.). *Luftbårne sensorsystemer*. NSM. Hentet 12. mai 2022 fra:
<https://nsm.no/fysisk/luftbarne-sensorsystemer/>
- Pesci, A. & Teza, G. (2008). Terrestrial laser scanner and retro-reflective targets: an experiment for anomalous effects investigation. *International Journal of Remote Sensing*, 29:19. s. 5749-5765.
<https://doi.org/10.1080/01431160802108489>
- Pix4D. (2019, 4. desember). Ground control points: why are they important? Pix4D. Hentet 10. mars 2022 fra:
<https://www.pix4d.com/blog/why-ground-control-points-important>
- Pix4D. (2018, 5. november) Do more GCPs equal more accurate drone maps? Pix4D. Hentet 23. mars 2022 fra:
<https://www.pix4d.com/blog/GCP-accuracy-drone-maps>
- Riegl (2006). *Reflectivity of various surfaces/materials*. Hentet 19. mars 2022 fra:
http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/General-Information-Distancemeter.pdf

- Riegl (2022). *RIEGL VQ-1560 II-S*. Riegl Laser Measurement Systems. Hentet 18. mai 2022 fra: <http://www.riegl.com/nc/products/airborne-scanning/produktdetail/product/scanner/70/>
- San José Alonso, J.I., Martínez Rubio, J., Fernández Martín, J.J., & García Fernández, J. (2012). Comparing Time-of-flight and phase-shift. The survey of the royal pantheon in the Basilica of San Isidoro (León). *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38(5). s. 377-385. <http://dx.doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXVIII-5-W16-377-2011>
- Schenk, A. (2001). *Modeling and Analyzing Systematic Errors in Airborne Laser Scanners*. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.20019.25124>
- Siebert, S. og Teizer, J. (2014). *Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system*. *Automation in Construction*, 2014 (41), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.01.004>
- Skogseth, T. og Norberg, D. (2014). *Grunnleggende landmåling*. (3. utgave). Gyldendal Norsk Forlag AS. Oslo.
- Statens Vegvesen (2014). *Håndbok R310 Trafikksikkerhetsutstyr – Tekniske krav*. Hentet 18. mai 2022 fra: <https://www.vegvesen.no/globalassets/fag/handboker/hb-r310-ny.pdf>
- Stori, A. (2020). *Retrorefleksjon*. Store norske leksikon. Hentet 19. mars 2022 fra: <https://snl.no/retrorefleksjon>
- Štroner, M., Urban, R., & Línková, L. (2021). A New Method for UAV Lidar Precision Testing Used for the Evaluation of an Affordable DJI ZENMUSE L1 Scanner. *Remote Sensing*, 13(23), 4811. <https://doi.org/10.3390/rs13234811>
- Suchocki, C. (2020). Comparison of Time-of-Flight and Phase-Shift TLS Intensity Data for the Diagnostics Measurements of Buildings. *Materials*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/ma13020353>
- Terratec. (2021). *Laserskanning rapport – Viken 10pkt 2021*. Hentet 19. april 2022 fra: https://hoydedata.no/LaserInnsyn/ProsjektRapport?filePath=%5C%5Cstatkart.no%5CChoyde data_orig%5Cvol11%5C5171%5Cmetadata%5CViken%2010pkt%202021_Prosjektrapport.pdf
- Vosselman, G. & Maas, H. G. (2010). *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Whittles Publishing. Dunbeath. Caithes.
- Wilkinson, B., Lassiter, H. A., Abd-Elrahman, A., Carthy, R. R., Ifju, P., Broadbent, E., & Grimes, N. (2019). Geometric Targets for UAS Lidar. *Remote Sensing*, 11(24), 3019. <https://doi.org/10.3390/rs11243019>
- Wojtanowski, J., Zygmunt, M., Kaszczuk, M., Mierczyk, Z. & Muzal, M. (2014). Comparison of 905 nm and 1550 nm semiconductor laser rangefinders' performance deterioration due to adverse environmental conditions. *Opto-Electronics Review*, 22(3), 183–190. <https://doi.org/10.2478/s11772-014-0190-2>
- Zhang, W., Qi, J., Wan, P., Wang, H., Xie, D., Wang, X. & Yan, G. (2016). An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation. *Remote Sensing*, 8(6), 501. <https://doi.org/10.3390/rs8060501>

Zheng, L. Li, B. Yang, B. Song, H. & Li, Z. (2019). Lane- Level Road Network Generation Techniques for Lane-Level Maps of Autonomous Vehicles: A Survey. *Sustainability* 2019, 11(16), 4511. <https://doi.org/10.3390/su11164511>

9. Vedlegg

- Vedlegg 1 – LAS-filer
- Vedlegg 2 – Kvalitetsrapport
- Vedlegg 3 – Beregning av bakkepunkt
- Vedlegg 4 – Produksjon av GCP-er
- Vedlegg 5 – GCP-innmåling 05.04.22