

Nasjonal detaljert høydemodell - homogenitetsanalyse av terrengmodell fra flybåren laserskanning

Gaute Wilhelm Hallan
Steiwler

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: februar 2017

Hovedveileder: Terje Midtbø, IBM

Medveileder: Arkadiusz Szadkowski, Terratec AS

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for bygg- og miljøteknikk

Masteroppgave

(TBA4925 - Geomatikk, masteroppgave)

Høst 2016

for

Gaute Wilhelm Hallan Steiwer

Nasjonal detaljert høydemodell – homogenitetsanalyse av terrengmodell fra flybåren laserskanning

**National detailed height model – homogeneity analysis of terrain model
from airborne lidar scanning**

BAKGRUNN

Innen 2020 skal Norge etter planen ha fått en detaljert høydeangivelse ved hjelp av laserskanning. Kartverket har gitt oppdraget med å laserskanne store deler av Norge til Terratec AS. Det er ønskelig å se nærmere på hele prosessen fra datainnsamling til levering av endelig høydemodell for å vurdere kvalitet på resultatet. Ulike firmaer med forskjellige typer lasersensorer vil bidra i prosjektet. Det vil være interessant å undersøke om dette har noe å si for påliteligheten til produktet.

OPPGAVEBESKRIVELSE

Kandidaten skal utforske leverandørens metoder gjennom hele prosessen, fra flyplanlegging, via operatør og prosessering til den endelige leveringen av en høydemodell. Dette skal gjøres for å kunne undersøke og evaluere hva som må til for å få en homogen og pålitelig terrengmodell. Kandidaten skal analysere produktet og sammenligne resultat basert på bruk av forskjellige lasersensorer, for å evaluere homogeniteten til en landsdekkende høydemodell.

SPESIFIKKE PUNKTER

Kandidaten skal

- Studere bruk av ulike laserskannere
- Studere hele produksjonsprosessen for en terrengmodell fra flybåren laserskanning
- Studere hva som kan påvirke nøyaktigheten til den digitale terrengmodellen som blir produsert

-
- Analysere mulig avvik i terrengmodell ved bruk av ulike laserskannere og produksjonsprosesser
 - Drøfte årsaker til mulige avvik, og foreslå eventuelle forbedringer

ADMINISTRATIVT/VEILEDNING

Arbeidet på denne masteroppgaven starter 28. august, 2016

Masteroppgaven, som beskrevet over, skal leveres inn digitalt på DAIM senest 21. januar, 2016

Oppgaven skal utføres i samarbeid med Terratec AS.

Ekstern veileder ved Terratec AS:
Arkadiusz Szadkowski

Veileder ved NTNU:
Terje Midtbø

Trondheim, 10. august, 2016 (revidert: 1. november, 2016)

Sammendrag

Flybåren laserskanning er en raskt og kostnadseffektiv metode for innsamling av stor mengde punktdata for høykvalitets høydemodellering. Denne metoden benyttes når hele Norge i løpet av 2020 skal få en detaljert høydeangivelse. Terratec AS har inngått en avtale med Kartverket om å utføre laserskanningen som skal resultere i en nasjonal detaljert høydemodell (NDH). Flere firmaer med ulike lasersensorer vil være delaktige i prosjektet. Denne oppgaven analyserer homogeniteten til den nye nasjonale høydemodellen på bakgrunn av ulike firmaers involvering og bruk av ulike lasersensorer. Oppgaven gjennomgår produksjonsprosessen til flybåren laserskanning, og beskriver likheter og forskjeller mellom de involverte firmaenes produksjonsprosesser. Bufferområdene i NDH-prosjektet gir mulighet for sammenligning av terrengmodell produsert av ulike firmaer med forskjellige sensorer. Analyse av bufferområdene i NDH-prosjektet viser stor grad av homogenitet, men tegn til små høydeforskjeller i hellende områder. Disse høydeforskjellene ser ut til å stamme fra ulike skanneposisjon. Analysen viser også tegn til at justeringen under matching kan gi høydeforskjeller i terrengmodellen i bufferområdet. Disse analysene ser ikke ut til å være forårsaket av ulike firmaers produksjonsprosess eller bruk av forskjellige lasersensorer. Ulik laserpunktfordeling for lasersensorene som er benyttet gir ulike mønstre i terrengmodellen, og denne inhomogeniteten skyldes bruk av ulike lasersensorer. Kvaliteten til høydemodellen ser ikke ut til å bli nevneverdig påvirket.

Funnene i denne oppgaven er interessante for videre analyse. Da vil det være mer overlappende data tilgjengelig fra dette prosjektet.

Abstract

Airborne laser scanning is a fast and cost efficient method for collection of large amounts of point data for use in high quality height model generation. This method is being used when all Norway will be covered within 2020. Terratec AS has signed an agreement with the Norwegian Mapping Authority to carry out laser scanning and delivery of a national detailed height model (NDH). Three companies utilising different sensors will take part in the project.

This paper is analysing the homogeneity of the new national height model based on the different companies' involvement and use of different sensors. The paper discusses the production processes of the airborne laser scanning, and describes the similarities and differences between the involved companies' production processes. The buffer areas in the NDH project enable comparison of the terrain models produced by different companies and their sensors. The analysis of these buffer areas shows a large degree of homogeneity, but there are small traces of height differences in slope areas. These differences seem to originate from varying scanner positions. The analyses also show that adjustments made in the matching process results in deviations between terrain models in the buffer areas. These analyses do not seem to be caused by the different production methods or use of different scanners. Uneven laser point distribution from the laser sensors in use gives different patterns in the terrain model. This inhomogeneity is caused by use of different laser sensors. The quality of the height model does not seem to be affected.

The findings in this thesis are interesting for further investigation. More overlapping data will be available in the future.

Forord

Denne oppgaven markerer slutten på masterstudiet i Bygg- og miljøteknikk ved NTNU, Norges teknisk-naturvitenskaplige universitet i Trondheim.

Jeg vil rette en stor takk til produksjonsansvarlig for prosessering i Terratec, Arkadiusz Szadkowski, for inspirasjon og rådgivning. Takk også til professor Terje Midtbø ved NTNU for veiledning gjennom masteroppgaven.

Takk til Kartverket for tillatelse til å analysere den nye nasjonale detaljerte høydemodellen. Takk også til Terratec for innsyn i produksjonen. Takk til de ansatte i Terratec som velvillig delte kunnskap. Takk til Zbigniew Matonóg hos KPGeo for deling av flere figurer.

Til slutt vil jeg takke familie for støtte gjennom studiet, og korrekturlesing av denne oppgaven.

Innhold

SAMMENDRAG	III
ABSTRACT	V
FORORD	VII
INNHold	IX
FIGURER	XI
TABELLER	XIII
1 INNLEDNING	1
1.1 OPPGAVEMÅL OG PROBLEMSTILLING	1
1.2 TEORI OM LASERSKANNING.....	2
1.3 FAKTA OM NDH.....	5
2 LEVERANDØRPROSEDYREN I NDH-PROSJEKTET	9
2.1 FLYPLANLEGGING	9
2.2 DATAINNSAMLING	13
2.3 PREPROSESSERING OG KVALITETSKONTROLL	15
2.4 AUTOMATISK BAKKEKLASSIFISERING	18
2.5 MATCHING OG KONTROLLFLATEJUSTERING	21
2.6 MANUELT ETTERARBEID	25
2.7 LEVERING OG FORVENTET NØYAKTIGHET	30
3 HOMOGENITETSANALYSE	33
3.1 HYPOTESE	35
3.2 LASERPUNKTFORDELING.....	37
3.2.1 <i>Områder</i>	37
3.2.2 <i>Metode</i>	37
3.2.3 <i>Resultat og diskusjon</i>	38
3.3 BUFFEROMRÅDER.....	44
3.3.1 <i>Områder</i>	45
3.3.2 <i>Metode</i>	48

3.3.3	<i>Resultat og diskusjon</i>	49
4	KONKLUSJON	70
5	REFERANSER	73

Figurer

Figur 1.1 Returnert energi for samme laserpuls (NEON, 2014)	3
Figur 1.2 Skannemekanisme	4
Figur 1.3 Blokkinnndeling NDH (Kartverket, 2016a)	7
Figur 2.1 Eksempel på en enkel flyplan	11
Figur 2.2 Operatørens hjelpemiddel	14
Figur 2.3 Utsnitt av tetthetsplott for NDH-blokk A22, med ønsket tetthet 5 punkt/m ²	17
Figur 2.4 Utsnitt av tetthetsplott for A26 med dårlige værforhold	18
Figur 2.5 Avvik mellom flystriper (Szadkowski, 2016)	21
Figur 2.6 Dokumentasjon av utført matching	22
Figur 2.7 Profil av overlapsområde med laserpunkter fra to naboflystriper	23
Figur 2.8 Kontrollflate fra hjulspor	25
Figur 2.9 Område som krever manuelt etterarbeid	26
Figur 2.10 Manuelt etterarbeid ved garasjebygning, før endring	28
Figur 2.11 Manuelt etterarbeid ved garasjebygning, etter endring	28
Figur 2.12 Manuelt etterarbeid med bru	29
Figur 3.1 Hypotese om skannevinkel og helning	36
Figur 3.2 Målemetode for laserpunktfordelingen	38
Figur 3.3 Visuell fremvisning av laserpunktfordelingen fra tabell 3.1	39
Figur 3.4 Laserpunktfordeling for en lasersensor med oscillerende speil	41
Figur 3.5 Laserpunktfordeling for en lasersensor med et roterende polygonspeil	41
Figur 3.6 Overflatemodell med tilhørende flyfoto (lasersensor med oscillerende speil)	42
Figur 3.7 Overflatemodell med tilhørende flyfoto (lasersensor med roterende polygonspeil)	43
Figur 3.8 Terrengmodell fra en lasersensor med oscillerende speil	43
Figur 3.9 Terrengmodell fra en lasersensor med roterende polygonspeil	44
Figur 3.10 Oversikt over analyseområde 1	46

Figur 3.11 Analyseområde 1	46
Figur 3.12 Oversikt over analyseområde 2	47
Figur 3.13 Analyseområde 2	47
Figur 3.14 Laserpunktsky for A43	51
Figur 3.15 Laserpunktsky for A44	51
Figur 3.16 Høydedifferanse for analyseområde 1	51
Figur 3.17 Høydedifferanse for analyseområde 1, nye tegneklasser	53
Figur 3.18 Terrengmodell for analyseområde 1	53
Figur 3.19 Interessante områder i analyseområde 1	54
Figur 3.20 Sensorenes plassering i forhold til interessante områder i analyseområde 1	57
Figur 3.21 Flere interessante områder i analyseområde 1	59
Figur 3.22 Profil punktsky A43.....	61
Figur 3.23 Punktsky analyseområde 2	62
Figur 3.24 Terrengmodell for analyseområde 2.....	63
Figur 3.25 Høydedifferanse for analyseområde 2	63
Figur 3.26 Flyfoto av analyseområde 2.....	65
Figur 3.27 Restavvik til kontrollflater etter kontrollflatejustering	67
Figur 3.28 Plasseringen av de nye analyseområdene	68

Tabeller

Tabell 1.1 – Ulike lasersensorer i bruk på NDH-prosjektet	5
Tabell 2.1 – Parameterinnstillinger i flyplanene for NDH, per lasersensor	10
Tabell 2.2 – Klasseinndeling av laserpunktskyen	19
Tabell 2.3 – Endringer av klassene ved manuelt etterarbeid.....	27
Tabell 3.1 – Analyse av laserpunktfordeling	39
Tabell 3.2 – Analyseområder i bufferområder	45
Tabell 3.3 – Høydedifferanse mellom Optech Titan og Riegl 1560 for analyseområde 1	52
Tabell 3.4 – Interessante områder i analyseområde 1	54
Tabell 3.5 – Skannevinkel for de interessante områdene i analyseområde 1	56
Tabell 3.6 – Flere interessante områder i analyseområde 1	59
Tabell 3.7 – Høydedifferanse mellom blokkene i analyseområde 2	64
Tabell 3.8 – Punkttetthet og andelen bakkepunkter i analyseområde 2	66
Tabell 3.9 – Høydedifferanse mellom blokkene i de nye analyseområdene.....	69

1 Innledning

I løpet av 2020 er målet at hele Norge skal være laserskannet og at hver kvadratmeter av landet skal ha en detaljert høydeangivelse. Terratec AS har inngått en avtale med Kartverket om å utføre laserskanningen som skal resultere i en nasjonal detaljert høydemodell (NDH). NDH blir Kartverkets største kartleggingsprosjekt på land noensinne. Høydemodellen vil være nyttig for statlige og kommunale etater i arbeidet med alt fra planlegging til prosjektering. Da modellen gjøres fritt tilgjengelig vil også flere private aktører kunne bruke og tilby tjenester basert på høydemodellen. Derfor vil en landsdekkende detaljert høydemodell skape stor interesse fra flere forskjellige hold. Dette gjenspeiles i budsjettet for prosjektet, som har en totalramme på anslagsvis 350 millioner kroner.

Prosjektets omfang gjør at Terratec ikke har kapasitet til gjennomfører prosjektet alene, og benytter derfor to norske underleverandører. Blom ASA og COWI AS bidrar med blant annet datainnsamling. Flere underleverandører betyr at det på det meste vil være fem fly med lasersensorer i lufta som samler inn data på en gang. Som hovedleverandør er Terratec ansvarlig for hva som leveres, og den endelige leveringen er det de som står for. Terratec, Blom og COWI har alle forskjellige lasersensorer. Derfor ville det vært interessant å se om dette gjør utslag på den endelige høydemodellen. Muligens kan ulike arbeidsrutiner også være en faktor som spiller inn.

1.1 Oppgavemål og problemstilling

I NDH-prosjektet er den nasjonale høydemodellen et produkt av sammensatte delområder, flyvninger, lasersensorer og vegetasjon- og værforhold. Det er mange utfordringer knyttet til å lage en digital høydemodell, med alt fra flyplanlegging, datafangst og prosessering. Det er innlysende at om NDH skal være samfunnsnyttig må høydemodellen være homogen og pålitelig. For NDH er det som nevnt flere firmaer som bidrar, med mulighet for at ulike arbeidsrutiner kan spille inn på homogeniteten i leveransen. Likevel er det først og fremst involveringen av ulike typer lasersensorer som med størst sannsynlighet vil kunne påvirke homogeniteten til høydemodellen. Målet med oppgaven er å undersøke om den leverte høydemodellen i NDH er homogen. De nevnte utfordringene over er innlysende faktorer som vil bli studert.

I denne sammenhengen vil det være naturlig å spørre hvordan man får en homogen og pålitelig digital høydemodell. Det er ønskelig å undersøke hvilke parameterne eller faktorene

som påvirker om høydemodellen blir mer eller mindre homogen. Ved å få innsikt i arbeidet hos hovedleverandøren for NDH har man mulighet til å evaluere alle stegene i prosessen som trengs for å skape en pålitelig høydemodell som imøtekommer kundens krav. I første del av oppgaven er målet å gjennomgå leverandørens produksjonsprosess fra datainnsamling til endelig levering høydemodell, for senere å kunne vurdere kvaliteten på resultatet. I denne gjennomgangen vil det pekes på arbeidsprosedyrer som er felles eller ikke for firmaene involvert, med spørsmålet om disse eventuelle prosedyrene vil kunne påvirke homogeniteten.

I andre del av oppgaven vil den endelig leverte høydemodellen blir studert ved sammenligning av leveranse fra de ulike lasersensorene. Målet med oppgaven er ikke å finne eventuelle svakheter ved en eller flere av lasersensorene, men å avdekke om det finnes muligheter for at leveransen av de ulike blokkene kan være inhomogen som følge av bruk av forskjellige lasersensorer.

Vil den nasjonale detaljerte høydemodellen være homogen til tross for at forskjellige firmaer og lasersensorer er involvert?

1.2 Teori om laserskanning

Laserskanning blir ofte kalt LiDAR (Light Detection And Ranging). Laserskanning har blitt brukt til rekonstruksjon av overfalte siden midt på 1990-tallet (Pfeifer og Briese, 2007). I de senere årene har laserskanning gitt oss muligheten til å innhente et stort antall avstandsmålinger prosessert til en tett punktsky, på en tid- og kostnadseffektiv måte (Vosselman og Maas, 2010). Dette muliggjør luftbåren laserskanning over store arealer med hensikt å høydemåle terrengoverflaten, slik NDH-prosjektet er et eksempel på.

Laserskannere er kontaktløse målingsinstrumenter som produserer en digital 3D-presentasjon (punktsky) av en overflate. Luftbåren og terrestriske laserskannere blir vanligvis klassifisert som flytidsbasert optisk 3D-målingssystemer (Vosselman and Maas, 2010). Disse systemene bruker en laserkilde til å skanne overflaten for å skaffe et stort antall avstandsmålinger.

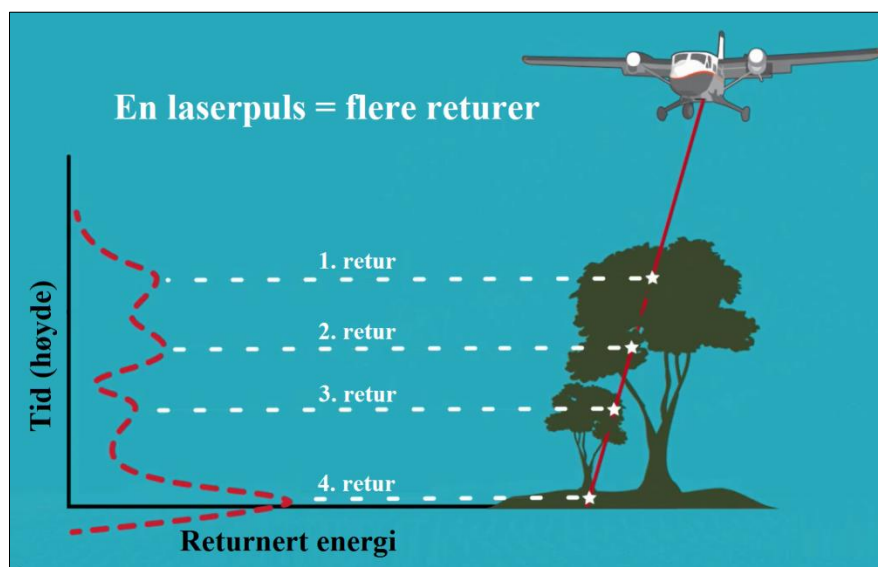
Ved laserskanning bestemmes distansen mellom sensoren og objektoverflaten ved å måle tiden en laserpuls bruker på å returnere til sensoren. Ettersom den utsendte laserpuls beveger seg i lysets hastighet, vil avstanden (s) mellom sensoren og objektet følge av:

$$s = c * \frac{t}{2}$$

Tiden må deles på to ettersom laserpuls beveger seg mot objektet, og tilbake. For store avstandsmålinger er denne måten å måle laserpulsens flytid på den klart mest foretrukne

(Blais, 2004). Flytiden kan også finnes indirekte via fasemålinger i lasere med kontinuerlige bølger. Disse systemene har en rekkevidde på maksimum rundt 100 meter (Vosselman og Maas, 2010). Derfor er denne målemetoden vanligvis forbeholdt terrestrisk laserskanning. Videre i oppgaven vil all laserskanning være assosiert med luftbåren laserskanning, ettersom det er dette som er aktuelt for NDH-prosjektet.

Det er mulig å måle mer enn en pulsretur, ettersom en og samme laserstråle kan returneres flere ganger basert på det skannede områdets karakteristikk. Dette gjelder spesielt når vegetasjon blir laserskannet (Pfeifer og Briese, 2007). Figuren 1.1 under viser et eksempel på hvordan de returnerte pulsene kan bli oppfattet av lasersensorens mottaker. Måling av flere pulsreturer muliggjør blant annet skogtaksering, som vil bli ett av mange bruksområder for den nye høydemodellen.

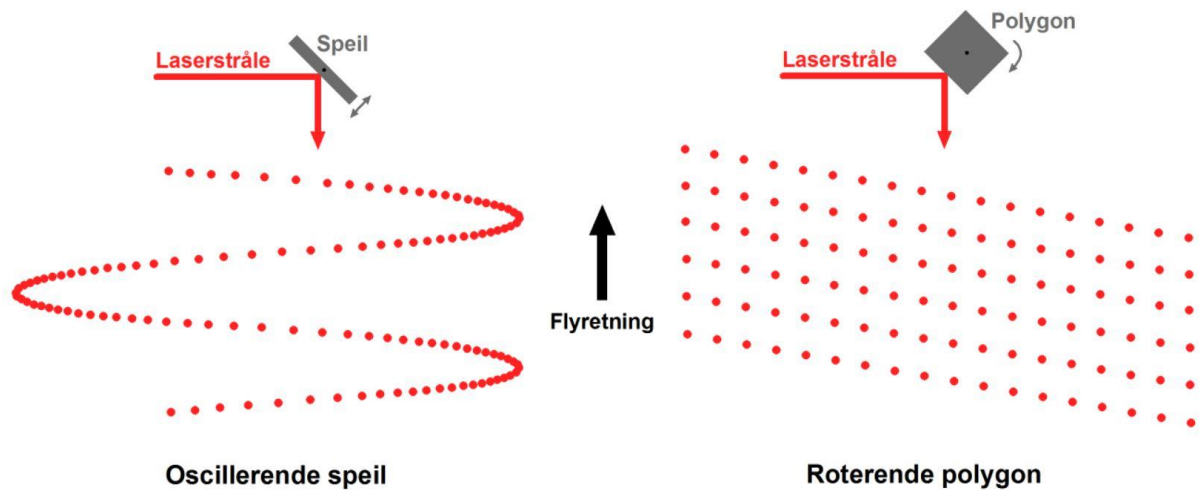


Figur 1.1 Returnert energi for samme laserpuls (NEON, 2014)

Flybåren laserskanning består hovedsakelig av tre elementer. En lasersensor måler avstanden til et punkt på bakken ved å sende ut laserstråler. En GNSS-antenne (Global Navigation Satellite System) montert på flyet måler posisjonen til lasersensoren. En IMU-sensor (Inertial Measurement Unit) måler akselerasjon og rotasjonen til flyet (og lasersensoren). Kombinasjonen av GNSS- og IMU-målingene gjør at eksakt posisjon og orientering av lasersensoren kan måles. De tre omtalte elementene er koblet til en kontrollenhet (datamaskin) som lagrer alle innsamlede data.

Får å kunne laserskanne et større område av gangen, sprer skanneren i sensoren laserpulsene til begge sider av flyet. Skannevinkelen er laserstrålens vinkel i forhold til loddlinjen av flyet.

Denne loddlinjen blir referert til som nadir vinkel. Skanneren sprer laserpulsene utover skannevinkelen ved bruk av et speil. Ulike lasersensorer har ulike måter å praktisere speilet på, kalt skannemekanisme. Lasersensorene som opereres på NDH-prosjektet bruker både et oscillerende speil og et roterende polygonspeil som skannemekanisme. Figur 1.2 viser fotavtrykket på overflaten som følge av ulike skannemekanismer.



Figur 1.2 Skannemekanisme

Laserpunktene langs skannemønsteret til et oscillerende speil vil ha varierende punktdifferanse siden speilet er i konstant akselerasjon og nedbremsing. Skannemønsteret til et roterende polygon vil ha parallelle linjer i en retning. Til forskjell fra skannere med roterende polygonspeil kan skannevinkelen varieres hos skannere med oscillerende speil. Skannemønsteret til et roterende polygon gir en uniform spredning av laserpunktene på overflaten, i motsetning til de oscillerende skannerne. En og samme lasersensor kan ha flere skannere, som dermed gir flere skannemønstre på overflaten. En laserskanner kan også ha en strålesplitter som splitter laserstrålen i to etter å ha forlatt speilet. I dette tilfellet blir det også to ulike skannemønstre.

Under følger en tabell med hvilke lasersensorer de forskjellige firmaene involvert i NDH benytter. Tabellen viser hvilken skannemekanisme lasersensorene benytter, samt bølgelengdene på laseren.

Tabell 1.1 – Ulike lasersensorer i bruk på NDH-prosjektet

Tabellen viser lasersensorene som blir benyttet på NDH-prosjektet. Lasersensorene er fordelt på firma.

Firma	Terratec		Blom	COWI
Sensor	Leica ALS70	Optech Titan	Riegl LMS-Q1560	Leica ALS80
Skannemekanisme	Oscillerende	Oscillerende	Roterende polygon	Oscillerende
Antall skannere	1	3*	2	1
Lasersplitter	Ja	-	-	Ja
Bølgelengde [nm]	1064	532*, 1064,1550	1064	1064

*Det har vist seg at skanneren med bølgelengde 532 nm gir mer støy i punktskyen. Derfor planlegges det uten å bruke punkter fra denne skanneren, og disse punktene leveres ikke om punkttettheten er godkjent

For Optech-sensoren er de tre skannerne plassert i forskjellig vinkel i forhold til flyretningen. De er vinklet henholdsvis 7, 0 og 3,5 grad i forhold til nadir vinkel. For Riegl-sensoren er de to skannerne vinklet ± 14 grader i forhold til en skannelinje på tvers av flyretningen. Riegl-sensoren (Riegl LMS-Q1560) vil heretter gå under navnet Riegl 1560.

I tillegg til å fastslå tredimensjonale koordinater på overflaten, har lasersensorene også muligheten til å måle intensiteten til de returnerte laserstrålene. Intensiteten vil ikke bli diskutert i denne oppgaven, selv om dette er en del av leveransen til Kartverket.

1.3 Fakta om NDH

Som nevnt blir NDH Norges største kartleggingsprosjekt på land. Kartverket har inngått avtale med Terratec AS om laserskanning av omlag 240 000 kvadratkilometer av Norges landareal. Dette prosjektet utgjør størstedelen av datafangsten i arbeidet med å etablere en nasjonal, detaljert høydemodell. Når arbeidet er ferdig vil hver kvadratmeter av landet få en detaljert høydeangivelse. Prosjektet håper å få dekket hele landet i løpet av 2020.

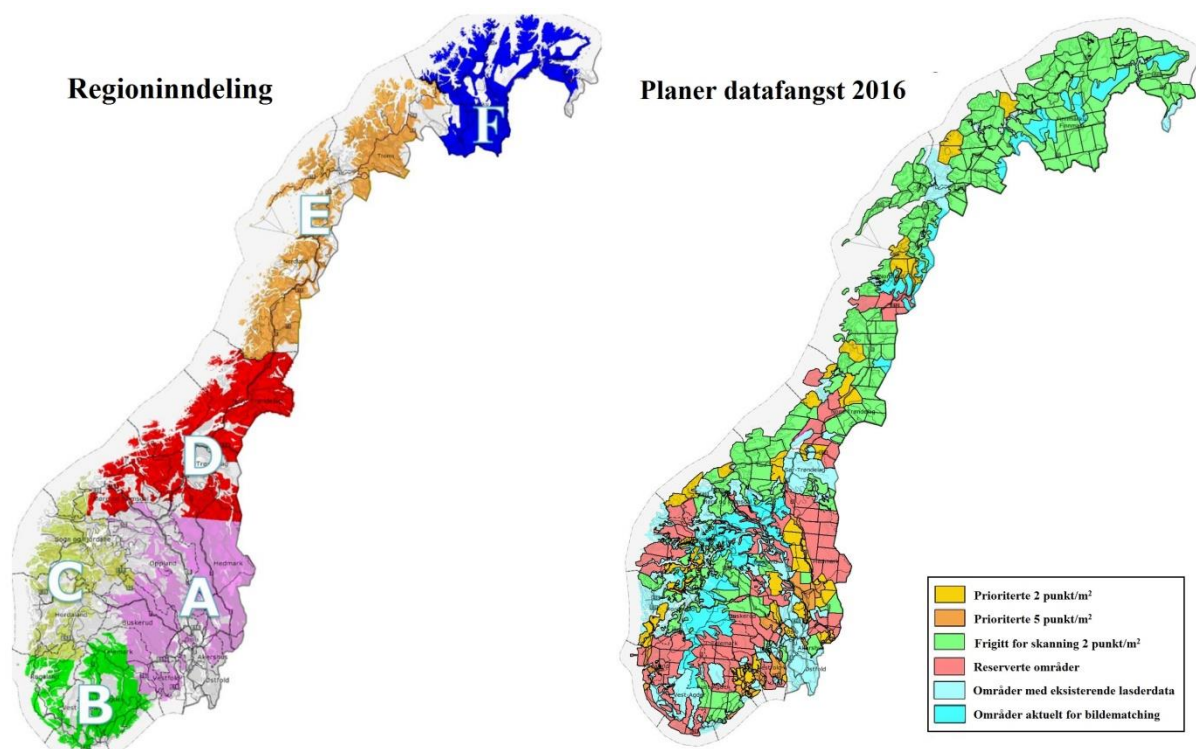
Prosjektet er statlig finansiert for å laserskanne med en punkttetthet på 2 punkt/ m². Den valgte punkttettheten er basert på erfaring fra parter involvert som må ha 2 punkt/ m² for å ha nytte av dataene. Et eksempel på en slik part er NVE. Det finnes likevel en god del parter som trenger høyere punkttetthet i arbeidet med dataen. Eksempler på dette er Vegvesenet, NSB, arkeologer og enkelte kommuner. Disse partene ønsker minimum en punkttetthet på 5 punkt/ m² i områder de har interesse for. Denne økte punkttettheten kjøres som tilleggs kostnad der partene betaler lokalt. Tillegget koordineres gjennom nasjonalprosjektet Geovekst.

I Norge har praksisen lenge vært at det laserskannes mindre områder ved behov. Dette utgjør at små deler av Norge har laserskannede høydemodeller allerede. Disse områdene blir innlemmet i den nye høydemodellen. I tillegg finnes det områder som er aktuelle for

bildematching for å bestemme høydeangivelsen. Disse områdene skal ikke høydebestemmes basert på flybåren laserskanning, grunnet lavere krav til nøyaktighet og dermed mulighet for å redusere kostnadene. Dette gjelder stort sett høyfjellsområdene av landet.

Kartverket har fra før digitale terrengmodeller tilgjengelig for fastlands-Norge. Disse kalles Digital terrengmodell 10 m (DTM10) og Digital terrengmodell 50 m (DTM50), og er basert på høydeinformasjon hentet fra Felles Kartdatabase (FKB). DTM10 og DTM50 er rastermodeller med rutenettstørrelse (oppløsning) på henholdsvis 10*10 meter og 50*50 meter. Nøyaktigheten til de gamle digitale terrengmodellene ligger på $\pm 2 - 6$ meter standardavvik i høyde, avhengig av terreng og kartdataenes alder i FKB (Kartverket, 2016b). Til sammenligning vil den nye detaljerte høydemodellen ha en oppløsning på 1*1 Meter, og høydenøyaktigheten vil stort sett være under 10 cm i områder med laserskannede grunnlag (Kartverket, 2015).

NDH-prosjektet er delt inn i regioner basert på blant annet terreng og værforhold. Disse regionene er gitt bokstavnavn fra A til F, og inndeling vises i figur 1.3. Regionene deles videre inn i mindre nummererte blokker og navngis A1, A2 og så videre. Blokkinnndeling vises i figuren under til høyre. Størrelsen på blokkene er tilpasset en håndterbar enhet på omtrent 1 200 km². Avgrensningene er bestemt ut ifra ulike prioriteringer og ønsker, der blant annet kommuner ønsker homogen skanning innenfor sine egne grenser. Kartverket har lagt begrensninger på hvilken sesong blokkene kan flys etter prioriterte behov. Kartverket har gitt blokkene status som enten prioriterte, frigitte eller reserverte. En slik foreløpig blokkstatus er illustrert i figur under til høyre.



Figur 1.3 Blokkinnndeling NDH (Kartverket, 2016a)

Noen brukere av høydemodellen har behov for data med en gang i enkelt områder. Blokker med slike områder er fastsatt som prioriterte blokker (gult og oransje i figuren over). Andre områder holdes igjen som reserverte blokker (rødt) da til eksempel finansieringen for mulige områder med skanning av 5-punkt/m² ikke er på plass enda. Antall reserverte områder blir en avveining for Kartverket mot ønske om flest mulige frigitte blokker med tanke på lettere planlegging og gjennomføring av datainnsamling for leverandøren.

For at alle naboblokker skal henge sammen er det bestemt at hver blokkavgrensning skal inneholde en buffer. Denne bufferen er satt til 100 meter for hver blokk. Blokkene sikrer at Kartverket ikke får hull i datasettet mellom blokkene når de lager rastermodellen for høydedataløsningen. I tillegg skal bufferområdet fungere som en sikkerhet under datainnsamling, samt kontroll mot naboblokker. Denne buffersonen vil være et avgjørende element i denne oppgavens analyse av homogeniteten til høydemodellen.

2 Leverandørprosedyren i NDH-prosjektet

Dette kapitlet inneholder teori om flybåren laserskanning og hvordan en digital terrengmodell blir til fra rådata laserpunktsky. Teorien blir koblet sammen med arbeidsprosedyren i NDH-prosjektet. For å kunne evaluere påliteligheten og homogeniteten i NDH-datasettet er det avgjørende å få et innblikk i hva som gjøres. Derfor har kandidaten vært delaktig i hele prosessen med å lage datasettet som leveres til Kartverket for NDH. Både det å lage en flyplan for NDH, være med å fly for å samle inn data for en blokk, og prosessere innsamlet data har gitt en tryggere base for senere å kunne evaluere homogeniteten i prosjektet.

Dette kapitlet beskriver arbeidsprosedyren til Terratec. Flere steder er det hentet inn relevant informasjon også fra de andre firmaene involvert i prosjektet. Slik kan eventuelle ulikheter i arbeidsrutinene kartlegges og evalueres opp mot påvirkningen av homogeniteten i leveransen. Der tiltak er blitt gjort for å samkjøre arbeidsrutiner, vil dette bli påpekt og vurdert opp mot en eventuell innvirkning på homogeniteten mellom blokkene fra de ulike firmaene.

De ulike stegene i prosessen er delt opp i underkapitler, med tilhørende teori og prosedyre. I hvert delkapittel blir det også diskutert utfordringer i den spesifikke prosessen, hvor dette blir knyttet opp mot relevante, virkelige eksempler. I arbeidsprosedyren vil det ikke bli gitt noen praktisk gjennomgang i de ulike dataprogrammene som benyttes. Det anses som kun hensiktsmessig å beskrive hva som teoretisk skjer i de ulike prosessene.

Som hovedleverandør har Terratec ansvaret for alt som leveres til Kartverket. Underleverandørene har, i tillegg til nevnte datainnsamling, også i oppgave å legge flyplaner og preprosessere innhentede data. Prosessering av data skjer normalt hos Terratec. Underleverandørene vil tidvis gjøre hele prosesseringen selv, og som hovedleverandør vil denne kvalitetssjekkes av Terratec. Den endelige leveringen gjøres av Terratec.

2.1 Flyplanlegging

Når man skal ut å fly og laserskanne et bestemt område, er det viktig å ha en god plan på hvor det skal flys. Uten en god flyplan er sjansene større for hull i datasettet, samt at kostnadene blir større. Derfor er målet med flyplanleggingen å utarbeide en effektiv flyplan som sikrer datafangst på hele området, med riktige sensorinnstillinger.

En flyplan er en planlagt rute som flyet skal fly over et ønsket område, samt flyhøyde og flyhastighet. Flyplanen inneholder også innstillingene for lasersensoren slik at man oppnår den ønskede tettheten på datasettet som skal skannes. De aktuelle parameterinnstillingene i flyplanen er vist i tabellen under, spesifisert per lasersensor benyttet i NDH-prosjektet. Flyhøyden, flyhastigheten og frekvensen på laserpuls sendt ut av sensoren har alle innvirkninger på tettheten av laserpunktene på bakken. Innstillingene i tabell 2.1 under er veiledende, der flyplanleggeren kan gjøre individuelle tilpasninger til hver blokk etter behov.

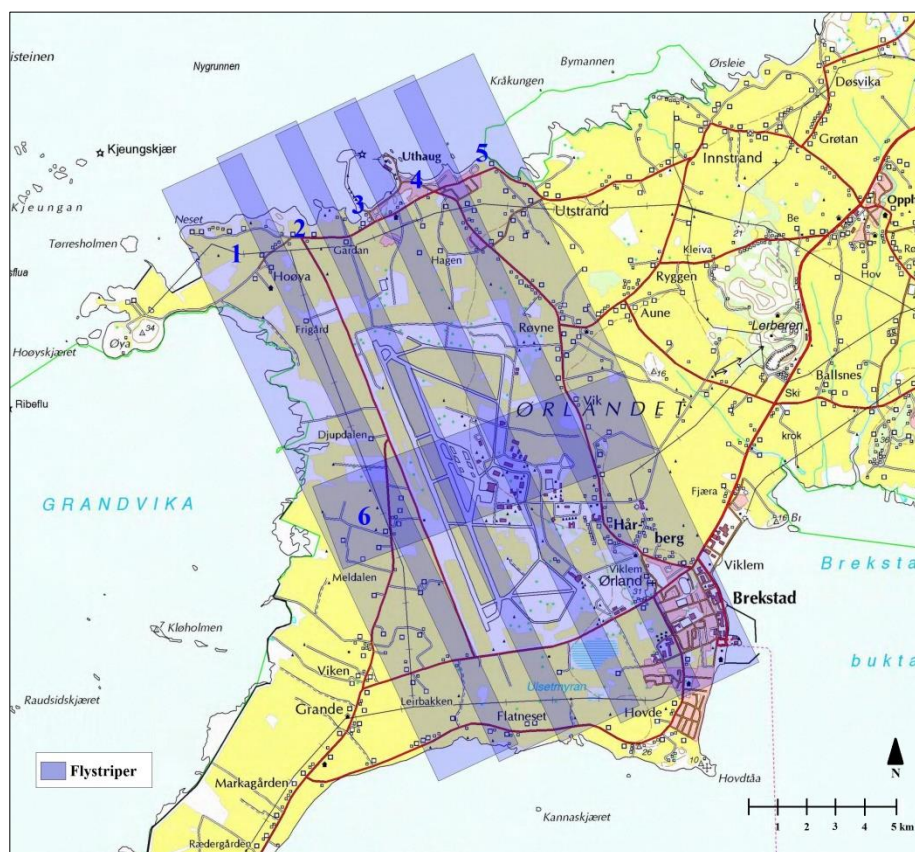
Tabell 2.1 – Parameterinnstillinger i flyplanene for NDH, per lasersensor

Tabellen viser parameterinnstillingene i flyplanen spesifisert per lasersensor benyttet i NDH-prosjektet. Lasersensorene er fordelt på firma. Flyhøyden er oppgitt i meter over bakkenivå for laveste punkt per flystripe. Pulsfrekvensen er oppgitt som total frekvens av skannere/laserstrålesplitt.

Sensor	Terratec				Blom		COWI
	Leica ALS70		Optech Titan		Riegl Q1560		Leica ALS80
Bestilt punkt/m ²	2	5	2	5	2	5	2
Flyhøyde [m]	1300	860	1650	1050	2500	1300	2500
Flyhastighet [m/s]	77	77	77	77	85	70	60
Pulsfrekvens [kHz]	220	320	300	450	534	534	300

Ettersom NDH-prosjektet laserskannes fra fly, vil flyplanen har rette flystriper. Svinger må unngås når det skannes, da lasersensoren følger flyets krenkning og ikke lenger skanner planlagt område under flyet. Derfor planlegger man rette parallelle flystriper til man har dekket det ønskede området. I tillegg skal hver flystripe være dekket av en tverrstripe. Tverrstripen fungerer som korleksjon mellom flystripene, som blir omtalt i kapittel 2.5. For å fungere optimalt til dette formålet bør tverrstripen ligge vinkelrett i forhold til de vanlige flystripene. Kartverket setter krav til at minste vinkel på tverrstripen er 50 grader i forhold til de aktuelle flystripene (Kartverket, 2015). Se figur 2.1 under for et eksempel på en enkel flyplan. Flystripe 6 i figuren er en klassisk tverrstripe. En flyplan for NDH-prosjektet dekker hele blokka og er derfor mye større og komplisert.

For å unngå hull i datasettet mellom flystripene legger man flystriper parallelt inntil hverandre med en sideoverlapp. Denne overlappen hindrer hull i datasettet, som blant annet kan oppstå om flyet ikke flys i planlagt hastighet, høyde eller plassering. Sideoverlappen er normalt 20 %, og aldri under 70 meter. I figuren under vises overlappsområdet som mørkere blåfarge mellom flystripene. Her er sideoverlappen planlagt til 20 %.



Figur 2.1 Eksempel på en enkel flyplan

For å unngå at flyets bevegelser påvirker fotavtrykket til laseren, er lasersensoren ofte plassert på en stabilisert plattform. Plattformen holder lasersensoren orientert i flyets fartsretning og horisontalplan, selv om flyet kommer i unormale bevegelser. Slike bevegelser kan komme av blant annet turbulens. Treghetssensoren sender rotasjonsinformasjon til plattformen, som horisonterer lasersensoren. Enkelte ganger overstiger flyets bevegelser plattformens rekkevidde, og i slike tilfeller er sideoverlapp viktig.

Etter at prosjektleder i Terratec klargjør en blokk til flyvning, sendes det en ordre på flyplan til flyplanleggerne. De får da i oppgave å lage en flyplan med de rette instrumentinnstillingene og passende plassering av flystriper.

Til å begynne med hentes det inn en områdeavgrænsning for den aktuelle blokken der det skal legges en flyplan. Denne avgrænsningen skal inneholde en buffer som tidligere omtalt. I tillegg hentes det inn en terrengmodell (DTM10 eller DTM50) som grunnlag for beregning av flyhøyde. Flyhøyden på stripen er høyden over det høyeste punktet på stripen, og det er derfor viktig med en terrengmodell som grunnlag for beregning av flyhøyde. Slik unngår man å legge en stripe der de høyeste områdene kommer i blindsonen til lasersensorene, noe som

ikke gir noe data. Blindsonen er der laseren ikke lenger klarer å detektere hvilken laserstråle som blir returnert.

Når det skal lages en flyplan er det i hovedsak to oppgaver som gjelder for NDH-prosjektet:

1. Dekke området av blokka med buffer, med riktig tetthet/innstillinger (nøyaktighet)
2. Legge en økonomisk gunstig flyplan

For det første punktet over lager flyplanleggingsprogrammet et forslag som dekker hele avgrensningen. Det er kun krav om at laserskanningen skal dekke fastland og øyer innenfor hver blokk. Derfor kan flystriper slettes og avkortes over hav. Jo færre flystriper jo mer økonomisk blir flyplanen.

Norge har til tider svært varierende topografi, og det gjør flere av flyplanene for NDH-prosjektet utfordrende å planlegge. Moderne programmer for flyplanlegging kalkulerer et forslag til en flyplan der de høyeste områdene på flystripen får den angitte sideoverlappen og den angitte flyhøyden/punktettheten. Om terrenget her har store høydeforskjeller kan det bli trippel dekning på de laveste områdene på stripen, og dette er ikke økonomisk gunstig. For å forbedre en flyplan økonomisk er det mulig å planlegge for hull i datasettet på de høyeste områdene av flystripen. Hull kan være planlagt som mangel på sideoverlapp, eller som en konsekvens av blindsonen til lasersensoren. De planlagte hullene i flyplanen blir dekket over av nye kortere striper med høyere flyhøyde. Det blir en erfaringsbasert avveining om hva som ender opp med færrest mulig striper. Å legge ekstra tid i en god flyplan er økonomisk lurt med tanke på kostnader for flytid. Med en god flyplan reduseres antallet reflyvninger og forsinkelser. Terratec legger alltid en flyplan med 10 % buffer på tetthet, i tilfelle unøyaktig DTM som grunnlag i flyplanen, og turbulens, for høy flyhastighet og -høyde under datainnsamling.

De overnevnte utfordringene i flyplanleggingen er ikke like store for Blom. Deres Riegl-sensor er mer effektiv ettersom flere laserpulsene er i luften samtidig. Dette gjør at flyplanen kan planlegges med færre flystriper. Dette kommer visuelt tydelig frem i sammenligning mellom blokker. Noen få blokker har flyplan fra både Leica/Optech-sensor og Riegl-sensor, da fordelingen mellom Terratec og Blom ikke ble bestemt med en gang. Forskjellen i antall striper har i et tilfelle vært så mye som henholdsvis 163 kontra 25. Dette gjør at Blom har vært vesentlig raskere med å fullføre datainnsamlingen for blokkene sine. Kvaliteten på terrengmodellen skal være den samme såfremt flyplanene er planlagt med riktige innstillinger.

Kartverket skal godkjenne alle flyplanene for NDH-prosjektet før det gis tillatelse til å begynne å fly. Her sjekker kartverket om flyplanen dekker hele blokkavgrensningen, samt at det er tilstrekkelig med godkjente tverrstriper.

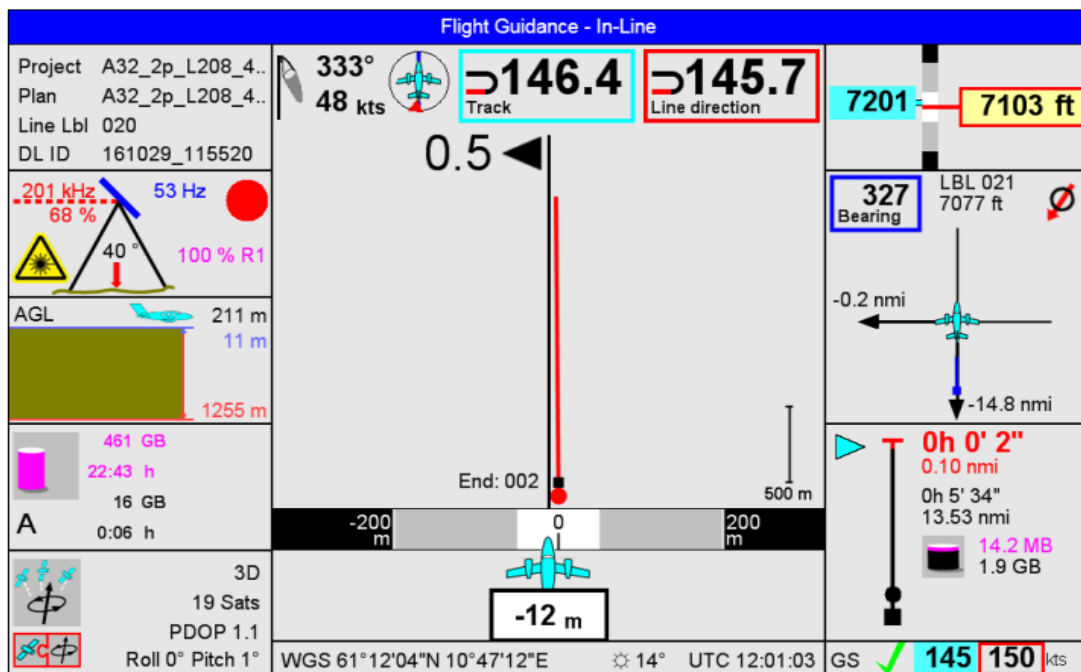
2.2 Datainnsamling

Kartverkets kravspesifikasjon for NDH bestemmer at datainnsamlingen skal gjennomføres med luftbåren laserskanning. Det fastsettes videre at de atmosfæriske forholdene mellom flyet og bakken skal være fritt for skyer, tåke og nedbør under datainnsamlingen. Disse værforholdene kan reflektere laserstrålene og medføre færre signaler som er returnert fra bakken. Av samme grunn tillates det ikke snø på bakken under datainnsamlingen. Kravspesifikasjonen henviser til Kartverkets standard for produksjon av basis geodata som beskriver hvordan datainnsamling ved luftbåren laserskanning skal gjennomføres. Her presiseres det at det heller ikke bør gjennomføres datainnsamling i sterk vind eller ved mye turbulens, for å unngå skjev punktfordeling og redusert nøyaktighet (Kartverket, 2015).

Gode værforhold under datainnsamling er både viktig og altså pålagt for NDH-prosjektet. I forkant av datainnsamlingen sjekker flyoperativ avdeling værmeldinger nøye for å ha en oversikt over hvor i landet det kan flys. Når dette er bestemt laster flyvningens lasersensoroperatør ned prosjektfiler for det aktuelle området. Operatøren informerer Luftfartstilsynet hvor og hvorfor det skal flys, med informasjon om sted, tidsrom og flyhøyder. I lufta samarbeider operatør og pilot for å oppnå best mulig kvalitet på datainnsamlingen. Før første stripe skal flys, får piloten beskjed om å foreta en S-sving for å oppdatere treghetsnavigasjonssystemet, da det som oftest er lengre flyvninger uten svinger fra avgang til prosjektområdet. Før hver datainnsamling noterer operatøren informasjon i flyrapporten om temperatur og trykk i lufta utenfor flyet. Denne informasjonen brukes i preprosesseringen av laserdataen som diskuteres i neste delkapittel. I flyrapporten noteres det også en kommentar etter hver gjennomførte flystripe, noe som er til hjelp i kvalitetssjekken av datasettet.

Underveis i datainnsamling har operatøren flere parametere som må sjekkes for å oppnå ønsket kvalitet. Sammen med piloten sjekkes flyhastigheten, flyhøyden og flyretningen. I tillegg må operatøren påse at systemet lagrer data, og forvise seg om at navigasjonsløsningen er tilfredsstillende. Operatøren kan sjekke disse parameterne på skjermen til datasystemet som er koblet til lasersensoren. En skjermdump av et program i bruk under datainnsamling er vist i figur 2.2 under. En slik visning har også piloten tilgang til på en egen skjerm. I midtre del av

figuren kan piloten og operatøren sjekke retningen flyet har i forhold til den planlagte flystripen. Det er viktig at flyet ligger innenfor 30-40 meter fra senterlinjen til den planlagte flystripen for å unngå hull mellom stripene i datasettet. Den røde linjen er den planlagte flystripen, mens den svarte linjen er flyets heading (retning). For å unngå for lav tetthet på datasettet må piloten og operatøren påse at den planlagte flyhastigheten ikke overstiges. Helt nederst til høyre i figuren ser man at i dette tilfellet er farten 5 knop under planlagt bakkehastighet. Øverst til høyre i figuren vises den ellipsoidiske flyhøyden i fot. Her er flyhøyden noe over planlagt for den aktuelle flystripen. For høy flyhøyde gir lavere punkttetthet enn planlagt. Det samme gir for høy flyhastighet. For lav flyhøyde kan gi hull i datasettet, avhengig av størrelse på den planlagte sideoverlappen. Venstre side av figuren viser navigasjonsløsningen, og om systemet lagrer data.



Figur 2.2 Operatørens hjelpemiddel

Underveis i datainnsamlingen er det mange elementer som kan gjøre at operatøren må avgjøre om en flystripe må flys på nytt. Slike tilfeller kan være for høy flyhastighet, feil flyhøyde, feil plassering av flyet, for mye turbulens, systemet lagrer ikke data eller mistet kontakt med treghetsnavigasjonssystemet. Ofte blir det en erfaringsvurdering om den endelige tettheten blir tilstrekkelig eller ikke, og om flystripen i så fall må flys på nytt. Om datainnsamlingen gjennomføres uten stabilisert plattform er det enda viktigere å holde flyet i ro, og hastigheten senkes derfor noe.

For å få et godt sluttprodukt er været ved datainnsamlingen viktig. Som tidligere nevnt er skyer og nedbør ikke tillatt, og vind kan gi dårligere kvalitet på datasettet. Sterk medvind gjør det vanskelig å holde lav nok fart og samtidig holde flyet høyt nok oppe. Nesen på flyet kan ikke vendes opp for å skape oppdrift, da lasersensoren ikke lenger vil peke i nadir vinkel. Sidevind gjør det mer krevende å følge flystripene, og kan gi endret punktfordeling da flyet må vris for å holde retningen.

Kartverkets standard for Produksjon av basis geodata fastsetter at nabostriper i flyplanen hovedsakelig skal flys motsatt retning for å bestemme eventuelle systematiske avvik mellom stripene (Kartverket, 2015). Justering av disse avvikene blir omtalt i kapittel 2.6

2.3 Preprosessering og kvalitetskontroll

Dette kapitlet handler om å få inn rådata, preprosessere og kvalitetssjekke laserpunktskyen. Etter at operatørene har kommet inn fra flyvningen sendes både navigasjonsdata og rå laserdata til preprosessering.

Navigasjonsdataene inneholder informasjon om hvilke satellitter som GNSS-antennen på flyet har hatt kontakt med, og til hvilke tider. I tillegg inneholder dataene informasjon fra treghetssensoren om flyets rotasjoner. Navigasjonsinformasjonen er avgjørende for at hvert laserpunkt skal få riktig posisjon på bakken. Uten riktige posisjonskoordinater er alle punktene i laserdataene verdiløse.

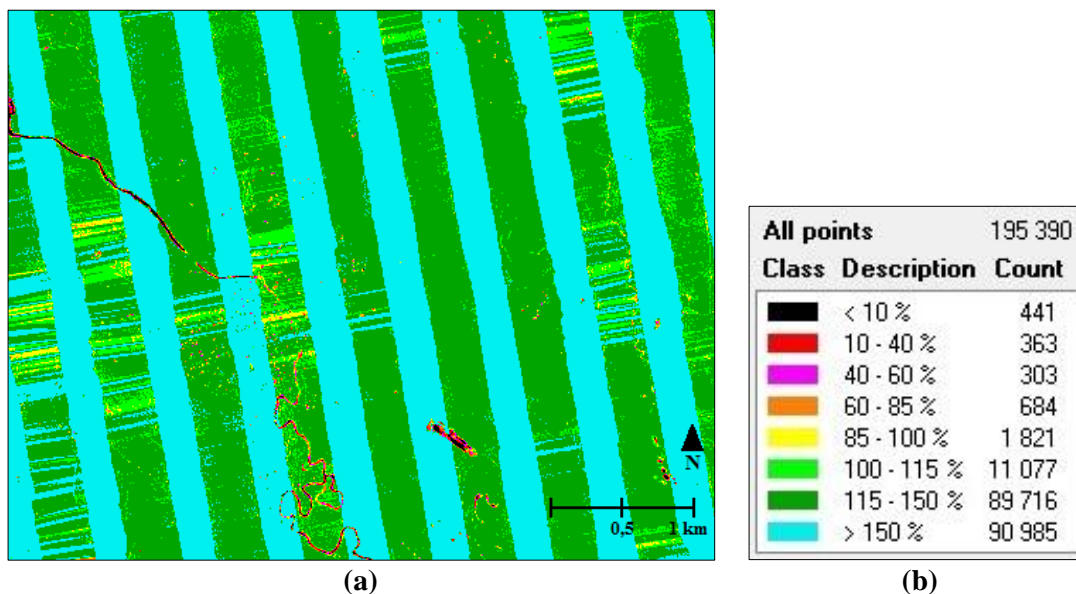
I navigasjonsprosesseringen lastes det ned postkalkulert nøyaktig informasjon om satellittbanedata og atmosfæriske korreksjoner. Med informasjon om satellittenes posisjon, kombinert med informasjonen fra navigasjonsdataene, kan man kalkulere nøyaktig posisjon til flyet. I navigasjonsprosesseringen bruker leverandørene forskjellige programmer for å beregne navigasjonsløsningene. Terratec bruker sitt egenutviklede GNSS/IMU post-prosesseringsprogram TerraPos. TerraPos benytter PPP-teknologi (Precise Point Positioning) som muliggjør navigasjonsprosessering uten bruk av basestasjoner eller referansenettverk. Til forskjell benytter både Blom og COWI tradisjonell navigasjonsutregning basert på basestasjoner med henholdsvis programmene Applanix POSpac MMS og Waypoint Inertial Explorer. I navigasjonsprosesseringen vil derfor leverandørene ha ulike inndata. Likevel skal navigasjonsløsning godkjennes og leveres basert på de samme nøyaktighetskravene, og med de samme navigasjonsplottene. Selv om navigasjonsløsningen beregnes i forskjellige programmer, er resultatet av navigasjonsprosesseringen filer i samme filformat (SBET).

I preprosesseringen av laserdataene kobles resultatet av navigasjonsprosesseringen sammen med laserpunkttskyen. Slik får hvert punkt i laserpunkttskyen posisjonskoordinater. Resultatet er laserfiler der hver fil inneholder en flystripe med posisjonsbestemt punkttsky. Før prosedyren går videre til prosessering av dataene, må de preprosesserte dataene kvalitetskontrolleres.

Kvalitetskontroll er viktig for å påse at de preprosesserte dataene sendt videre til prosessering holder ønsket kvalitet. I hovedsak sjekkes det om dataene over ønsket område er uten hull og med ønsket punkttetthet. I NDH-prosjektets kravspesifikasjon setter Kartverket krav til at det kun kan forekomme hull i laserdataene som er forårsaket av permanente vannoverflater eller flater med lav refleksjon. Dette betyr at hull i laserdataene forårsaket av for eksempel manglende sideoverlapp, skyer eller andre grunner ikke aksepteres.

Videre setter Kartverket krav til fullstendighet i punkttetthet for prosjektet. NDH-prosjektet skal følge laserstandarden FKB-Laser10. I Kartverkets produktspesifikasjon for FKB-Laser settes det for klassen FKB-Laser10 krav til at 95 % av prosjektområdet skal ha bestilt punkttetthet eller mer (Kartverket, 2013). Dette kontrolleres ved at hver NDH-blokk deles inn i ruter på 10 * 10 meter, og for hver rute beregnes det gjennomsnittlig punkttetthet. For en blokk med en ønsket tetthet på 2 punkt/m² må derfor 95 % av disse oppdelte rutene inneholde 200 laserpunkter eller mer. Ruter som helt eller delvis dekker vann eller områder utenfor blokkavgrensningen, skal ikke medregnes. Terratec sjekker først ruter med en oppløsning på 5 * 5 meter, da større rutestørrelse kan skjule uønskede tetthetsproblemer.

Mot slutten av kvalitetskontrollen lages et tetthetsplott for å kontrollere fullstendigheten i punkttettheten. Figur 2.3 til venstre under viser et utsnitt fra et tetthetsplott for en NDH-blokk. Figuren til høyre viser forklaring til fargekodene med tilhørende statistikk for utsnittet til venstre. Forklaringen i prosentandel refererer til ønsket tetthet. Det betyr at fargene lysegrønn, mørkegrønn og lyseblå viser ruter som har den ønskede tettheten, som i dette tilfellet er på 5 punkt/m². Ved å kontrollere med bakgrunnskart finner man i dette tilfellet ut at de sorte hullene i datasettet faktisk er vann, og ikke skal medregnes. Statistikken for dette utsnittet viser derfor at over 98 % av rutene har ønsket tetthet, og dermed er innenfor kravet Kartverket setter.



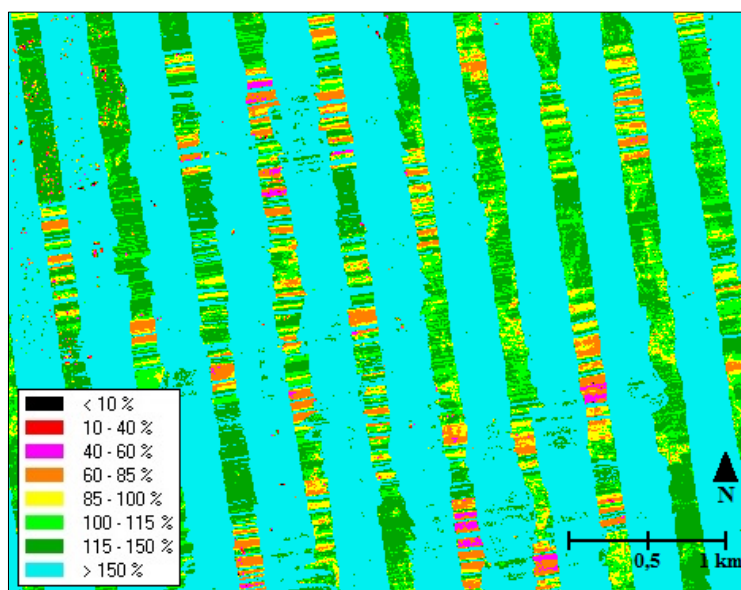
Figur 2.3 Utsnitt av tetthetsplott for NDH-blokk A22, med ønsket tetthet 5 punkt/m²

(a) Tetthetsplott

(b) Statistikk

Om det viser seg at kvaliteten ikke tilfredsstillende må det aktuelle området med dårlig kvalitet laserskannes på nytt. Hvis blokka har for lav tetthet kan områder med lavest tetthet flys på nytt. Da legges det ofte en ny mindre flyplan som deretter laserskannes. Samme fremgangsmåte gjøres om det har oppstått hull i datasettet, som tidligere nevnt ikke godtas. Det blir en økonomisk avveining om hele den eller de berørte flystripene skal flys på nytt, eller om det skal legges en ny flyplan som dekker de berørte områdene.

I forrige kapittel ble det diskutert viktigheten av gode værforhold. Dette kommer godt til syne når laserdataene skal kvalitetssjekkes. Ved utfordrende vær under datafangst blir ofte datafangsten av varierende kvalitet. Da blir det en avveining om laserdataene blir godkjent eller må flys på nytt. Under følger et eksempel fra en flyvning på NDH som hadde mye turbulens. Figur 2.4 viser et utsnitt av et tetthetsplott for blokka A26, som skal ha punkttetthet på 5 punkt/m². De rosa og oransje feltene viser at tettheten tidvis avtar betraktelig langs flystripene. Turbulensen har i dette tilfellet gitt flyet store svingninger, som har oversteget den stabiliserte plattformens rekkevidde. I dette utsnittet har kun 92 % av området den ønskede tettheten eller mer. Her må det påses at resten av blokka holder så god punkttetthet at det totalt for hele blokka er 95 % av rutene som har ønsket punkttetthet.



Figur 2.4 Utsnitt av tetthetsplott for A26 med dårlige værforhold

En annen bemerkning man kan gjøre seg fra noen av tetthetsplottene er at punkttettheten er tydelig lavest i de lavtliggende områdene av flystripene. Dette kommer naturlig nok av at tettheten vil være høyere jo nærmere terrenget kommer lasersensoren. Det er et paradoks at de lavtliggende områdene der det som oftest er mest sivilisasjon, og i de fleste sammenhenger har mest bruk for en detaljert høydemodell, har lavest punkttetthet innad i blokka.

2.4 Automatisk bakkeklassifisering

Etter at hele NDH-blokka er ferdigflydd og laserpunktskyen er kvalitetsgodkjent, skal dataene prosesseres. Dette delkapittelet og de to neste omhandler prosesseringen. Før prosesseringen inneholder laserpunktskyen kun posisjonsbestemmelse. I første steg av prosesseringen skal punktene i laserpunktskyen automatisk klassifiseres til forskjellige klasser. Punktskyen inneholder punkter på bakken, men også punkter på trær, bygninger og andre elementer over bakken. For å kunne skape en terrengmodell må punktene som er treff på bakken skilles fra øvrig punkter i punktskyen. På grunn av omfanget av antall punkter i laserpunktskyen må dette i første omgang gjøres automatisk ved hjelp av algoritmer. Målet med den automatiske bakkeklassifiseringen er at så mye som mulig av laserpunktene som returneres fra bakken skal klassifiseres til bakke. Senere i kapittel 2.7 vil de resterende klassifiseringsfeilene etter den automatiske bakkeklassifiseringen bli rettet opp manuelt.

NDH-prosjektet følger standardinndeling av klasser for en laserpunktsky fra Kartverkets produktspesifikasjon FKB-Laser. Tabellen under viser denne klasseinndelingen.

Tabell 2.2 – Klasseinndeling av laserpunktskyen

Tabellen viser hvilke standardklasser laserpunktskyen skal dels inn i for NDH.

Nr.	Navn	Forklaring
1	Uklassifisert	Alle punkter som ikke er klassifisert til klasse 2, 7 eller 10
2	Bakke	Punkter på terrengoverflaten. Omfatter også punkter på vannoverflaten
7	Støy	Unormalt høye eller lave punkter, forårsaket av støy, skyer, systemfeil osv.
10	Bru	Punkter på bru. Både selve brua og objekter på den

Før den automatiske bakkeklassifiseringen kjøres skal deler av punktskyen bli klassifisert på bakgrunn av vinkelen under laserskanningen. Fra figur 1.2 så vi at lasersensorene med oscillerende skannemekanisme har et skannemønster som går frem og tilbake på tvers av flyretningen. I hver ende av skannemønsteret vil det hopes opp med laserpunkter når speilet stopper opp og snur og sender punktene tilbake mot nadir vinkel for flyet. Oppbremsingen og akselerasjonen i vendingen av speilet er vanskelig å måle nøyaktig nok. Derfor vil laserpunktene på kantene av hver flystripe ha dårligere posisjonsnøyaktighet. Derfor ekskluderes én grad fra hver kant av flystripen bort, slik at man står igjen med 38 grader skanneråpning (19 grader til hver side). Ekskluderingen skjer ikke om dette vil skape hull i datasettet. De ekskluderte punktene klassifiseres i første omgang til klassen overlapp (klasse 12). Disse punktene vil ikke bli levert, så fremt det ikke oppstår noe som gjør at man likevel ønsker å innlemme dem. I den endelige leveringen (kapittel 2.7) blir denne klassen slettet. Riegl-sensoren med skannemekanismen roterende polygon, skanner med 60 grader skanneråpning. Kartverket tillater kun leveranse med opptil 40 grader skanneråpning. Derfor vil 10 grader fra hver kant av flystripen på tilsvarende måte klassifiseres til klassen overlapp. Etter at klassifiseringen til klassen overlapp er gjennomført, er blokka klar for automatisk bakkeklassifisering.

Å separere en laserpunktsky i bakkepunkter og ikke-bakkepunkter er ofte det mest kritiske og vanskeligste steget i prosessen med å lage en terrengmodell (Liu, 2008). Dette gjelder spesielt ved varierende terreng. Det finnes flere forskjellige typer algoritmer for å filtrere bakkepunkter fra en laserpunktsky. Ofte fungerer algoritmene best ved hver sin spesielle terrengtype (Meng et al., 2010). To vanlige tilnærminger for automatisk klassifisering av en laserpunktsky er lineær antagelse og helningsbasert filtrering (Liu, 2008). Lineær antagelse er en iterativ tilnærming til terrenget ved bruk av vektet lineær interpolasjon. Metoden ble først introdusert av Kraus og Pfeifer (1998). Alle punktene i punktskyen blir først til en gjennomsnittlig overflate med lik vektning. Punkter under denne gjennomsnittlige overflaten har større sjanse for å være bakkepunkter, og gis høyere vekt enn punkter over denne

overflaten. Jo høyere negativ høydeforskjell til den gjennomsnittlige overflaten, jo høyere vekt. Prosessen itereres til bakkeoverflaten er funnet.

Helningsbasert filtrering baseres på antagelsen om at terrengets naturlige helning er merkbart forskjellig fra helningen til objekter over bakken (som trær og bygninger). Metoden ble først introdusert av Vosselman (2000). Om helningen mellom to laserpunkt innenfor en gitt sirkel overskrider en definert terskel, er et av laserpunktene antatt ikke å være et bakkepunkt.

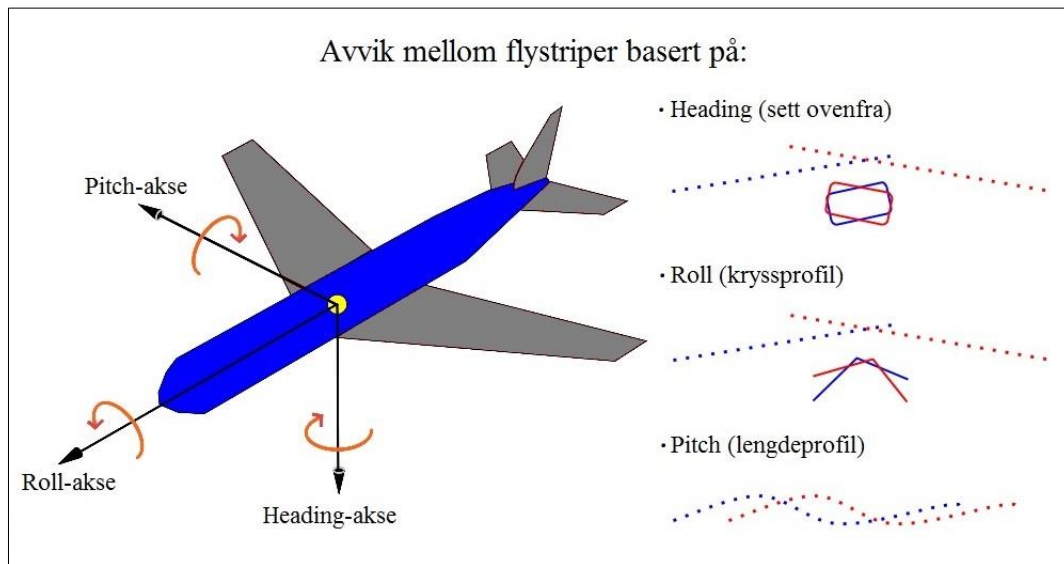
Alle firmaene involvert i NDH bruker samme programvare i den automatiske klassifiseringen. Denne programvaren brukes for hele den interne prosesseringen (dette kapitlet og kapittel 2.5). Programvaren, Terrasolid, baserer sin bakkeklassifiseringsalgoritme på helningsbasert filtrering. Lik programvare i klassifiseringen blant alle leverandørene sikrer lik filtreringsmetode, og derfor en mulig større bevarelse av homogeniteten mellom blokkene prosessert av de ulike firmaene.

Bakkeklassifiseringsalgoritmen må ha steder å starte itereringsprosessen. Bakkeoverflaten er vanligvis den laveste delen av et lokalt område. Mange bakkeklassifiseringsmetoder baseres på denne antagelsen, og søker dermed i laserpunktskyen etter de lokalt laveste punktene til å starte klassifiseringsprosessen (Meng et al., 2010). Bakkeklassifiseringsalgoritmene i Terrasolid er bygd opp på denne måten. Klassifiseringsprosessen startes i mange slike lavtliggende punkter. Det gjøres flere operasjoner for å unngå at algoritmen starter i lave punkter som ikke er bakke. Dette kan være støypunkt som havner veldig lavt, eller store menneskeskapte arealer (for eksempel fabrikker). Ut i fra disse lavtliggende startpunktene jobber algoritmen som nevnt videre med å definere bakkepunkter, basert på en definert terskel for helning innenfor en gitt sirkel rundt punktet. Det er vanlig å redusere vinkelen på den definerte terskelen for helningen i området med høy punkttetthet. Dette gjøres for å unngå støy i bakkedatasettet. Innstillingene for de ulike parameterne i algoritmen er ikke lik blant leverandørene av NDH. En av bakgrunnene for dette er at algoritmen må tilpasses datasettet fra de ulike lasersensorene. Jo større ulikheten er i klassifiseringsalgoritmen mellom firmaene, jo mindre er sjansen for et homogent datasett på tvers av blokkene. Bakkeklassifiseringsalgoritmen kan også bli justert til å passe terrengoverflaten som skal klassifiseres. Norge består av et stort spekter av terrengetyper, og en og samme algoritme vil ikke passe for hele landet.

Den automatiske bakkeklassifisering skjer i to ulike steg i prosesseringen. Først skjer det en bakkeklassifisering per flystripe før matching (kapittel 2.5). Etter matching utføres det en ny og tilsvarende bakkeklassifisering, men denne gangen på hele blokka.

2.5 Matching og kontrollflatejustering

Matching av laserdataene betyr å utjevne eventuelle systematisk og tilfeldige avvik i punktskyen. Ved å beregne utjevningsparametere og påføre korrigering av punktskyen bedres nøyaktigheten. Matching er en relativ utjevning innad i datasettet. Senere vil det utføres en absolutt høydejustering til både geoider og kontrollflater. Figur 2.5 viser mulige avvik i punktskyen mellom flystripene.



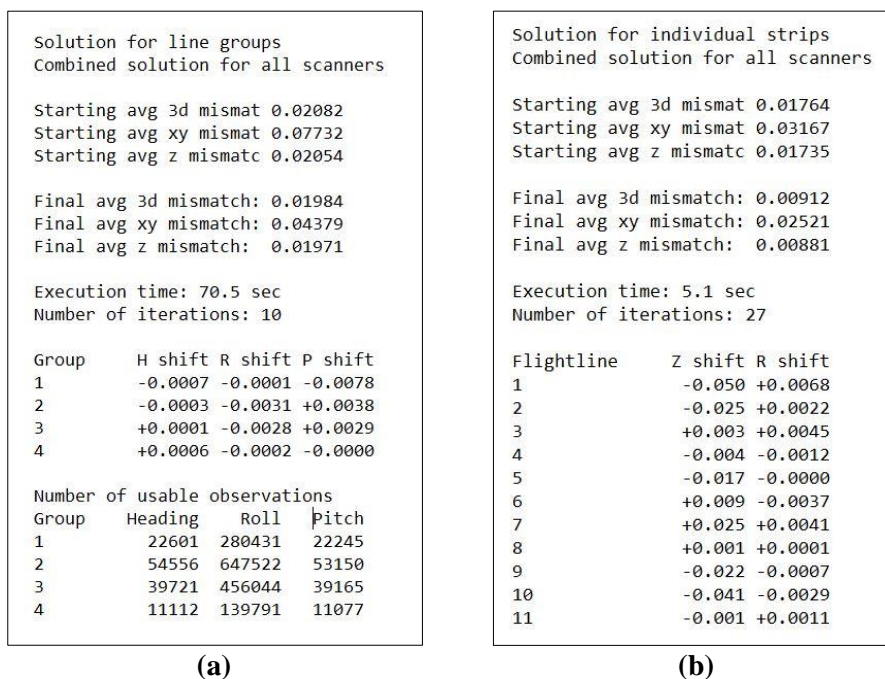
Figur 2.5 Avvik mellom flystriper (Szadkowski, 2016)

Systematiske avvik i laserdatasettet kan komme av unøyaktige eller ikke beregnede vinkelavstander mellom de ulike koordinatsystemene og korreksjonsfaktorer for skannemekanismens retningsmåling (Kartverket, 2015). Slike avvik er relatert til hver enkelt flyvning, og korrigeringen blir derfor kalt daglig kalibrering. Kalibreringen blir av samme grunn utført i grupper basert på flytidspunkt. I denne kalibreringen beregnes det korreksjoner for avvik i heading, roll og pitch. Som nevnt tidligere i kapittel 2.2 skal nabostriper i flyplanen flys i motsatt retning for å bestemme eventuelle systematiske avvik mellom stripene. Ved å fly nabostriper i samme retning vil man ikke kunne oppdage eventuelle avvik da avvikene virker i samme retning.

Tilfeldige avvik kan oppstå mellom flystripene, og det er derfor nødvendig å beregne stripevise korreksjoner. Kalibreringen blir utført per flystripe for å utjevne slike små forskjeller mellom flystripene. I denne kalibreringen beregnes det korreksjoner for avvik i høyde mellom flystripene, og avvik i roll.

Matchingen skjer etter den automatiske bakkeklassifiseringen fordi man blant annet søker etter avvik mellom flystripene på bakkeplan. For å finne mulige avvik søkes det etter bindingslinjer i overlappssonen mellom flystripe og tverrstripe, og mellom overlappende flystriper. Derfor må den automatiske bakkeklassifiseringen fra forrige kapittel først kjøres på hver flystripe separat. I tillegg til å søke etter bindingslinjer på bakken, søkes det også etter bindingslinjer på mønelinjer og terrenglinjer. Algoritmen klarer å gjenkjenne både bygninger og terrenglinjer. Da disse brukes til å søke etter bindingslinjer, blir både bygninger og terrenglinjer eksportert i bakkeklassifiseringen per flystripe.

Ved å søke etter avvik mellom bindingslinjene finner man korreksjonsparametere, som igjen påføres bindingslinjene. Om disse justeringene ser optimale ut påføres korreksjonsparametere selve laserpunktshøyden for hele blokka. Første påføres korreksjoner i grupper for den daglige kalibreringen, deretter per flystriper for stripejusteringen. Kartverket krever dokumentasjon på beregnede korreksjonsparametere med standardavvik før og etter korrigering. I figur 2.6 under vises eksempler på slik dokumentasjon. Korreksjonene for avvik i heading, roll og pitch i den daglige kalibreringen vises som henholdsvis H-, R- og P-skift i figuren til venstre. Tilsvarende, i figuren til høyre, vises korreksjonene for avvik i høyde og roll i stripejusteringen som henholdsvis Z- og R-skift. Korreksjonene er oppgitt i meter.

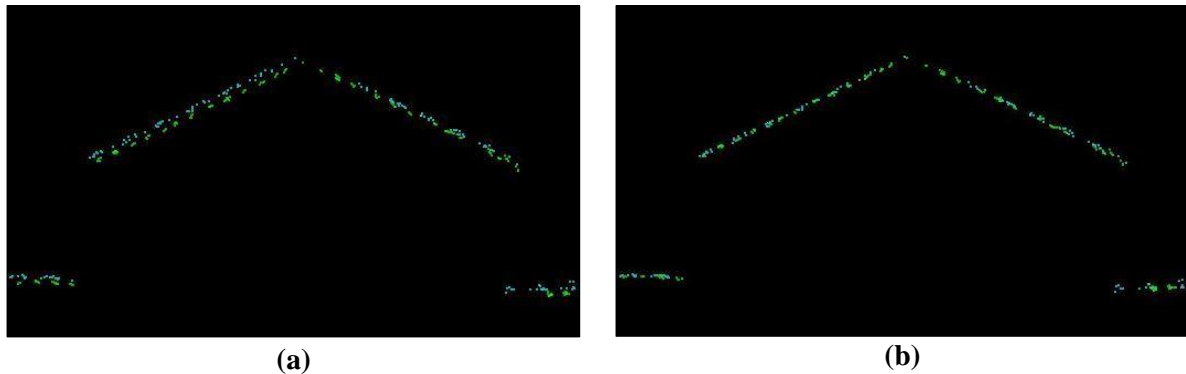


Figur 2.6 Dokumentasjon av utført matching

(a) Daglig kalibrering

(b) Stripejustering

For å vise et visuelt eksempel på hva matchingen mellom flystripene fører til, viser figur 2.7 under et hus i profil fra blokka A29 både før og etter matching.



Figur 2.7 Profil av overlapsområde med laserpunkter fra to naboflystriper

(a) Før matching

(b) Etter matching

Etter påføring av korreksjonsparametere skal det produseres et plott som viser homogeniteten i overlapsområdene mellom flystripene. Her beregnes det beregnes høydeavvik mellom stripene. Fra dette plottet kontrolleres matchingen, og et mønster med manglende homogenitet i punktskyen skal ikke forekomme. I så fall må det søkes etter feil i korreksjonsparametere, da matchingen kun skal være en finjustering. Dersom det må gjøres større justeringen i matchingen er man ikke lenger sikker på integriteten i punktskyen. Da bør det heller søkes etter feil i tidligere steg i prosessen før matching.

Terratec har bedt Blom og COWI om å utføre matchingen i henhold til deres prinsipper og prosedyre. Som tidligere nevnt gjennomføres matching i samme programvare hos alle involverte parter. Videre skal alle firmaene ha lik grense for godkjent homogenitetsplott. Disse elementene vil være med på å øke homogeniteten mellom blokkene i NDH-prosjektet.

Etter fullført matching kjøres som nevnt den automatiske bakkeklassifiseringen på hele punktskyen. Dermed får man en høydemodell som dekker hele blokka.

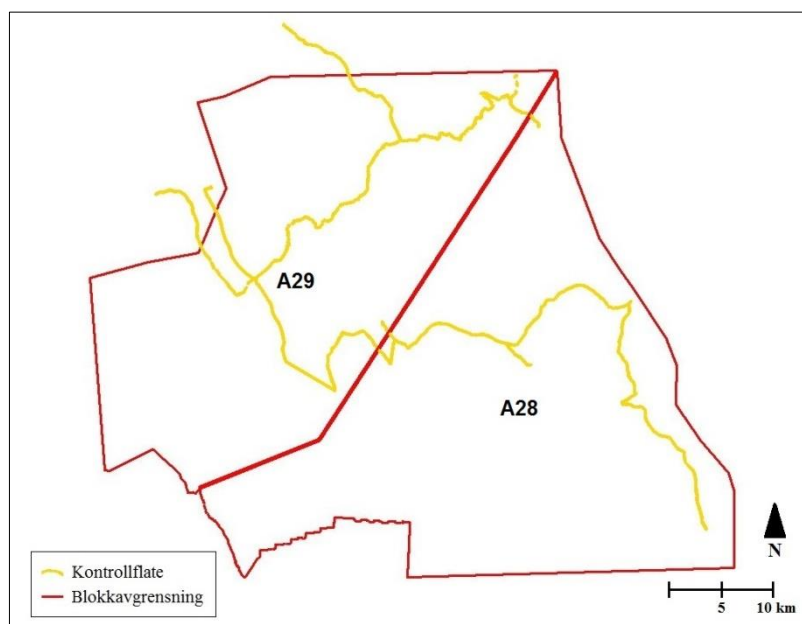
Siden koordinatene til punktskyen stammer fra GNSS-målinger, refererer høydekoordinatene til en matematisk ellipsoide (WGS84). Terrengmodellen skal ha høyder basert på det offisielle norske høydesystemet NN2000, som er et geodetisk høydesystem. Punktskyen må derfor geoidjusteres. I Norge ligger geoiden mellom 18 og 48 meter over ellipsoiden (Kartverket, 2009). En høydereferansemodell brukes for å justere høyden, og referansemodellen inneholder høydeforskjellen mellom ellipsoiden og NN2000-høyden. Alle firmaene skal bruke samme høydereferansemodell, som jevnlig oppdateres av Kartverket. Modellen hentes

inn som et rutenett, og ved triangulering og interpolering får hvert laserpunkt en korrigeringsverdi ut ifra hvor det befinner seg.

Etter geoidejustering skal punktskyen kontrollflatejusteres. Matchingen skal gjøre at punktskyen er homogen mellom flystripene. Det betyr likevel at høydemodellen kan ha et systematisk avvik fra korrekt høyde. Under er det listet opp feilkilder som kan gi systematisk avvik (Kartverket, 2015):

- GNSS/IMU-løsningen
- Systematisk avvik fra stripejustering
- Ytre væravhengige faktorer som trykk og temperatur
- Kalibrering av instrumentet

Derfor må punktskyen kontrolleres i høyde i forhold til innmålte kontrollflater. En kontrollflate blir tradisjonelt målt med sanntids differensiell GNSS. Målingene skal skje på en hard plan flate og i et kvadratisk meterbredt rutenett på minimum 16 m² (Kartverket, 2015). For NDH-prosjektet kreves det 6 slike kontrollflater jevnt fordelt i hver blokk. Terratec har utviklet en ny metode for innmåling av og justering mot kontrollflater. En målebil utstyrt med treghetsnavigasjonssystem og odometer samler inn data fra hjulsporene. Det har blitt testet kontrollflatejustering for en NDH-blokk både med tradisjonelle innmålte kontrollflater og kontrollflater fra hjulspor. Konklusjonen er at et nettverk av veier med hjulspor gir et bedre grunnlag for å justere og kontrollere punktskyen, ettersom justeringen er basert på et mye større datagrunnlag enn tilfellet er for et fåtall kontrollflater. Hjulspormetoden kan også bidra til å avdekke lokale avvik i stripeutjevningen ettersom kontrolldatasettet har stor utstrekning. En ytterligere fordel er at datainnsamlingen fra hjulspor ofte krysser flere blokker. Et slikt datagrunnlag vil kunne øke homogeniteten mellom blokkene. Man vil nemlig kunne få en absolutt høydejustering mellom naboblokker, ettersom man kontrollflatejusterer til samme datasett. Dette gjelder også naboblokker prosessert av Blom og COWI, da Terratec stiller med kontrollflater fra hjulspormetoden for alle tilgjengelige blokker. Terratec stiller også med tradisjonelt innmålte kontrollflater for blokker uten hjulspordata, noe som gjelder mindre enn 10 % av blokkene for NDH. Under følger figur 2.8 som viser et hjulspordatasett for de to naboblokker A28 og A29.



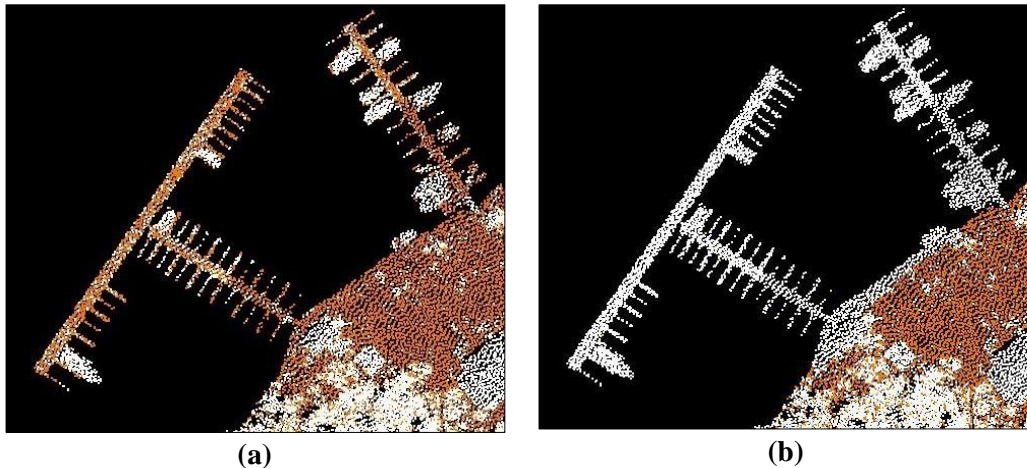
Figur 2.8 Kontrollflate fra hjulspor

2.6 Manuelt etterarbeid

Første steg i bakkeklassifiseringen gjøres automatisk, som beskrevet i kapittel 2.4. Fordi klassifiseringen her skjer automatisk er det flere områder som blir klassifisert som bakke, men som ikke er selve terrenget (og omvendt). Eksempler på dette er som oftest menneskeskapt objekter som er flate med relativt stor utstrekning. Dette har med at algoritmen i bakkeklassifiseringen sjekker vinkelen til nærliggende punkter, som tidligere omtalt.

Kartverket krever manuell inspeksjon av laserpunktskyen for å rette opp feilklassifiseringer fra den automatiske bakkeklassifiseringen. Nøyaktighetsmålet kvantifiseres i produktspesifikasjonen FKB-Laser. Her bestemmes det at innenfor hver rute på 1 km * 1 km skal ikke mer enn to prosent av laserpunktene være feilklassifisert (Kartverket, 2013). Punktskyen blir derfor manuelt redigert etter ferdig matching.

Under (figur 2.9) følger et eksempel fra NDH på et område som krever manuelt etterarbeid. I figuren til venstre er flere av punktene på bryggen klassifisert til bakke (brune punkter), ettersom den er flat og med relativt stor utstrekning. I figuren til høyre er bakkepunktene som ikke er selve terrenget manuelt endret til uklassifisert (hvite punkter).



Figur 2.9 Område som krever manuelt etterarbeid

(a) Før manuell redigering

(b) Etter manuell redigering

Prosessen med manuell inspeksjon og redigering av en laserpunktsky er tidkrevende og repetitiv, og blir ofte satt bort til lavkostland. For NDH-prosjektet setter Terratec bort denne prosessen til de polske firmaene KPGeo og TerraMap, stasjonert i Kraków. Blom har et eget firma i Romania som gjør den manuelle redigeringen, mens COWI har egne kontorer i Polen og India. Deler av DTM-redigeringen må gjøres internt da Nasjonal Sikkerhetsmyndighet begrenser tilgangen til laserskannet data over graderte områder i Norge.

Terratec har bestemt å konsentrere den manuelle redigering hos KPGeo neste år, både for seg selv og Blom. Ved å sentralisere den manuelle redigeringen er målet å styrke homogeniteten blokkene imellom. I tillegg til enklere logistikk er målet å samle kunnskap på et sted og dermed økt mulighet for høyere kvalitet på leveransen. COWI vil fortsatt ha eget kontor.

KPGeo ble kontaktet for å kunne sette seg inn i prosedyrer og utfordringer i det manuelle etterarbeidet for NDH-prosjektet. Figurene 2.10 – 2.12 vist senere i dette delkapittelet er levert av KPGeo, og er hentet fra aktuelle utfordringer i NDH-prosjektet.

De utenlandske partnerne mottar automatisk klassifiserte data for hele blokker av gangen, oppdelt i ruter. KPGeo gjør en rutinesjekk til å begynne med, ved å forsikre seg om at alle ruter er levert for den aktuelle blokken. Deretter sjekkes det kjapt om det er utført rett automatisk bakkeklassifisering, ved å sjekke om det kun er de fire klassene nevnt i kapittel 2.4. Det skal også verifiseres at det ikke finnes underkjente hull i datasettet innenfor blokkavgrensningen. Av tidshensyn blir dette gjort samtidig som den manuelle inspeksjonen av datasettet senere. Når punktskyen skal inspiseres, gjennomgås hele datasettet manuelt på utkikk etter feil. Under følger en tabell over hvilke endringer som gjøres mellom klassene:

Tabell 2.3 – Endringer av klassene ved manuelt etterarbeid

Tabellen viser hvilke klasser som blir sendt til underleverandørene for manuell redigering, og hvilke klasser som kommer i retur. Klassennummeret står oppført i parentes. Videre vises det hvilke endringer som gjøres mellom klassene.

Klasser sendt ut	Klasser returnert	Endringer mellom klassene
Uklassifisert (1)	Uklassifisert (1)	Uklassifisert → Bakke
Bakke (2)	Bakke (2)	Uklassifisert → Bru
Støy (7)	Støy (7)	Uklassifisert → Støy
Overlapp (12)	Bru (10)	Bakke → Uklassifisert
	Overlapp (12)	Bakke → Bru
		Bakke → Støy

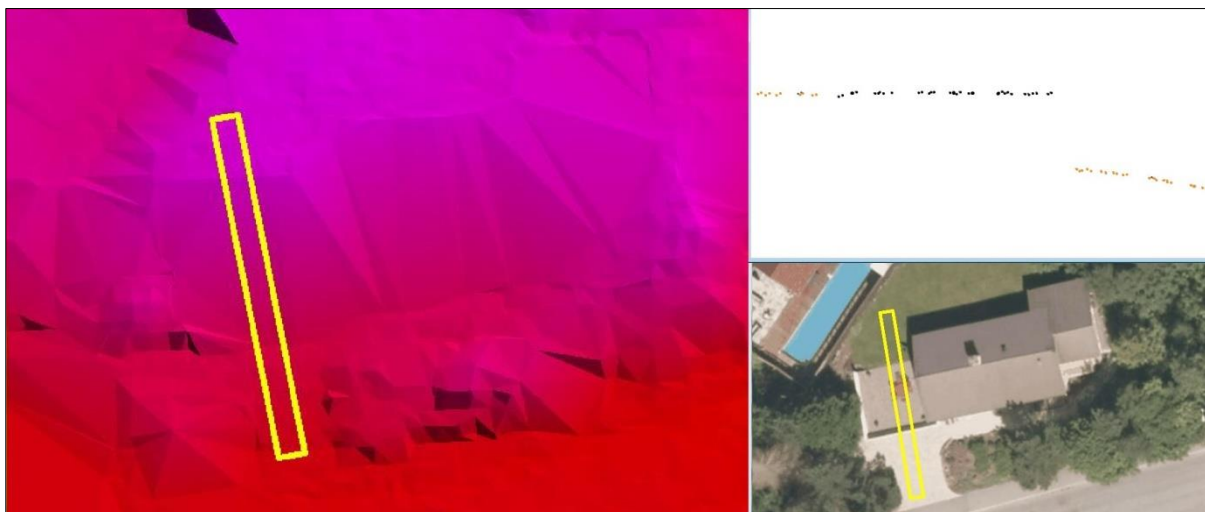
Endringene som må gjøres i det manuelle etterarbeidet skjer oftest i sammenheng med bebygde områder. Mange av de manuelle endringene er enkle å observere og redigere for et trent øye. Et slikt gjennomgående eksempel er plattinger og verandaer på bakkeplan. På grunn av den flate utstrekningen kan disse oppfattes som bakke av bakkeklassifiseringsalgoritmen, men skal klassifiseres som uklassifisert.

I andre sammenhenger er det ikke like lett å avgjøre om den automatiske klassifiseringen skal redigeres eller ikke. Et slikt eksempel er en garasje med tilsynelatende terreng over, og er vist uten utført manuelt etterarbeid i figur 2.10. Med kun innblikk i laserpunktskyen er det vanskelig å avgjøre om garasjen går inn i terrenget, eller om taket på garasjen utgjør kunstig bakke. Da er ortofoto til stor hjelp i klassifiseringsarbeidet. Figur 2.10 viser et skjermbilde fra hvordan arbeidet med den manuelle redigering kan se ut. Nederst til høyre vises ortofoto, og til venstre vises tilsvarende utsnitt i form av en terrengmodell fra bakkepunktene i laserpunktskyen. Her symboliserer lilla farge terreng som ligger høyere enn rød farge. Det gule rektangelet viser profilet som laserpunktene i utsnittet oppe til høyre representerer. I denne visningen er de oransje punktene klassifisert til bakke, mens svarte punkter er uklassifisert.



Figur 2.10 Manuelt etterarbeid ved garasjebygning, før endring

I enkelte tilfeller brukes også panoramabilder i Google Street View til støtte i klassifiseringsarbeidet. I tilfellet over ble det konkludert med at taket på garasjen er kunstig terreng. I den manuelle redigeringen ble punktene på garasjetaket omklassifisert fra bakke til uklassifisert, se figur under. Terrenngmodellen har blitt triangulert mellom de gjenværende bakkepunktene, på lik linje med resten av huset.

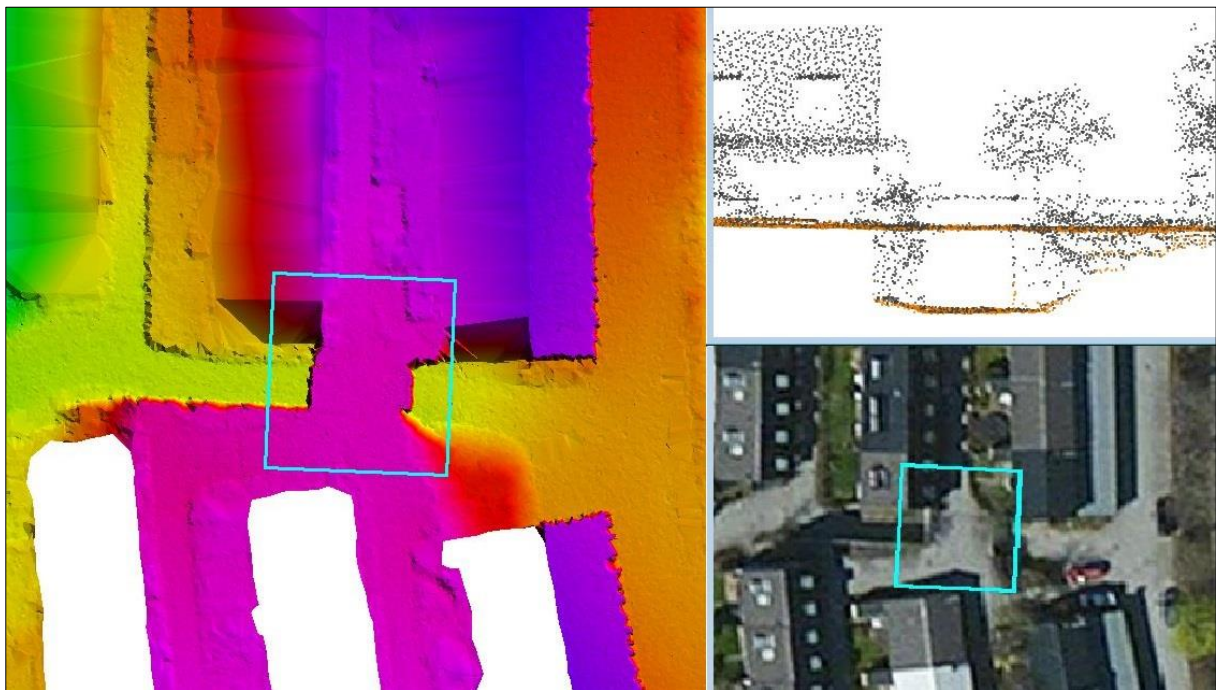


Figur 2.11 Manuelt etterarbeid ved garasjebygning, etter endring

Det finnes også eksempler på ikke-menneskeskapte objekter der bakkealgoritmen sliter med å klassifisere bakken riktig. Ved skiftende helning på terreng under tett vegetasjon kan ofte algoritmen kutte terrenget. Ett annet eksempel er tett vegetasjon under bratt terreng, der vegetasjonen har en tendens til å bli klassifisert som bakke. I forbindelse med det manuelle etterarbeidet er det mulig å kjøre en ny bakkeklassifisering med endrede

algoritmeinnstillinger, om det oppdages et gjennomgående klassifiseringsproblem i blokka eller et spesifikt område.

Som vist i tabell 2.3 skal bruer ha egen klasse, og dette må redigeres i den manuelle prosessen. Kartverket ønsker egen bruklasse slik at ikke bruene ødelegger terrenngmodellen. Å avgjøre om noe er bru, tunnel eller overbygg er en av de vanskeligste utfordringene i den manuelle redigeringen. Figur 2.12 viser et boligområde der det er vanskelig å avgjøre om objektet i den blå boksen skal klassifiseres til bru, eller om området i nivået under skal defineres som en tunnel og punktene på nivået over forblir bakkepunkter. I dette tilfellet ble det konkludert med at det øverste nivået skulle klassifiseres til bru. I tilfellet hvor det er bru skal selve brua og alle elementer på brua (gjerde, lys og så videre) klassifiseres til klasse 7, bru.



Figur 2.12 Manuelt etterarbeid med bru

KPGeo får tilgang til Kartverkets FKB-data. Denne kartdatabase inneholder de mest detaljerte kartdataene, med stedinformasjon av bruer. Dette er til støtte i klassifiseringen, men databasen kan være ufullstendig. Etter at hele den aktuelle NDH-blokka er manuelt sjekket og redigert hos KPGeo, kvalitetssjekkes det av en annen person hos dem. Her blir det tatt et nytt, kjappere blikk på hele datasettet. Om alt ser bra ut pakkes filene sammen og lastes opp på felles filoverføringsserver. Terratec gjør deretter stikkprøver etter den manuelle redigeringen, før blokka godkjennes og er klar for levering til Kartverket.

2.7 Levering og forventet nøyaktighet

For NDH-prosjektet er det flere ulike delleveranser og frister som leverandøren må forholde seg til. Etter at en hel blokk er ferdig flydd og med godkjent kvalitetskontroll (kapittel 2.3), starter tiden å rulle for de ulike fristene. Innen 30 dager skal det leveres en matchet automatisk klassifisert punkttsky (kapittel 2.4 og 2.5). Dette er en preliminær leveranse slik at Kartverket blant annet kan sjekke og eventuelt godkjenne kvaliteten av matchingen. Samtidig som den automatisk klassifiserte punktskyen leveres til Kartverket, blir en identisk punkttsky sendt til manuell redigering (kapittel 2.6). Innen 60 dager skal det leveres en laserpunkttsky som har gjennomgått manuell inspeksjon og redigering. Denne leveringen blir i oppgaven referert som den endelige leveringen. Det er punktskyen fra denne leveransen som blir analysert i neste kapittel. Innen 90 dager skjer det enda en levering. Da skal det leveres en meters høydekurver, men denne prosessen vil ikke bli diskutert i denne oppgaven.

Videre følger en kort gjennomgang av hva leverandøren gjør ved den endelige leveringen. Først kvalitetssjekkes datasettet som kommer fra den manuelle redigeringen. Her kontrolleres redigeringen i tilfeldige områder. Alle bruene i blokka sjekkes opp mot eksisterende FKB-data, ettersom bruklassen er en vanskelig klasse å redigere. Deretter slettes laserklassen overlapp, ettersom blokka nå skal være komplett. Laserpunktene som ligger utenfor blokkavgrensingen (som inkluderer 100 meter med buffer) slettes også. Ved endelig levering sjekkes grunnrissnøyaktigheten for blokka. Nøyaktigheten måles i kontrollprofiler og sammenlignes med FKB-data. Kontrollprofilene er ofte mønelinjer på hus, ettersom disse er enkle å skille ut i laserpunktskyen. Kartverket tillater grunnrisskontroll mot FKB-data, selv om disse FKB-dataene ofte har dårligere nøyaktighet enn punktskyen. En bedre grunnrisskontroll gjøres mot kontrollprofiler målt inn med landmåling. Etter at punktskyen struktureres i Kartverkets kartbladinndeling, er den klar til leveranse. I den endelige leveransen følger det også rapportering av blant annet dekningsoversikt, flystriper, homogenitetsplott, kontrollflater og kontrollprofiler.

Videre i dette kapitlet vil det fokuseres på hva man kan forvente av nøyaktighet til det leverte produktet. I Kartverkets standard for produksjon av geodata står det at den forventede absolutte nøyaktigheten til en punkttsky fra flybåren laserskanning avhenger av nøyaktigheten til komponentene listet opp under (Kartverket, 2015):

- GNSS/INS løsning (posisjon og rotasjon)
- Stripejusteringen i matchingen
- Høydejusteringen til kontrollflater

- Kvalitet til geoiden i geoidejusteringen
- Avstands- og vinkelmåling til laserskanneren
- Systemkalibreringen

De fire øverste punktene har blitt forklart i produksjonsprosessen i forrige kapittel. Avstands- og vinkelmåling til laserskanneren er knyttet til kvaliteten til hver enkelt lasersensor. Systemkalibreringen er delt opp i tre ulike nivåer (Kartverket, 2015). Først utføres en leverandørkalibrering. Leverandøren av lasersensoren utfører en kalibrering i fabrikken for å bestemme indre parametere i laserskanneren. Deler av denne kalibreringen gjøres også i felt, og da ofte av brukeren selv. Det neste nivået i systemkalibreringen er installasjonskalibrering. Denne kalibreringen utføres etter hver nye installasjon i et fly. Avstanden mellom GNSS-antennens fasesenter og origo i laserskannerens referansesystem bestemmes. Uten denne verdien får man ikke korrigert GNSS-koordinatene til riktige koordinater for laserskanneren. Det siste nivået i systemkalibreringen er den daglige kalibreringen, som ble gjennomgått under matchingen i kapittel 2.6. Tidligere er været nevnt som en faktor som påvirker nøyaktigheten til punktskyen. Selv om ikke været står listet opp over, vil nøyaktigheten til flere av punktene påvirkes av været.

Fra Kartverkets standard for produksjon av basis geodata står det beskrevet at forventet punktnøyaktighet med dagens utstyr er i størrelsesorden 0,02-0,20 m (standardavvik) i høyde (Kartverket, 2015). For NDH gjelder et toleransekrav på 10 cm i systematisk avvik i høyde (Kartverket, 2013), så det er i realiteten denne punktnøyaktigheten leverandøren må forholde seg til.

3 Homogenitetsanalyse

Hittil i denne oppgaven har fokus vært på prosedyren i NDH-prosjektet. Vi har sett hvordan leverandøren jobber med å lage en terrengmodell fra flybåren laserskanning, hvor vi har vært innom flyplanlegging, datainnsamling og hvert element i prosesseringen av laserdataene. Det har blitt fremhevet utfordringer knyttet til hver delprosess som kan ha innvirkning på nøyaktigheten til produktet. I hver delprosess har det også blitt påpekt hvilke likheter og ulikheter som finnes i produksjonsprosessen i de ulike firmaene som er involvert i NDH-prosjektet. Ulike lasersensorer som benyttes på NDH-prosjektet, sammen med eventuelle ulikheter i produksjonsprosessen til de involverte firmaene, vil kunne forklare eventuell inhomogenitet mellom blokkene i den endelige nasjonale høydemodellen. Forrige kapittel vil derfor skape en god base for diskusjon av resultatet av analysen i dette kapittelet. Nå er det ønskelig å analysere det endelige produktet i NDH-prosjektet for å se etter mulig høydeforskjell mellom blokkene i prosjektet.

Ved sammenligning av terrengmodeller fra forskjellige lasersensorer ville det vært ønskelig med et stort analyseområde bestående av både forskjellig terrengtyper, ulik grad av urbanisering og varierende helning. Da ville man kunne fått et bredt analysegrunnlag til støtte i senere konklusjoner. I denne analysen er det kun mulig å sammenligne terrengmodeller fra forskjellig lasersensorer ved å ta utgangspunkt i bufferområdene. Dette området mellom blokkene er det eneste området hvor det leveres dobbelt sett med terrengmodeller. Som tidligere nevnt leveres hver blokk med en buffer på 100 meter på blokkavgrensningen. Dette gir derfor en 200 meter bred korridor langs alle blokkavgrensningene hvor det vil være overlappende terrengmodeller, og derfor en mulighet for å analysere to ulike leverte utgaver av samme område direkte mot hverandre.

Med overlapp mellom hver blokkavgrensning skulle dette tilsi flere tusen kilometer med en 200 meter bred korridor som potensielle områder for analysen. Blokkavgrensningene krysser gjennom både forskjellig terrengtyper, ulik grad av urbanisering og varierende helning, og skulle derfor tilsi at man skal kunne finne ønskede analyseområder. Ettersom NDH-prosjektet fortsatt er i oppstartsfasen er det likevel utfordrende å finne områder som egner seg til analysen, særlig ettersom få blokker foreløpig er levert. Under følger en liste med ulike begrensninger som ligger til grunn for å finne egnede analyseområder:

- Naboblokkene må være flydd med ulike lasersensorer

- Begge naboblokkene må være levert
- Naboblokkene må være klassifisert som samme punktetthet (2 eller 5 punkt/m²)
- Bufferområdet kan ikke ligge over vann/hav.

Det første punktet er like innlysende som begrensende. Blokkene i NDH-prosjektet blir på et tidlig stadium fordelt mellom de involverte firmaene. Grovt sett blir delområder av landet fordelt til ett og samme firma. For eksempel er Blom tildelt de fleste hittil fordelte blokkene på Sør- og Vestlandet, mens Terratec har de fleste blokkene på Østlandet. Mange blokker i samme område er hensiktsmessig når det kommer til planlegging av datainnsamling og periodevis base for flyene. Av samme grunn har ofte Terratec planlagt og delt inn blokkene sine basert på de to lasersensortypene, ettersom datainnsamlingen for hver enkelt blokk planlegges, og fullføres, med samme type lasersensor. En slik oppdeling av landet basert på firmaer og lasersensorer er en stor begrensning av antallet aktuelle analyseområder. Når ikke alle disse foreløpig fordelte blokkene er ferdig levert blir det enda færre aktuelle områder.

Det har derfor vist seg at ingen leverte områder er tilgjengelig for analysering innen rimelig tid før innlevering av denne oppgaven. Ved å ta utgangspunkt i blokker som er sendt til manuell redigering, fantes det likevel noen mulige analyseområder. Prosessen med manuelt etterarbeid tar normalt 2-4 uker avhengig av størrelsen på blokka og grad av urbanisering. Ved å få hjelp til å fremskynde denne prosessen for en ønsket del av bufferområdet til noen av blokkene, har det blitt mulig å skaffe noen få områder å analysere. Disse blir presentert i kapittel 3.3.

Siden det viste seg å være få områder å analysere, var det interessant å se om det fantes andre måter og områder hvor det var mulig å sammenligne datasettet fra de forskjellige blokkene (med ulike lasersensorer) mot hverandre, uten å bruke bufferområdene. For å vurdere parametere i en slik sammenligning var det hensiktsmessig å se på hva som påvirker nøyaktigheten til terrengmodellen. I forrige kapittel ble det oppsummert hva som påvirker den absolutte nøyaktigheten til en laserpunktsky. Nå kan det være hensiktsmessig å se på hva som påvirker nøyaktigheten til terrengmodellen som er et avledet produkt fra laserpunktskyen. I Kartverkets standard for produksjon av geodata heter det at den absolutte nøyaktigheten til eventuelle avledede produkter fra laserpunktskyen vil avhenge av (Kartverket, 2015):

- Andel feilklassifiserte punkt
- Laserpunktfordelingen

Et feilklassifisert punkt vil kunne gi en unøyaktig terrengmodell når for eksempel et laserpunkt returnert fra en busk blir klassifisert som et bakkepunkt og ikke uklassifisert punkt. Når det kommer til laserpunktfordelingen er det ønskelig med en jevn fordeling av laserpunktene. Lang avstand mellom laserpunktene vil kunne gi en unøyaktig terrengmodell ettersom modellen interpoleres mellom punktene.

Å sjekke forskjellen i laserpunktfordeling mellom blokkene er mulig uten å måtte bruke bufferområdene. Ved å undersøke laserpunktfordelingen kan man visuelt se forskjell i skannemønsteret forklart i innledningen, og måle forskjellen i punktdifferansen. Fordelen av å måle punktdifferansen innad i blokkene og ikke i de utvalgte bufferområdene, er at man da enkelt finner flate områder uten hindringer over bakken. I tillegg kan man forsikre seg om at man måler punktdifferansen på områder med relativ lik punktetthet og lik skannevinkel, noe som ikke nødvendigvis er tilfelle i bufferområdene. Analysen av laserpunktfordeling kommer i kapittel 3.2

Kapittel 3.1 presenterer hypotesen for homogenitetsanalysen. Kapittel 3.2 og 3.3 inneholder analysen av henholdsvis laserpunktfordelingen og bufferområdene. Disse to delkapitlene vil ha hver sin metodedel og resultatdel med diskusjon. Deretter vil hele oppgaven konkluderes i kapittel 4.

3.1 Hypotese

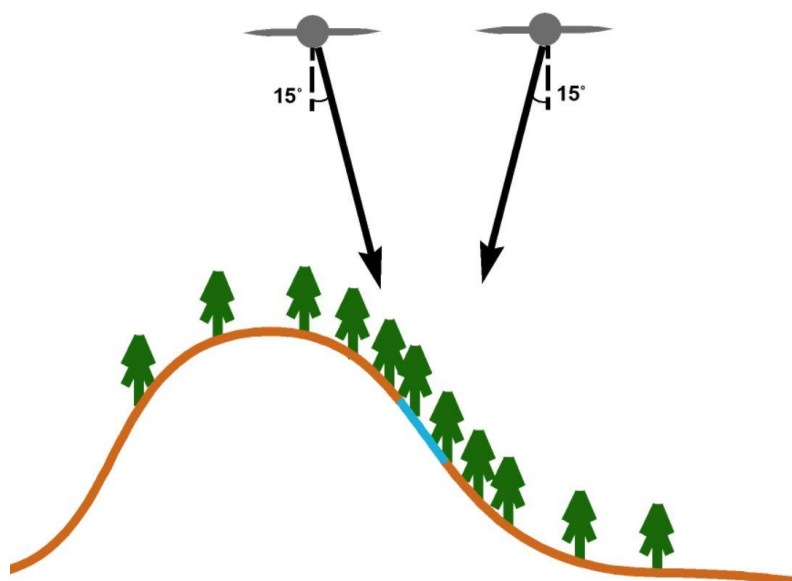
I kapittel to ble det beskrevet hvordan leverandøren jobber med å lage en høydemodell fra flybåren laserskanning. Her ble det vist at det i flere steg av prosessene legges innsats i å homogenisere datasettene. Den automatiske bakkeklassifiseringen generaliserer datasettet ved bruk av avanserte algoritmer. Vi har sett at matchingen skal utjevne avvikene mellom flystripene, og kontrollflatejusteringen skal utjevne avvikene til den innmålte terrengoverflaten. Den manuelle redigeringen skal rette opp eventuelle feilklassifiseringer fra den automatiske bakkeklassifiseringen. Det er derfor ønskelige fra en leverandørs perspektiv at uansett lasersensorprodusent, skannemønster, punktfordeling og støy, får man det samme resultatet, en homogen høydemodell. Vi har også fått et innblikk i tiltak hovedleverandøren har gjort i samarbeid de andre leverandørene slik at arbeidsprosedyrene dem imellom skal generaliseres, i håp om en homogen leveranse.

Ut i fra kapittel 2 er det derfor forventet at homogeniteten i datasettet for NDH er innenfor Kartverkets toleransekrav på 10 cm i systematisk avvik.

Likevel kan det være andre faktorer som spiller inn som ikke blir eller kan bli rettet opp i prosesseringen. En slik faktor er flyretningen, som kan spille inn på høydeforskjellen mellom blokkene. I kapittel 2.1 ble det vist at flyplanleggeren plasserer flystripene i best egnet plassering i aktuell blokk, i henhold til dekning og økonomi. Derfor vil flystriper fra to ulike blokker i ett og samme bufferområde ofte være plassert i forskjellige retning. Lasersensorene vil derfor også ofte skanne et og samme område med forskjellig skannevinkel. Forskjellig skannevinkel kan oppstå selv med samme retning på flystripene.

En hypotese kan være at dette vil gi utslag når man analyserer høydeforskjellen til terrengmodeller fra ulike lasersensorer i bufferområdene. Skannevinkel i kombinasjon med ufordelaktig helning vil kunne gi færre bakketreff i helningen. Begrunnelsen for dette er både at geometrien av en ufordelaktig helning vil kunne resultere i færre bakketreff, men også fordi laserstrålene i en slik helning ofte vil måtte penetrere gjennom mer vegetasjon sammenlignet med en gunstig vinklet helning. Konsekvensen av færre bakketreff kan være dårligere nøyaktighet på en avledet terrengmodell, og derfor en større differanse mellom blokkene i dette området.

Figur 3.1 under visualiserer det overnevnte scenarioet. Det vil kunne være sannsynlig at det blå området i figuren kan ha flere bakketreff fra lasersensoren i flyet til høyre sammenlignet med flyet til venstre. Flyretningen vil være ut eller inn av arket. Skannevinkelen vist i figuren er en del under de tillatte 20 gradene, ettersom områdene med maks tillatt skannevinkel vil være overlappet av nabostripen. I figuren under viser det blå området et bufferområde, og de to flyene er fra to naboblokker.



Figur 3.1 Hypotese om skannevinkel og helning

Selv om den overordnede hypotesen for analysen av bufferområdene er at det ikke forventes forskjeller utenfor toleransekravet, blir det interessant å se om det finnes lokale forskjeller som kan stamme fra ulik flyretningen og/eller ulik skannevinkel.

Det er viktig å ha i bakhodet at naboblokker kan ha blitt laserskannet i ulike vekstsesong, og at dette naturlig kan gi en forskjell når datasettene sammenlignes mot hverandre. Mengden løv på trærne, og mengden undervegetasjon i terrenget, vil variere med ulike vekstsesong. Løv på trærne kan minimere antallet bakketreff. I tillegg kan undervegetasjon gjøre at laserstrålene ikke trenger helt ned til selve terrenget, og derfor kan undervegetasjonen oppfattes som bakke.

3.2 Laserpunktfordeling

I første del av homogenitetsanalysen skal det tas en nærmere titt på egenskapene til lasersensorene. Som forklart i kapittel 1.2 har lasersensorene i bruk på NDH to ulike typer skannemekanismer. Lasersensorene fra Leica og Optech har et oscillerende speil som fordeler laserstrålene, mens Riegl-sensoren har et roterende polygonspeil. Disse to ulike måtene å fordele laserstrålene på gir som tidligere nevnt to forskjellige laserpunktmønstre.

I denne analysen vil laserpunktfordeling bli målt for de ulike lasersensorene. Deretter vil de to ulike laserpunktmønstrene bli visualisert, og forskjellig virkning diskutert.

3.2.1 Områder

I denne analysen av ulike laserpunktfordeling er det valgt å bruke flere av de allerede leverte blokkene for NDH. Det er brukt flere områder i forskjellige blokker per sensor slik at resultatene i denne analysen vil være et gjennomsnittlig estimat.

For å få mest mulig like vilkår i analysen er det blitt valgt å måle laserpunktfordelingen ved lik skannevinkel. Den valgte skannevinkelen er nadir vinkel. Videre er det målt på flate områder uten hindringer (kun en retur av laserstrålen), for å unngå uønskede endringer i laserpunktfordelingen.

3.2.2 Metode

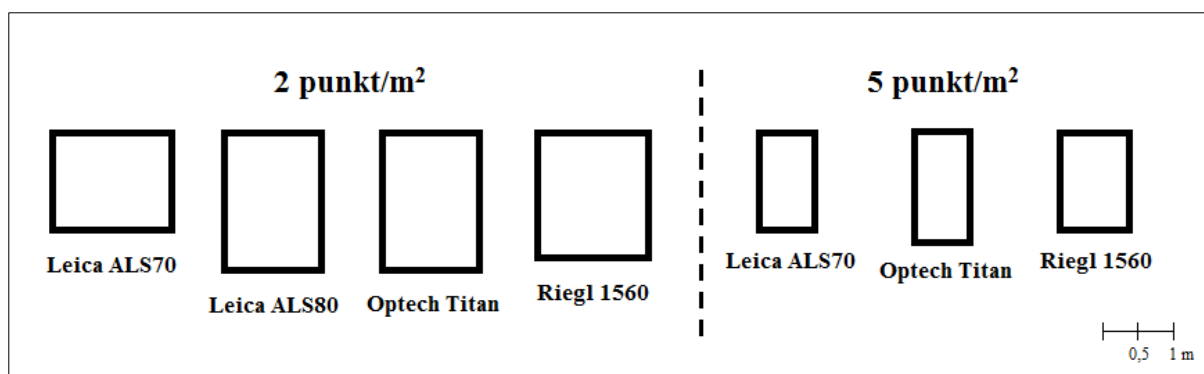
I analysen av laserpunktfordeling er både laserpunktdifferansen og linjeavstanden målt. Figur 3.2 viser hva disse begrepene tilsvarer. Som nevnt gjøres alle målinger i nadir vinkel.

Tabell 3.1 – Analyse av laserpunktfordeling

Tabellen viser resultatet av analysen for laserpunktfordelingen til de ulike lasersensorene. Både laserpunktdifferansen og linjeavstanden er oppgitt i meter.

Bestilt punkttetthet	Lasersensor	Laserpunkt-differanse [m]	Linjeavstand [m]
2 punkt/m ²	Leica ALS70	0,9	0,7
	Leica ALS80	0,7	1,0
	Optech Titan	0,7	1,0
	Riegl 1560	0,8	0,9
5 punkt/m ²	Leica ALS70	0,4	0,7
	Optech Titan	0,4	0,8
	Riegl 1560	0,5	0,7

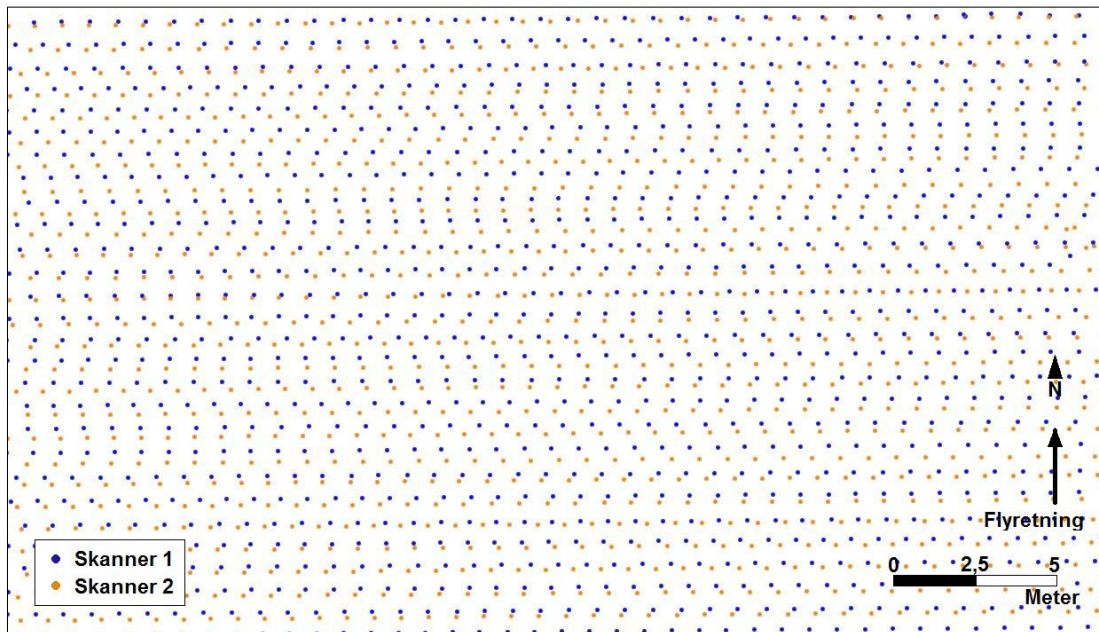
Under følger figur 3.3 som viser forskjellen i laserpunktfordelingen fra tabellen over. I praksis vil mønsteret til Riegl-sensoren være rotert 14 grader med en flyretning oppover på arket som skissert for de andre sensorene.

**Figur 3.3** Visuell fremvisning av laserpunktfordelingen fra tabell 3.1

Som tabellen og figuren viser har nesten alle sensorene på begge punkttetthetene gjennomsnittlig større linjeavstand enn laserpunktdifferansen. Det er kun lasersensoren Leica ALS70 som har større laserpunktdifferanse enn linjeavstand. Som forklart i innledningen til denne analysen er det ønskelig med like stor laserpunktdifferanse som linjeavstand. Her ser vi at ingen av lasersensorene treffer på dette punktet. Særlig de oscillerende lasersensorene Leica og Optech får stor forskjell for 5 punkt/m², og et høyt rektangel i figuren over. Det er viktig å huske på at dette er et omtrentlig estimat av den leverte laserpunktfordelingen. Målemetoden inneholder vesentlig grad av usikkerhet, og antallet målinger er sannsynligvis for lavt til at gjennomsnittstallet er nøyaktig. I analysen ble det oppdaget varierende grad av laserpunktfordeling også innad per lasersensor. Et standardavvik er ikke tatt med ettersom antallet målinger er lavt. Flere ulike faktorer påvirker den planlagte punktfordelingen, der

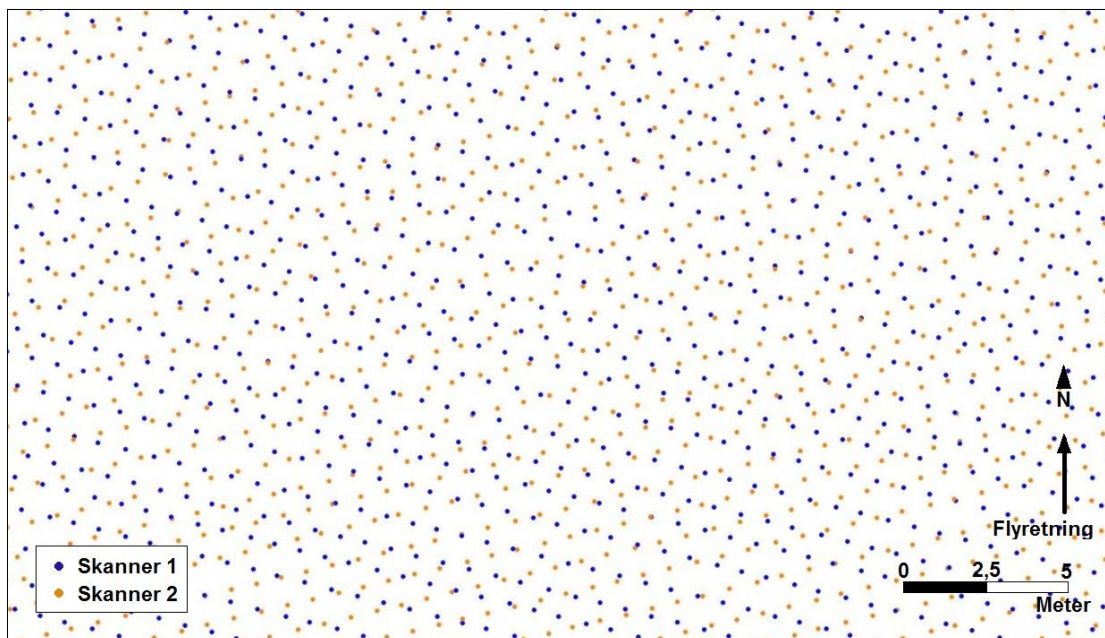
flyhøyde, flyhastighet og turbulens er de vesentligste. Punktfordelingen kan justeres i flyplanleggingen, ettersom hastigheten på speilet i skanneren kan justeres og virker inn på linjeavstanden. Frekvensen på utskutt laserstråle kan også justeres, noe som virker inn på punktdifferansen. Som omtalt tidligere er disse skannerinnstillingene normalt fastsatt for NDH-flyplanleggingen, men kan justeres av flyplanleggeren utfra terreng og andre forhold. Dette gjør at laserpunktfordelingen vil variere også mellom blokker operert med samme lasersensor. Likevel gir denne analysen en pekepinn på at laserpunktfordelingen er relativt lik for alle sensorene tatt i betraktning både 2 og 5 punkt/m².

Videre i dette kapittelet skal virkningen av lasersensorenes to forskjellige skannemekanismer analyseres og diskuteres. I innledningen til denne oppgaven ble det enkelt forklart hvordan laserpunktfordelingen blir når et oscillerende speil fordeler laserpunktstrålene, og når et roterende polygon gjør det. Nå skal de to ulike skannemønstrene vises i praksis. Under følger figurene 3.4 og 3.5 som viser reell laserpunktfordeling for de to ulike skannemekanismene i bruk på NDH. Begge figurene viser laserpunktfordeling i nadir vinkel. Den første figuren viser laserpunktfordeling for en lasersensor med et oscillerende speil. Dette eksempelet er hentet fra et område i blokka A28 (2 punkt/m²), operert med lasersensoren Leica ALS70. Her ser man at laserpunktlinjene er parallelle og ligger vinkelrett på flyretningen, noe som kjennetegner mønsteret for en lasersensor med et oscillerende speil. Her ser man også at linjeavstanden varierer mellom de to skannerne i lasersensoren. Dette kommer som tidligere nevnt av flyets bevegelser i pitch. I noen tilfeller vil derfor skannerlinjene sammenfalle med hverandre.



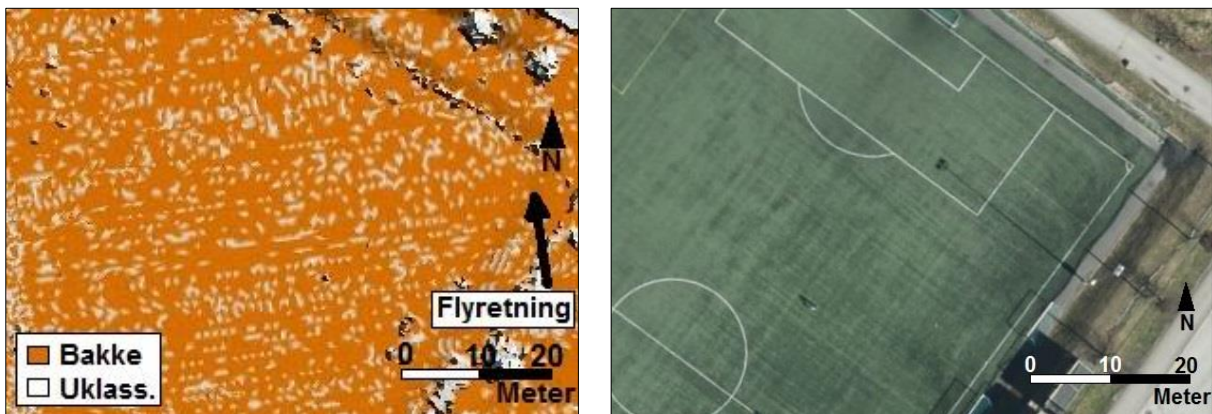
Figur 3.4 Laserpunktfordeling for en lasersensor med oscillerende speil

Den neste figuren viser laserpunktfordeling for en lasersensor med et roterende polygonspeil. Dette eksempelet er hentet fra et område i blokka A02 (2 punkt/m²), operert med lasersensoren Riegl 1560. Her ser vi tydelig at laserpunktlinjene er rotert i forhold til flyretningen, og at de to skannerne er rotert forskjellig vei. I kapittel 1.2 ble det beskrevet at denne roteringen er ± 14 grader i forhold til retningen normalt på flyretningen.



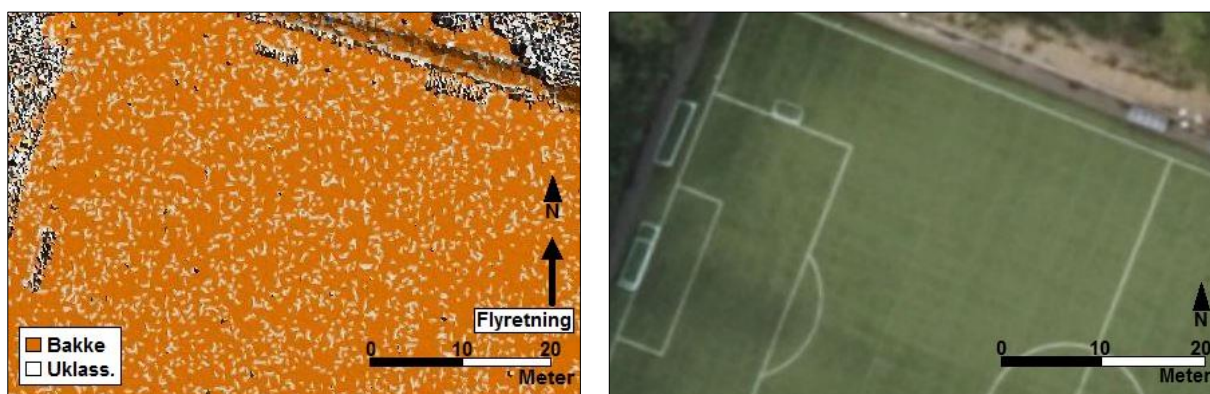
Figur 3.5 Laserpunktfordeling for en lasersensor med et roterende polygonspeil

For å studere hva slags virkning de ulike skannemønstrene kan gi, følger figurene 3.6 og 3.7 som viser en overflatemodell fra et flatt område fra to forskjellige blokker. Samme utsnitt vises også som flyfoto. Den første figuren er hentet fra blokka A26 (5 punkt/m²) operert med Optech Titan (oscillerende speil). Her kan man tydelig se et mønster i de uklassifiserte punktene på tvers av flyretningen. Dette mønsteret sammenfaller med laserpunktlinjene på tvers av flyretningen fra et oscillerende speil, som vist i figur 3.4 tidligere. I kapittel 2.4, som omhandlet bakkeklassifiseringsalgoritmen, ble det beskrevet at algoritmen ikke klassifiserte et punkt til bakke om punktet lå for nærme et allerede klassifisert bakkepunkt. Dette var for å unngå støy i datasettet. Fra figur 3.4 ble det vist at skannerlinjene fra en lasersensor med oscillerende speil i visse tilfeller vil sammenfalle. Derfor vil punkter ofte kunne ligge meget tett, og på grunn av innstillingene til klassifiseringsalgoritmen vil det derfor kunne oppstå linjer av uklassifiserte punkter som vist i figur 3.6 under. Disse linjene finnes for alle de tre oscillerende lasersensorene.



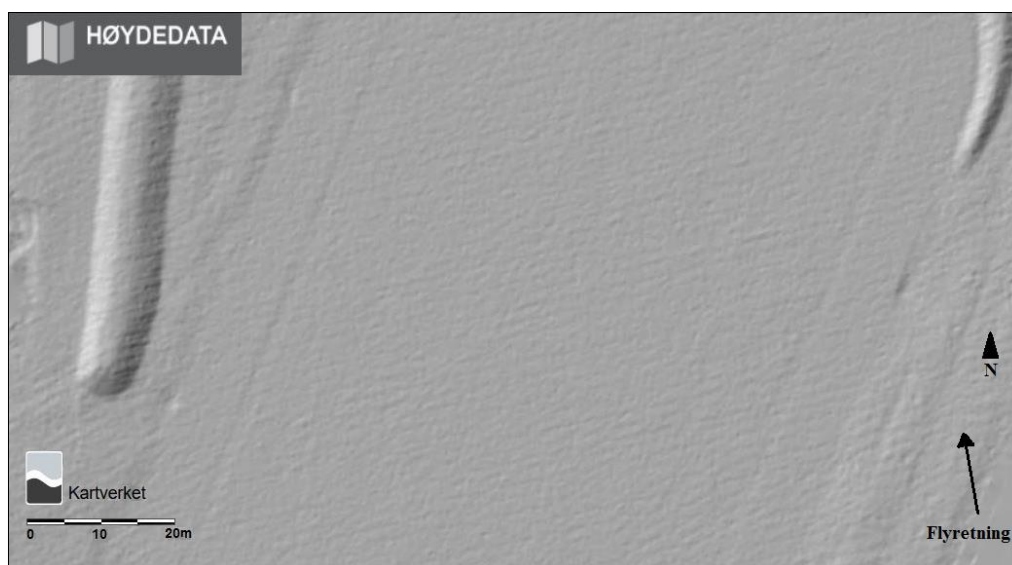
Figur 3.6 Overflatemodell med tilhørende flyfoto (lasersensor med oscillerende speil)

Et slikt mønster vil normalt sett ikke oppstå for et område operert med en lasersensor som har skannemekanismer med roterende polygonspeil. For Riegl 1560 ble det vist i figur 3.5 at laserpunktlinjene ikke er parallelle for de to ulike skannerne, og derfor vil normalt sett ikke linjene sammenfalle uansett flyets bevegelser. Under følger en overflatemodell fra et flatt tilsvarende område som forrige figur. Figuren er hentet fra blokka A04 (5 punkt/m²) operert med Riegl 1560 (roterende polygonspeil).



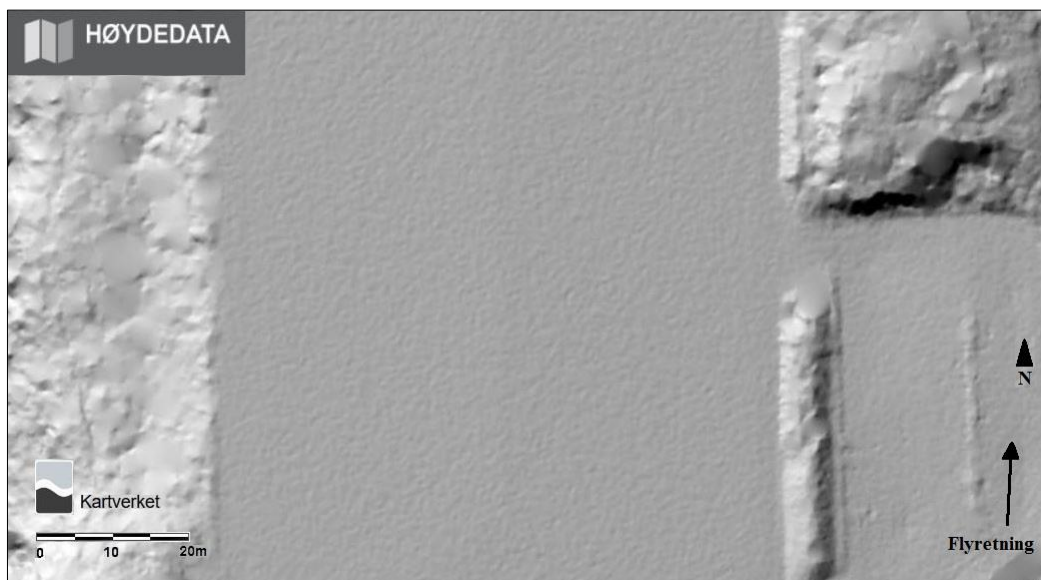
Figur 3.7 Overflatemodell med tilhørende flyfoto (lasersensor med roterende polygonespeil)

Ved å ta en titt på selve høydemodellen for NDH som foreløpig er levert, og som Kartverket har publisert på <http://hoydedata.no>, vil man finne igjen det nevnte mønsteret fra en blokk operert med en oscillerende skannertype. Under følger figur 3.8 fra blokka A30 (5 punkt/m²) over et flatt gressområde (fotballbane). Blokka er operert med Optech Titan. Her kommer laserpunktfordelingen igjen til syne. Når de ulike skannerlinjene sammenfaller i laserpunktfordelingen, vil det bli stor og kort avstand mellom laserpunktene i flyretningen. Når høydemodellen trianguleres vil disse avstanden komme til syne, slik vi ser i figuren under. Når dette skjer ville det hjulpet at laserpunktfordelingen per skanner fra figur 3.3 hadde vært mer kvadratisk.



Figur 3.8 Terrengmodell fra en lasersensor med oscillerende speil

I figur 3.9 følger en tilsvarende figur for blokk B02 (5 punkt/m²), operert med lasersensoren Riegl 1560. I midten av figuren er det et tilsvarende underlag som i figur 3.8. Her finnes det ikke et lignende mønster på tvers av flyretningen slik tilfellet er i figur 3.8.



Figur 3.9 Terrengmodell fra en lasersensor med roterende polygonspeil

Funnene presentert i figurene i dette kapittelet opptrer stort sett jevnt over i de leverte blokkene, og er ikke enkeltstående. Derfor er det valgt å vise eksempler fra forskjellig blokker i denne analysen, og ikke følge et bestemt område for hver type skannemekanisme.

Figur 3.8 og 3.9 viser at forskjellig måte å fordele laserpunktene på fra laserskanneren kan gi ulikt mønster på den leverte høydemodellen. I så måte kan dette betraktes som inhomogenitet mellom de leverte blokkene basert på hvilken type skannemekanisme lasersensoren er utstyrt med. Det ser ut til at en lasersensor utstyrt med oscillerende speil i skannerne gir et linjemønster i terrengmodellen på tvers av flyretningen.

For å kun konkludert med større grad av sikkerhet ville det vært ønskelig med et egnet område som er laserskannet med begge de to typene laserskannemekanisme. Etersom ingen av de leverte bufferområdene kunne gi et slikt egnet, flatt område, falt valget på å vise til eksempler fra forskjellige blokker.

3.3 Bufferområder

I andre del av homogenitetsanalysen skal bufferområdene i NDH-prosjektet studeres. Hver blokk leveres med en 100 meter buffersone på blokkavgrensningen. Bufferområdet mellom blokkene er som tidligere nevnt det eneste området hvor det leveres dobbelt sett med

terrengmodeller. En analyse av de nevnte bufferområdene vil være høyst relevant i en homogenitetsanalyse av NDH-prosjektet. Enkelte bufferområder gir en mulighet for å analysere direkte mot hverandre to ulike leverte utgaver av samme område fra to forskjellige lasersensorer.

3.3.1 Områder

Valgte analyseområder baserte seg på hvilke bufferområder som var tilgjengelig. Ved å få hjelp til å forskynde prosessen med manuelt etterarbeid for en ønsket del av bufferområdet til blokkene, har det blitt mulig å skaffe noen få områder å analysere. Under følger en tabell over de egnede analyseområdene.

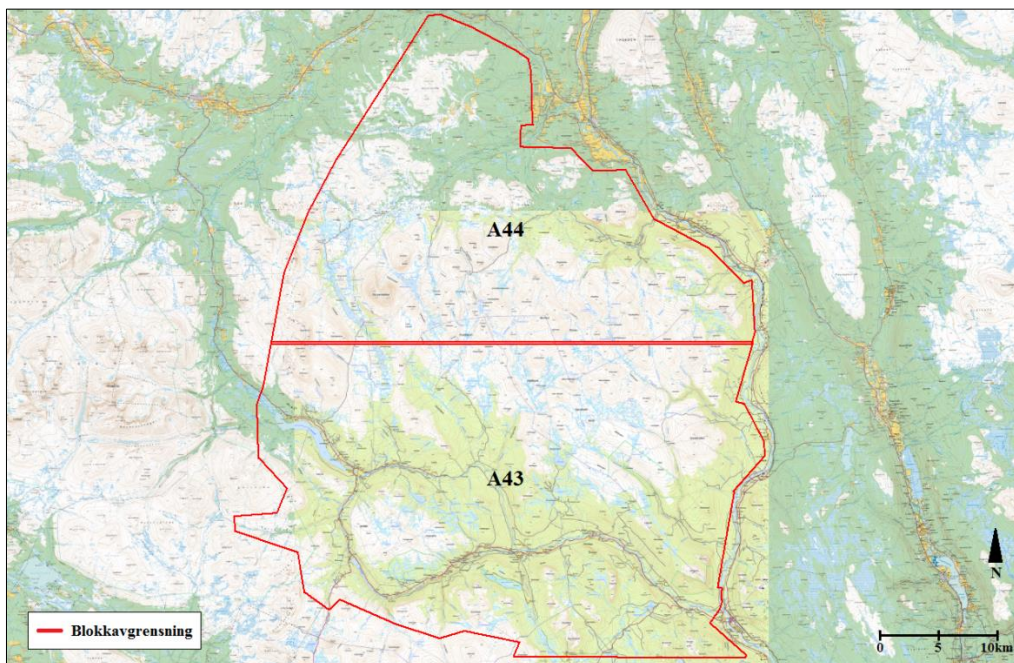
Tabell 3.2 – Analyseområder i bufferområder

Tabellen viser analyseområdene nummerert, med informasjon om hvilke blokker som har bufferområde i det aktuelle analyseområdet. I tillegg inneholder tabellen informasjon om hvilket firma og hvilken lasersensor som opererer på den aktuelle blokka. Bestilt punkttetthetsklasse er oppgitt for begge analyseområdene.

Analyseområde	Punkttetthet	Blokker	Lasersensor	Firma
1	2 punkt/m ²	A43	Riegl 1560	Blom
		A44	Optech Titan	Terratec
2	2 punkt/m ²	D20	Leica ALS80	COWI
		D21	Riegl 1560	Blom
		D23	Leica ALS70	Terratec

En analyse av bufferområdet mellom to blokker operert med lasersensorene Optech Titan og Leica ALS70 er ikke mulig ettersom det ikke finnes slike blokker som ligger inntil hverandre. Det samme gjelder mellom Optech Titan og Leica ALS80. Ettersom analysen kun består av å undersøke noen få enkeltområder, blir analysen uansett bare for stikkprøver å regne. Det som er ønskelig å undersøke er om det finnes tegn til inhomogenitet eller ikke mellom blokkene. Da vil det ikke være avgjørende om ikke alle lasersensorene blir testet mot hverandre, selv om det hadde vært ønskelig.

Under følger figurene 3.10 og 3.11 som beskriver det første analyseområdet omtalt i tabellen over. Figur 3.10 viser de to blokkene involvert, A43 og A44. Disse to blokkene ligger i Hedmark fylke, sør og vest for Alvdal.



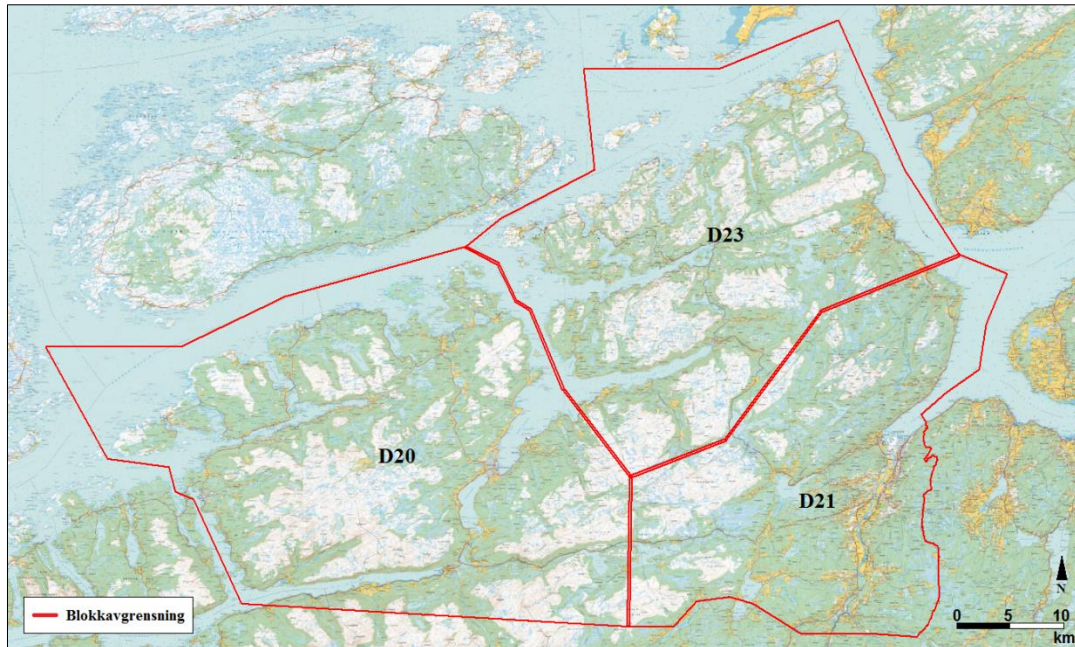
Figur 3.10 Oversikt over analyseområde 1

Bufferområdet mellom blokkene A43 og A44 består i hovedsak av et fjellområde uten vegetasjon. Det valgte analyseområdet er plassert på et av de få stedene med vegetasjon, og ligger i den vestlige delen av bufferområdet. Valgt området er 1000 meter langt. Med en bufferkorridor på 200 meter gir dette et areal for området på 200 000 m². Figur 3.11 under viser analyseområdet.



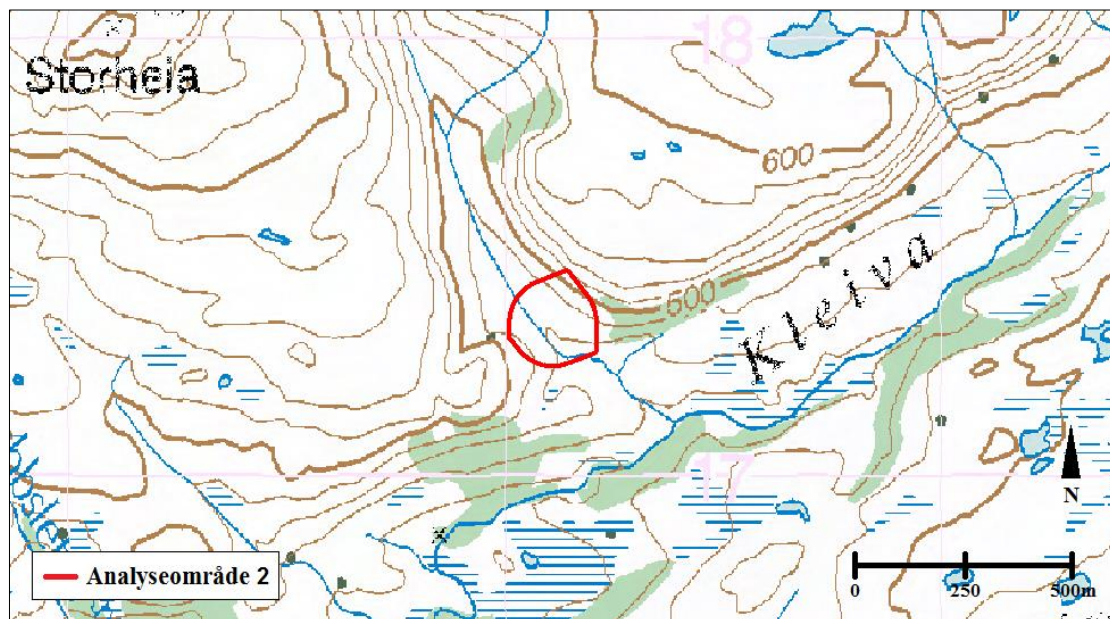
Figur 3.11 Analyseområde 1

Videre følger figur 3.12 og 3.13 som beskriver det andre analyseområdet omtalt i tabell 3.2. Figur 3.12 viser de tre blokkene involvert, D20, D21 og D23. De tre valgte blokkene ligger vest for Trondheim, i både Sør-Trøndelag og Møre og Romsdal fylke.



Figur 3.12 Oversikt over analyseområde 2

Det valgte analyseområdet er i bufferområdet som overlappes av alle de tre blokkene. Området blir omtrent en sirkel med radius 100 meter. Arealet av området er på 33 300 m². Området består av lite vegetasjon, og med helning i forskjellige retninger. Figur 3.13 under viser analyseområdet.



Figur 3.13 Analyseområde 2

Ettersom flyplanen legges med ekstra margin utenfor blokkavgrensningen, vil det finnes mer laserdata utenfor bufferområdene som også er laserskannet med flere lasersensorer. Dette kunne gitt en større korridor å analysere på for begge analyseområdene. Ettersom det manuelle etterarbeidet kun gjennomføres med et ekstra påslag på omtrent 20 meter utenfor blokkavgrensningen (med buffer), er store deler av den ekstra laserpunktskyen ikke kontrollert manuelt. Det er også ønskelig å kun analysere datasettet som blir endelig levert til Kartverket. Det er derfor kun analysert data innenfor den nevnte bufferkorridoren.

3.3.2 Metode

I denne analysen skal en terrengmodell over samme område fra flere ulike lasersensorer sammenlignes med hverandre. Den valgte fremgangsmåten baseres på å sammenligne to datasett mot hverandre. Slik får man en oversikt over hvor mye datasettene skiller seg fra hverandre. Områder med størst forskjell, eller markante endringer, kan analyseres mer inngående i selve datasettene.

For å kunne sammenligne to ulike datasett må posisjonen til hvert punkt i sammenligningen være identisk. Derfor vil datasettene omgjøres til rasterformat før de kan sammenlignes og vise forskjellen mellom dem. Ettersom det er varierende punkttetthet i analyseområdet må datasettet trianguleres før det gjøres om til raster.

I første del av den påfølgende analysen har programvaren ArcGIS fra ESRI blitt brukt, med applikasjonen ArcMap. Utvidelsen 3D Analyst i ArcGIS gir tilgang til å importere laserpunktskyer og jobbe med dem. I ArcMap har datasettene blitt triangulert til terrengmodeller, for så å gjøres om til hvert sitt rasterformat. Deretter har et raster blitt trukket fra et annet raster. Resultatet ble et raster som viser høydeforskjellen mellom de to datasettene som ga bakgrunn for den siste operasjonen. Under følger en detaljert beskrivelse av fremgangsmåten i ArcMap. Prosedyren er listet opp kronologisk, og de ulike verktøyene tatt i bruk er uthevet i fet tekst. De tre første stegene i listen under ble utført for hvert datasett fra hver lasersensor.

- i. **LAS to Multipoint.** Her importeres laserdatasettet. I dette steget kan klassifiseringsklassene filtreres, slik at datasettet etter importering kun består av punkter som er klassifisert som bakke.
- ii. **Create Terrain.** Her bygges en terrengmodell basert på punktene fra forrige steg.
- iii. **Terrain to Raster.** Her interpoleres et raster fra en terrengmodell. Cellestørrelse i rasteret er satt til 1,0 meter. Valgt cellestørrelse blir en avveining i forhold til

detaljgraden i rasteret mot sjansen for kunstige celler som ikke er i direkte kontakt med et laserpunkt, og dermed en høydeverdi. Begge analyseområdene har bestilt punkttetthet på 2 punkt/m². Bakkepunkttheteten kan bli lavere, særlig i tett vegetasjon. Derfor virker en cellestørrelse på en kvadratmeter naturlig. Valgt interpolasjonsmetode for å kalkulere celleverdier i rasteret er satt til Natural Neighbors. Metoden bruker arealbasert vektning fra Voronoi-polygoner. Denne metoden er ansett for å være bedre i analysering enn den andre valgmuligheten for interpolering (Lineær). Her brukes et vektet gjennomsnitt basert på avstand fra nodene i terrenstrukturen til cellen.

- iv. **Minus.** Dette steget subtraherer et raster fra et annet. Slik får man et raster som viser høydedifferansen mellom to datasett fra forskjellige lasersensorer. Resultatet vil ha samme cellestørrelse som de tilførte rasterene fra forrige steg. Totalt vil fire slike rastre bli laget. Ett for det første analyseområdet, og tre for det andre.

Det ble gjort analyser av interessante områder i rasterene fra det siste steget over. Interessante områder omhandlet både generelle mønstre og lokale avvik. Statistiske analyser ble gjort i ArcMap ved å klippe ut de interessante områdene og få gjennomsnittlig høydeforskjell med tilhørende standard avvik. I et forsøk på å forklare årsaken til høydeforskjellen i de interessante områdene, ble det gjort undersøkelser i Terrasolid av selve laserpunktskyene.

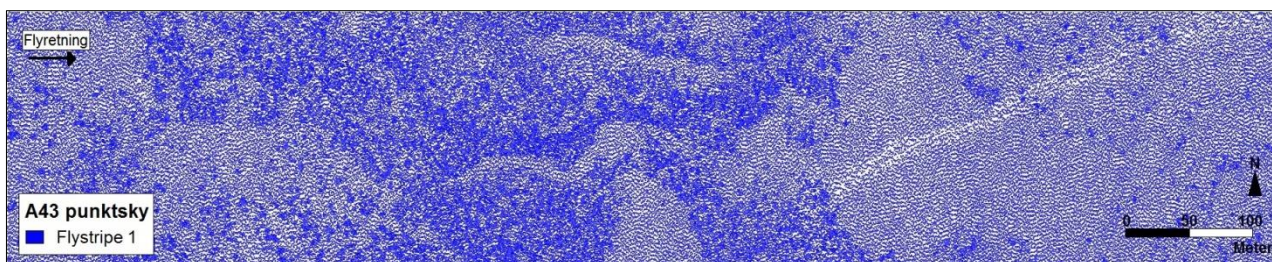
3.3.3 Resultat og diskusjon

Dette kapittelet vil starte med første analyseområdet. Etter at resultatene er lagt frem og diskutert, vil det andre analyseområdet studeres.

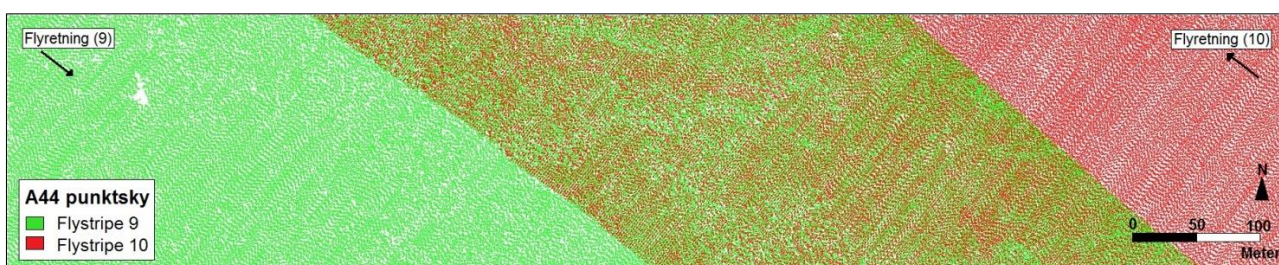
Før den påfølgende analysen er det viktig å gjøre seg opp noen meninger om hva man kan forvente av resultatene. Som metoden i forrige kapittel tilsier, vil to og to datasett bli sammenlignet mot hverandre. Her er det viktig å huske på at avvik i datasettene (i forhold til terrenget) kan utligne hverandre om avvikene peker i samme retning. Både små og store avvik kan ved denne måten forsvinne om avvikene er like store og i samme retning i begge datasettene. Videre kan også avvik forstørres når to datasett sammenlignes mot hverandre. Laserdatasettene inneholder alltid en form for unøyaktighet. Om disse unøyaktighetene i datasettene peker i motsatt retning, vil en feil basert på unøyaktigheter bli forstørret. Slik kan et avvik mellom datasettene oppfattes som større enn det det egentlig er. Jo større det analyserte området er, jo mindre er sjansen for at feilkildene diskutert over vil utgjøre er forskjell.

Analyseområde 1

I figurene 3.14 og 3.15 følger laserpunktskyen for henholdsvis A43 og A44. Figurene viser punktskyene fargelagt basert på flystripe, og hvilken retning stripen er fløyet. Figur 3.14 viser at hele området dekkes av en og samme flystripe for blokka A43. Punktskyen inneholder alle laserpunktklassene omtalt i kapittel 2.5. Mørkere områder i figur 3.14 viser i dette tilfellet vegetasjonsområder der det oppstår flere returer av laserstrålene, og flere punkter av klassen. Figur 3.15 viser at det aktuelle bufferområdet for A44 er dekket av to flystriper med et overlappsområde i mellom.

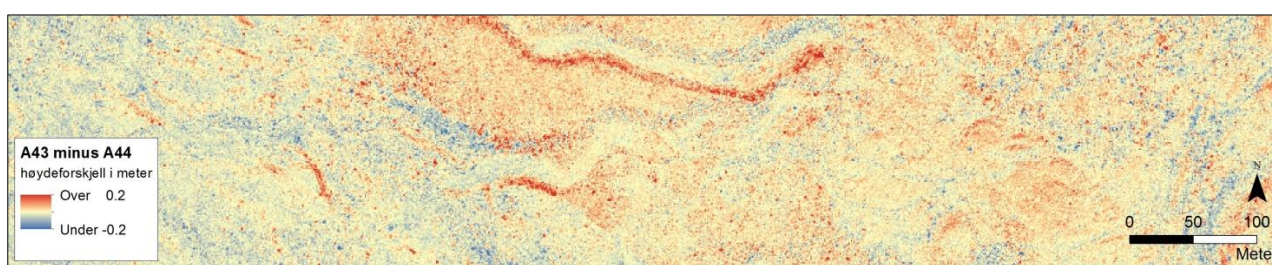


Figur 3.14 Laserpunktsky for A43



Figur 3.15 Laserpunktsky for A44

Figur 3.16 under viser rasteret fra steg iv i forrige kapittel. Figuren viser høydeforskjellen mellom blokkene A43 og A44 i det utvalgte bufferområdet. A43 er operert av Blom med lasersensoren Riegl1560, mens A44 er operert av Terratec med lasersensoren Optech Titan. Rød farge representerer der høydemodellen fra A43 ligger høyere enn høydemodellen fra A44. Blå farge viser motsatt tilfelle. Tegnforklaringen viser at fargeverdiene er strukket. Dette kan vise mindre differanseendringer, men også fremheve naturlig støy i datasettet.



Figur 3.16 Høydedifferanse for analyseområde 1

Mønsteret som dannes av flystripene for A44 i figur 3.15 over, er også synlig i figur 3.16, der overlapsområdet får et rødlig preg og skiller seg ut i forhold enkeltstripeområdene. Innbyrdes forskjell i det nevnte mønsteret er det første som vil bli analysert. Under følger en tabell som viser gjennomsnittlig differanse mellom høydemodellene fra de to blokkene.

Området er delt inn basert på flystripene fra A44, både flystripene alene og overlappsområdene. I tillegg vises tilsvarende data for hele analyseområdet.

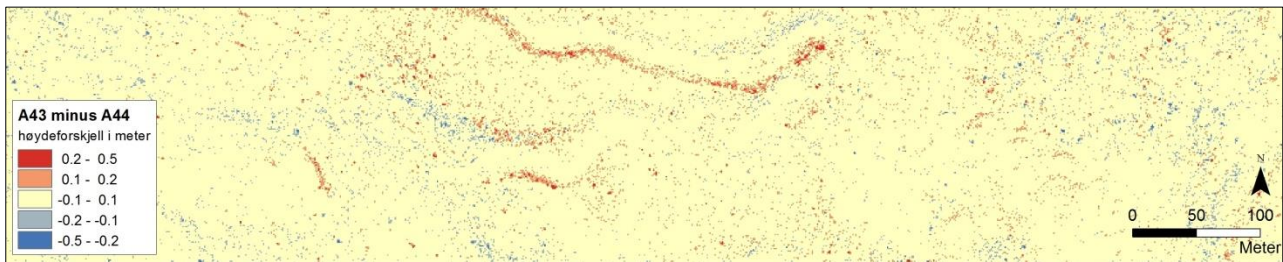
Tabell 3.3 – Høydedifferanse mellom Optech Titan og Riegl 1560 for analyseområde 1

Tabellen viser differansen mellom høydemodellen fra blokka A43 og A44, operert med henholdsvis Riegl 1560 og Optech Titan. Statistikken er oppgitt i meter. I tillegg vises hvor stort arealprosent delområdene representerer i forhold til hele området.

Område	Snitt	St.avvik	Areal
Hele	0,00	0,06	100 %
Flystripe 9	-0,02	0,05	38 %
Overlapp	0,02	0,05	44 %
Flystripe 10	0,00	0,06	18 %

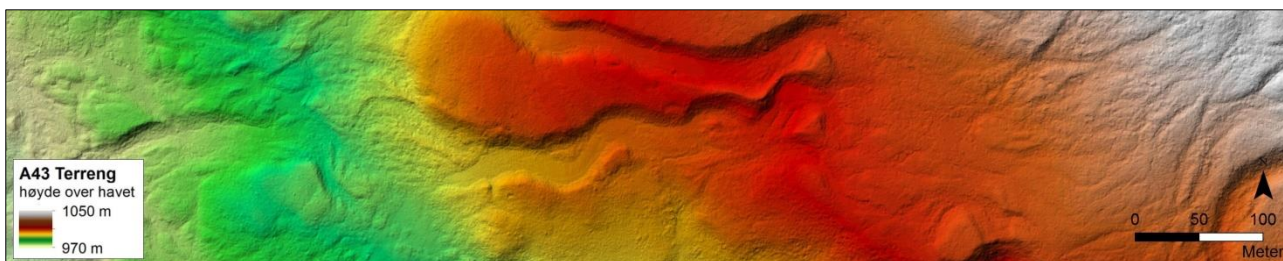
Fra tabellen over ser man at for hele analyseområdet er høydedifferansen mellom blokkene i gjennomsnitt helt lik, og med forventet standardavvik. Som tidligere nevnt er forventet punktnøyaktighet med dagens utstyr i størrelsesorden 0,02-0,20 m (standardavvik) i høyde. Ettersom analysemetoden har ytterligere feilkilder, som omtalt tidligere, vil et standardavvik på 6 cm i høyde mellom blokkene være forventet. Funnene rimer altså med hypotesen omtalt i kapittel 3.1, ettersom blokkene har vesentlig homogenitet i datasettet. Videre nedover i tabellen ser vi at det er en viss forskjell mellom områdene med kun stripe 9 og 10, og overlappsområdet dem i mellom. Forskjellen skyldes i hovedsak stripejusteringen for blokka A44 som gjøres i matchingen, omtalt i kapittel 2.5. Forskjellen på ± 2 cm mellom områdene er som forventet, og er innenfor kravet til nøyaktighet. Kartverket setter krav til absolutt høydenøyaktighet for å sikre at laserdataene har jevn og homogen stedfestingsnøyaktighet i høyde. For NDH gjelder det et toleransekrav på 10 cm i systematisk avvik. Et systematisk avvik vil ofte bety et generelt avvik som vises på et større område enn området som er analysert, selv om betydningen av ordet systematisk ikke er godt definert i Kartverkets standard. Avviket innenfor analyseområdet er likevel mulig å sammenligne med Kartverkets toleransekrav, og både for hele området og delområdene i tabell 3.3 er avviket vesentlig lavere. Avvikene mellom stripene anses som både forventede og godkjente. Dersom stripejustering i matchingen av blokka A44 hadde vært gjennom med større nøyaktighet kunne avvik som vist i tabell 3.3 vært unngått.

Figur 3.17 viser av rasterene som representerer høydedifferansen mellom blokkene fra steg iv i metoden på nytt. Her er det nå valgt å gi en nøytral gul farge for verdier ± 10 cm, som representerer kravet til systematisk avvik. 93 % av cellene i rasteret befinner seg innenfor denne klassen.



Figur 3.17 Høydedifferanse for analyseområde 1, nye tegneklasser

Figur 3.18 representerer terrenget for samme område, slik at informasjonen i figur 3.17 kan sammenlignes visuelt med hvordan terrenget ser ut. Terrenget under er representert ved datasettet fra blokka A43. Hele området ligger mellom 970 og 1050 meter over havet.

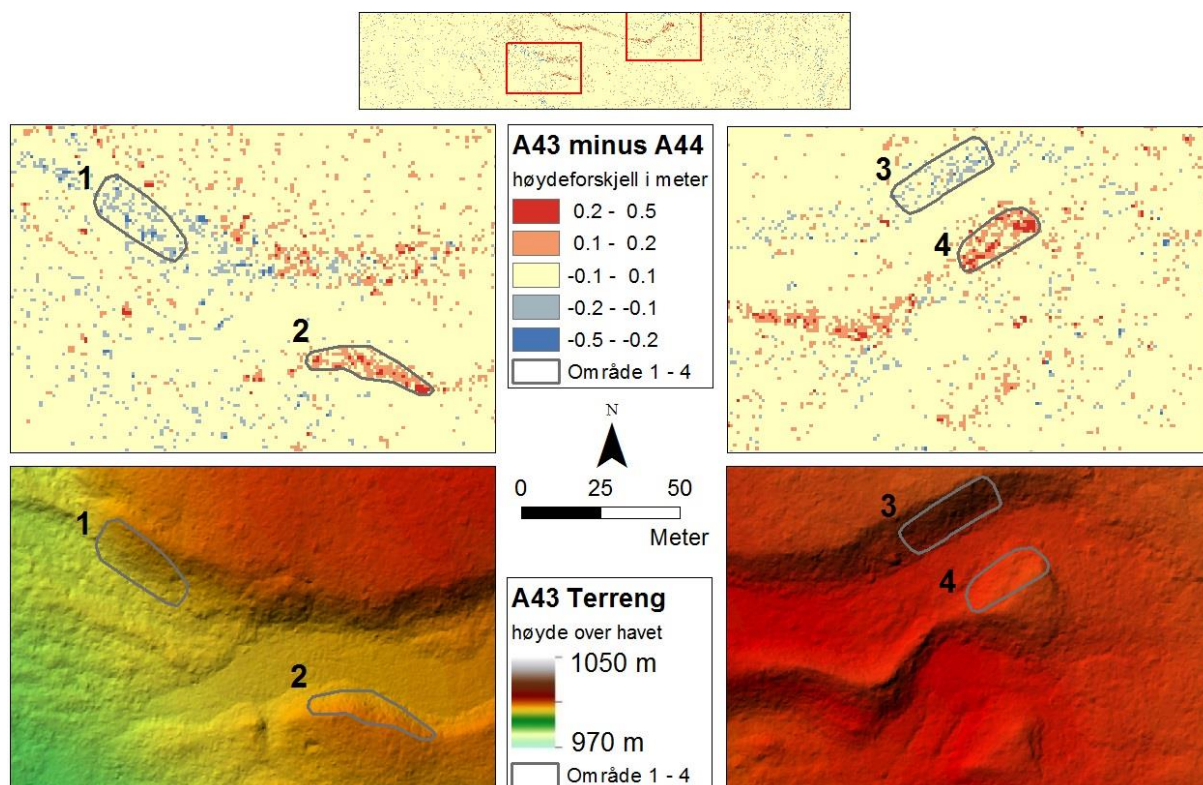


Figur 3.18 Terrenget for analyseområde 1

Selv om analysen hittil har vist homogenitet i datasettene, er det videre ønskelig å studere de høydeavvikene som finnes. I figur 3.17 er det mulig å gjenkjenne terrengformasjonene fra figur 3.18 ovenfor. Dette gjelder særlig den nordre ravinen i midtre del av figur 3.18 over. Terrengavtrykket er enda mer tydelig i figur 3.16. I søndre side av ravinen ligger høydemodellen fra A43 høyere enn tilsvarende modell fra A44, og kanten får en rød farge. Den nordre kanten av ravinen får en svak blå farge, og høydemodellen fra A43 ligger dermed i motsatt fall lavere enn A44.

Slike lokale avvik mellom blokkene i bufferområdet har ingen toleransekrav hos Kartverket som det er mulig å måle mot. Likevel er det interessant å analysere størrelsen på slike lokale avvik og mulig opprinnelse, ettersom avvikene i første øyekast virker å støtte opp om hypotesen omtalt i kapittel 3.1. I skarp helning ser det her ut til at de to blokkene har en høydedifferanse. Figur 3.19 viser hvilke områder som er analysert nøyere. Det er valgt ut to separate delområder. Det ene delområdet ligger i overlapsområdet for blokka A44, mens det andre ligger i tilknytning til flystripe 9 fra A44, vest for overlapsområdet. Begge

delområdene består av to analyserte områder, der områdene ligger på hver side av en ravine, med motstående kanter. I alle områdene på figur 3.19 under er det spredt vegetasjon (trær).



Figur 3.19 Interessante områder i analyseområde 1

Høydifferansen mellom blokka A43 og A44 for disse utvalgte områdene er vist i tabell 3.4. Gjennomsnittsverdier på differansen og tilhørende standardavvik er vist, samt arealet for hvert av områdene.

Tabell 3.4 – Interessante områder i analyseområde 1

Tabellen viser gjennomsnittlig differansen mellom høydemodellen fra blokka A43 og A44 for de fire utvalgte områdene. Gjennomsnittsverdiene med tilhørende standardavvik er oppgitt i meter. Arealet for hvert område er også oppgitt, i kvadratmeter.

Område	Snitt	St.avvik	Areal
1	-0,08	0,06	388
2	0,12	0,07	275
3	-0,05	0,06	347
4	0,13	0,08	273

Tabellen viser at de utvalgte områdene har et merkbart gjennomsnittlig lokalt avvik i høyde mellom blokkene, sammenlignet med det gjennomsnittlige avviket for hele blokka. For både område 2 og 4 er det gjennomsnittlige avviket av en slik størrelse at høydeverdiene til en av blokkene kan være utenfor Kartverkets krav til systematisk avvik. Ettersom dette er en

sammenligning, kan også begge blokkene være innenfor. Det er også viktig å huske på at kravet referer til systematisk avvik, og ikke lokal avvik slik som analysert. Område 1 og 2 ligger utenfor overlappsområdet for A44, og fra tabell 3.3 så vi at dette området hadde et gjennomsnittlig høydeavvik mellom blokkene på -0,02 cm. Til sammenligning ligger områdene 3 og 4 i overlappsområdet for blokka A44, og dette området hadde et gjennomsnittlig avvik på 0,02 cm. Selv om disse avvikene ble ansett som små, vil de ha en liten betydning når man sammenligner høydeforskjellene for områdene mot hverandre.

Standardavvikene i tabell 3.4 er relativt store sammenlignet med gjennomsnittsverdiene, og det er derfor legitimt å sette spørsmålsteget ved om gjennomsnittsverdiene er signifikant forskjellig fra null. Et nesten like stort standardavvik som gjennomsnitt vil ofte tilsi at dette ikke er tilfelle. Med en forventet bakkepunktthet på minst 1 punkt/m² (planlagt punktthet minimum 2 punkt/m²), og en celledørrelse i rasterene på 1 meter, er det naturlig å anta at hver celle i rasterene har en eller flere observasjoner i begge blokkene. I en signifikanstest vil det derfor være naturlig at antall observasjoner i analysene er lik arealet av områdene. Med en slik betraktning er alle gjennomsnittsverdiene signifikant forskjellig fra null i en Student's t-test med et signifikansnivå på 95 %. Likevel er standardavvikene å betrakte som høye sammenlignet med gjennomsnittet. Det finnes dog store avvik i datasettet som påvirket standardavviket i økende grad. 5-6 % av datasettene for rasterene i tabell 3.4 lå utenfor to standardavvik fra gjennomsnittet. Ved å ekskludere disse celledverdiene minket absolutt-tallet for gjennomsnittsverdiene med 0-1 cm, mens tilsvarende 1-2 cm for det tilhørende standardavviket. For område 4 med det største standardavviket ble gjennomsnittet og standardavviket etter ekskluderingen henholdsvis 12 cm og 6 cm. For område 2 med det nest høyeste standardavviket ble de tilsvarende tallene 12 cm og 5 cm. Da ser det med ett ikke like ille ut, selv om dette blir en form for manipulering av data. De store avvikene i slike datasett er jo interessante i seg selv, og ønskelig å undersøke nærmere om områdene hadde vært større. Nettopp denne prosedyren har jo blitt gjort på det fulle datasettet for analyseområde 1, da de interessante områdene ble valgt ut og analysert.

Selv om både gjennomsnittsverdiene og standardavvikene kan være innenfor krav til nøyaktighet og forventet nøyaktighet som tidligere beskrevet, er det likevel ønskelig å analysere disse lokale avvikene i høyde mellom blokkene, og diskutere eventuell årsakssammenheng. Avvikene kan beskrive en tendens som vil kunne bli forsterket og derfor havne utenfor nøyaktighetskravet.

Nå første vil det bli undersøkt om disse lokale avvikene skyldes flyretningen og skannevinkelen som laserpunktene er skannet med, jamfør hypotesen i kapittel 3.1. Derfor er det analysert hvilken skannevinkel laserskanneren har hatt for punktene som har truffet innenfor de interessante områdene. Hypotesen sier at skannevinkel i kombinasjon med ufordelaktig helning vil kunne gi færre bakketreff i helningen, hvor konsekvensen kan være en relativt større differanse mellom blokken. Derfor er det også analysert antallet bakketreff i områdene fra hver lasersensor i de to blokkene, samt helningen på områdene. Antall bakketreff er fremstilt som bakkepunktthet, hvor arealet i tabell 3.4 er med i denne beregningen. Helningen er oppgitt som gjennomsnitt for skråningen og er regnet ut manuelt fra visuell fremstilling av laserpunktskyen i profil. Tallene er presentert i tabell 3.5.

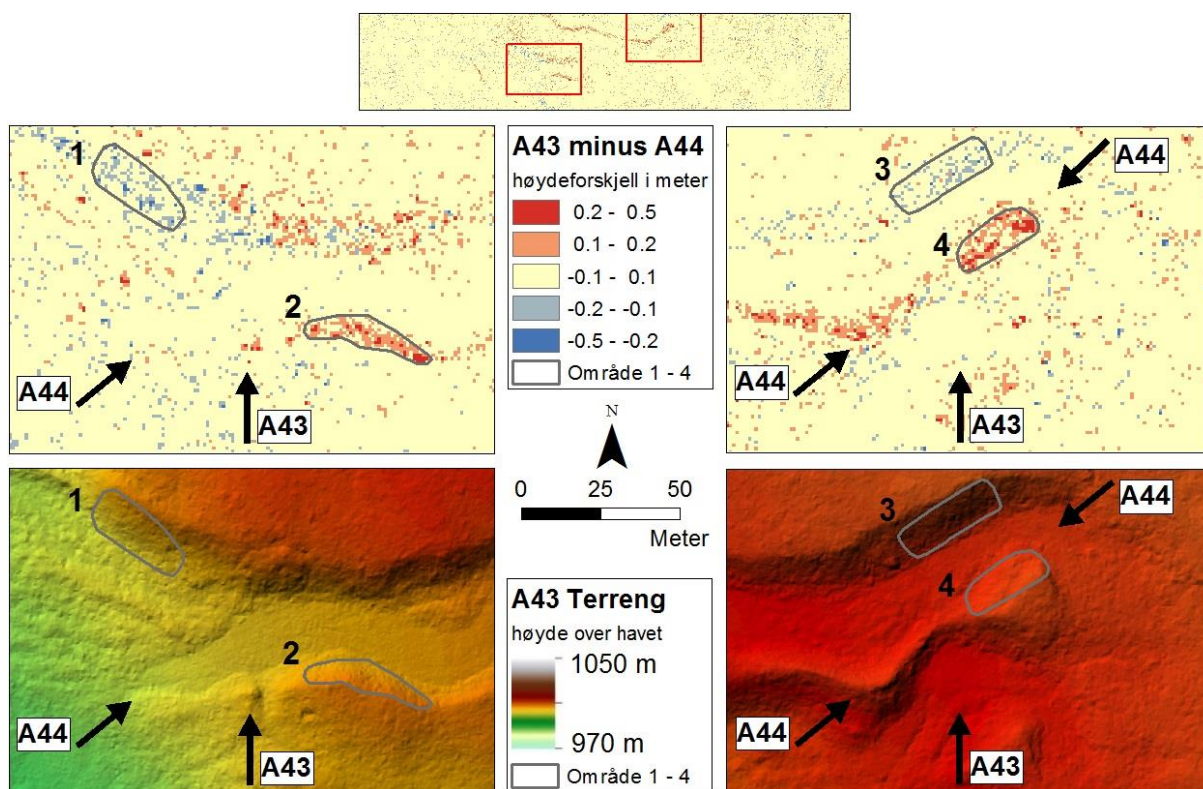
Tabell 3.5 – Skannevinkel for de interessante områdene i analyseområde 1

Tabellen viser skannevinkelen til laserskanneren for laserpunktene i de fire utvalgte områdene, oppgitt i grader i forhold til en loddrettlinje fra flyet til bakken. I tillegg vises bakkepunktthet i punkt/m² og gjennomsnittshelningen oppgitt i grader i forhold til horisontalplanet.

Område	Vinkel A43	Vinkel A44 (Stripe 9, 10)	Bakkepunkt -tetthet A43	Bakkepunkt -tetthet A44	Helning
1	-11	+8, n/a	2,4	1.8	30
2	-10	+9, n/a	2.4	1.8	26
3	-13	+17, +12	3,2	2,9	30
4	-13	+17, +12	2.2	2.6	16

Skannevinklene i tabellen over er ikke alltid like lett å forholde seg til. Riegl-sensoren på A43 har negativ skannevinkel til venstre for flyretningen, mens Optech-sensoren på A44 har negativ skannevinkel til høyre for flyretningen. Man må også bemerke at flystripe 9 og 10 i blokk A44 er flydd motsatt vei, og det er derfor logisk at samme område har likt fortegn på skannevinkelen. I kapittel 1.2 ble det beskrevet at nadir vinkel er definert til skannevinkel 0 grader.

Figuren 3.20 viser plasseringen av lasersensorene i grunnriss i forhold til de interessante områdene fra figur 3.19.



Figur 3.20 Sensorenes plassering i forhold til interessante områder i analyseområde 1

For venstre del av figur 3.20 over ser vi at begge lasersensorene har skannet på samme side av helningen til delområdene. Ut i fra hypotesen skulle dette tilsi at begge lasersensorene skal ha lavere bakkepunktthet i område 2 kontra område 1. Tabell 3.5 viser at dette ikke er tilfellet, for lasersensorene har lik bakkepunktthet for begge områdene seg imellom. En sammenligning av bakkepunktthet mellom lasersensorene for samme område vil variere i forhold til blant annet flyhøyde og ulik bakkeklassifiseringsalgoritme. Det blir derfor lagt mest vekt på sammenligningen mellom områdene for hver lasersensor separat. Fra tabell 3.4, og diskusjonen etterpå, så det ut til at område 2 har størst forskjell og usikkerhet mellom blokkene og lasersensorene. I henhold til hypotesen vil dette være logisk, i og med at begge lasersensorene er plassert på ugunstig side av helningen når skanningen ble utført.

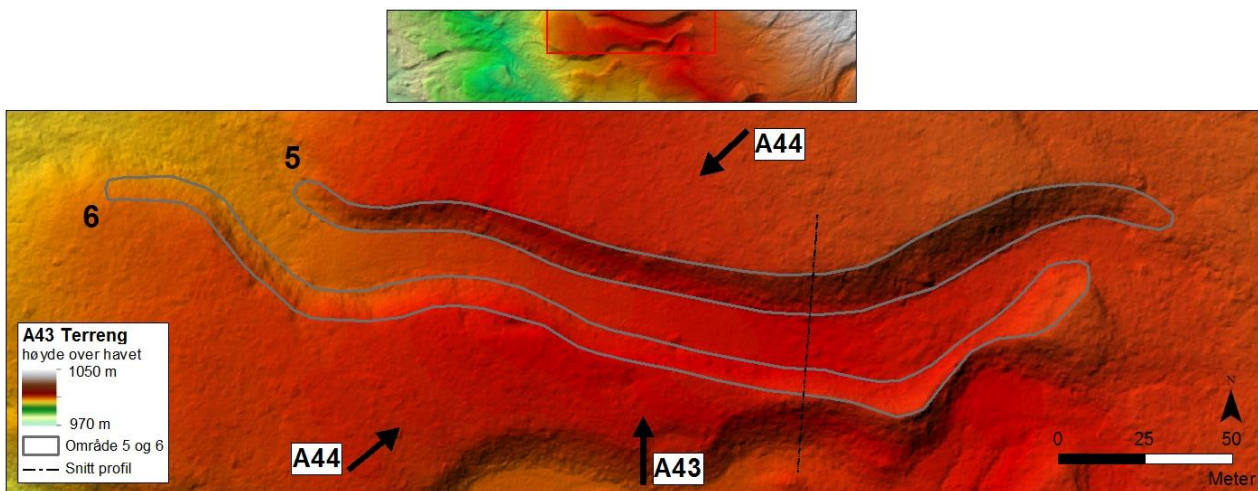
For høyre del av figur 3.20 ser vi at siden områdene ligger i et overlapsområde for blokka A44, er det to ulike innfallsvinkler for lasersensoren. For A43 er det bare en, som ser sørfra. I henhold til hypotesen skulle dette tilsi at A43 vil ha lavere bakkepunktthet i område 4, kontra område 3. Fra tabell 3.5 ser vi at dette stemmer. For blokka A44 er det mindre forskjell, og område 4 er det eneste området hvor A44 har høyere bakkepunktthet enn A43. For disse områdene kan det virke som om flyretning og helning på terrenget kan ha noe å si

for nøyaktigheten til terrengmodellen. Likevel er det viktig å huske på at i dette forsøket har man ingen garanti for hvilken av terrengmodellene som er mest troverdig.

Områdene fra figur 3.19 og 3.20 ble valgt fordi de skilte seg ut med større høydedifferanse mellom blokkene. Hypotesen ser ikke ut til å stemme overens med begge områdene. Da kan det være naturlig å se etter andre mulige grunner til høydeavvik mellom blokkene. Først ut er dato for skanningen av de forskjellige flystripene. Ulik dato for flyvning vil kunne resultere i ulik grad av vegetasjonsvekst, både på bakken og bladene på trærne. Dette vil kunne gi høydedifferanser og unøyaktigheter i høydesammenligningen mellom blokkene. Blom, med sin Riegl-sensor, laserskannet flystripene i A43 den 6. oktober, mens Terratec laserskannet flystripene i A44 den 13. september med sin Optech-sensor. Med drøyt tre ukers mellomrom kan vegetasjonen i området ha forandret seg. Det er likevel lite trolig at en høydeforskjell i helning kan forklares med variasjon i vegetasjon, ettersom alle de interessante områdene har delvis vegetasjon.

Derimot vil et skift mellom terrengmodellene i grunnriss kunne forklare en mulig høydeforskjell i helning mellom blokkene. Kartverket setter krav til absolutt grunnrissnøyaktighet med et toleransekrav på 30 cm i systematisk avvik (Kartverket, 2013). Fra tabell 3.5 så vi at flere av områdene har en helning på rundt 30 grader. Et avvik på 30 cm i grunnriss mellom blokkene helningsretningen vil resultere i en høydedifferanse på 17 cm. Grunnrissnøyaktighet lar seg lettest måle i knekklinjer, som for eksempel mønelinjer og takkanter (Kartverket, 2013). Analyseområdet består ikke av noen knekklinjer som kan brukes til å måle grunnrissnøyaktigheten mellom blokkene. Grunnrissnøyaktigheten sjekkes som nevnt av leverandøren ved endelig levering. Nøyaktigheten måles ofte på mønelinjer og sammenlignes med FKB-data. For de aktuelle blokkene ble det registrert og rapportert varierende avvik gjennom blokkene, hvor de største enkeltavvikene overskrider 20 cm. De eksisterende FKB-dataene er likevel ikke nødvendigvis nøyaktige nok til å kunne konkludere med et reelt avvik for blokkene eller analyseområdet. Ettersom område 3 har nesten dobbelt så kraftig helning som område 4, skulle en mulig grunnrissnøyaktighet i teorien påvirke høydedifferanse mellom blokkene mer for område 3. Dette fordi skråningskanten til områdene har samme retning (skråningene heller motsatt vei). Derimot, fra tabell 3.4 så vi at høydedifferansen er størst for område 4. Lignende scenario finner man mellom område 1 og 2. Retningen på skråningskantene og størrelsen på høydedifferansen mellom blokkene støtter derfor ikke klart opp under at grunnrissnøyaktighet er årsakene til høydeavvikene mellom blokkene.

La oss denne gangen ta utgangspunkt i terrengmodellen, og bruke det vi vet om skannevinkelen til lasersensorene i analyseområdet, og høydeforskjellen mellom blokkene fra figur 3.17. I figur 3.21 er det valgt ut to områder basert på at områdene ligger i en ravine og har skråninger med motsatt helning. Områdeavgrensningene er valgt slik at de følger og helhetlig dekker skråningene. Områdene ligger i overlappsområdet for blokka A44. I figuren vises også lasersensorenes retning ved skanning for både A43 og A44. De tidligere diskuterte områdene 3 og 4 ligger i vestre del av de nye utvalgte områdene 5 og 6. Figuren under viser også plasseringen av snittet til et profil vist senere i figur 3.22.



Figur 3.21 Flere interessante områder i analyseområde 1

Under følger en tabell med gjennomsnittverdier og tilhørende standardavvik for de to områdene fra figuren over. I tillegg er den gjennomsnittlige bakkepunkttheteten for områdene vist for hver blokk.

Tabell 3.6 – Flere interessante områder i analyseområde 1

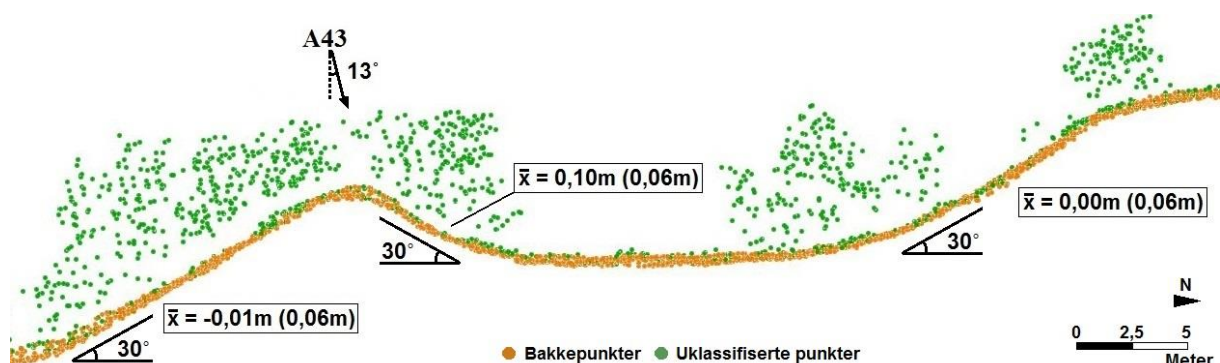
Tabellen viser gjennomsnittlig differansen mellom høydemodellen fra blokka A43 og A44 for to utvalgte områder. Gjennomsnittsverdiene med tilhørende standardavvik er oppgitt i meter. Arealet for hvert område er i kvadratmeter, mens bakkepunkttheteten er oppgitt i punkt/m².

Område	Snitt	St.-avvik	Areal	Bakkepunktthet A43	Bakkepunktthet A44
5	0,00	0,06	2630	2.7	2.7
6	0,10	0,06	2450	2.2	2.6

Ettersom arealene for områdene i figur 3.21 er vesentlig større sammenlignet med de tidligere omtalte områdene, vil resultatene fra tabell 3.6 og den påfølgende diskusjonen ha større innflytelse. Fra tabell 3.6 ser vi at for område 6 har blokkene en gjennomsnittlig høydeforskjell på 10 cm. Høydeforskjellen er identisk sammenlignet med Kartverkets krav til systematisk avvik i høyde. Avvikene i område 6 er dog lokale avvik. Igjen er det snakk om et

relativt høyt tilhørende standardavvik på gjennomsnittsverdien. Tar man som utgangspunkt at antall observasjoner er lik arealet av området, som diskutert tidligere, er likevel gjennomsnittet for område 6 signifikant forskjellige fra null. Fra figur 3.21 og tabell 3.6 ser det ut til at lasersensorene måler lik høyde for punktene i helningen der begge sensorene har godt innsyn (område 5). Der den ene sensoren er plassert ugunstig i forhold til helningen under skanning, kan det se ut som det blir et høydeavvik. Dette støttes om man tar utgangspunkt i bakkepunktettheten fra tabell 3.6. Tettheten av bakkepunkter reduseres tydelig for A43 når helningen er ugunstig kontra gunstig. For A44 er det relativt jevnt. Alle de nevnte verdiene for bakkepunktetthet i tabell 3.6 er godt innenfor kravet satt av Kartverket (1,6 punkt/m² på harde, veldefinerte overflater uten hindringer). Likevel kan en nedgang i bakkepunktetthet redusere nøyaktigheten, og i dette tilfellet gi et høydeavvik grunnet helning. Dette er i tråd med hypotesen.

I denne sammenhengen kan det nå være interessant å studere hva slags type laserreturer disse bakkepunktene består av for disse to områdene. Bakkepunktene består av enten «kun en retur»-laserpunkter eller «siste av mange returer»-laserpunkter. Der laserstrålene treffer for eksempel vegetasjon, kan det returneres deler av laserstrålen underveis mens laserstrålen penetrerer vegetasjonen (figur 1.1). Kun første, eller siste laserretur, kan være fra bakken, ettersom ingen av strålene vil penetrere videre ned i bakken. Om laserstrålen ikke treffer noen hindringer før bakken, vil denne være merket som «kun en retur». For blokka A43 synker bakkepunktettheten med 18 % fra område 5 til område 6, vektet for arealforskjellen. Det totale antall «kun en retur»-punkter synker til sammenligning med 32 %. Dette tilsier at en større andel av bakketreffene har trengt gjennom vegetasjon, som er logisk og i henhold til hypotesen. Ved mange trær er det sannsynlig at antallet bakketreff synker i forhold til et åpent område. Med færre bakketreff er det igjen sannsynlig at nøyaktigheten i terrengmodellen synker. Under følger figur 3.22 av et profil gjennom punktsky fra A43 for områdene 5 og 6. Snittet for profilet vises i figur 3.21, og ser i retning vest.



Figur 3.22 Profil punktsky A43

Område 5 ligger i skråningen til høyre i figuren, mens område 6 ligger i skråningen midt på figuren og heller motsatt vei av område 6 som tidligere vist. Til venstre i figuren er det en ny skråning som heller samme vei som område 6. I boksen som er i tilknytning til hver skråning vises gjennomsnittlig høydedifferanse mellom høydemodellen fra A43 og A44. Gjennomsnittsverdiene representerer et område på cirka 250m² i skråningen i tilknytning til profilets snitt. Tilhørende standardavvik er gitt i parentes. For visualiseringen sin del er lasersensorens skannevinkel for A43 vist, denne gangen i reell vinkling, ettersom profilets snitt er en forlengelse av den horisontale skannevinklingen under laserskanningen av området.

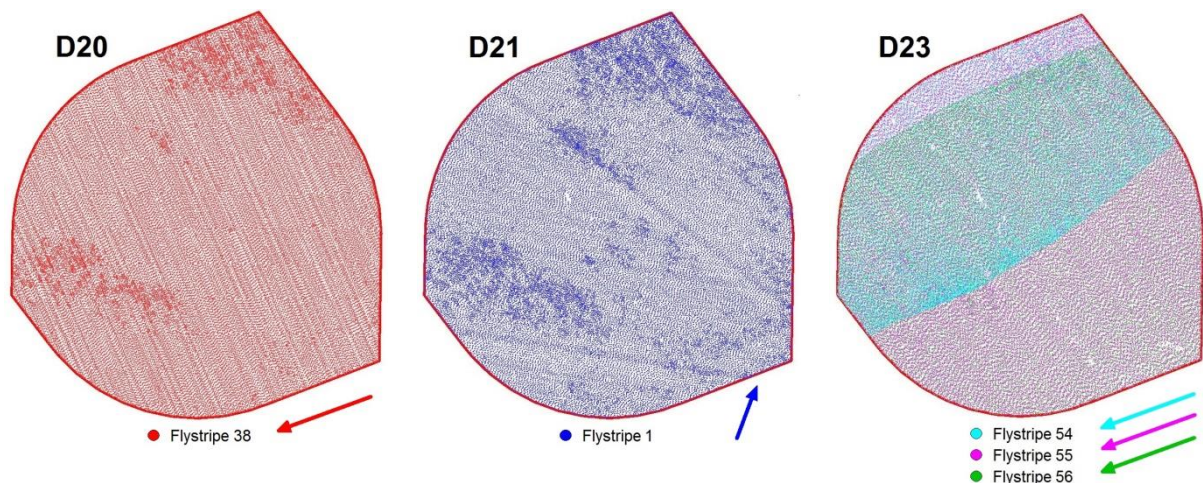
Figuren gir et tydelig bilde på det tidligere diskuterte temaet. Det ser ut til at der det er helning i en bestemt retning er høydemodellene har interne avvik. Det virker ikke til at høydeforskjellene fra figur 3.22 kan stamme fra grunnrissunøyaktighet alene, ettersom det kun er høydedifferanse i den ene helningen. Likevel kan det nevnes at områdene ligger i overlappsområdet for blokka A44, og fra tabell 3.3 så vi at dette overlappsområdet hadde en gjennomsnittlig høydeforskjell på 2 cm. Om man justerer for dette avviket, vil et reelt lokalt avvik for områdene være 2 cm mindre. Da kan det være en liten grunnrissunøyaktighet som gir et høydeavvik i helning på et par cm, og i så fall vil ikke forskjellen mellom områdene i figur 3.22, eller område 5 og 6 i tabell 3.6, være på mer enn 6 cm.

I analysen hadde man helst sett at de seneste områdene diskutert ikke var i et overlappsområde for en av sensorene. I forhold til hypotesen er denne situasjonen likevel relevant, ettersom den ene lasersensoren ikke har god vinkling og innsyn for området, mens den andre sensoren har det. Det er naturlig å tro at om begge lasersensorene hadde hatt ugunstig innsyn til en av skråningene hver, ville differansen i høydeavviket mellom de motsatt hellede skråningene vært større.

For å oppsummere dette analyseområdet kan det virke som at der begge lasersensorene har godt innsyn til helningen, er høydeavvikene i høydemodellen små, og derfor også større sjans for at dette er det korrekte. Der en eller begge lasersensorene er plassert på feil side av helningen, ser det ut til at de ikke samnefaller. Det er vanskelig å påpeke hvilken som har rett, men det er ikke lett å peke på andre grunner i dette tilfellet enn helningen og feil side av helningen muligens gir dårlige nøyaktighet. Det hadde vært veldig interessant å ha manuelt innmålte kontrollflater fra landmåling tilgjengelig. Da kunne man med stor sikkerhet fastslått hvilken blokk som leverte korrekt høydemodell i områdene med avvik, og derfor også hatt større troverdighet i konklusjonen. Av tid- og logistikkhensyn ble dette ikke prioritert.

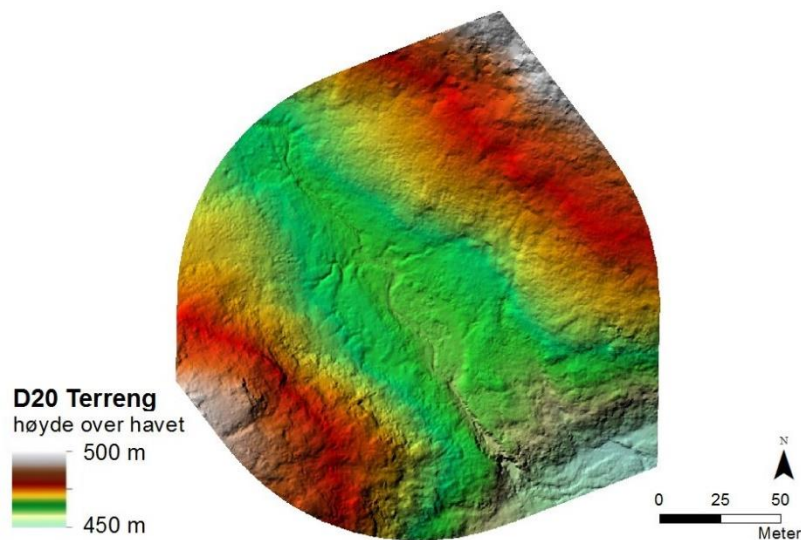
Analyseområde 2

For det andre analyseområdet blir det først presentert laserpunktskyer fra hver blokk for det spesifiserte bufferområdet fra figur 3.13. Figur 3.23 under viser punktskyene fargelagt basert på flystripenummer, i tillegg til å vise aktuell flyretning med pil. For blokkene D20 og D21 ser man at bufferområdet er dekket av en og samme flystripe. Her er det mulig å gjenkjenne skannemønsteret som ble analysert i kapittel 3.2. For blokk D23 er det flere overlappende flystriper involvert, og hele området er dekket av minst to av de tre flystripene. Figuren viser at alle de tre flystripene er flydd samme vei. I kapittel 2.2 om datainnsamling ble det beskrevet at nabostriper i flyplanen hovedsakelig skal flys motsatt retning. For flystripe 55 ble dette forsøkt gjennomført, men brudd i navigasjonsløsningen gjorde at flystripen måtte flys på nytt. I det tredje og godkjente forsøket ble stripen flydd motsatt retning enn planlagt, og derfor i samme retning som de to nabostriperne.



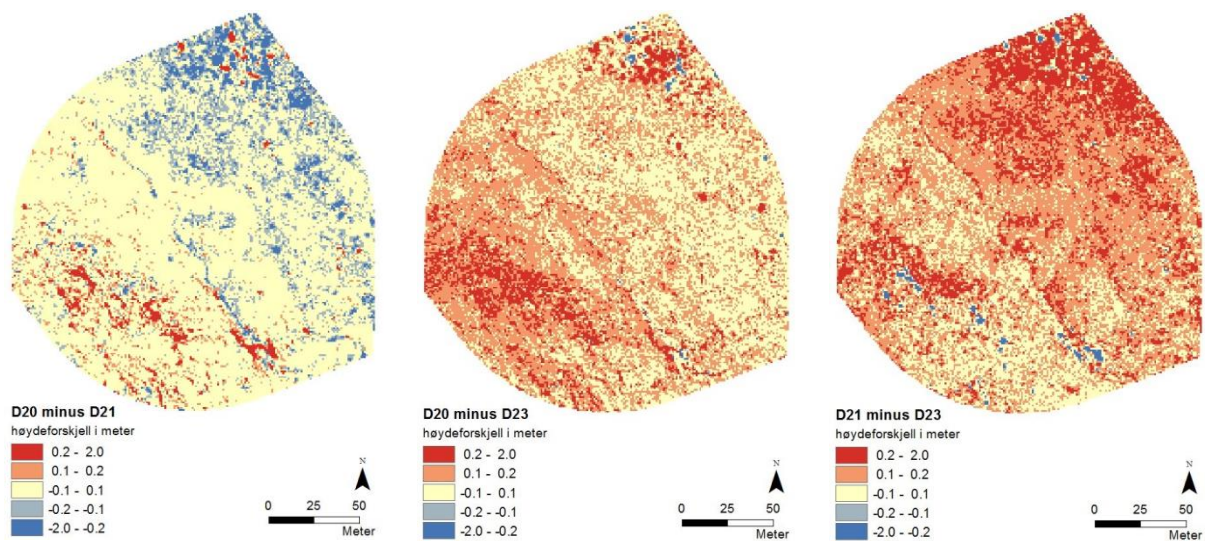
Figur 3.23 Punktsky analyseområde 2

Videre i figur 3.24 følger en figur som representerer terrenngmodellen for samme område. Terrenngmodellen er representert med datasettet fra blokk D20. Hele området ligger mellom 450 og 500 meter over havet. Som figuren viser består området av en liten dal med kanter opp på begge sider.



Figur 3.24 Terrengmodell for analyseområde 2

Figur 3.25 viser alle tre kombinasjoner av høydedifferanse mellom blokkene som dekker bufferområdet. Figurene har lik tegnforklaring som figur 3.17 fra forrige analyseområde, der nøytral gul farge tilsvarer høydeforskjell på ± 10 cm. Verdien representerer Kartverkets toleransekravet for absolutt høydenøyaktighet på 10 cm i systematisk avvik for NDH.



Figur 3.25 Høydedifferanse for analyseområde 2

Tabell 3.7 under tallfester høydedifferansen som er visuelt fremstilt ovenfor. I tabellen er det også tatt med høydedifferansen for østre og vestre del av analyseområdet. Fra figuren over ser man en tendens til at alle tre delfigurene har et skille mellom øst og vest som samsvarer med terrengformen fra figur 3.24. Områdene som representerer øst og vest i tabellen under er delt i elveleiet nederst i dalen.

Tabell 3.7 – Høydedifferanse mellom blokkene i analyseområde 2

Tabellen viser gjennomsnittsverdier for høydedifferanse med tilhørende standardavvik for hele analyseområdet, samt for østre og vestre del av dalbunnen i området. Verdiene er oppgitt i meter.

Blokker	Hele		Øst		Vest	
	Snitt	St.avvik	Snitt	St.avvik	Snitt	St.avvik
D20 – D21	-0,02	0,14	-0,07	0,12	0,03	0,15
D20 – D23	0,12	0,10	0,10	0,09	0,15	0,11
D21 – D23	0,14	0,11	0,17	0,12	0,11	0,10

Fra tabellen over ser vi at D23 skiller seg relativt tydelig ut i forhold til de to andre blokkene. Tabellen viser at høydemodellen for D23 ligger henholdsvis 12 og 14 cm lavere enn tilsvarende modell for blokkene D20 og D21. Disse differansene er større enn det tidligere nevnte toleransekravet på 10 cm i systematisk avvik. Det er ikke innmålte kontrollflater i området, og man vet derfor ikke den reelle høyde til terrenget. Derfor kan alle modellene være innenfor Kartverkets krav. Likevel er disse gjennomsnittlige høydedifferansene å anse som store, og skal senere bli studert. De tilhørende standardavvikene er også større sammenlignet med statistikken fra analyseområde 1, og sammenlignet med gjennomsnittsverdiene. Ved å eliminere for uteliggere (grove feil utover tre standardavvik) reduseres standardavviket for hele området for alle tre høydedifferansene med 3-4 cm. Jmfør tidligere antakelse at antall observasjoner er lik arealet av området, vil høydeavvikene innholdende blokk D23 være signifikant forskjellig fra null. Likevel er standardavvikene også her regnet for å være store sammenlignet med de tilhørende gjennomsnittsverdiene. For dette analyseområdet ble det fokusert på å analysere et område som inneholdt alle de tre blokkene. Det er en styrke for analysen at man kan sammenligne et område med tre forskjellige lasersensorer direkte mot hverandre. Svakheten for analysen er at området er lite og derfor kan være mindre representativt.

Det ser ut til at det er en forskjell mellom øst og vest av området i alle tre høydedifferansene i tabell 3.7. Forskjellene i den østlige og vestlige delen av områdene blir ikke videre analysert ettersom dette elementet bredt studert i forrige analyseområdet, og dette analyseområdet viser større gjennomsnittlig forskjell mellom blokkene. Likevel kan man her ikke utelukke at for eksempel grunnrissunøyaktighet kan spille inn på høydeavvikene, ettersom hele området er dekket av to skråninger. For dette analyseområdet vil det nå fokuseres på å studere årsakssammenhengen for den store forskjellen mellom blokka D23 og de to andre blokkene.

I denne sammenhengen er det naturlig først å se tilbake på figur 3.23 og punktskyen fra de forskjellige blokkene. Her så vi at analyseområdet var dekket av minst to flystriper for blokka

D23. En høydemodell vil ofte bli mer nøyaktig jo høyere punkttetthet, og i denne sammenhengen er det overraskende at blokka med høyest punkttetthet er blokka som ved første øyekast fra tabell 3.7 virker å bomme noe med høydemodellen.

Videre skal vi se på flyvningsdato for de forskjellige blokkene og muligheten for at laserskanning har pågått i ulik vekstsesong. Blom var først ute og laserskannet med Riegl-sensoren den 4. august i blokk D21. COWI (D20) og Terratec (D23) fulgte opp henholdsvis 9. oktober og 20. oktober med hver sin Leica-sensor. Fra starten av august til slutten av oktober kan det være forandring i vegetasjonen i området, og innvirkning på høydemodellen avhenger av tetthet og type vegetasjon. Under følger figur 3.26 som viser flyfoto av området.



Figur 3.26 Flyfoto av analyseområde 2

Flyfotoet viser at det finnes noen trær i sør-vest og nord-øst i analyseområdet. Dette bekreftes ved å ta en titt på punktskyene fra de forskjellige blokkene. Ellers ser det ut til å være noe kratt langs bekken i dalbunnen. Det er nærliggende å tro at det vil være en viss forskjell i undervegetasjon fra tidlig august til sent oktober. Ulik vekstsesong kan forklare noe av høydedifferansen mellom D21 og D23. Tettere undervegetasjon kan gjøre at det ikke alltid er selve bakken, men undervegetasjonen over, som blir siste laserretur og dermed kan klassifiseres som bakke. En slik høydemodell vil kunne ligge noe høyere enn en høydemodell laserskannet under forhold uten like mye undervegetasjon. Blokka D20 derimot ble også laserskannet i oktober sammenlignet med D23, snaue to uker tidligere. Her kan man ikke anta at høydedifferansen mellom blokkene kan forklares i like stor grad med ulikt flytidspunkt, men noe forskjell kan denne tidsforskjellen muligens gi.

Det kan nå være interessant å ta en titt på punkttettheten og andelen bakkepunkter for de ulike blokkene i analyseområdet. Under følger en tabell med denne informasjonen.

Tabell 3.8 – Punkttetthet og andelen bakkepunkter i analyseområde 2

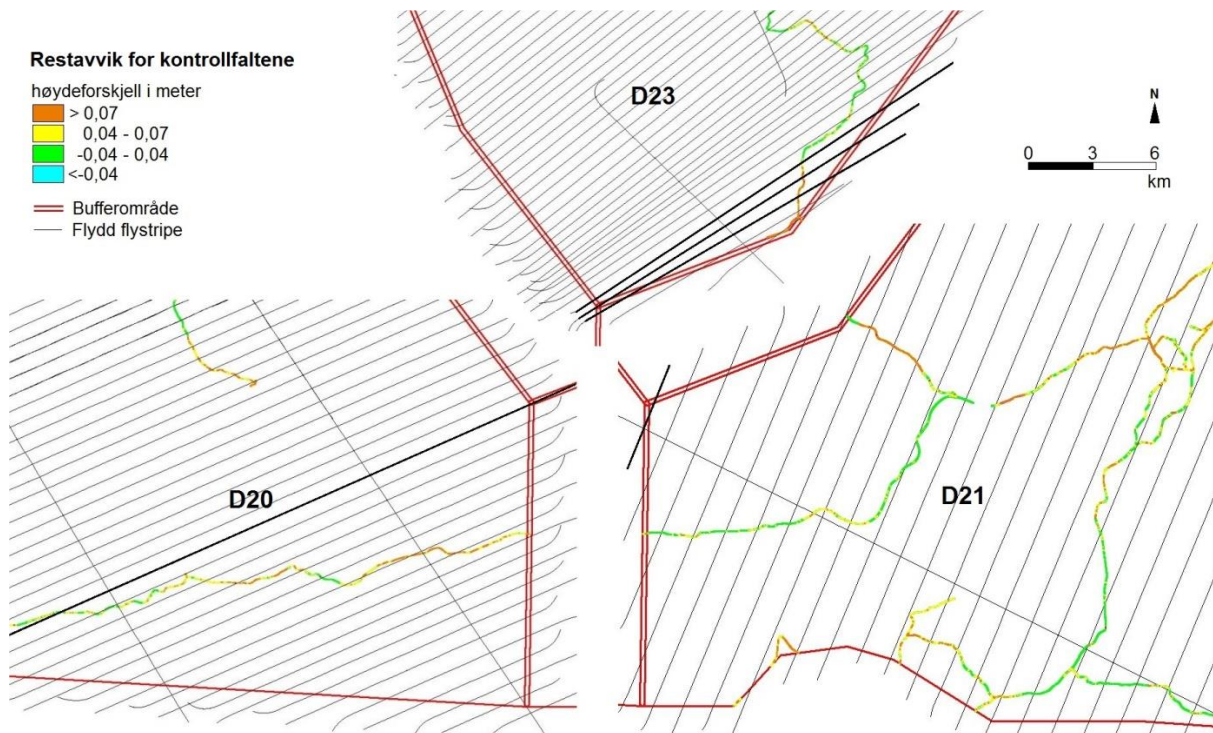
Tabellen viser punkttettheten og andelen bakkepunkter fra hver blokk for analyseområdet. Punkttettheten er vist som gjennomsnittet for hele blokka, og er oppgitt i punkter per kvadratmeter. Datoen for datainnsamlingen for hver blokk er også vist.

Område	Punkttetthet	Andel bakkepunkter	Dato
D20	3,7	85 %	9. oktober
D21	3,2	59 %	4. august
D23	9,3	43 %	20. oktober

Som vi ser av tabellen over er det stor forskjell i prosentandelen bakkepunkter for hver blokk i bufferområdet. Her kan man spørre seg om forskjellige innstillinger i bakkeklassifiseringsalgoritmen (som forklart i kapittel 2.4) vil påvirke andelen bakkepunkter. Fra tabellen kan det i første omgang se ut som blokka D20 har hatt en mer aggressiv filtrering til bakkepunkter i forhold til de to andre blokkene. Kan støy i bakkedatasettet for D20 forklare en høydeforskjell mellom D20 og D23? I kapittel 2.4 ble det beskrevet at det er vanlig å sile antallet bakkepunkter i områder med høy punkttetthet for å unngå støy i bakkedatasettet. Dette er forklaringen til at D23 har den laveste andelen bakkepunkter. Her er punkttettheten klart størst ettersom analyseområdet som nevnt er dekket av flere flystriper. Tar man høyde for flyvningsdatoene, og ulik vekstsesong, er det naturlig at D21 har lavere andel bakkepunkter enn D20. Mer løv på trærne og mer vegetasjon på bakken vil gjøre at en større del av laserpunktskyen for D21 er uklassifiserte punkter over bakken. Derfor er det ikke mulig å konkludere med at forskjellig innstillinger i bakkeklassifisering er årsaken til andelen bakkepunkter.

Videre vil resultatet av matchingen for de aktuelle linjene fra hver blokk bli studert. Ettersom analyseområdet ligger i kanten av hver blokk kan området ved matching bli vinklet noe både opp og ned. For å undersøke matchingen har restfeilen i kontrollflatejusteringen for punktskyen i forhold til kontrollflatene blitt analysert. I kapittel 2.5 ble det vist at kontrollflatejusteringen bestod av en felles høydejustering for blokka basert på et gjennomsnittlig avvik til de innmålte kontrollflatene. Det gjenværende avviket til punktskyen i forhold til kontrollflatene er illustrert i figur 3.27. Her ser vi at kontrollflatene består av hjulspor som diskutert i kapittel 2.5. Flystripene som dekker analyseområdet er uthevet. Fargevisningen for figuren er noe misvisende ettersom større positiv høydeforskjell dekker over de negative høydeforskjellene. Likevel gir figuren en visuell pekepinn på hvordan

restfeilene er fordelt. Positiv verdi på figuren under viser at punktskyene ligger under de innmålte kontrollflatene i det aktuelle området.

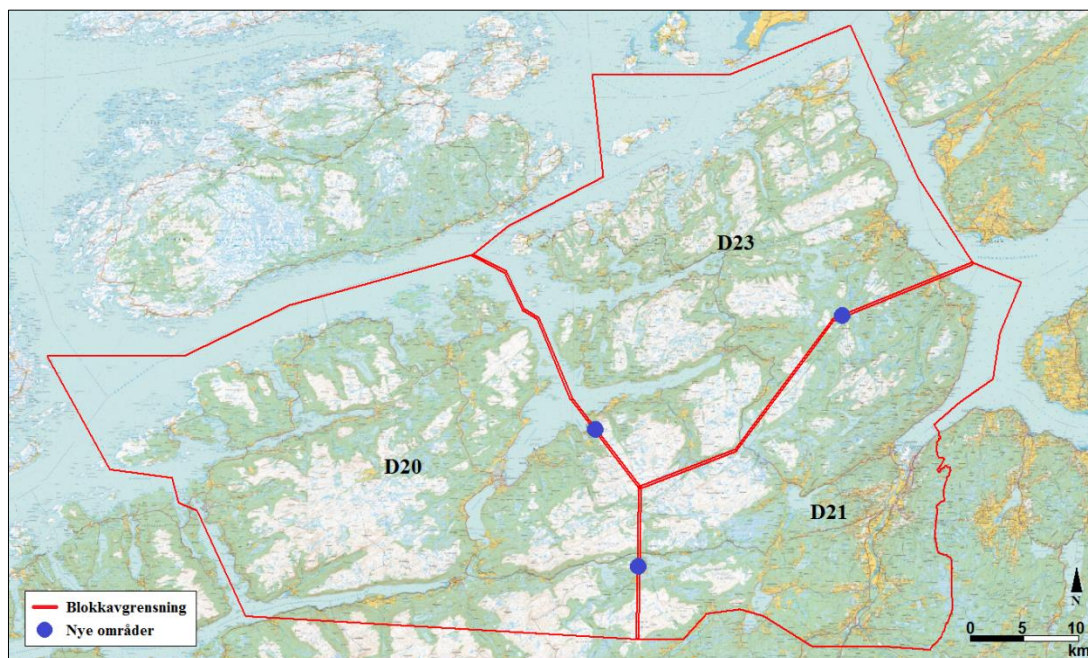


Figur 3.27 Restavvik til kontrollflater etter kontrollflatejustering

For blokka D23 ser det ut til at punktskyen ligger lavere enn kontrollflatene for de fem sørligste flystripene, deriblant de tre flystripene som dekker analyseområdet. Fra de faktiske restavvikene ser det ut til at det gjennomsnittlige avviket i dette området ligger på rundt fire cm. For blokka D21 krysser ikke den korte flystripen (som dekker analyseområdet) over noen kontrollflater. Flystripen vil bli påvirket av naboflystripene under matchingen. Der disse naboflystripene krysser kontrollflaten ser det ut til at punktskyen ligger høyere enn kontrollflaten. Gjennomsnittlig ser det ut til at dette avviket ligger på rundt minus tre cm. Dermed ligger punktskyen for D21 i motsatt vertikal retning enn D23 i forhold til kontrollflatene. For blokka D20 er de tilsvarende verdiene rundt null cm. Dette betyr at det kan se ut til at resultatet av matchingen for blokkene har gjort at analyseområdet for blokkene D21 og D23 er vippet i motsatt retning. Retningen blokkene er vippet i tilsvarer retningsforskjellen for høydeavviket i tabell 3.7. Dermed kan det virke som at resultatet av matching kan ha forårsaket noe av den målte høydedifferansen mellom blokkene. Forskjellene funnet i matching mellom blokk D20 og D23 vil også gjøre at høydeavviket mellom blokkene kunne vært mindre.

Figuren 3.27 viser også faktorer som kan påvirke påliteligheten av matchingen og nøyaktigheten til høydemodellen. En kort flystripe slik D21 har vil kunne øke unøyaktigheten til navigasjonsløsningen for den aktuelle flystripen. Det faktum at analyseområdet ligger nærmest en tverrstripe for denne flystripen har positiv effekt i matchingen. At alle de tre flystripene for blokk D23 er flydd samme vei gir større unøyaktighet i matchingen, som tidligere omtalt.

For å undersøke i hvilken grad høydedifferansen mellom blokkene kan forklares med resultatet av matchingen, er det analysert høydedifferanse mellom blokkene i andre steder av bufferområdet. Her er det blitt brukt datasett fra den automatisk klassifiserte leveransen, ettersom kun en av blokkene er manuelt redigert (og dermed også endelig levert) i denne oppgavens tidsrom. Fokuset i den manuelle redigeringen er på områder som ofte har feilklassifisert punkter, slik som bebyggelse, tettere vegetasjon og skarpe kanter. Ved å unngå slike områder vil en analyse mellom høydemodeller fra den automatisk klassifiserte leveransen inneholde færre feilklassifiserte punkter, og ofte være tilnærmet identisk med en analyse av den endelige leveransen. Figuren 3.28 viser plasseringen av de nye områdene som er blitt analysert basert på automatisk klassifiserte datasett. Plasseringen ble valgt tilfeldig, men basert på kriteriene over.



Figur 3.28 Plasseringen av de nye analyseområdene

De nye analyseområdene er omtrent like store som området som ble analysert mellom blokkene A43 og A44 tidligere. Det vil si 1000 meter langs bufferområdet, som er 200 meter bredt. Metoden i analysen av høydedifferanse mellom blokkene følger samme prosedyre som

for de tidligere analysene. Metoden er omtalt i kapittel 3.3.2. I tabellen under følger resultatene av analysen.

Tabell 3.9 – Høydedifferanse mellom blokkene i de nye analyseområdene

Tabellen viser gjennomsnittsverdier for høydedifferanse med tilhørende standardavvik for de nye analyseområdene. Verdiene er oppgitt i meter.

Blokker	Snitt	St.avvik
D20 – D21	-0,02	0,08
D20 – D23	0,00	0,15
D21 – D23	-0,04	0,12

Tabellen viser at forskjellen mellom blokkene avtar sammenlignet med tabell 3.7. Det kan virke som at blokkenes sammenfaller mer når man ikke lenger er helt i kanten av områdene. Dette kan bety at matchingen har spilt en stor rolle i høydeavvikene som ble oppdaget i tabell 3.7. Forholdet mellom D21 og D23 fra tabell over tyder ikke på at forskjellig vekstsesong under laserskanningen har spilt en avgjørende rolle. Argumentet om høyere undervegetasjon ser ikke ut til å stemme ettersom D21, skannet tidlig i august, ligger noe lavere enn D23. Dermed antas det at matchingen er hovedårsaken til avvikene oppdaget i tabell 3.7.

4 Konklusjon

Vil den nasjonale detaljerte høydemodellen være homogen til tross for at forskjellige firmaer og lasersensorer er involvert?

Spørsmålet over står skrevet i kapittelet om denne oppgavens mål og problemstilling. I løpet av denne oppgaven har målet vært å komme et steg nærmere svaret på dette spørsmål.

I kapittel 2 om leverandørprosedyren i prosjektet, ble det vist hvilke prosesser som utføres for å fremstille den nasjonale høydemodellen. Det ble også vist hvilke tiltak som er gjort i håp om å forsterke homogeniteten mellom blokkene prosessert av forskjellige firmaer. Tiltak som lik programvare i prosesseringen og kontrollflatejustering til datasett på tvers av blokkene vil kunne øke homogeniteten til produktet. Kartverkets standarder og produktspesifikasjoner som gjelder for prosjektet, vil også bidra positivt til homogeniteten. Ulik programvare i navigasjonsprosesseringen, ulik bakkeklassifiseringsalgoritme og ulike underleverandører for manuelt etterarbeid vil kunne redusere homogeniteten mellom blokkene prosessert av forskjellige firmaer. I tillegg til ulikheter i leverandørprosedyren, vil ulike lasersensortyper benyttet i prosjektet kunne redusere homogeniteten.

I analysen av laserpunktfordelingen ble det vist at forskjellig måte å fordele laserpunktene kan gi ulikt mønster på den leverte terrengmodellen. Det ser ut til at en lasersensor utstyrt med oscillerende speil i skannerne gir et linjemønster i terrengmodellen på tvers av flyretningen. I så måte kan dette betraktes som inhomogenitet mellom de leverte blokkene basert på hvilken type skannemekanisme lasersensoren er utstyrt med.

I analysen av det første området ble høydeforskjellen mellom terrengmodellene fra Riegl 1560 (Blom) og Optech Titan (Terratec) analysert. Analysen viste at den gjennomsnittlige høydeforskjellen mellom terrengmodellene viste stor grad av homogenitet. I enkelte lokale områder ser det ut til at helning øker høydeforskjellen mellom terrengmodellene. Etter diskusjoner i kapittel 3.2 kan det virke som om ulik skannevinkel for lasersensorene kan være årsaken til høydedifferansen mellom terrengmodellene i helningen. Der den ene lasersensoren er plassert på ugunstig side av helningen under skanningen, ser det ut til lasersensorenes terrengmodell har økt høydedifferanse. Det kan se ut som at bakkepunkttheteten synker når lasersensoren skanner en helning fra ugunstig side kontra gunstig side. En slik inhomogenitet skyldes neppe lasersensorenes eller firmaenes ulikheter, men kan oppstå ved ulik skannevinkel. For NDH-prosjektet vil de oppdagede høydeforskjellene kunne være av mindre

betydning. For prosjekter eller områder som har høyere nøyaktighetskrav kan differansene likevel bli vesentlige. For å unngå den diskuterte høydeforskjellen mellom terrengmodellene, kan en løsning være å laserskanne med større maksimum skannevinkel. Med den samme flyplanen som i dag vil man derfor få flere områder med overlapp, og mindre sjanse for skanning i ugunstig vinkel i forhold til helning. I dag slettes mye av laserdataen som allerede blir innsamlet, og inkludering av disse kan hjelpe på problemet.

I analysen av det andre området ble det analysert høydeforskjeller mellom terrengmodellene fra Leica ALS80 (COWI), Riegl 1560 (Blom) og Leica ALS70 (Terratec). Analysen viste at den gjennomsnittlige høydeforskjellen var overraskende stor og inhomogeniteten mellom datasettene var vesentlig. Laserskanning i ulike vekstsesonger kan ha påvirket homogeniteten noe. Det så ut til at justeringen i matchingen har vippet terrengmodellene i forskjellig høyderetning. Også i dette analyseområdet kan det se ut til at inhomogeniteten skyldes feilkilder i prosessen med å lage en laserpunktsky, fremfor lasersensorenes og firmaenes ulikheter. For NDH-prosjektet vil de oppdagede høydeforskjellene kunne være av betydning, og kan med fordel forsøkes utbedret. Det analyserte området kan virke som et verst tenkelig tilfelle når det kommer til resultatet av matchingen, området ligger helt i kanten av hver NDH-blokk. Her kan ofte flyplanleggingen ende opp med uønskede løsninger, som en kort flystripe er et eksempel på. En mer vinkelrett blokkavgrensning fra Kartverket vil kunne bedre et slikt problem. For leverandørene kunne det vært positivt å samkjøre både flyplan og matching for å unngå en inhomogen matching mellom blokkene. For et utsatt overlappsområde kan flyplanleggerne strekke eventuelle tverrstriper et antall flystripers bredde inn i naboblokkene. Laserpunktene fra disse tverrstripene, samt de berørte flystripene, kunne blitt delt mellom firmaene og inkludert i matchingen av hver separat blokk. Da kunne man fått en mer homogen matching mellom blokkene.

Det er viktig å presisere at analysen av bufferområdene ikke har inneholdt kontrollmålte høyder i analyseområdene. Innmålte kontrollflater ville vært særdeles interessant som bakgrunn for konklusjonen. Det er også viktig å huske på at all analyse av høydedifferansene i bufferområdene har en ekstra unøyaktighet knyttet til metoden i analysen.

Så tilbake til spørsmålet. Vil den nasjonale detaljerte høydemodellen være homogen til tross for at forskjellige firmaer og lasersensorer er involvert? Fra analysen av høydedifferansen mellom blokkene i bufferområdene kan det virke slik. Differansene som er funnet, og konklusjonene som er tatt, berøres ikke av at prosjektet gjennomføres av flere firmaer som benytter forskjellige lasersensorer, men til unøyaktigheter og problemer knyttet til flybåren

laserskanning generelt. Når det gjelder funnene i variasjonen i laserpunktfordelingen vil dette gi en inhomogenitet mellom blokkene som skyldes bruk av ulike lasersensorer. Grensen for hva som regnes for homogen terrengmodell vil avgjøre om ulike lasersensorer i bruk på NDH gir inhomogenitet. Kvaliteten til høydemodellen ser ikke ut til å bli nevneverdig påvirket.

I løpet av denne oppgaven har Terratec kjøpt opp Blom Nordic. Videre har Terratec nylig kjøpt to nye Riegl-sensorer. Terratec og Blom står samlet for 90 % av datainnsamlingen og prosesseringen i NDH-prosjektet. Terratec har samlet laserprosesseringen på et produksjonssted. Oppkjøpet vil dermed redusere de forskjellige ulikhetene som ble funnet i produksjonsprosessen. Med to nye Riegl-sensorer vil inhomogeniteten som følge av forskjellig laserpunktfordelingen også reduseres. Utfordringene diskutert i analysen av bufferområdene vil fortsatt være gjeldende.

5 Referanser

- BLAIS, F. 2004. Review of 20 years of range sensor development. *Journal of Electronic Imaging*, 13, 231-243.
- KARTVERKET 2009. Norges offisielle høydesystemer og referansenivåer.
- KARTVERKET 2013. Produktspesifikasjon nasjonal modell for høydedata fra laserskanning (FKB-Laser).
- KARTVERKET 2015. Produksjon av basis geodata.
- KARTVERKET. 2016a. *Områder og planer for datafangst 2016* [Online]. <http://www.kartverket.no/Prosjekter/Nasjonalt-detaljert-hoydemodell/omrader-og-status-datafangst-2016/>. [Accessed 6.10. 2016].
- KARTVERKET. 2016b. *Terrengmodeller - land* [Online]. <http://www.kartverket.no/data/Kartdata/Terrengmodeller/Terrengmodell-10-meters-grid/>. [Accessed 06.10. 2016].
- KRAUS, K. & PFEIFER, N. 1998. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and remote Sensing*, 53, 193-203.
- LIU, X. 2008. Airborne LiDAR for DEM generation: some critical issues. *Progress in Physical Geography*, 32, 31-49.
- MENG, X., CURRIT, N. & ZHAO, K. 2010. Ground Filtering Algorithms for Airborne LiDAR Data: A Review of Critical Issues. *Remote Sensing*, 2, 833.
- NEON 2014. How does LiDAR work. National Ecological Observatory Network.
- PFEIFER, N. & BRIESE, C. 2007. Geometrical aspects of airborne laser scanning and terrestrial laser scanning. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36, 311-319.
- SZADKOWSKI, A. 2016. Presentasjon flybåren laserskanning.
- VOSSSELMAN, G. 2000. Slope based filtering of laser altimetry data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 33, 935-942.
- VOSSSELMAN, G. & MAAS, H.-G. 2010. *Airborne and Terrestrial Laser Scanning, chapter 1* by Jean-Angelo Beraldin, Francois Blais and Uwe Lohr, Whittles Publishing.