



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2022 30 stp
Fakultet for realfag og teknologi

Filtrering av LiDAR-punktsky for opprettelse av nøyaktig DTM – En prestasjonsanalyse av to punktskybehandlingssystem

Filtering of LiDAR point cloud with respect to
creating precise DEM – A performance analysis of
two selected point cloud SW-packages

Vegard Fiane Pedersen
Geomatikk

Forord

En stor interesse for samferdselsutbyggingsprosjekter kombinert med en iboende nysgjerrighet for LiDAR punktskybehandlingssystemer har inspirert til denne oppgaven. Arbeidet har vært en interessant, krevende og lærerik prosess, der jeg nå står igjen med mange gode faglige erfaringer.

Jeg vil gjerne rette en stor takk til min veileder, Ivar Maalen-Johansen, som har bidratt med stødig veiledning og ledet meg i riktig retning gjennom prosessen. En hjertelig takk rettes til min familie, for støtte og korrekturlesing.

Jeg håper denne oppgaven kan vekke en interesse for utforskning av punktskybehandlingssystemer til ulike formål, for dem som leser den. Jeg håper også den kan bidra med nyttig informasjon om de ulike punktskybehandlingssystemene.

Ås, 16. Mai 2022

Vegard Fiane Pedersen

Sammendrag

Reguleringsplanlegging av modellbaserte veiprosjekter krever digitale terrengmodeller med god høydenøyaktighet. Slike modeller opprettes fra bakkepunkter i punktskyer fra laserskanning, som beskriver både terrengoverflate og objekter i et aktuelt område. Det er derfor nødvendig med gode filtreringsalgoritmer for klassifisering av terrengoverflaten.

Formålet til dette forsøket er å undersøke egnetheten punktskybehandlingssystemene *ALDPAT* og *QTM* har til filtrering av LiDAR-punktskyer. Denne filtreringen er gjort med hensyn til opprettelse av digitale terrengmodeller til reguleringsplanleggingsfasen for modellbaserte veiprosjekter etter håndbok V770 Modellgrunnlag fra Vegdirektoratet.

Grenstøl i Tvedestrand kommune, innenfor avgrensningen til veiprosjektet E18 Tvedestrand – Arendal, som stod ferdig i 2019 er valgt som forsøksområde. Fem testområder som representerer terreng og vegetasjonsvariasjonene i det aktuelle området er valgt. Tre av dem er videre klassifisert som vegetasjon og to som harde flater.

Datasettene som benyttes stammer fra laserskanning fra helikopter utført i forbindelse med oppstart for utbyggingen av prosjektet i 2016. Disse består av en punktsky per testområde, og en DTM for hele området, som er hentet fra forvaltningsløsningen høydedata.no. DTM er brukt som sammenligningsgrunnlag, mens punktskyene er filtrert med fire ulike filtreringsalgoritmer i *ALDPAT*, og med en filtreringsalgoritme i *QTM*. Videre er det foretatt geometrisk kontroll av høydeavvikene mellom DTM-er opprettet fra de filtrerte punktskyene og sammenligningsgrunnlaget.

Resultatene fra den geometriske kontrollen viser god evne til filtrering for begge punktskybehandlingssystemene. For alle filtrene er det i enkelte testområder høy prosentandel grove feil. Ett av de to harde testområdene ble som følge av dette utelukket. For det gjenværende harde testområdet presterer *QTM* aller best. *QTM* virker også å prestere svært godt i de vegeterte områdene, men ulike filtreringsalgoritmer i *ALDPAT* viser antydninger til å egne seg bedre. Med bakgrunn i benyttede datasett, testområder og resultater fra geometrisk kontroll av høydeavvik er det indikasjoner til at *QTM* er det totalt sett best egnede punktskybehandlingssystemet til formålet.

Nøkkelbegreper: Punktskybehandlingssystem, *ALDPAT*, *QTM*, filtreringsalgoritmer, DTM, Sammenligning.

Abstract

Zoning planning for model-based road projects are dependent on good digital elevation models with high absolute height accuracy. Digital elevation models are created from ground points in point clouds derived from laser scanning. These contain many points that describe both the terrain surface and objects. Good filtering algorithms for classification of the terrain surface in point clouds are therefore necessary.

The target of this survey is to examine the filtering suitability for the point cloud software packages *ALDPAT* and *QTM*. The filtering is done with respect to creating digital elevation models used for zoning planning for model-based road projects according to handbook V770 *Modellgrunnlag* from The Norwegian Public Roads Administration.

Grenstøl in Tvedestrand municipality, within the delamination of the road project E18 Tvedestrand - Arendal completed in 2019, is chosen as test area for the survey. Five areas are selected to represent the terrain and vegetation variations in the area in question. Three are classified as vegetation and two as hard surfaces.

The data in use originated from airborne laser scanning from helicopter at the start of construction in 2016. All data is acquired from The Norwegian Mapping Authority's domain, høydedata.no. They consists of one point cloud per test site, and one DEM covering the entire area. The five point clouds are filtered by four filtering algorithms in *ALDPAT*, and by one filtering algorithm in *QTM*. The DEM is used as a basis for comparing height differences of the filtered point clouds. A geometric control is performed on the observed height differences between the filtered point clouds and DEM.

From the geometric control of the height differences, both point cloud software packages show good filtering capability. For all the filters, there is a high percentage of gross errors in some test areas. One of the two hard test areas is excluded due to this. For the remaining test surface with solid surface, *QTM* seems to perform best. *QTM* also seems to perform very well in the vegetated areas, but various filtering algorithms in *ALDPAT* shows hints of being more suitable. Based on the data sets used, test areas and results from geometric control of height deviations, there are indications that *QTM* is the overall most suitable point cloud processing system for the purpose.

Keywords: Point cloud software, ADLPAT, QTM, filtering algorithms, DTM, Comparison.

Innholdsfortegnelse

Forord	I
Sammendrag	III
Abstract	V
Innholdsfortegnelse	VII
Figurliste.....	X
Tabelliste	XII
Formelliste.....	XIII
Forkortelser	XIV
1. Introduksjon	1
1.1 Problemstilling.....	2
1.2 Om oppgaven.....	2
1.3 Om området	2
1.4 Tidligere forskning	3
2. Teoretisk bakgrunn.....	5
2.1 Filtrering av punktsky.....	5
2.1.1 ETEW	5
2.1.2 PM	6
2.1.3 MLS.....	8
2.1.4 ATIN	9
2.2 Klassifisering	9
2.3 DTM	11
2.3.1 GRID	11
2.3.2 TIN	11
2.3.3 Helningsrelieff.....	12
2.4 Litteratursøk LiDAR-programvarer	12
2.4.1 LiDAR Prosesseringsprogramvarer	12
2.4.2 Filtreringsprogramvarer for LiDAR.....	13
3. Metode.....	15
3.1 Litteratursøk.....	15
3.1.1 Valgt programvare.....	15
3.1.2 <i>LAStools</i>	15
3.2 Maskinvare og programvare	16
3.2.1 Programvarer og tilleggsmoduler	16
3.2.2 Filformater.....	17
3.2.3 Maskinvare	20

3.3	Datagrunnlaget.....	21
3.3.1	Høydedata.....	21
3.3.2	Tilgjengelige datasett Høydedata	22
3.3.3	Valg av datasett	22
3.3.4	E18 Tvedestrand-Arendal 2016	23
3.3.5	DTM Høydedata.....	24
3.3.6	Sensor	25
3.4	Preprosessering	26
3.4.1	Opprettelse av testområder.....	26
3.4.2	Fil-konvertering.....	29
3.4.3	Opprettelse av kontrollpunkter.....	30
3.4.4	Uttrekk av punktinformasjon fra differensiert DTM.....	32
3.5	Sammenligningsgrunnlag	34
3.5.1	Punktsky	34
3.5.2	DTM	34
3.6	Kvalitetsmål.....	34
3.6.1	Kontrollmålinger	35
3.6.2	Systematisk avvik.....	36
3.6.3	Standardavvik.....	37
3.6.4	RMS	37
3.6.5	Grovfeilsøk.....	38
3.7	Geometrisk kontroll	38
3.7.1	Kontrollmålinger	38
3.7.2	Grovfeilsøk.....	38
3.7.3	Systematisk avvik, Standardavvik og RMS	39
3.7.4	Kontroll	39
3.8	Filtrering <i>ALDPAT</i>	40
3.8.1	Pilot	41
3.8.2	ETEW	43
3.8.3	PM	44
3.8.4	MLS.....	45
3.8.5	ATIN	46
3.9	Filtrering <i>QTM</i>	47
3.9.1	Above Ground Level Analyst	47
3.10	Opprettelse DTM	50
3.10.1	Opprettelse DTM.....	50
3.10.2	Eksportering DTM	54

3.10.3	Differensiert DTM.....	55
4.	Resultater.....	57
4.1	Filtrering Punktskyer	57
4.2	Opprettelse DTM.....	61
4.2.1	Differanse modeller.....	62
4.3	Geometrisk kontroll.....	65
4.3.1	Grove feil.....	65
4.3.2	Systematisk avvik, standardavvik og RMS.....	67
4.3.3	Kontroll av systematisk avvik.....	68
5.	Diskusjon.....	69
5.1	Diskusjon resultater	69
5.1.1	Reduksjon av filstørrelse	69
5.1.2	Differansemodeller.....	70
5.1.3	Grovfeilsøk.....	72
5.1.4	Systematisk avvik, standardavvik og RMS.....	73
5.1.5	Kontroll systematisk avvik.....	74
5.1.6	Oppsummering	74
5.2	Metodediskusjon.....	76
5.2.1	Sammenligningsgrunnlaget.....	76
5.2.2	Kontrollmålinger	76
5.2.3	Konvertering filformater	76
6.	Konklusjon	77
6.1	Veien videre.....	77
7.	Litteraturliste	78
8.	Vedlegg	1
	Vedlegg 1 – Tabell estimerte statistiske verdier geometrisk kontroll i meter og prosent.....	1

Figurliste

Figur 1: Eksempel på rå (nede venstre) og filtrert LiDAR-punktsky (nede høyre) ved bruk av ETEW og gjenværende punkter for iterasjon nummer en til og med fem med ETEW sammen med original punktsky (oppe) (Zhang & Cui, 2007).....	6
Figur 2: Prosessering med progressivt morfologisk filter for å identifisere terreng og bygninger. Punktene representerer kunstige punkter basert på LiDAR-måling. Første filtreringsiterasjon av terrengoverflaten (stiplet linje) finnes ved en åpningsoperasjon med et filtreringsvindu på 15 meter av den ufiltrerte punktskyen. Andre iterasjon av terrengoverflaten (heltrukket linje) finnes ved en åpningsoperasjon med et filtreringsvindu på 21 meter. Terrengoverflatepunktene beholdes ettersom høydedifferansen mellom punktene og den filtrerte overflaten er mindre enn høydedifferanseskelen. Bygningpunktene ekskluderes ettersom høydedifferansen mellom den filtrerte terrengoverflaten til punktene overstiger høydedifferanseskelen. (Zhang & Cui, 2007).....	8
Figur 3: Oversikt over hierarkiet for TIFF-filformatet (Mahammad & Ramakrishan, 2009a).	19
Figur 4: Skjermdump av FvL Høydedata til Kartverket for høydedata (02.04.2022.)	21
Figur 5: Skjermdump FvL Høydedata utstrekning eksportert prosjekt-DTM (Utsnitt Kartverket DTM dekning, 02.04.2022).....	24
Figur 6: Skjermdump eksporteringsvalg DTM E18 Tvedestrand-Arendal 2016 (0.25m).....	24
Figur 7: Opprettelse av regulært rutenett i med <i>QGIS</i> -funksjonen "Lag rutenett".	26
Figur 8: Opprettelse av helningsrelieff med rasterverktøyet "Helning" i <i>QGIS</i>	27
Figur 9: Utsnitt terrenghelningsraster generert i <i>QGIS</i> fra Høydedata DTM fra prosjekt E18 Tvedestrand-Arendal fra Høydedata 2016. Testområder markert med gule rektangler og nummer: 1. Fiane-svingen, 2. Fløyheia, 3. Bergsmyr, 4. Grenstøl og 5. Bergsmyr.	28
Figur 10: Sammenstilling av skjermdumper av DOM fra FvL Høydedata for alle testområder	29
Figur 11: Opprettelse av regelmessige punkt i <i>QGIS</i> innenfor utstrekningen av et testområde i ETRS89 / UTM sone 32N. Punktavstand satt til tre meter og forskyvning fra øvre venstre hjørne satt til tre meter.	31
Figur 12: Opprettede kontrollpunkter innenfor testområdeavgrensing for testområde 4 vist over helningsrelieff.	32
Figur 13:Uttrekk av høydeavvik for regelmessige punkt fra falsk-normalisert DTM med <i>QGIS</i> -verktøyet "Ta stikkprøver fra rasterverdier".	33
Figur 14: Illustrasjon av systematisk avvik og standardavvik for kontrollmåling av punktsky mot referansegrunnlag (Statens kartverk, 2022).	35
Figur 15: Worksheet og tilgjengelige filtreringsalgoritmer i <i>ALDPAT</i>	40
Figur 16: <i>ALDPAT</i> Worksheet før klargjort til prosessering.	41
Figur 17: Parametere ETEW <i>ALDPAT</i>	43
Figur 18: Parametere PM <i>ALDPAT</i>	44
Figur 19: Parametere MLS <i>ALDPAT</i>	45
Figur 20: Parametere ATIN <i>ALDPAT</i>	46
Figur 21: "Parameterne Grid Sampling" og "Max Object Size" for bakkefiltrering med filtreringsalgoritmen LidarSense i AGL Analyst i <i>QTM</i>	48
Figur 22: Fordelingen av relative terrenghøyder i AGL Analyst i <i>QTM</i> etter filtrering med LidarSense og uttrekkshøyder for filtrert punktsky.	49
Figur 23: Initial parametere for konvertering av punktsky til DTM i <i>QTM</i>	50
Figur 24: Skjermdump <i>QTM</i> Gridding Options for algoritmer for bestemmelse av høydeverdi i DTM.	52

Figur 25: Skjermdump <i>QTM</i> Gridding Options for metoder for interpolering av "null" verdier.	53
Figur 26: Parametere for opprettelse av DTM fra punktsky i <i>QTM</i>	53
Figur 27: Skjermdump Rasterkalkulator i <i>QGIS</i> for normalisering av filtrert DTM mot sammenligningsgrunnlag.	56
Figur 28: Sammenstilling av skjermdumper fra <i>QGIS</i> av ufiltrert punktsky, ETEW-, PM-, MLS-, ATIN- og <i>QTM</i> -filtrert punktsky for testområde en.....	57
Figur 29: Sammenstilling av skjermdumper fra <i>QGIS</i> av ufiltrert punktsky, ETEW-, PM-, MLS-, ATIN- og <i>QTM</i> -filtrert punktsky for testområde to.	58
Figur 30: Sammenstilling av skjermdumper fra <i>QGIS</i> av ufiltrert punktsky, ETEW-, PM-, MLS-, ATIN- og <i>QTM</i> -filtrert punktsky for testområde tre.	58
Figur 31: Sammenstilling av skjermdumper fra <i>QGIS</i> av ufiltrert punktsky, ETEW-, PM-, MLS-, ATIN- og <i>QTM</i> -filtrert punktsky for testområde fire.	59
Figur 32: Sammenstilling av skjermdumper fra <i>QGIS</i> av ufiltrert punktsky, ETEW-, PM-, MLS-, ATIN- og <i>QTM</i> -filtrert punktsky for testområde fem.	59
Figur 33: Prosentandel av gjenværende opprinnelig LAS-filstørrelse for <i>ALDPAT</i> - filtreringsalgoritmer per testområde.....	60
Figur 34: Prosentandel av gjenværende LAS-filstørrelse for alle filtreringsalgoritmer per testområde.	60
Figur 35: DTM generert fra filtreringsalgoritmen <i>LIDARSense</i> i <i>QTM</i> for testområde to.	61
Figur 36: Differansemodell i meter fra DTM fra høydedata og DTM generert i <i>QTM</i> fra preklassifisert terrengpunkter.	62
Figur 37: Differansemodell for alle filtreringsalgoritmer i testområde en.	63
Figur 38: Differansemodell for alle filtreringsalgoritmer i testområde to.....	63
Figur 39: Differansemodell for alle filtreringsalgoritmer i testområde tre.	64
Figur 40: Differansemodell for alle filtreringsalgoritmer i testområde fire.	64
Figur 41: Differansemodell for alle filtreringsalgoritmer i testområde fem.	65
Figur 42: Prosentandel grovfeil for hver filtreringsalgoritme per testområde samt aggregert for alle testområder sett mot grensen på 5 % grovfeil.	66
Figur 43: Største absolutte grove feil verdi i meter for alle filtreringsalgoritmer per testområde.	66
Figur 44: Systematisk avvik med tilhørende standardavvik i meter for alle filtreringsalgoritmer per testområde og aggregert for alle testområder.	67
Figur 45: Beregnet RMS sammenlignet med standardavvik for alle filtreringsalgoritmer per testområde.	68
Figur 46: Kontroll av systematisk avvik mot krav på både 3 cm og 6 cm for alle filtreringsalgoritmer per testområde.....	68

Tabelliste

Tabell 1: Standard klasser for leveranse av punkttskyer etter FKB-Laser versjon 2.0 i LAS-formatet (Statens kartverk, 2013).....	10
Tabell 2: Standard klasser for leveranse av punkttsky etter FKB-Laser versjon 3.0 i LAS-formatet.	10
Tabell 3: LAS 1.4 Format definisjon (ASPRS, 2019).....	17
Tabell 4: Maskinpark tilgjengelig til prosesseringsoppgaver.....	20
Tabell 5: Tilgjengelige LiDAR-prosjekt, måleplattform, bestilt punktetthet og punktetthet gitt av prosjektrapport i aktuelt forsøksområde. ¹ <i>Pkt. m2</i> , er punktetthet oppgitt i antall punkt (pkt.) per kvadratmeter <i>m2</i> . ² <i>B</i> representerer bestilt punktetthet fra oppdragsgiver. ³ <i>P</i> representerer prosjektets gjennomsnittlige punktetthet.	22
Tabell 6: Informasjon om testområder. ¹ Ellipsoidisk areal i kvadratmeter <i>m2</i> for testområdet i ETRS89 / UTM 32N. ² Punktetthet <i>pkt. m2</i> gitt fra antall punkt innenfor arealet av hvert testområde. ³ Totalt antall ufiltrerte punkt i punkttskyen. ⁴ Høydeverdi i meter <i>m</i> fra Z-verdi i punkttsky.	23
Tabell 7: Originalt filnavn og prosesseringsfilnavn for punktskydata fra Høydedata for hvert testområde.	23
Tabell 8: Informasjon om sensorer og parametere for datainnsamling av punktskydata for prosjektet E18 Tvedestrand-Arendal 2016 (TerraTec, 2016).	25
Tabell 9: Antall kontrollpunkter og punktetthet per testområde opprettet i <i>QGIS</i> til uttrekk av høydeavvik. ¹ Punktetthet <i>Pkt. m2</i>	30
Tabell 10: Terrengdefinisjon, antall stikkprøver og utstrekning av testområder.	35
Tabell 11: Kategorier for stedfestingsnøyaktighet (Vegdirektoratet, 2022).	36
Tabell 12: Krav til standardavvik for absolutthøydenøyaktighet og grove feil for harde flater og vegetasjon i meter.....	38
Tabell 13: Verdier for parametere benyttet for filtrering med ETEW-algoritmen for alle fem testområder.	43
Tabell 14: Verdier for parametere benyttet for filtrering med PM-algoritmen for alle fem testområder.	44
Tabell 15: Verdier for parametere benyttet for filtrering med MLS-algoritmen for alle fem testområder.	45
Tabell 16: Verdier for parametere benyttet for filtrering med ATIN-algoritmen for alle fem testområder.	46

Formelliste

Formel 1: Sammenligning for høydedifferanse i ETEW-filter vindu mot høydeterskel (Zhang & Cui, 2007).....	5
Formel 2: Høydeterskel for sammenligning av høydedifferanse i ETEW-filtrering (Zhang & Cui, 2007).....	5
Formel 3: Vindusstørrelse for beregning av høydeterskel ETEW-filtrering (Zhang & Cui, 2007).....	5
Formel 4: Bestemmelse av høydeforskjellsterskel mellom avledet sekundærflate og opprinnelig flate for PM-filter (Zhang & Cui, 2007).....	7
Formel 5: Beregning av bakkepunkter for filtreringsalgoritmen MLS (Zhang & Cui, 2007).....	8
Formel 6: Beregning av helningsrelieff ved konvulsjon av høydevariasjonsraster (Vosselman et al., 2010).....	12
Formel 7: Beregning av systematisk høydeavvik (Statens kartverk, 2015).....	36
Formel 8: Beregning av standardavvik baser på kontrollmålinger (Statens kartverk, 2015).....	37
Formel 9: Beregning av høydeavvik mellom referansepunkt og filtrert punkt (Suleymanoglu & Soycan, 2019).....	37
Formel 10: Beregning av RMS (Suleymanoglu & Soycan, 2019).....	37

Forkortelser

ATIN	Adaptive TIN
CSV	Comma Separated Values
DOM	Digital overflatemodell
DTM	Digital terrengmodell
ETEW	Elevated Threshold With Expand Window
FKB	Felles Kartdatabase
FLS	Flybåren laserskanning
FvL	Forvaltningsløsningen
IPF	Iterative Polynomial Fitting
LiDAR	Light Detection And Ranging
MCC	Multiscale Curvature Classification
MLS	Maximum Local Slope
NDH	Nasjonal detaljert høydemodell
RMS	Root Mean Square
TIN	Triangulert Irregulært Nettverk

1. Introduksjon

Planleggingen og prosjekteringen av store veiprosjekter er svært kompleks og arbeidskrevende. Hvordan dette arbeidet har vært utført har endret seg i takt med den teknologiske utviklingen. Der det tidligere ble anvendt 2D-plantegninger på folie, førte denne utviklingen på 1980- og 1990-tallet til at arbeidet ble flyttet over til dataassistert konstruksjon (Statens Vegvesen, u.å.-a).

Omtrent samtidig som laserskannerteknologien ble tatt aktivt i bruk til kartlegging av terreng på 2000-tallet, forflyttet også den digitale prosjekteringen seg fra 2D-tegninger til 3D-geometri. Stadig teknologisk utvikling har i dag ført denne prosjekteringen videre mot informasjonsmodellering, der informasjon om alle objekter i ulike digitale modeller defineres sammen med avhengigheter mellom objekter (Statens Vegvesen, u.å.-a).

Krav til informasjon som skal følge modellene i et modellbasert veiprosjekt er i dag varierende. Selv om de fleste store veiprosjekter i dag gjennomføres modellbasert, er det frivillig å benytte metodene som beskrives i den veiledende håndboken V770 Modellgrunnlag (Statens Vegvesen, u.å.-a). Håndboken beskriver at ulike situasjoner for veiprosjekter kan dokumenteres med modeller. En av situasjonene som anbefales å ha svært gode modeller, ifølge håndboken, er reguleringsplanlegging av veiprosjekter. For denne prosjektfasen bør det blant annet benyttes DTM-er som oppfyller strenge krav til absolutt høydenøyaktighet. Dette kravet til absolutt høydenøyaktighet er betraktelig strengere enn hva som gjelder for FKB-DTM og DTM10 (Vegdirektoratet, 2016).

Det er for tiden et pågående arbeid med å utarbeide en erstatning for både håndbok V770 Modellgrunnlag og R700 Tegningsgrunnlag. Den nye håndboken som våren 2022 var på høring skal samle og videreutvikle de to nevnte håndbøkene til en ny håndbok med status som retningslinje (Thorsen, 2022). Endringen av håndbokens status til retningslinje medfører at den nye håndboken er hjemlet i enten lovverk eller instruks fra vegdirektøren. Den er da gjeldende for alle riksveier, samt for Statens Vegvesen og alle entreprenører eller konsulenter på oppdrag for Statens Vegvesen (Statens Vegvesen, u.å.-b).

Det er allment kjent at Statens Vegvesen er byggherre for svært mange samferdselsprosjekter i Norge, og den nye retningslinjen vil dermed med stor sannsynlighet medføre økt bruk av modellbaserte veiprosjekter. Kravene til stedfestningsnøyaktighet og absolutt høydenøyaktighet til DTM grunnlagsmodell for prosjektfasen reguleringsplanlegging er i

høringsutkastet til retningslinjen videreført (Vegdirektoratet, 2022). Kombinert med stadig høyere romlig oppløsning på LiDAR-punktskyer som danner grunnlag for DTM medfører dette et økt behov for gode punktskybehandlingssystemer for filtrering av punktskyer.

1.1 Problemstilling

For å kunne gjennomføre reguleringsplanfasen i modellbaserte veiprosjekter trengs gode DTM-er filtrert fra LiDAR-punktskyer som gjengir terrengets høyde nøyaktig. Målet med oppgaven er å foreta en sammenlignende vurdering av to ulike punktskybehandlingssystemers egnethet til filtrering av LiDAR-punktskyer til formålet. Dette er gjort ved å sammenligne anbefalt krav til stedfestingsnøyaktighet for høydegrunnet i Vegdirektoratets håndbok V770 Modellgrunnlag, mot resultater fra geometrisk kontroll av høydeavvik for et sett testområder.

1.2 Om oppgaven

Oppgaven er bygd opp bestående av tre hoveddeler. Den første delen presenterer aktuell bakgrunnsinformasjon og teori, påfølgende beskrives metode som er benyttet i forsøket. I den siste delen presenteres resultatene og en vurdering av de programmene som er benyttet.

Programvarene som undersøkes er *Quick Terrain Modeler, QTM*, fra Applied Imagery og *Airborne LIDAR Data Processing and Analysis Tools, ALDPAT*, fra National Center for Airborne Laser Mapping.

1.3 Om området

Området ved Grenstøl i Tvedestrand kommune i Agder fylke ble valgt med bakgrunn i tilgjengelige punktsky-datasett fra 2007 til 2019 i området på FvL Høydedata. Området er preget av stor utvikling de siste årene med tanke på veiutbygging. Dette har resultert i laserskanning med høy oppløsning av området i forbindelse med planlegging, gjennomføring og sluttdokumentasjon av veiutbyggingen. Derfor er det svært interessant å undersøke bakkefiltrering av punktskyer med hensyn på terrengoverflatemodell til reguleringsplanlegging for modellbaserte veiprosjekter. Varierende topografi og vegetasjon i området er momenter som vil være interessante å undersøke om hvorvidt det påvirker ulike bakkefiltreringsalgoritmer forskjellig.

1.4 Tidligere forskning

Flybåren LiDAR vokste frem som primærkilde for rask og kostnadseffektiv opprettelse av DTM på starten av 2000-tallet. Punktskyer fra flybåren LiDAR inneholder store mengder punkter utenom terrengoverflaten, og må derfor reduseres før DTM kan avledes fra punktsky (Zhang et al., 2003). Det har vært forsket på bakkefiltrering i utstrakt grad over de siste 20 årene, som har resultert i utviklingen av flerfoldige filtreringsalgoritmer for punktskyer (Chen et al., 2016; Suleymanoglu & Soycan, 2019).

I 2007 samlet og utviklet Zhang og Cui (2007) et sett med dokumenterte filtreringsalgoritmer i en åpent tilgjengelig programvare med grafisk brukergrensesnitt, *ALDPAT*. Dette ble gjort for å legge bedre til rette for prosessering og analyse av store punktskydatasett fra flybåren LiDAR. Arbeidet med *ALDPAT* og integrering av algoritmene var et kumulativt arbeid over åtte år blant flere forfattere innenfor flybåren LiDAR (Zhang & Cui, 2007).

Sammenlignende undersøkelser av egnetheten til bakkefiltrering med *ALDPAT* av LiDAR-punktskyer har siden vært gjort for flere studier. Dette har blant annet vært gjort med tanke på opprettelse av DTM og har vært sammenlignet mot annen tilgjengelig programvare. Sulaiman et al. (2010), Montealegre et al. (2015), Suleymanoglu og Soycan (2019) og Ali et al. (2021) sammenlignet alle et utvalg av filtreringsalgoritmene i *ALDPAT* mot filtrering i programvarene TerraScan, ENVI-LiDAR, *LAStools* og *Fusion* blant annet. Testområdene som har vært undersøkt i disse forsøkene var flate urbane områder, mellomkuperte landlige og skogkledde områder, og grovkuperte områder. Punktettheten er av forskjellig tetthet for de ulike forsøkene, og er korrelert med utviklingen av målefrekvensen for LiDAR (Wang et al., 2020).

Resultatene fra de ulike studiene er noe differensierte med tanke på hvilke filtreringsalgoritmer og programvarer som presterer best mot forsøkene kvantitative mål. Sulaiman et al. (2010) konkluderer med at ETEW fra *ALDPAT* var nærmest å produsere lik DTM som TerraScan. For Suleymanoglu og Soycan (2019) presterte ATIN, ETEW, MLS, PM, IPF og MCC jevnbyrdig i flatt og slakt terreng, mens ETEW skilte seg positivt ut i kupert terreng med tett vegetasjon og infrastruktur. Ali et al. (2021) kom frem til at filtrerne i *ALDPAT* produserte svært like DTM som ENVI-LiDAR. Hvilke filtreringsalgoritmer som presterer best, var avhengig av hvilke multispektrale kanaler de filtrerte LiDAR-punktskyene var fra.

2. Teoretisk bakgrunn

2.1 Filtrering av punktsky

Prosessering av data fra laserskanning har ofte som hovedmålsetning å redusere antallet uønskede målinger. Denne reduksjonen kalles filtrering når målsetningen er å filtrere bort målinger som ikke er terrengoverflate for datasett med målinger av både terrengoverflate, vegetasjon, bygninger, med mer (Axelsson, 2000).

Felles antagelse for alle *ALDPAT*-filtreringsalgoritmer er at en terrengoverflate i stor grad er positivt romlig autokorrelert og at målte høydeforskjeller mellom tilstøtende bakkepunkt er distinkte fra høydeforskjeller mellom bakke og tretopper, samt bygninger (Longley et al., 2015; Zhang & Cui, 2007).

Videre presenteres kortfattet fire aktuelle filtreringsalgoritmer.

2.1.1 ETEW

ETEW er en algoritme for å filtrere bakkepunkter fra ikke-bakkepunkter for en punktsky. Punktskyen deles i kvadratiske filtreringsvinduer der alle punkt bortsett fra vinduets laveste punkt ekskluderes ($Z_{i,min}$). Videre sammenlignes høydedifferansen for et punkt i filtreringsvinduet ($p_{i,j}$), der $Z_{i,j}$ representerer høyden for et punkt, og laveste punkt i cellen ($Z_{i,min}$) mot høydeterskelen ($h_{i,T}$):

$$z_{i,j} - Z_{i,min} > h_{i,T}$$

Formel 1: Sammenligning for høydedifferanse i ETEW-filter vindu mot høydeterskel (Zhang & Cui, 2007).

Høydeterskelen estimeres basert på maksimal helningsverdi (s) og vindusstørrelsen (c_i):

$$h_{i,t} = s \cdot c_i$$

Formel 2: Høydeterskel for sammenligning av høydedifferanse i ETEW-filtrering (Zhang & Cui, 2007).

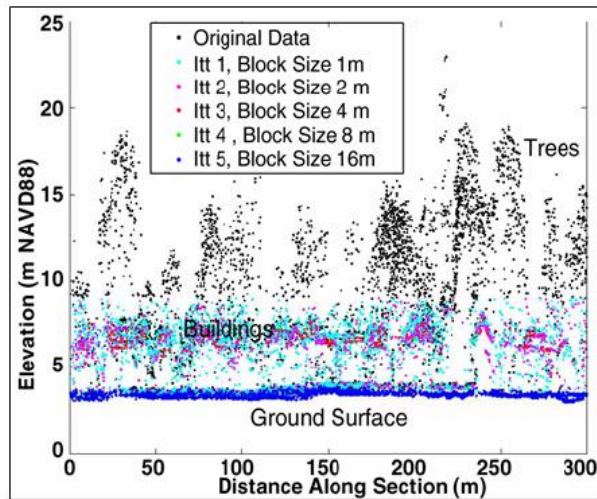
For hver iterasjon doubles vindusstørrelsen:

$$c_i = 2 \cdot c_{i-1}, \quad i = 2, 3, \dots, M$$

Formel 3: Vindusstørrelse for beregning av høydeterskel ETEW-filtrering (Zhang & Cui, 2007).

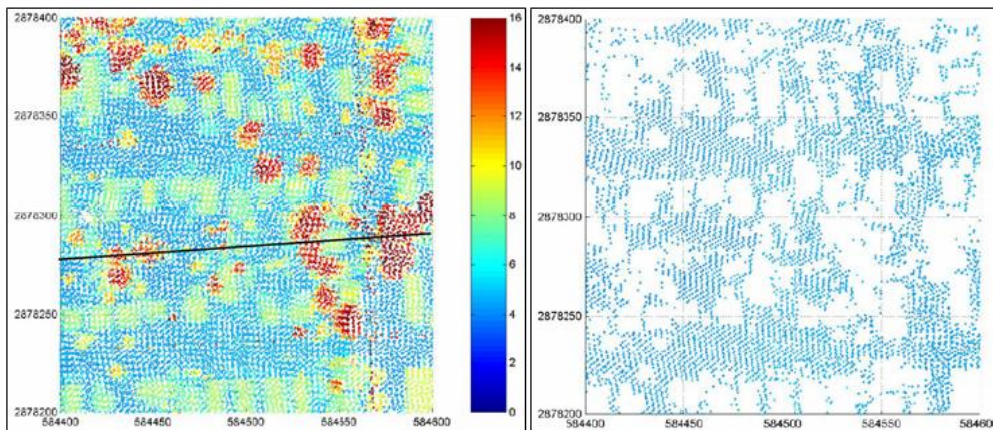
Algoritmen filtrerer iterativt med M antall steg inntil ingen flere punkter kan legges til som bakkepunkter (Zhang & Cui, 2007). Eksempel på punktsky før og etter filtrering med ETEW kan sees i Figur 1.

Points Remaining after each Iteration



Unfiltered Points

Filtered Points



Elevations in Meters

Figur 1: Eksempel på rå (nede venstre) og filtrert LiDAR-punktsky (nede høyre) ved bruk av ETEW og gjenværende punkter for iterasjon nummer en til og med fem med ETEW sammen med original punktsky (oppe) (Zhang & Cui, 2007).

2.1.2 PM

PM-filter ble utviklet av Zhang (2003) for å eliminere ikke-bakkepunkter fra et LiDAR-datasett (Figur 2). De punktmålingene i datasettet med lavest høydeverdi i et filtreringsvindu $(p_j(x_j, y_j, z_j))$ velges ut og en estimert flate opprettes. Ved å gradvis øke størrelsen på filtreringsvinduet samt å benytte høydedifferanseterskler kan PM-filtelet eliminere

ikke-bakkepunkter fra LiDAR-datasettet samtidig som bakkepunkter beholdes.

PM-filtelet kan beskrives som en trestegs prosedyre:

1. Et rektangulært gitter legges som et lag over LiDAR-datasettet. Hver celle i gitteret inneholder en punktmåling $(p_j(x_j, y_j, z_j))$ som er det laveste av punktene innenfor hver celle. Cellestørrelsen velges ofte til å være mindre enn den gjennomsnittlige punktavstanden i datasettet for å bevare alle punktmålinger i datasettet. Dersom en celle ikke inneholder noen punkt tilegnes cellen høydeverdi til den nærest liggende punktmålingen. Høydeverdier til punktmålinger i en celle gir en estimert initialflate.
2. Det avledes en sekundærflate fra initialflaten gjennom en erosjon- og åpningsoperasjon på initialflaten. Høydeforskjellen (dh_j) for en celle j mellom den foregående ($i-1$) og den nåværende (i) flaten sammenlignes til en høydedifferanseterskel ($dh_{i,T}$) for å avgjøre om en punktmåling (p_j) i en celle er et ikke-bakkepunkt. Høydeforskjellterskelen $dh_{i,T}$ bestemmes ved:

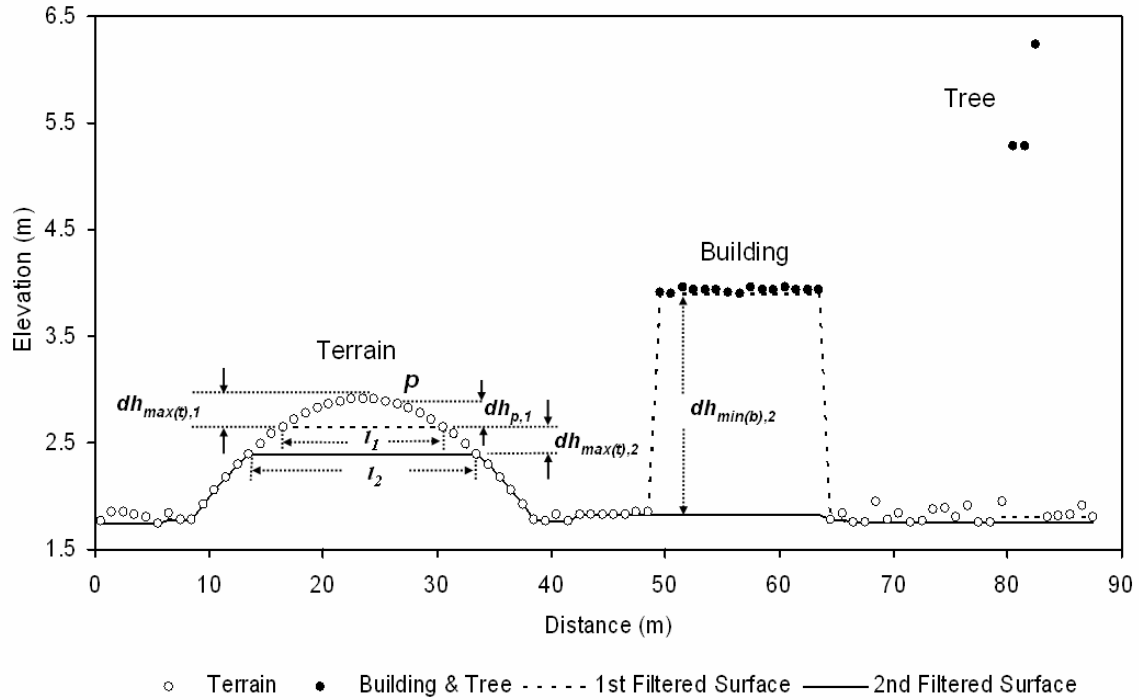
$$dh_{i,T} = \left\{ \begin{array}{ll} dh_0 & \text{hvis } w_i \leq 3, \\ s(w_i - w_{i-1}) \cdot c + dh_0 & \text{hvis } w_i \geq 3, \\ dh_{max} & \text{hvis } dh_{i,T} > dh_{max} \end{array} \right\},$$

Formel 4: Bestemmelse av høydeforskjellsterskel mellom avleddet sekundærflate og opprinnelig flate for PM-filter (Zhang & Cui, 2007).

der dh_0 er initial høydedifferanseterskel som estimerer nøyaktigheten av LiDAR-målinger, dh_{max} er den maksimale høydeforskjellterskelen, s er den predefinert maksimale terrenghellingen, c er cellestørrelsen for gitteret og w_i er størrelsen av filtreringsvinduet i antall celler for iterasjon nummer i .

3. Filtreringsvinduet økes i størrelse og den avlede sekundærflaten fra foregående prosesseringssteg benyttes som utgangspunkt for neste erosjon- og åpningsoperasjon. Prosesseringssteg to og tre gjentas inntil filtreringsvinduets størrelse overskrider en predefinert maksimalstørrelse for ikke-bakkeobjekter (Zhang & Cui, 2007).

For å sikre eliminering av store lave bygninger i urbane områder kan den den maksimale høydeforskjellterskelen settes til en bestemt verdi eller til den største høydedifferansen for filtreringsområdet (Zhang & Cui, 2007).



Figur 2: Prosessering med progressivt morfologisk filter for å identifisere terreng og bygninger. Punktene representerer kunstige punkter basert på LiDAR-måling. Første filtreringsiterasjon av terrengoverflaten (stiplet linje) finnes ved en åpningsoperasjon med et filtreringsvindue på 15 meter av den ufiltrerte punktskyen. Andre iterasjon av terrengoverflaten (heltrukket linje) finnes ved en åpningsoperasjon med et filtreringsvindue på 21 meter. Terrengoverflatepunktene beholdes ettersom høydedifferansen mellom punktene og den filtrerte overflaten er mindre enn høydedifferanseterskelen. Bygningspunktene ekskluderes ettersom høydedifferansen mellom den filtrerte terrengoverflaten til punktene overstiger høydedifferanseterskelen. (Zhang & Cui, 2007).

2.1.3 MLS

Forutsetning for MLS-filteeret er en distinkt differanse mellom terrenghelning og helningen mellom bakkepunkter og ikke-bakkepunkter i et LiDAR-datasett. MLS klassifiserer bakkepunkter i en LiDAR-punktsky ved hjelp av hellingsverdier mellom en punktmåling ($p_0(x_0, y_0, z_0)$) og dens nabopunkt (p_j) innenfor en gitt radius dersom den maksimale hellingsverdien mellom p_0 og p_j ($s_{0,max}$) er mindre enn den definert helningsterskel (s):

$$\left\{ \begin{array}{l} s_{0,j} = \frac{z_0 - z_j}{\sqrt{(x_0 - x_j)^2 + (y_0 - y_j)^2}} \\ p_0 \in \text{bakkepunkt} \mid \text{hvis } s_{0,max} < s \end{array} \right\}$$

Formel 5: Beregning av bakkepunkter for filtreringsalgoritmen MLS (Zhang & Cui, 2007).

der x_j og y_j representerer de horisontale koordinatene til punktmålingen p_j og z_j representerer høyden (Zhang & Cui, 2007).

2.1.4 ATIN

ATIN ble utviklet av Axelsson (2000) og benytter avstand fra et punkt på overflaten av en TIN for å klassifisere bakkepunkter i LIDAR datasett (Zhang & Cui, 2007). ATIN er en iterativ TIN-fortetningsalgoritme (Axelsson, 2000).

Testområdet deles opp i predefinerte celler der laveste punkt i hver celle velges ut til å representere terrengoverflate. En Delaunay-trianguleringsalgoritme benyttes til å generere en foreløpig TIN fra de utvalgte terrengpunktene. Punktene som er benyttet til opprettelse av TIN evalueres ikke i neste steg. Videre evalueres avstand mellom punkt i punktskyen og flatene i den genererte TIN mot en predefinert terskelavstand. Den maksimale av tre helningsvinkler mellom et triangels noder og kandidatpunkt kontrolleres også mot en terskelverdi. Dersom både avstanden mellom punkt og triangelflate, samt maksimal helningsvinkel er mindre enn definerte terskelverdier inkluderes punktet som terrengoverflate, og inkluderes i TIN. Filtringen av punkter fortsetter iterativt inntil alle punkter er klassifisert enten som bakkepunkter eller ikke-bakkepunkter (Suleymanoglu & Soycan, 2019).

2.2 Klassifisering

Resultat fra en laserskanning er en punktsky bestående av punkter med kjent posisjon i grunnriss og høyde. En uklassifisert punktsky inneholder alle punkter fra datainnsamlingen og beskriver alle objekter på og over terrengoverflaten. For å kunne avlede en terrengmodell fra en punktsky må punkter som ligger på terrengoverflaten være distinkte. Dette gir et behov for å klassifisere punktene ved leveranse av punktsky fra laser (Statens kartverk, 2013).

Standard klasser for leveranse av punktskyer i LAS-formatet avhenger av gjeldende produktspesifikasjon ved produksjon av punktskyen. Frem til januar 2022 var FKB-Laser gjeldene produktspesifikasjon for produksjon av topografiske punktskyer (Statens kartverk, 2022). FKB-Laser ble gitt ut i tre hovedversjoner, FKB-Laser versjon (v) 1.0, v2.0 og v3.0 (Statens kartverk, 2018). Opprinnelige standard klasser i LAS-formatet for v2.0 kan sees i Tabell 1 (Statens kartverk, 2013). Disse ble utvidet med klasser benyttet i NDH prosjekt til v2.1 og videreført til v3.0 (Statens kartverk, 2018). Standard klasser for leveranse i LAS-formatet fra v3.0 er vist i Tabell 2.

Fra 2022 er gjeldende produktspesifikasjon Punktsky v1.0.2. For leveranse i LAS-formatet av topografisk punktsky tar klassifiseringen utgangspunkt i ASPRS sin LAS Specification 1.4 - R15 (Statens kartverk, 2022).

Tabell 1: Standard klasser for leveranse av punktskyer etter FKB-Laser versjon 2.0 i LAS-formatet (Statens kartverk, 2013).

Standard klasser i LAS-formatet	Forklaring
1	Uklassifisert (Unclassified). Alle punkter som ikke er klassifisert som klasse 2, 7 eller 10
2	Punkter på terrengoverflate (Ground). Denne klassen omfatter som standard også punkt på vannoverflater (innsjø, hav, elv). Punkter innenfor vannpolygon som ligger over vann-/terrengoverflate (vegetasjon, brygger og lignende) leveres i klasse 1 (uklassifisert).
7	Støy-punkter (Lowpoints) forårsaket av skyer, fugler, ”multipath”, system feil etc. Denne klassen omfatter unormalt høye og lave punkt (spikere) og punkt som under bakkeklassifiseringen blir definert til å ligge under terrengoverflaten.
10	Punkter som ligger på bru (Bridge) Denne klassen innføres først i LAS-format versjon 2.0, men den forskutes i denne spesifikasjonen. Minstemål for klassifisering er 10 m ² . Eksisterende FKB-data av best mulig kvalitet benyttes som støtte til klassifiseringen. Alle punkter innenfor bru-avgrensningen skal klassifiseres som Bru (Klasse 10). Det presiseres at FKB-dataene kun benyttes som støtte i klassifiseringen. Kravet til klassifisering gjelder uavhengig av fullstendigheten i FKB-dataene.

Tabell 2: Standard klasser for leveranse av punktsky etter FKB-Laser versjon 3.0 i LAS-formatet.

Standard klasser i LAS-formatet	Forklaring
1	Uklassifisert (Unclassified). Alle punkter som ikke er klassifisert som klasse 2, 7 eller 17
2	Punkter på terrengoverflate (Ground). Denne klassen omfatter som standard også punkt på vannoverflater (innsjø, hav, elv). Punkter innenfor vannpolygon som ligger over vann-/terrengoverflate (vegetasjon, brygger og lignende) leveres i klasse 1 (uklassifisert).
7	Støy-punkter (Lowpoints) forårsaket av skyer, fugler, ”multipath”, system feil etc. Denne klassen omfatter unormalt høye og lave punkt (spikere) og punkt som under bakkeklassifiseringen blir definert til å ligge under terrengoverflaten.
17	Punkter som ligger på bru (Bridge) Minstemål for klassifisering er 10 m ² . Eksisterende FKB-data av best mulig kvalitet benyttes som støtte til klassifiseringen. Alle punkter innenfor bru-avgrensningen skal klassifiseres som Bru (Klasse 17). Det presiseres at FKB-dataene kun benyttes som støtte i klassifiseringen. Kravet til klassifisering gjelder uavhengig av fullstendigheten i FKB-dataene.

2.3 DTM

Begrepet DTM ble, ved Massachusetts Institute of Technology (MIT) på 1950-tallet, definert som en forenklet statistisk representasjon av en kontinuerlig flate med et stort antall punkter med kjente X-, Y- og Z-koordinater (Maliqi et al., 2017).

Det finnes forskjellige interpolasjons-algoritmer for å komme frem til en DTM. Hvilke interpolasjons-algoritmer som bør benyttes avhenger formålet til DTM. For produksjon av DTM for geodetiske- og ingeniørformål er det vanlig å representere DTM med et regulært nett av punkter som gjengir overflatens høyder (GRID), et irregulært nett (TIN) og vektorlinjer (Maliqi et al., 2017). De tre representasjonsmetodene GRID, TIN og vektorlinjer gjøres kort rede for i kapittel 2.3.1 og kapittel 2.3.2.

Det finnes også andre visualiseringsmetoder avledet fra DTM raster. En av disse er helningsrelieff som er et resultat av en matematisk operasjon på DTM-raster (Vosselman et al., 2010). Denne presenteres kortfattet i kapittel 2.3.3.

2.3.1 GRID

GRID er en rasterrepresentasjon av DTM i et regulært rutenett. Terrengoverflaten er representert som sett av høydeverdier knyttet til jevnt fordelte x- og y-koordinater (Maliqi et al., 2017). Det regulære rutenettet danner et rutenett av kvadrater, rektangler eller triangler med en bestemt utstrekning (Germak et al., 2021). Utstrekningen til hver rute kan for mindre punktskydatasett tilsvare den gjennomsnittlige punktavstanden i punktskyen. Da vil hver rute i teorien inneholde ett punkt, og informasjon om topografien for terrenget vil i stor grad være ivaretatt. Om en enkelt rute inneholder flere punkter kan høydeverdien til hver rute fastsettes som en funksjon av høydeverdien til alle punktene innenfor hver rute. En enklere måte er å benytte median høydeverdi eller høydeverdi for det punkt som ligger nærmest sentrum av ruten. Dersom det innenfor en rute ikke er lokalisert punkt fra punktskyen vil ruten være udefinert. For å unngå mange udefinerte ruter og medfølgende hull i det endelige rasteret interpoleres eller ekstrapoleres høydeverdien for den udefinerte ruten fra de tilstøtende rutenes høydeverdier (Vosselman et al., 2010).

2.3.2 TIN

TIN er en vektorrepresentasjon av DTM (Bjørke, 2010), adaptert av flerfoldige GIS-programvarer og automatiserte kartleggingsprogramvarer. TIN-modeller er bygd opp av punkter (noder) sammenkoblet av linjer (kanter) som danner triangler. Kontinuerlige flater

dannes innenfor hvert triangel, og flatene defineres av høyden for de tre hjørnepunktene (Maliqi et al., 2017).

Ofte vil det for områder med svært markante endringer i terrenghelning være nødvendig å supplere TIN med målte punkter som danner knekklinjer. Knekklinjer er vektorlinjer som ivaretar terrenggjengivelsen bedre, uten å gå på bekostning av rutestørrelser i modellen generelt (Bjørke, 2010).

2.3.3 Helningsrelieff

Et helningsrelieff er en visualiseringsmetode av høydemodell. Disse viser lokale høydevariasjoner tydeligere enn et høyderaster. Helningsrelieff (g') genereres ved å utføre en konvulsjon på et høyderaster (g):

$$g' = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \times g.$$

Formel 6: Beregning av helningsrelieff ved konvulsjon av høydevariasjonsraster (Vosselman et al., 2010).

Den resulterende helningsrelieffet (g') kan videre forbedres enten ved en lineær eller logaritmisk operasjon (Vosselman et al., 2010).

2.4 Litteratursøk LiDAR-programvarer

Et enkelt søk i flere databaser resulterer i flerfoldige artikler som tar for seg ulike problemstillinger tilknyttet prosessering og analyse av punkttskyer. Artikkene omhandler prosessering og analyse med flere ulike programvarer, biblioteker og kommandoverktøy. Videre presenteres kortfattet et utvalg av programvarer, biblioteker og kommandoverktøy for generell prosessering av punkttskyer og bakkefiltrering av punkttskyer.

2.4.1 LiDAR Prosesseringsprogramvarer

Li et al. (2018) gjør rede for et stort utvalg av prosesseringsverktøy for LiDAR-data. Blant programvarer utviklet med tanke på rasterisering av LiDAR-data til blant annet DTM nevnes *FugroViewer*, *ArcGIS LiDAR Analyst*, *ENVi LiDAR*, *GRASS GIS* og *FUSION/LDV*.

Av biblioteker ment for integrasjon i en annen applikasjon for prosessering av LiDAR-data nevnes *libLAS*. En applikasjon som benytter dette OS C++ biblioteket er *LAStools*.

Montealegre et al. (2015) gjør videre rede for ytterligere tre programvarer enn de nevnt av Li et al. (2018) i sin sammenlignende studie av nøyaktighet for filtrering av LiDAR-punktskyer. Disse er MCC-LiDAR, BCAL LiDAR og *ALDPAT* (Montealegre et al., 2015).

2.4.2 Filtreringsprogramvarer for LiDAR

For studiene av Ali et al. (2021) og Sulaiman et al. (2010) undersøkes filtrering av LiDAR-punktskyer med hensyn på opprettelse av nøyaktige DTM. De bruker OS-programvare til filtrering og lisensiert programvare til opprettelse av sammenligningsgrunnlag. Eksempel på slik lisensiert programvare brukt til opprettelse av sammenligningsgrunnlag i Ali et al. (2021) sitt forsøk er *TerraScan*.

Montealegre et al. (2015) sammenligner nøyaktigheten av syv metoder for bakkefiltrering av LiDAR-punktskyer fra fem ikke-lisensierte programvarer, *LAStools*, *FUSION*, *MCC-LiDAR*, *BCAL LiDAR Tools* og *ALDPAT*. Filtrering ble gjort for testområde av LiDAR-punktskyer for områder med moderat til bratt helning med variert vegetasjon i Spania. De kom frem til at kommandoverktøyet *MCC-LiDAR* presterte best totalt sett for bakkefiltrering av LiDAR-punktskyene. *MCC-LiDAR* klassifiserer punkter som bakke eller ikke-bakke ved bruk av MCC-algoritmen, som er en iterativ interpolasjonsalgoritme. MCC algoritmen er utviklet av Evans og Hudak ved Moscow Forestry Sciences Laboratory ved USFS Rocky Mountain Research Station (Montealegre et al., 2015).

Også *lasground*-verktøyet fra *LAStools* presterte godt totalt sett med forholdsvis lik feilrate som MCC algoritmen. *LAStools* er lisensiert av *rapidlasso GmbH*, og utviklet av Martin Isenburg som et sett med LiDAR-prosesseringsverktøy. Verktøyet *lasground* baserer seg på Axelsson (2000) sin ATIN-algoritme (Montealegre et al., 2015).

Suleymanoglu og Soycan (2019) undersøkte seks ulike bakkefiltreringsalgoritmer for produksjon av DTM fra punktskydata fra programvaren *ALDPAT* og kommandoverktøyet *MCC-LiDAR* for fire forskjellige testområder. *ALDPAT* programvaren ble utviklet av Zhang og Cui (2007) for analyse og prosessering av punktskyer i forskningsøyemed. Algoritmene ETEW, IPF, MLS, PM og ATIN i *ALDPAT* er av denne grunn svært godt dokumentert (Zhang & Cui, 2007).

Testområdene utgjorde et utvalg av varierende topografi, vegetasjon og bebyggelse. For testområdene med beskjeden helning var IPF-filter generelt best. I det siste testområdet preget av markant helning, mer utfordrende topografi og mye vegetasjon presterte ETEW-filteret best (Suleymanoglu & Soycan, 2019).

3. Metode

3.1 Litteratursøk

Som en del av grunnlaget til forsøket ble det utført litteratursøk for å utforske programvarer, biblioteker og kommandoverktøy for håndtering av punktskydata. Videre ble det undersøkt tidligere benyttede programvarer for filtrering av punktskyer og opprettelse av DTM. Et utvalg av programvarer, bibliotek og kommandoverktøy fra litteratursøket er presentert i kapittel 2.4. Konteksten for bruk av programvarene gjøres her også kortfattet rede for. Videre presenteres kortfattet en vurdering omkring valg av programvarene, samt en vurdering av noen av programvarene fra litteratursøket som ikke ble valgt.

3.1.1 Valgt programvare

ALDPAT og *QTM* er valgt som programvarer for filtrering av punktskyer med hensyn på opprettelse av DTM for modellbaserte veiprosjekter. *ALDPAT* er valgt med bakgrunn i Zhang og Cui (2007) svært utfyllende dokumentasjon av filtreringsalgoritmene. Valget er også tatt med bakgrunn i et bredt spekter av tidligere forskning på filtrering av punktskyer med *ALDPAT* over flere år. Et utvalg av artikler som omtaler *ALDPAT* for filtrering av punktsky med hensyn på opprettelse av DTM er blant annet Sulaiman et al. (2010), Montealegre et al. (2015), Suleymanoglu og Soykan (2019) og Ali et al. (2021). De fire artiklene beskriver filtrering av punktskyer som spenner over ulike topografiske områder og vegetasjonstyper.

Med bakgrunn i bruken av lisensiert programvare for opprettelse av sammenligningsgrunnlag som nevnt kapittel 2.4.1, undersøkes tilgjengelig programvare ved Fakultet for realfag og teknologi ved Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet, NMBU. Programvaren *QTM* er her tilgjengelig ved datasalen til Geomatikk. Umansky (2022) i Applied Imagery LLC gir i e-post korrespondanse uttrykk for at filtreringsalgoritmen i denne programvaren er lite utforsket i form av White Papers. Med bakgrunn i tilgjengeligheten av programvaren ved NMBU, samt det faktum at filtreringsalgoritmen er lite utforsket fra før velges *QTM* som andre programvare for filtrering av LiDAR-punktsky med tanke på nøyaktig DTM.

3.1.2 *LAStools*

Av andre programvarer som ble vurdert utforsket med hensyn på opprettelse av nøyaktige DTM fra LiDAR-punktskyer var *LAStools* det fremste alternativet. *LAStools*, er en samling av kommandolinjeverktøy for blant annet klassifisering, "tiling", konvertering, filtrering,

rasterisering og triangulering av LiDAR-data. Samlingen av verktøy er også tilgjengelig som prosesseringsverktøy i både *QGIS*, *ArcGIS* og *ERDAS IMAGINE*, og betegnes som det raskeste og mest minneeffektive løsningen for kjøring av batch-scriptet prosessering av store LiDAR datasett (rapidlasso GmbH, u.å.).

En stor usikkerhet omkring valg av *LAStools* som programvare var bortgangen av utvikler Martin Isenburg høsten 2021, og overgangen til nye utviklere av *LAStools* som enda ikke var satt inn i programvaren. (support@rapidlasso.de, 2021). Dette resulterte i at *LAStools* ble utelukket fra denne oppgaven.

3.2 Maskinvare og programvare

De viktigste programvarer, filformater og maskinvare som er benyttet i oppgaven presenteres i dette kapittelet.

3.2.1 Programvarer og tilleggsmoduler

ALDPAT

Airborne LIDAR Data Processing and Analysis Tools (*ALDPAT*) er en OS-programvare for analyse av LiDAR-data utgitt av National Center for Airborne Laser Mapping ved Florida International University i Miami i 2007. *ALDPAT* er oppbygget av algoritmer for ulike prosesseringsoppgaver av store LiDAR-datasett bygd inn i et grafisk brukergrensesnitt (Zhang & Cui, 2007). *ALDPAT* versjon 1.0 brukes i dette forsøket.

CloudCompare

CloudCompare^{V2} (CC) er en programvare for prosessering av tredimensjonale punktskyer og triangulert «mesh». Opprinnelig utviklet til å sammenligne to tette tredimensjonale punktskyer eller tett punktsky mot triangulert "mesh". Med tiden har CC utviklet seg til å bli en mer generelt punktskyprosesseringsprogramvare. CC kan lese et vidt spekter av filformater for punktskyer, blant annet ASCII, LAS/LAZ med flere (CloudCompare, u.å.). For dette forsøket benyttes *CloudCompare*^{V2} 2.12.0 Kyiv.

QGIS

Quantum GIS (*QGIS*) er en åpenkilde GIS-programvare etablert av Gary Sherman i 2002 som i dag brukes i utstrakt grad over hele verden som et alternativ til lisensierte GIS-programvarer. *QGIS* er kompatibelt med de fleste operativsystemer og er gratis tilgjengelig for nedlastning. Både opprettelse og operasjoner på raster- og vektordata er mulig i grunninstallasjonen av

QGIS. Det er også tilgjengelig et stort antall utvidelser for en rekke andre funksjoner (Maliqi et al., 2017). I dette forsøket benyttes *QGIS* 3.24.1 Tisler, som ble utgitt 18. mars 2022 (*QGIS*, 2022).

QTM

Quick Terrain Modeler (QTM) utgitt av Applied Imagery er en kraftfull og intuitiv programvare for 3D-visualisering av punktskyer og overflatemodeller. *QTM* har flere verktøy for editering, måling, kvantifisering, analysering, eksportering og lagring av tredimensjonale modeller. Blant analyseverktøyene finnes endringskartlegging (Change Detection Map), beregning av terrenghøyde for punkter over terrengoverflaten med AGL Analyst (Above Ground Level Analyst), samt volumdifferanser (Volume Calculations) (Applied Imagery LLC, 2018). *QTM* versjon 8.2.1 benyttes i dette forsøket.

3.2.2 Filformater

CSV

CSV er et tekstformat mye brukt til deling og konvertering av data i tabeller mellom ulike regnearkprogramvarer og enheter. Data i tabeller på CSV-format er adskilt av komma eller andre skilletegn, som semikolon eller mellomrom (Shafranovich, 2005).

LAS

LASER (*LAS*) er et åpent binært filformat primært utviklet for utveksling av ASPRS LiDAR-punktskydata mellom brukere. Filformatet støtter utveksling av alle tredimensjonale X-, Y- og Z-ordnede lister (tuppler). *LAS* beholder informasjon som er spesifikk til LiDAR-data samtidig som dataen ikke er for kompleks. *LAS* kombinerer GNSS, INS, laserpuls avstandsdata for å produsere X-, Y- og Z-koordinater (ASPRS, u.å.).

American Society for Photogrammetry & Remote Sensing (ASPRS) eier *LAS* spesifikasjonen, som er anerkjent av Open Geospatial Consortium (OGC) som en OGC Community Standard (ASPRS, 2019). *LAS* formatet er firedelt (Tabell 3):

Tabell 3: *LAS* 1.4 Format definisjon (ASPRS, 2019).

Public Header Block (Filhode)
Variable Length Records (VLRs)
Point Data Records (Punktdata)
Extended variable Length Records (EVLRs)

- Filhode som inneholder generell informasjon om datasettet, eg. antall punkt og avgrensing til punktdataene.
- Variable Length Records (VLRs) inneholder begrensede mengder variable data som projeksjonsinformasjon, metadata, med mer. Maksimalt 65 535 bytes.
- Point Data Records (PDRs) (Punktdata) inneholder informasjon om hvert punkt, gitt etter PDRs format null til ti. Generelt inneholder PDRs informasjon om X-, Y- og Z-verdier for punktdata, returnnummer, antall returer for den utsendte pulsen med mer.
- Extended Variable Length Records (EVLRs) er essensielt VLRs som kan inneholde data utover 65 535 bytes.

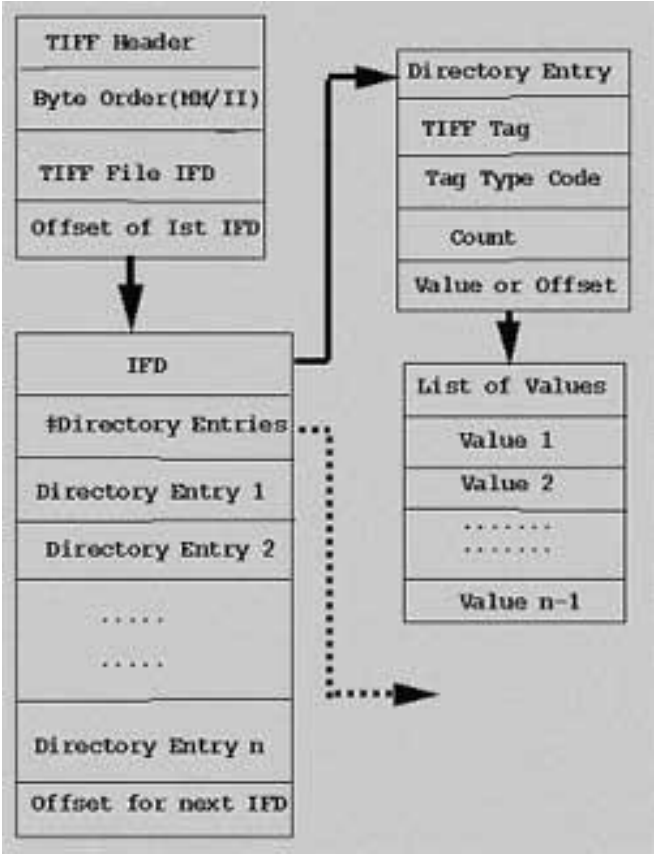
(ASPRS, 2019)

LAZ

LAZ er en LiDAR-spesifikk komprimering av LiDAR-data i LAS-format som brukes i *LAStools* utviklet av Rapidlasso. LAS-filer blir fort svært store ved store punktskyer som kan gjøre databehandling vanskelig til nesten umulig. LAZ-filer er betraktelig mindre enn LAS-filer som har medført at LAZ er implementert i mange programvareapplikasjoner (Lindsay, 2020).

TIFF

Tagged Image File Format (TIFF) er et tag-basert filformat for utveksling og lagring av raster-bildefiler. TIFF er hierarkisk oppbygd i tre nivåer fra høyest til lavest, se Figur 3. Øverst i hierarkiet er filhodet som gir informasjon om filen, som bytestruktur, TIFF-fil identifikasjon (ID) eller versjonsnummer og peker til første «Image File Directories» (IFD) i nivå to. Nivå to er da bestående av en eller flere IFD-er som inneholder enten koder og tilhørende data eller peker til data på nivå tre (Mahammad & Ramakrishan, 2009b).



Figur 3: Oversikt over hierarkiet for TIFF-filformatet (Mahammad & Ramakrishan, 2009a).

GeoTIFF

GeoTIFF er en utvidelse av TIFF-filformatet med et sett definerte TIFF-tagger for å beskrive kartografisk informasjon assosiert med TIFF-bildefiler som har opphav fra DTM, digitaliserte kart, med mer. Utvidelsen benytter reservede TIFF-tagger til å lagre et bredt spekter av georeferertinformasjon som kartprojeksjon, koordinatsystem, datum, ellipsoide, og lignende. (Mahammad & Ramakrishan, 2009b).

Shape

ESRI shape-fil (shape) er et vektorfilformat utviklet av Environmental Systems Research Institute (ESRI). Filformatet lagrer ikke-topologisk geometri og attributtinformasjon for et datasetts romlige egenskaper. Geometriske størrelser lagres som sett med vektorkoordinater, og støtter blant annet, punkt, linje og flater (ESRI, 1998).

XYZ

XYZ er et ikke-standardisert sett filer basert på ASCII fil-arkitektur. Data fremstilles som linjer av tekst, der hver linje er basert på kartesiske koordinater (x, y, z). Filformatet er støttet av et bredt spekter av programvarer (Thomson, 2018).

3.2.3 Maskinvare

Maskinparken som benyttes til prosessering i dette forsøket er bestående av to datamaskiner. Programvare som benyttes i forsøket dikterer hvilken datamaskin som benyttes. "2_Geomatikk" benyttes til prosessering i *QTM*, mens "1_Egen" benyttes for alle andre programvarer nevnt i denne oppgaven (Tabell 4).

Tabell 4: Maskinpark tilgjengelig til prosesseringsoppgaver.

Navn	RAM	Prosesor (CPU)	CPU Hastighet
1_Egen	32 Gb	Intel Core i5-7300HQ	2.50 GHz
2_Geomatikk	20 Gb	AMD EPYC 7552 48-Core Processor	2.20 GHz

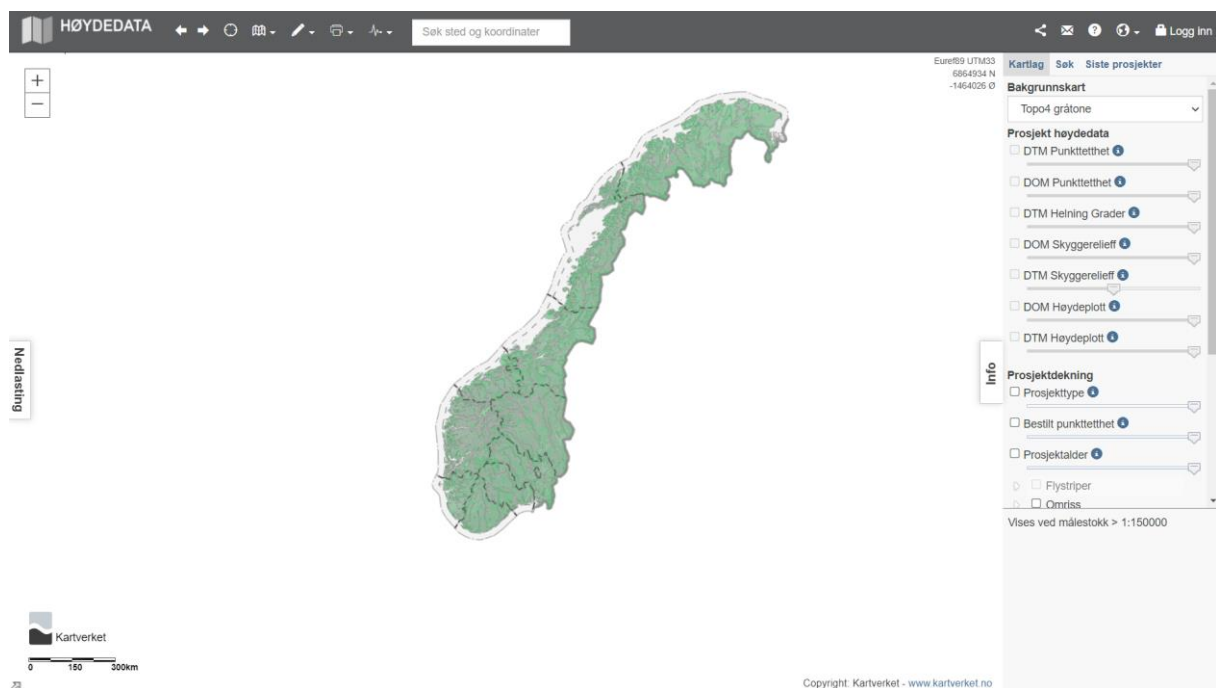
3.3 Datagrunnlaget

3.3.1 Høydedata

Høydedata.no (Figur 4) er FvL til Statens Kartverk for høydedata for hele Norge (Statens kartverk, u.å.-a). Data er samlet inn gjennom prosjektet NDH samt laserdata fra andre «Norge digitalt»-parter. Dette inkluderer blant annet dybde data fra ferskvann og elver, samt laserskanning fra bil. Datasettene er etablert som punktskyer med varierende punktetthet gitt av punktskyens formål (Statens kartverk, u.å.-b). Punktskyene i FvL er etablert etter den tids gjeldene produktspesifikasjon, og må derfor sees i sammenheng med denne .

Fra punktskyene er det avledet terrengmodeller og overflatemodeller med oppløsning på 1, 10 og 50 meter (Statens kartverk, u.å.-b). For prosjekter der terrengmodeller er en del av leveranse fra produsent til Høydedata er også prosjekt-DTM med annen oppløsning enn ovennevnte også tilgjengelig.

Terrengdata i FvL er i stor grad åpne eksporterbare data som kan lastes ned uten pålogging med BAAT-bruker (Statens kartverk, u.å.-a). Originale punktskyer kan lastes ned på enten LAZ-format eller ESRI optimalisert LAS-format (zLAS). Digitale terrengmodeller og digitale overflatemodeller kan lastes ned på Grid-formatet GeoTiff, som er bransjestandard for DTM eller i formatet USGS DEM (Statens kartverk, u.å.-a; Statens kartverk, u.å.-b).



Figur 4: Skjermdump av FvL Høydedata til Kartverket for høydedata (02.04.2022.)

3.3.2 Tilgjengelige datasett Høydedata

For det aktuelle området er det tilgjengelig totalt seks ulike LiDAR-datasett fra seks ulike prosjekter. Dataene er samlet inn i prosjekter over tolv år, fra og med 2007 til og med 2019. Dette medfører at det for det aktuelle området er god temporaloppløsning av LiDAR-data. Av Tabell 5 fremgår tilgjengelige datasett i det aktuelle området, samt grunnleggende informasjon om datasettene. Informasjon om datasettene fremgår av prosjektrapporter utarbeidet av TerraTec (2007; 2014; 2016; 2017; 2019a; 2019b).

Tabell 5: Tilgjengelige LiDAR-prosjekt, måleplattform, bestilt punktetthet og punktetthet gitt av prosjektrapport i aktuelt forsøksområde.

¹ $\frac{Pkt.}{m^2}$, er punktetthet oppgitt i antall punkt (pkt.) per kvadratmeter (m^2).

² B representerer bestilt punktetthet fra oppdragsgiver.

³ P representerer prosjektets gjennomsnittlige punktetthet.

Prosjekt	Plattform	B ² Pkt./m ² ¹	P ³ Pkt./m ² ¹
Arendal Tvedestrand Froland 2007	Fly	2	2.3
E18 Tvedestrand-Arendal 2014	Helikopter	20	20
E18 Tvedestrand-Arendal 2016	Helikopter	25	33
NDH Froland-Tvedestrand Arendal 5pkt 2017	Fly	5	5
E18 Tvedestrand-Arendal mobil 2019	Bil	-	-
E18 Tvedestrand-Arendal 2019	Fly	60	60

3.3.3 Valg av datasett

Prosjektet E18 Tvedestrand-Arendal 2016 er i denne oppgaven benyttet som datagrunnlag. Som følge av ønsket om å undersøke filtreringsalgoritmer med hensyn på reguleringsplanlegging av modellbaserte veiprojekter oppfyller ikke prosjektene Arendal Tvedestrand Froland 2007 og NDH Froland-Tvedestrand Arendal 5pkt 2017 kravet til nøyaktighet etter håndbok V770 Modellgrunnlag (TerraTec, 2007; TerraTec, 2017; Vegdirektoratet, 2016). Prosjektet E18 Tvedestrand-Arendal mobil 2019 og E18 Tvedestrand-Arendal 2019 er begge sluttokumentasjon av veianlegget, der førstnevnte også samlet inn fra bilbåren laserskanning hvilket gjør at disse blir ekskludert (TerraTec, 2019a; TerraTec, 2019b). Av de to resterende tilgjengelige prosjektene velges det nyeste prosjektet fra 2016 som følge av høyere punktetthet i punktstyken (TerraTec, 2014; TerraTec, 2016).

3.3.4 E18 Tvedestrand-Arendal 2016

Informasjon om aktuelt punktskydatasett innenfor hvert testområde og filnavn på eksportert datasett presenteres i henholdsvis Tabell 6 og Tabell 7.

Tabell 6: Informasjon om testområder.

¹ Ellipsoidisk areal i kvadratmeter (m^2) for testområdet i ETRS89 / UTM 32N.

² Punkttetthet ($\frac{pkt.}{m^2}$) gitt fra antall punkt innenfor arealet av hvert testområde.

³ Totalt antall ufiltrerte punkt i punktskyen.

⁴ Høydeverdi i meter (m) fra Z-verdi i punktsky.

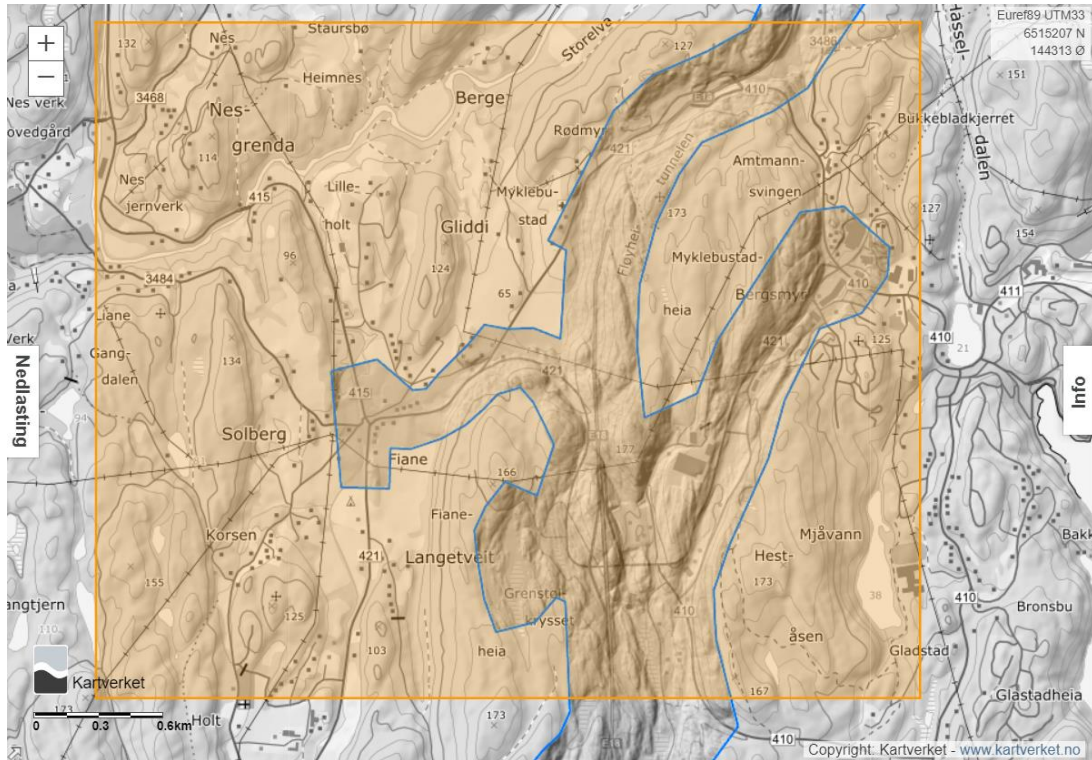
Parametere	Testområde				
	1	2	3	4	5
Areal ¹	22 518	22 518	22 518	22 518	22 518
Punkttetthet ²	30	30	30	30	30
Antall punkt ³	1 849 086	2 880 309	2 411 757	2 292 971	2 309 515
Maks høydeverdi ⁴	63.51	168.06	142.7	123.89	102.16
Minste høydeverdi ⁴	39.70	77.85	108.39	91.77	77.14

Tabell 7: Originalt filnavn og prosesseringsfilnavn for punktskydata fra Høydedata for hvert testområde.

Testområde	Filnavn høydedata	Filstørrelse	Filnavn prosessering
1	Eksport_578912_549_1	50 652 kB	1_Eksport_578912_549_1
2	Eksport_578979_549_1	78 759 kB	2_Eksport_578979_549_1
3	Eksport_578968_549_1	65 947 kB	3_Eksport_578968_549_1
4	Eksport_578967_549_1	62 699 kB	4_Eksport_578967_549_1
5	Eksport_578966_549_1	63 152 kB	5_Eksport_578966_549_1

3.3.5 DTM Høydedata

DTM fra prosjekt valgt under kapittel 3.3.3 eksporteres fra FvL Høydedata for området markert med oransje i Figur 5. Informasjon om oppløsning til DTM fremgår av "Velg prosjekt" i Figur 6, der DTM oppløsning står i parentes i prosjektnavnet. Denne oppløsningen legges til grunn for opprettelse av DTM i kapittel 3.10.1



Figur 5: Skjermdump FvL Høydedata utstrekning eksportert prosjekt-DTM (Utsnitt Kartverket DTM dekning, 02.04.2022)

Velg område	
Gjeldende kartutsnitt ▾	
Velg produkt	
Høydemodell ▾	
Velg type	
Prosjekt ▾	
Velg prosjekt	
E18 Tvedestrand-Arendal 2016 (0.25 m) ▾	
Velg datasett	
DTM ▾	
Oppløsning	
Som datasett ▾	
Filformat	Kompresjonsmetode
GeoTIFF ▾	LZ77 ▾
Koordinatsystem	
UTM 32 ▾	

Figur 6: Skjermdump eksporteringsvalg DTM E18 Tvedestrand-Arendal 2016 (0.25m)

3.3.6 Sensor

Av Tabell 8 presenteres kortfattet informasjon om sensor benyttet til datainnsamling, samt parametere for datainnsamling for punktskydataprojektet valgt i kapittel 3.3.3. I Tabell 8 står forkortelsene kt. for knop og Hz for hertz. Åpningsvinkelen er angitt i grader og punktettheten i punkt per kvadratmeter

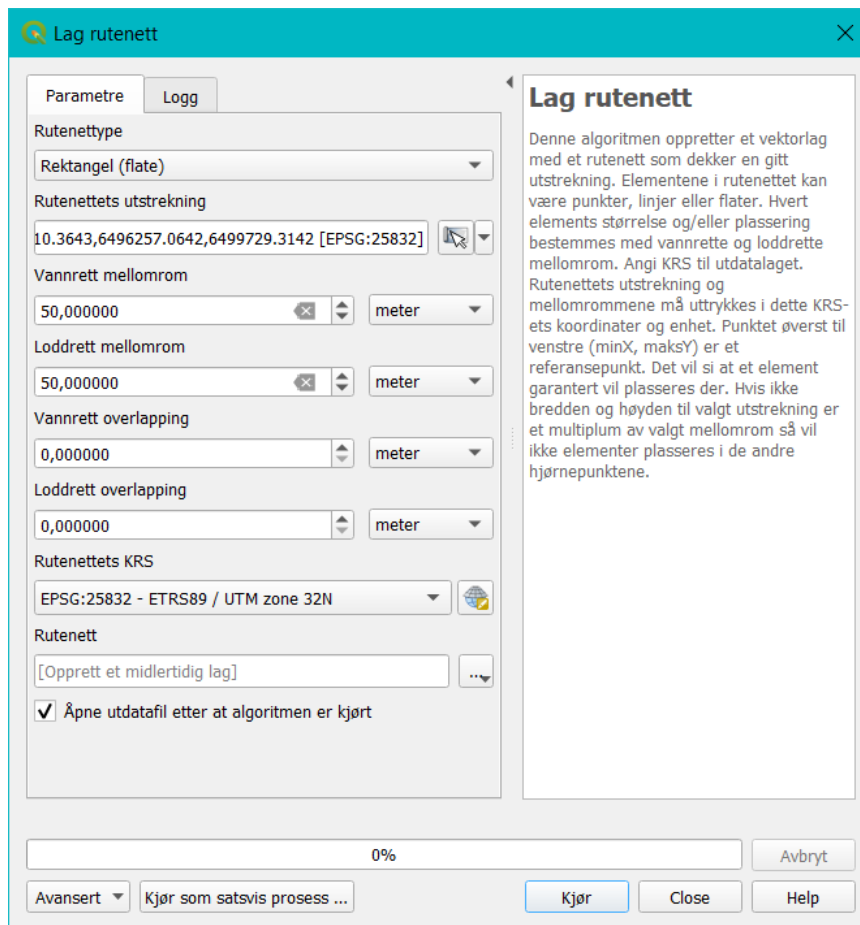
Tabell 8: Informasjon om sensorer og parametere for datainnsamling av punktskydata for prosjektet E18 Tvedestrand-Arendal 2016 (TerraTec, 2016).

Parametere	E18 Tvedestrand-Arendal 2016
Laserskanner	ALS70
IMU	MicroIRS
GNSS-mottakere	Topcon Legacy E
Plattform	Helikopter
Flyhastighet	70 kt
Laserpuls	500 000 Hz
Åpningsvinkel	18.0°
Punktetthet	33pkt./m ²
Sideoverlapp	20%
Kamera	RCD 30
GSD	Ca. 3 cm

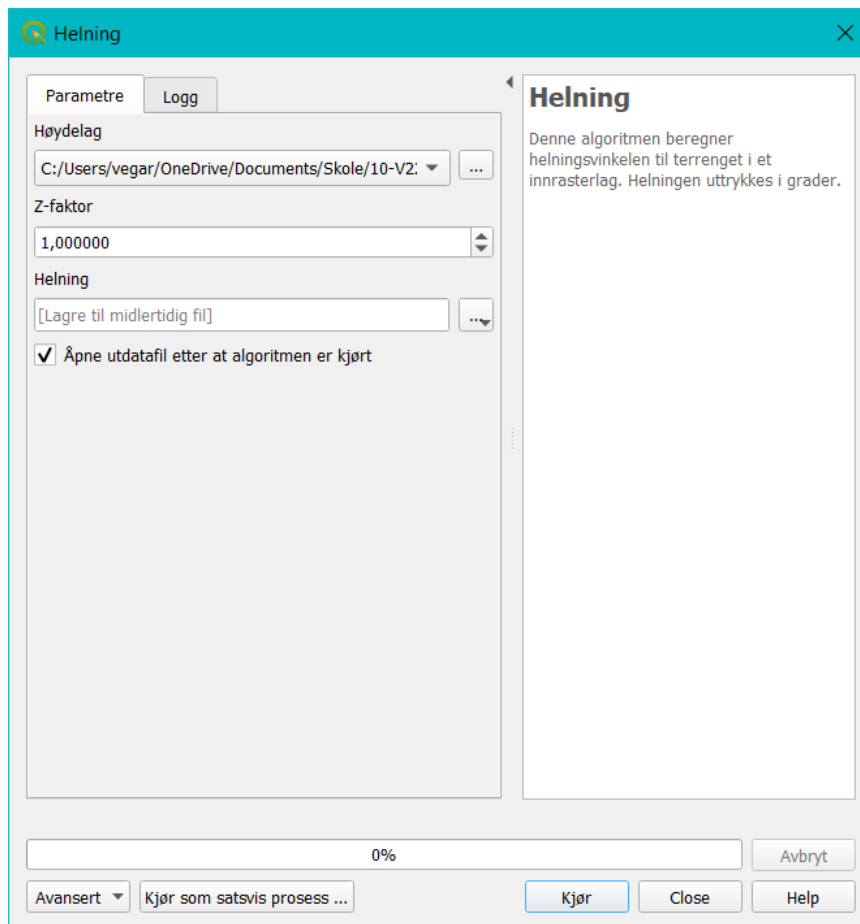
3.4 Preprosessering

3.4.1 Opprettelse av testområder

Det dannes et regulært vektorrutenett med samme utstrekning som prosjekt DTM-raster. Vektorfunksjonen "Lag rutenett" i *QGIS* benyttes til denne operasjonen. Rutenettet opprettes bestående av ruter med utstrekning på 50 gange 50 meter (Figur 7). Det lages et helningsrelieff fra DTM-rasteret eksportert fra Høydedata. Rasterverktøyet "Helning" i *QGIS* brukes til opprettelse av helningsrelieff (Figur 8).



Figur 7: Opprettelse av regulært rutenett i med *QGIS*-funksjonen "Lag rutenett".

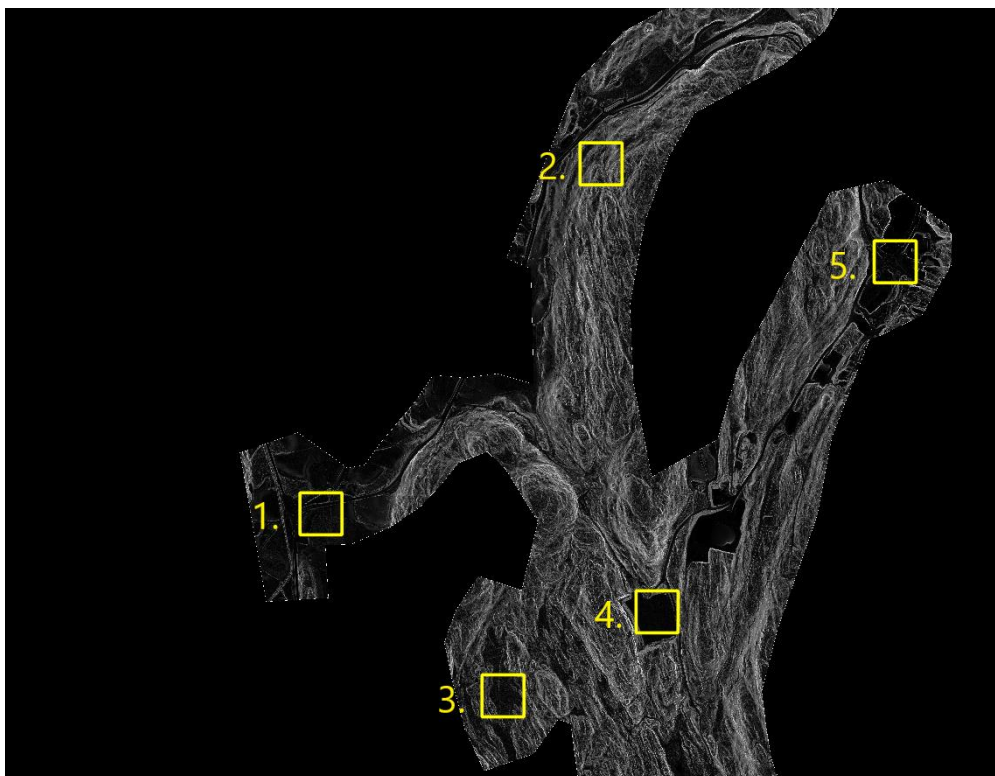


Figur 8: Opprettelse av helningsrelieff med rasterverktøyet "Helning" i QGIS.

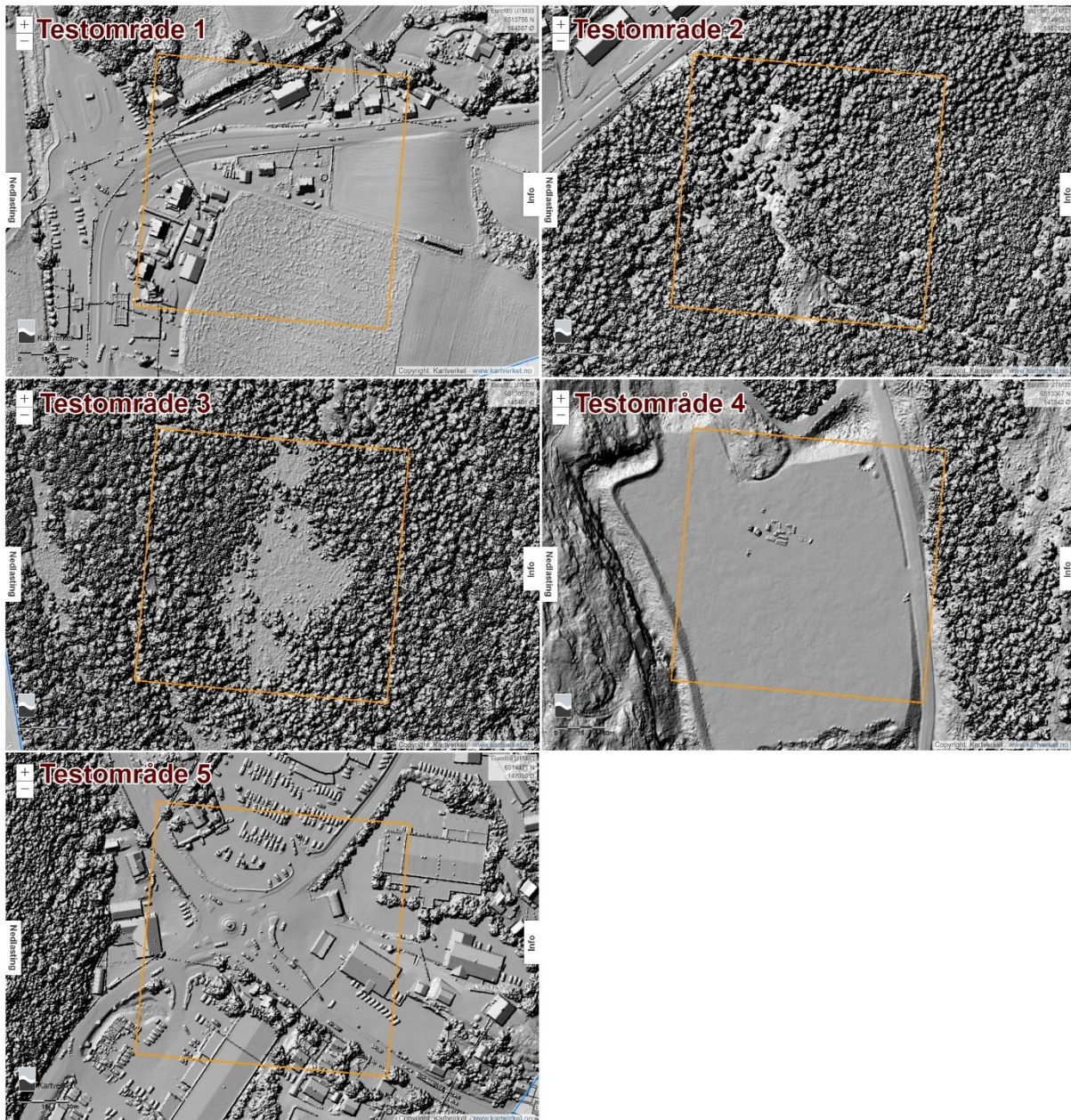
Terrenghelningsrasteret benyttes sammen med DOM i FvL Høydedata til å lokalisere områder med ulik topografi og vegetasjon (Figur 10). Fem områder med ulik topografi og vegetasjon er valgt ut (Figur 9):

- **Testområde nr. 1. Fiane-svingen**, landlig og flatt med spredt bebyggelse og noe variert vegetasjon.
- **Testområde nr. 2. Fløyheia**, grovkupert terreng med stor barskog.
- **Testområde nr. 3. Langemyr**, skogkledd myrområde.
- **Testområde nr. 4. Grenstøl**, planert anleggsområde uten særlig vegetasjon.
- **Testområde nr. 5. Bergsmyr**, senter-område med store bygningsmasser, store harde flater og noe kupering.

Hvert testområde dannes fra ni ruter med utstrekning på tre gange tre ruter. Hvert testområde har en utstrekning på 150 meter gange 150 meter. Hvert testområde eksporteres fra QGIS til Shape-filer, som benyttes til avgrensning av punktskydata ved nedlastning fra Høydedata.



Figur 9: Utsnitt terrenghelningsraster generert i *QGIS* fra Høydedata DTM fra prosjekt E18 Tvedestrand-Arendal fra Høydedata 2016. Testområder markert med gule rektangler og nummer: 1. Fiane-svingen, 2. Fløyheia, 3. Bergsmyr, 4. Grenstøl og 5. Bergsmyr.



Figur 10: Sammenstilling av skjermdumper av DOM fra FvL Høydedata for alle testområder .

3.4.2 Fil-konvertering

Punktskyer fra Høydedata er lagret i det LAS-komprimerte filformatet LAZ, dette filformatet er ikke kompatibelt med *ALDPAT* som kun kan lese ASCII filer (.xyz). Dette medfører at punktskyene må konverteres mellom ASCII og LAS før prosessering i *ALDPAT*. Etter prosessering i *ALDPAT* må så ASCII filene igjen konverteres til LAS format før innlesing i av punktskyen i *QTM*. For denne konverteringen benyttes *CloudCompare* v.2.11.3 som har algoritmer for å konvertere mellom filformatene (Ali et al., 2021).

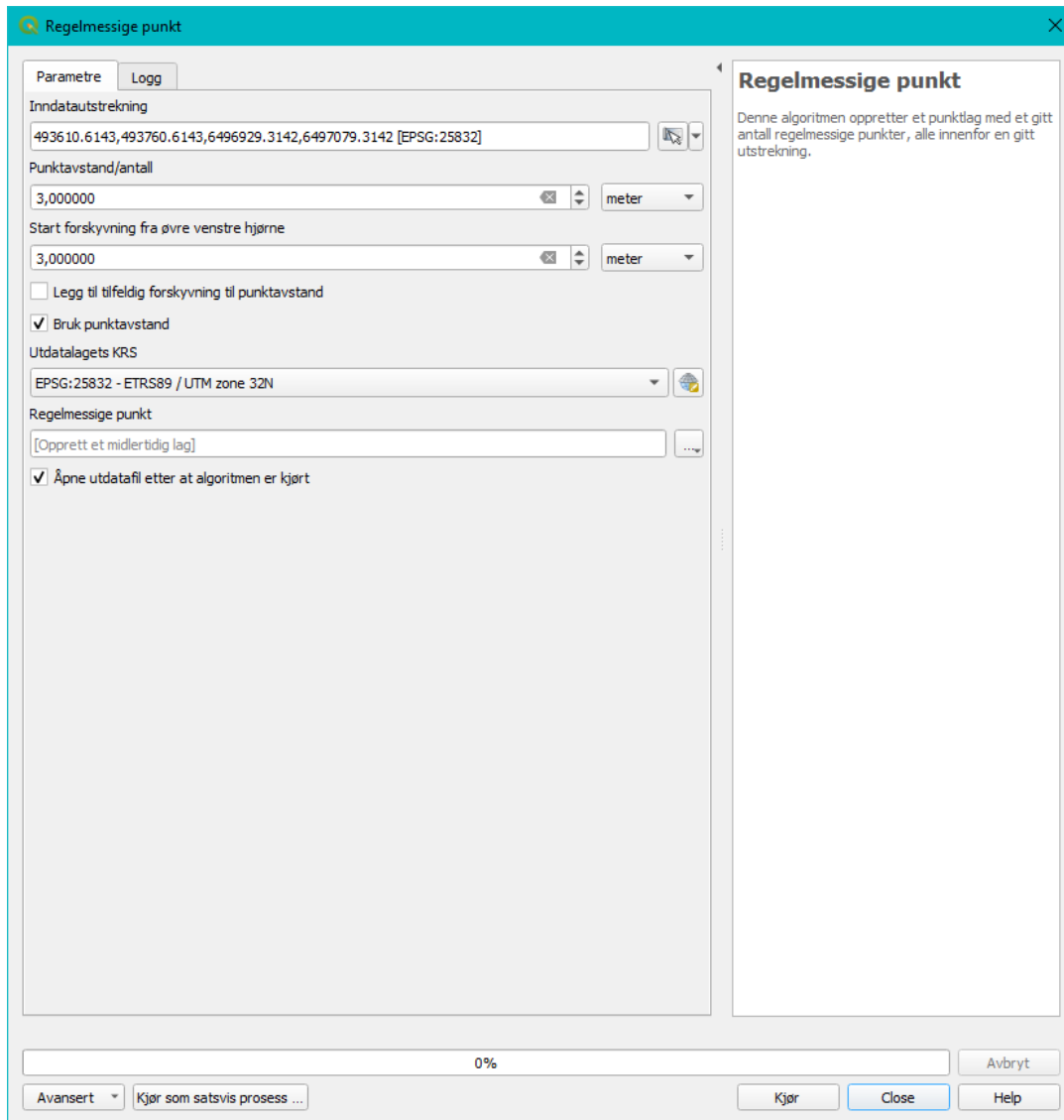
3.4.3 Opprettelse av kontrollpunkter

Kontrollpunkter til uttrekk av høydeavvik mellom filtrerte høydemodeller og sammenligningsgrunnlag opprettes i *QGIS*. Kontrollpunktene opprettes som et vektorpunktlag bestående av et sett med regelmessig fordelte punkt innenfor hvert testområdes utstrekning. Fordelingen er kvadratisk der alle punkt fordeles med tre meter i X- og Y- retning. For å unngå punkter langs randen av testområder forskyves punktfordelingen med tre meter i X- og Y-retning (Figur 11). Etter opprettelse slettes også nederste rad og høyre kolonne. Resulterende antall punkter og punktetthet per testområde fremgår av Tabell 9 og illustrert i Figur 12.

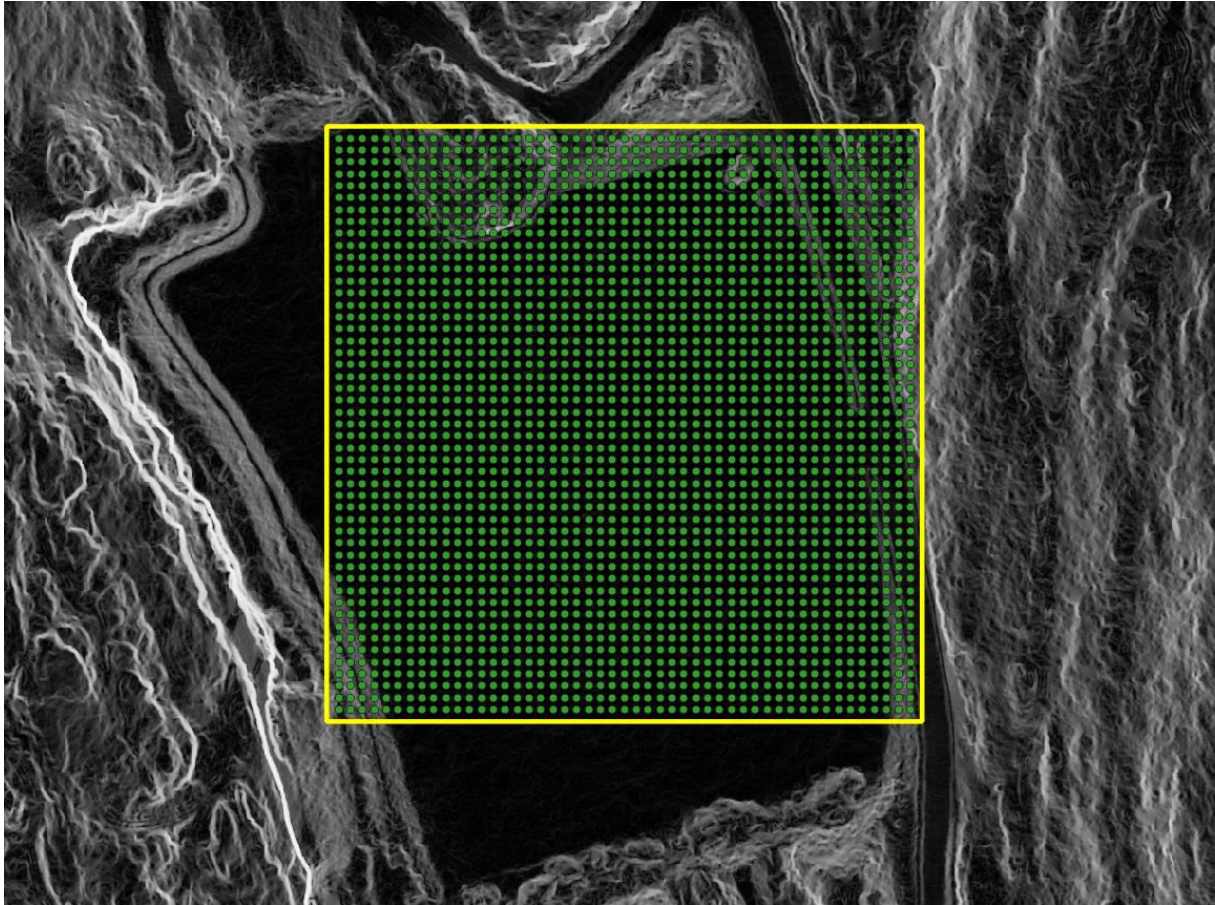
Tabell 9: Antall kontrollpunkter og punktetthet per testområde opprettet i *QGIS* til uttrekk av høydeavvik.

¹ Punktetthet ($\frac{Pkt.}{m^2}$).

Parametere	Testområde				
	1	2	3	4	5
Antall pkt.	2401	2401	2401	2401	2401
Punktetthet ¹	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11



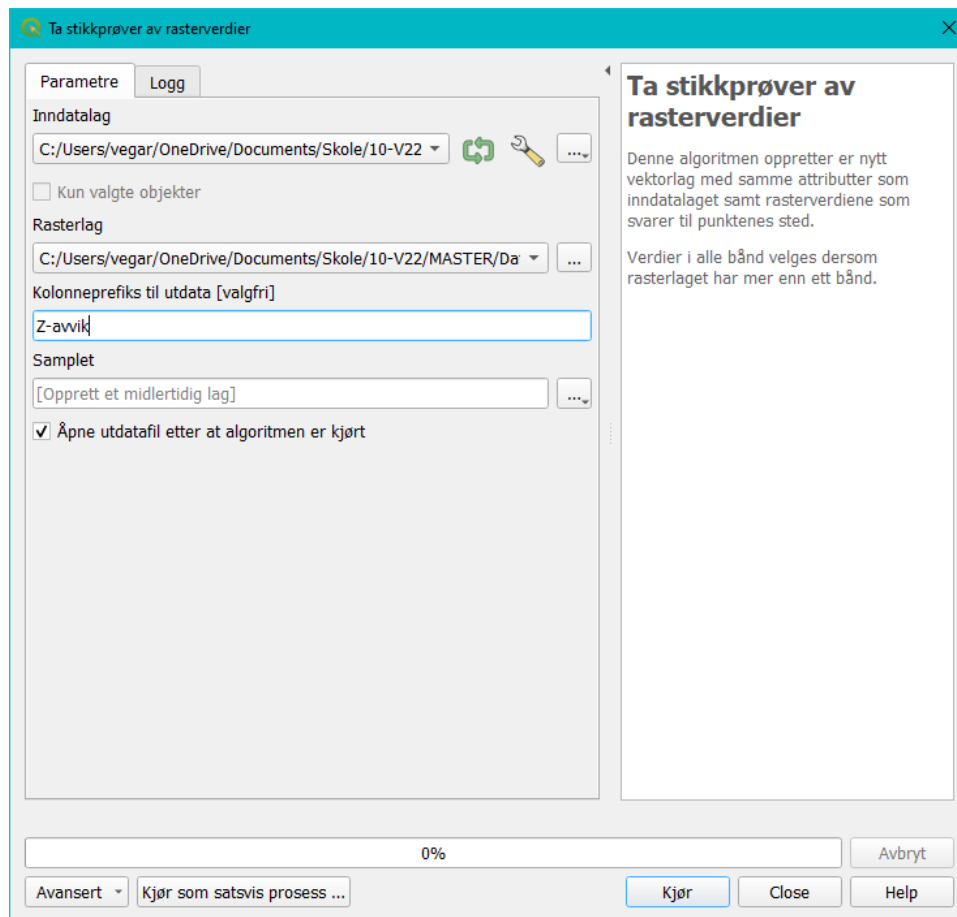
Figur 11: Opprettelse av regelmessige punkt i *QGIS* innenfor utstrekningen av et testområde i ETRS89 / UTM sone 32N. Punktavstand satt til tre meter og forskyvning fra øvre venstre hjørne satt til tre meter.



Figur 12: Opprettede kontrollpunkter innenfor testområdeavgrensing for testområde 4 vist over helningsrelieff.

3.4.4 Uttrekk av punktinformasjon fra differensiert DTM

Rasteranalyseverktøyet "Ta stikkprøver av rasterverdier" i *QGIS* benyttes til uttrekk av høydeavvik fra differensiert terrengoverflatemodell raster for alle filtreringsalgoritmer og testområder (Figur 13). Kontrollpunkter fra kapittel 3.4.3 benyttes som stikkprøver og differensierte DTM som blir omtalt i kapittel 3.10.3 benyttes som rasterlag. Høydeavvik legges til som en ny attributt i det nye vektorpunktlaget. Vektorpunktlagene med høydeavvik eksporteres til CSV for geometrisk kontroll.



Figur 13: Uttrekk av høydeavvik for regelmessige punkt fra falsk-normalisert DTM med QGIS-verktøyet "Ta stikkprøver fra rasterverdier".

3.5 Sammenligningsgrunnlag

Begrepet avvik benyttes som målbar størrelse for undersøkelse av differanser mellom de filtrerte modellene og sammenligningsgrunnlaget. Forutsetning for bruken av begrepet avvik om denne differansen krever en antagelse om at sammenligningsgrunnlaget er sann verdi (Statens kartverk, 2015).

3.5.1 Punktsky

Alle uklassifiserte punkt i punktskydataene fra Høydedata ekskluderes for alle testområder i *QTM*. Kun punkt som fra produsent er klassifisert som terrengoverflate beholdes i datasettene. De reduserte punktskyene eksporteres til nye LAS-filer og benyttes som sammenligningsgrunnlag til visuell inspeksjon av filtrerte punktskyer i *CloudCompare*.

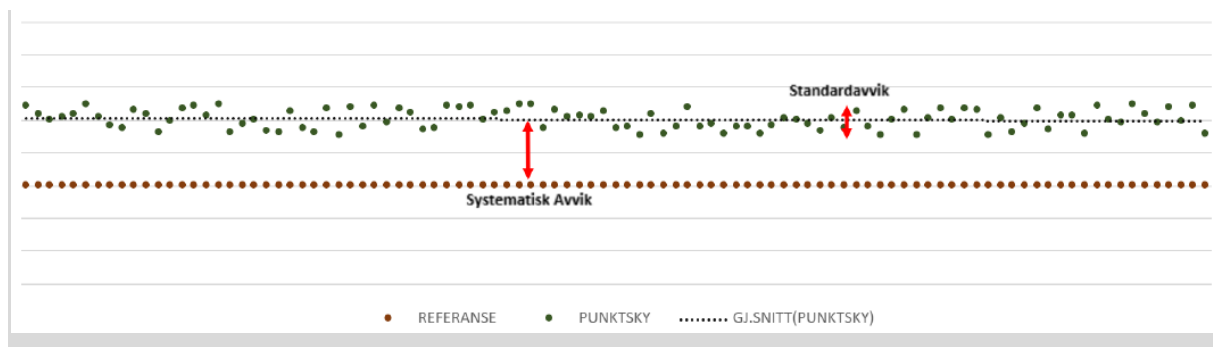
3.5.2 DTM

Som følge av ønsket om å undersøke *QTM* sin filtreringsalgoritme som en del av forsøket velges prosjekt DTM fra FvL Høydedata som sammenligningsgrunnlag. DTM eksportert fra Høydedata benyttes dermed som kvantitativt sammenligningsgrunnlag for DTM generert fra filtrerte punktskyer i *ALDPAT* og *QTM*.

DTM fra eksportert punktsky i kapittel 3.5.1 genereres med samme parametere som for DTM som omtales i kapittel 3.10.1 i *QTM*. Disse benyttes til å undersøke visuelt om det er differanser mellom DTM fra Høydedata og DTM generert fra punktsky fra kapittel 3.5.1. Dette utføres for å undersøke om det systematiske avviket som presenteres i kapittel 3.6.1 kan tilskrives forskjellig interpolasjon av DTM i *QTM* og Høydedata.

3.6 Kvalitetsmål

Kvalitetsmålene systematisk avvik, standardavvik og grove feil er sterkt korrelert da de hver for seg gir ufullstendig informasjon om nøyaktigheten i et datasett. For datasett der kvaliteten undersøkes ved kontrollmålinger, vil kvalitetsmålene være uttrykk for datasettets systematiske avvik, samt tilhørende standardavvik. Forutsetningen for den statistiske teorien som ligger til grunn for disse kvalitetsmålene er et datamateriale fritt for grove feil. Datamateriale fra LiDAR og lignende inneholder ofte grove feil, disse må derfor estimeres som en del av beregning av kvalitetsmål (Statens kartverk, 2015).



Figur 14: Illustrasjon av systematisk avvik og standardavvik for kontrollmåling av punktsky mot referansegrunnlag (Statens kartverk, 2022).

3.6.1 Kontrollmålinger

Kontrollmålingene gir uttrykk for modellenes systematiske avvik samt tilhørende standardavvik. Forutsetningen for disse kvalitetsmålene er at datamaterialet som benyttes er fritt for grove feil, dette omtales i kapittel 3.6.5.

Vurdering av en kontrollers troverdighet er sterkt korrelert med antallet stikkprøver som kontrolleres. Det vil derfor være enklere å bestemme om et datasett er dårlig dersom stikkprøveutvalget er forholdsvis stort enn når det er lite. Antallet stikkprøver av et objekt i kontrollområdet avgjøres basert på antall forekomster av objektet innenfor kontrollområdet. For dette forsøket aktuelle testområder vil dette medføre 200 stikkprøver per testområde (Statens kartverk, 2015). Det velges å øke antallet stikkprøver per testområde for dette forsøket, for å bedre kunne vurdere datasettenes kvalitet. En oversikt over antall stikkprøver per testområde er gitt av Tabell 10.

Tabell 10: Terrengdefinisjon, antall stikkprøver og utstrekning av testområder.

Område	Terrengdefinisjon	Stikkprøver	Areal testområde
Langemyr	Vegetasjon	2401	360000 m ²
Grenstøl	Hard flate	2401	360000 m ²
Bergsmyr	Hard flate	2401	360000 m ²
Fiane svingen	Vegetasjon	2401	360000 m ²
Fløyheia	Vegetasjon	2401	360000 m ²

3.6.2 Systematisk avvik

Statens kartverk (2013) angir systematisk avvik som kvalitetsmål for høydenøyaktighet til laserdata. Systematisk høydeavvik (a_h) benyttes som mål på gjennomsnittet av høydeavvik (ϵ_h) mellom datasett og referansegrunnlag (Figur 14),

$$a_h = \frac{\sum \epsilon_h}{n_h},$$

Formel 7: Beregning av systematisk høydeavvik (Statens kartverk, 2015).

for antall enkelt høydeavvik (n_h) (Statens kartverk, 2015).

Resulterende systematisk avvik kontrolleres mot et nøyaktighetskrav. Dersom systematisk avvik ikke oppfyller kravet, betegnes datasettet som dårlig.

For kontroll av datasett med stikkprøver skal det testes om datasett er signifikant dårlige før de endelig forkastes. Dersom alle objekter i et kontrollområde benyttes til kontrollen kan denne sammenlignes direkte mot kravet uten test av signifikans (Statens kartverk, 2015).

Med bakgrunn i den svært økte mengden stikkprøver per testområde, som omtalt i kapittel 3.6.1, velges det for dette forsøket å utføres en direkte sammenligning av kontroll mot krav.

Tabell 11: Kategorier for stedfestingsnøyaktighet (Vegdirektoratet, 2022).

Kategori	Nøyaktighetskrav
Høy presisjon	$\leq \pm 2$ cm
God presisjon	$\pm 3-6$ cm
Middels presisjon	$\pm 6-20$ cm
Lav presisjon	> 20 cm

Som krav for kontroll av systematiske avvik tas utgangspunkt i Vegdirektoratet (2022) sin kategori "*God presisjon*", som vist i Tabell 11. Denne kategorien sammenfaller med nøyaktighetskravet til terrengoverflatemodell i inngrepssonen definert for prosjektfasen "*Reguleringsplan*" i Vegdirektoratet (2016) sin gjeldene håndbok, V770 Modellgrunnlag. Dette nøyaktighetskravet er beholdt i høringsutkastet til ny håndbok R000 Modellgrunnlag (Vegdirektoratet, 2022). Det opprettes dermed to krav på henholdsvis 3 cm og 6 cm for kontroll av systematisk avvik.

3.6.3 Standardavvik

Statens kartverk (2015) angir standardavvik som en:

"... statistisk størrelse som angir spredningen for en gruppe måle- eller beregningsverdier i forhold til deres sanne eller estimerte verdier."

Der kvalitetsmålet standardavvik høyde (S_h) avledes fra enkelthøydeavvik (ϵ_h), systematisk høydeavvik (a_h) og antall enkelt høydeavvik (n_h):

$$S_h = \sqrt{\frac{\sum(\epsilon_h - a_h)^2}{n_h - 1}}$$

Formel 8: Beregning av standardavvik baser på kontrollmålinger (Statens kartverk, 2015).

(Statens kartverk, 2015)

3.6.4 RMS

RMS er en viktig statistisk verdi for å kunne evaluere de ulike filtreringsalgoritmenes parametere. RMS beregnes for avvik i Z-verdi mellom referansepunkt (Z_{ref}) og for Z-verdi for filtrerte DTM rutenett punkt ($Z_{flt-alg}$) med samme posisjon (x, y) i flatene:

$$\Delta Z(x_i, y_i) = Z_{flt-alg}(x_i, y_i) - Z_{ref}(x_i, y_i),$$

Formel 9: Beregning av høydeavvik mellom referansepunkt og filtrert punkt (Suleymanoglu & Soycan, 2019).

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^n \Delta Z}{n}}$$

Formel 10: Beregning av RMS (Suleymanoglu & Soycan, 2019).

der n er antall observasjoner og $i=1,2,\dots,n$ (Suleymanoglu & Soycan, 2019).

3.6.5 Grovfeilsøk

For målbare størrelser antas grove feil å være de systematiske avvik som er mer enn tre ganger kravet til standardavvik som følger av produktspesifikasjon, som beskrevet av Statens kartverk (2015). Det tas utgangspunkt i Statens kartverk (2013) sine krav til absolutt høydenøyaktighet for beregning av grove feil. Det er viktig å bemerke at det kun defineres krav for standardavvik for områder definert som veldefinerte harde flater. Det er ikke eksplisitt definert for områder preget av vegetasjon, men avviket skal være noe større (Statens kartverk, 2013). Som krav til standardavvik for områder med vegetasjon tas det utgangspunkt i Skjærpe et al. (2017) sitt benyttede krav. Benyttede krav til standardavvik for høydenøyaktighetskrav som videre gir krav til beregning av grove feil er gjengitt i Tabell 12. Kategorisering av testområder som harde flater eller vegetasjon fremgår av Tabell 10.

Tabell 12: Krav til standardavvik for absolutthøydenøyaktighet og grove feil for harde flater og vegetasjon i meter.

Parametere	Harde flater	Vegetasjon
Krav standardavvik	0.04 m	0.10 m
Krav grove feil	0.12 m	0.30 m

3.7 Geometrisk kontroll

Geometrisk kontroll er valgt som evalueringsmetode for høydeavvik mellom filtrerte modeller og sammenligningsmodell. Punktuttrekk fra differensierte terrengoverflatemodeller danner grunnlaget for geometrisk kontroll. Geometrisk kontroll utføres i Excel og CSV-filer omtalt i kapittel 3.4.4 danner datagrunnlaget for geometrisk kontroll.

3.7.1 Kontrollmålinger

Antall stikkprøver med tilhørende høydeavvik for alle filtreringsalgoritmer per testområde telles. Ved mindre antall stikkprøver i et datasett enn som beskrevet i kapittel 3.4.3 telles antall blanke stikkprøver og elimineres.

3.7.2 Grovfeilsøk

Alle stikkprøvepunkter med høydeavvik større enn krav til grove feil som nevnt i kapittel 3.6.5 telles. Største absolutte grove feil undersøkes, og andel av grove feil beregnes for hvert datasett. For videre beregninger ekskluderes alle stikkprøver som betegnes som grove feil.

3.7.3 Systematisk avvik, Standardavvik og RMS

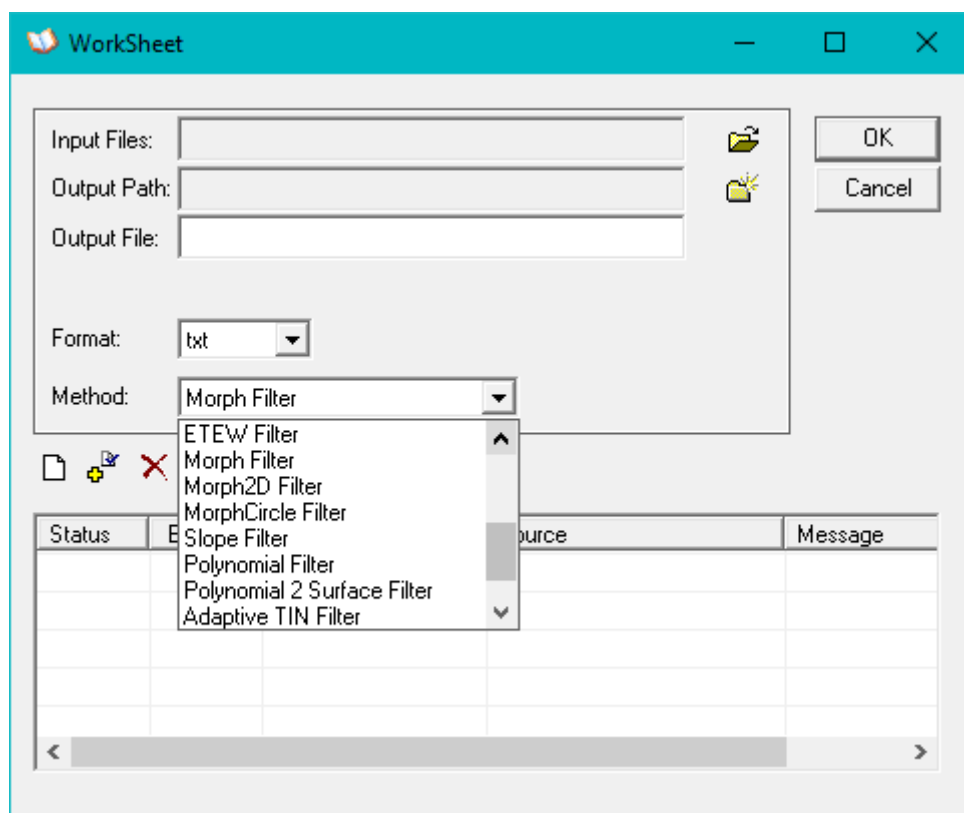
Systematisk avvik og standardavvik beregnes for alle filtreringsalgoritmer per testområde med bakgrunn i kapittel 3.6.2 og 3.6.3. Det beregnes også aggregert systematisk avvik og tilhørende standardavvik per filtreringsalgoritme. RMS beregnes for alle filtreringsalgoritmer per testområde.

3.7.4 Kontroll

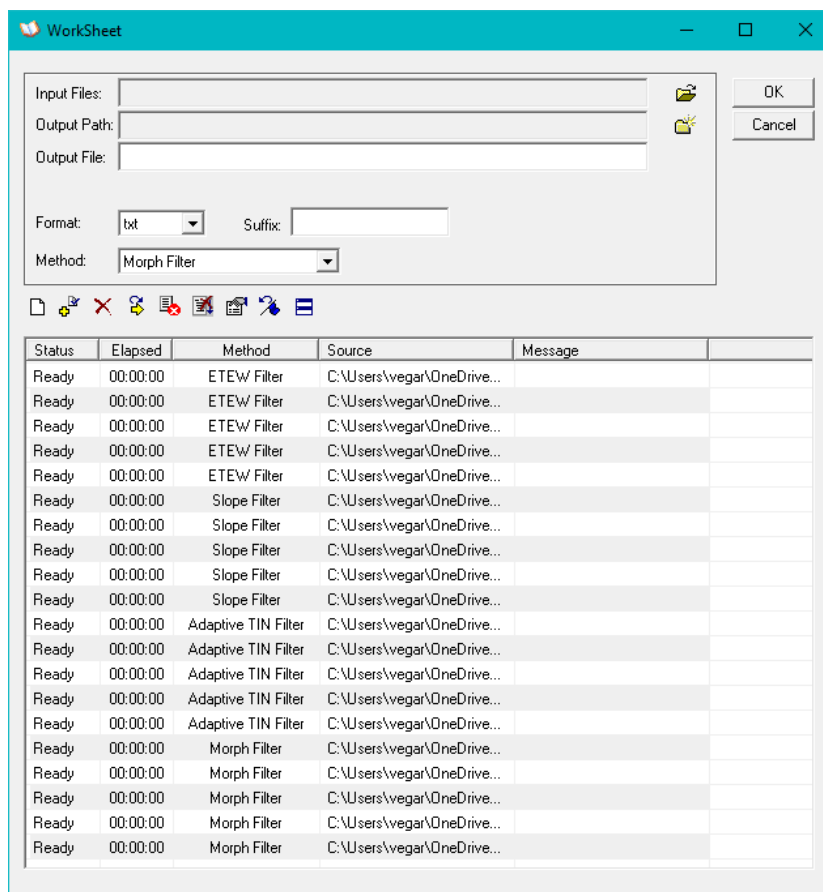
Kontroll av datasettene utføres ved sjekk av systematisk avvik mot krav til systematisk avvik beskrevet i kapittel 3.6.2. Kategorien som legges til grunne for kravet til systematisk avvik velges å deles i to separate kontroller. Det utføres to kontroller, en for hvert ytterpunkt av kravkategorien. Dermed kontrolleres absoluttverdien for systematisk avvik for alle filtreringsalgoritmer per testområde mot krav på henholdsvis 3 cm og 6 cm.

3.8 Filtrering *ALDPAT*

Filtrering av punktskyer i *ALDPAT* gjøres ved bruk av verktøyet "Worksheet" (Figur 15). I "Worksheet" velges filer som skal prosesseres, lagringsplass for resulterende fil, samt filnavn. Prosesseringsmetode velges for en enkeltfil eller flere filer samtidig. Parametere bestemmes for filgrunnlaget og prosesseringen legges til som en ny jobb. Flere jobber kan legges til i et "Worksheet", og de kan også redigeres eller slettes. Status for hver jobb vises i jobboversikten, sammen med prosesseringsmetode, prosesseringstid, kildefil og eventuelle beskjeder tilknyttet prosesseringen (Figur 16) (Zhang & Cui, 2007).



Figur 15: Worksheet og tilgjengelige filtreringsalgoritmer i *ALDPAT*.



Figur 16: ALDPAT Worksheet før klargjort til prosessering.

For bestemmelse av parametere for de fire ulike filtreringsalgoritmene er utgangspunkt tatt i tidligere forskning. Suleymanoglu og Soycan (2019) estimerte ved empirisk testing, kvalitativ analyse og kvantitativ evaluering, parametere for de fire aktuelle filtrene i ALDPAT for fire ulike terrengetyper. De fire ulike terrengetypene var; landlig område med variert terrenghelning og vegetasjon, urbant byområde med variert bebyggelse, flatt og landlig jordbruksområde og grovkupert bratt terreng med variert vegetasjon. De fire nevnte terrengetypene er til en viss grad overførbare til de fem testområdene som skal filtreres i dette forsøket. Parameterbestemmelse for filtreringsalgoritmene gjøres dermed med utgangspunkt i Suleymanoglu og Soycan (2019).

Videre optimalisering av parametere gjøres ved en kvalitativ inspeksjon av de filtrerte punktskyene i *CloudCompare*. De filtrerte punktskyene sammenlignes mot punktsky bestående av klassifiserte bakkepunkter fra kapittel 3.5.1.

3.8.1 Pilot

Suleymanoglu og Soycan (2019) utførte filtrering av punktskyer over i Bergama-distriktet i İzmir provinsen i Tyrkia. Dette området antas å ha svært annerledes klimatiske forhold og

vegetasjon enn det som er i det aktuelle området som filtrering skal utføres for i dette forsøket. Dette antas å medføre at parameterne for filtreringsalgoritmene må tilpasses noe til dette forsøket. For å undersøke denne antagelsen ble det utført en pilotfiltrering av alle testområdene med de parameterne som Suleymanoglu og Soycan (2019) kom frem til. Det ble foretatt en visuell inspeksjon av alle de resulterende filtrerte punktskyene sammen med sammenligningsgrunnlaget fra kapittel 3.5.1 i *CloudCompare*.

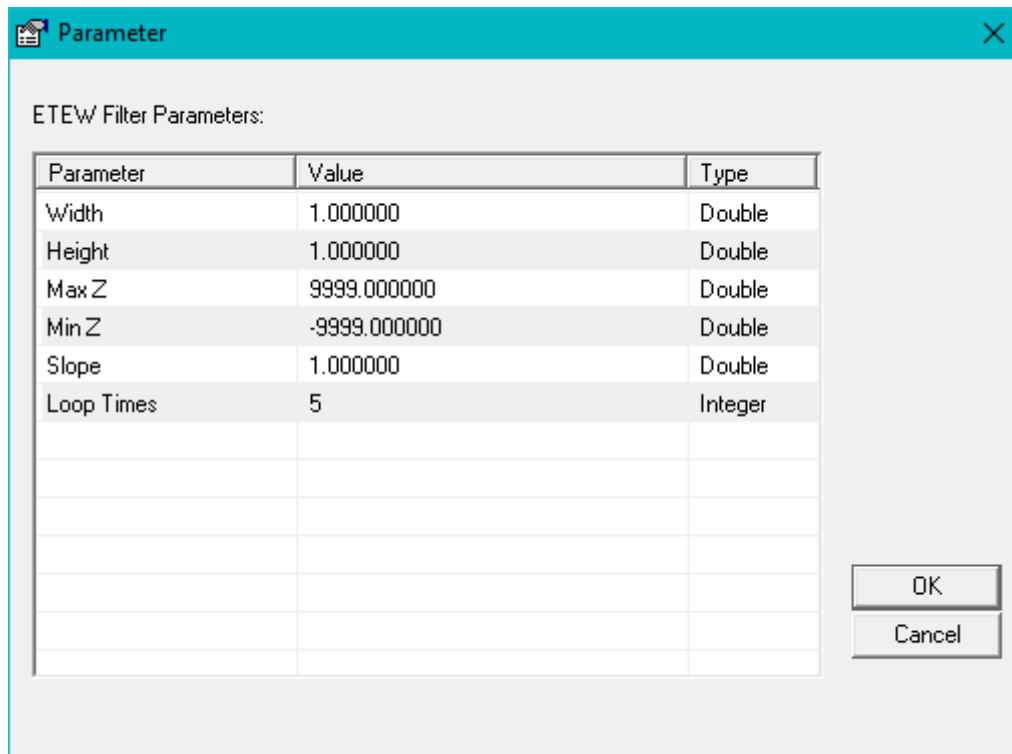
For de algoritmene og testområdene som ikke er tilfredsstillende ved visuell inspeksjon ble parametere oppdatert med nye verdier. Dette ble gjentatt frem til de filtrerte punktskyene ikke skilte seg merkbart fra sammenligningsgrunnlaget.

3.8.2 ETEW

Punktskyer for alle de fem testområdene ble individuelt filtrert med ETEW-algoritmen fra *ALDPAT*. Parametere for ETEW-filtrering i *ALDPAT* kan sees i Figur 17, og verdier for parametere som ble benyttet for hvert testområde fremgår av Tabell 13. Denne fremgangsmåten er generell for alle filtreringsalgoritmene i *ALDPAT*.

Tabell 13: Verdier for parametere benyttet for filtrering med ETEW-algoritmen for alle fem testområder.

Parametere	Testområde				
	1	2	3	4	5
Width (m)	0.75	1	0.75	1	0.5
Height (m)	0.75	1	0.75	1	0.5
Slope (°)	0.5	0.3	0.5	1	0.3
Loop times	1	1	1	1	7



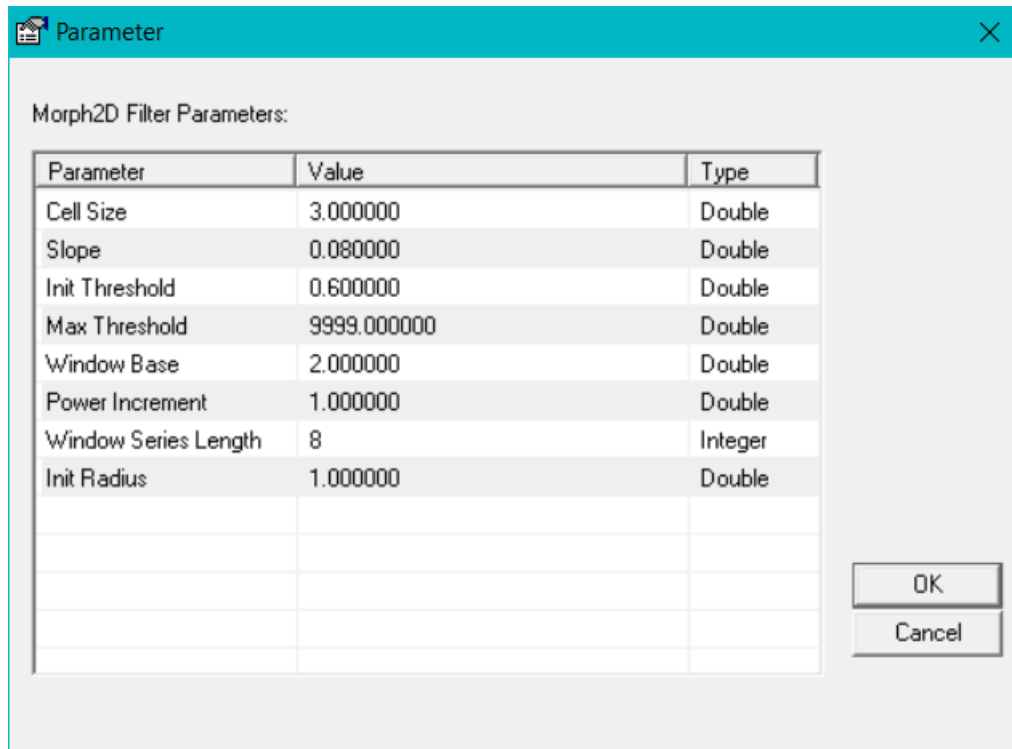
Figur 17: Parametere ETEW *ALDPAT*.

3.8.3 PM

Parametere for PM-filtrering i *ALDPAT* kan sees i Figur 18, og verdier for parametere som ble benyttet for hvert testområde fremgår av Tabell 14.

Tabell 14: Verdier for parametere benyttet for filtrering med PM-algoritmen for alle fem testområder.

Parametere	Testområde				
	1	2	3	4	5
Cell Size	0.5	1	0.75	3	0.5
Window Base (m)	2	2	2	2	2
Power Increment	1	1	1	1	1
Max Window Length (m)	8	8	8	8	8
Slope (°)	0.8	1	0.8	0.08	0.3
Initial Threshold (m)	0.3	0.4	0.3	0.6	0.2



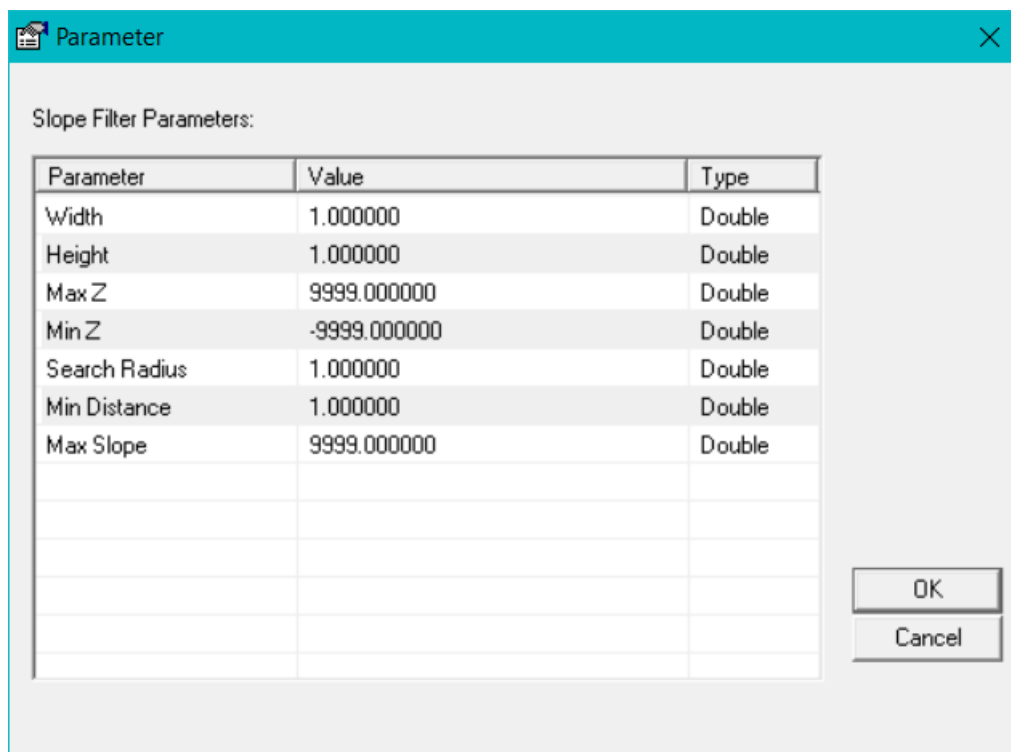
Figur 18: Parametere PM *ALDPAT*.

3.8.4 MLS

Parametere for MLS-filtrering i *ALDPAT* kan sees i Figur 19, og verdier for parametere som ble benyttet for hvert testområde fremgår av Tabell 15.

Tabell 15: Verdier for parametere benyttet for filtrering med MLS-algoritmen for alle fem testområder.

Parametere	Testområde				
	1	2	3	4	5
Width (m)	0.5	2	0.75	1	0.6
Height (m)	0.5	2	0.75	1	0.6
Search Radius (m)	10	1	5	1	20
Minimum Distance (m)	2	1	2	1	1
Maximum Slope (m)	0.3	0.3	0.8	1 ¹	0.5



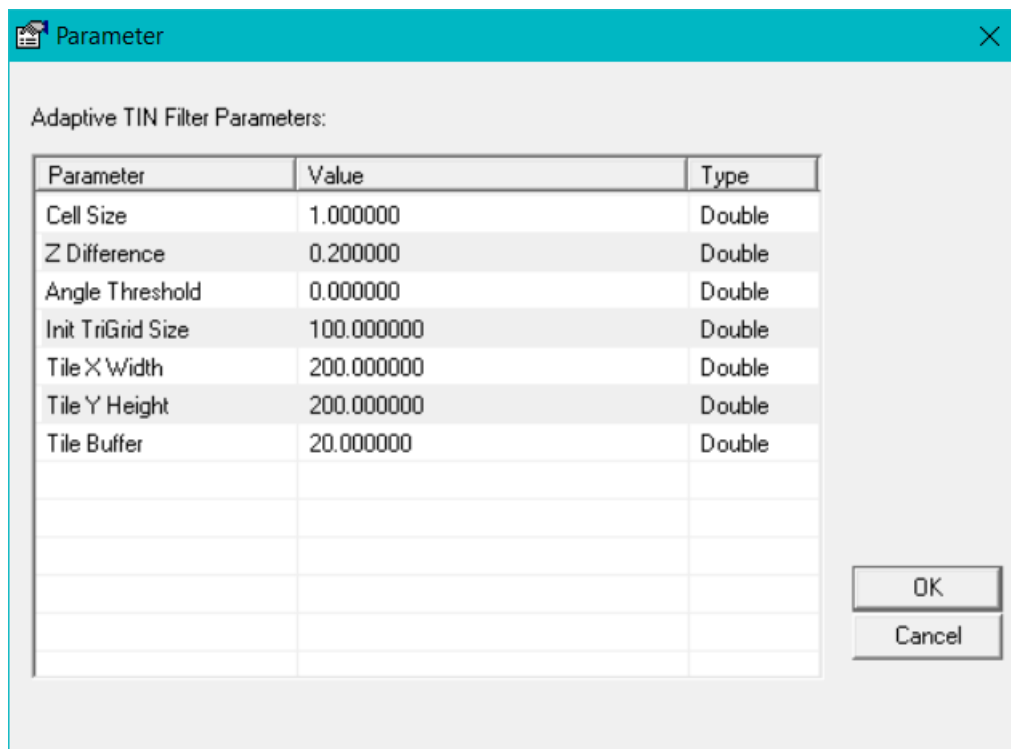
Figur 19: Parametere MLS *ALDPAT*.

3.8.5 ATIN

Parametere for ATIN-filtrering i *ALDPAT* kan sees i Figur 20, og verdier for parametere som ble benyttet for hvert testområde fremgår av Tabell 16.

Tabell 16: Verdier for parametere benyttet for filtrering med ATIN-algoritmen for alle fem testområder.

Parametere	Testområde				
	1	2	3	4	5
Cell Size	0.5	1	0.75	1	0.6
Z Difference (m)	0.2	0.8	0.3	0.2	0.2
Init. TriGrid Size (m)	10	10	10	100	25
Tile X Width (m)	200	20	200	200	200
Tile Y Width (m)	200	20	200	200	200
Tile Buffer	20	2	20	20	20



Figur 20: Parametere ATIN *ALDPAT*.

3.9 Filtrering *QTM*

Above Ground Level Analyst (AGL) i *QTM* beregner relative høyder over terrengoverflaten i en punktsky i stedet for absolutte høyder i punktskyen. Dette gjøres i AGL ved beregning av terrengoverflate eller ved estimering av bakkepunkter. I *QTM* er estimering av bakkepunkter ikke tilsvarende en fullverdig terrengoverflateberegning (Applied Imagery LLC, 2018).

3.9.1 Above Ground Level Analyst

For beregning av terrengoverflate benytter AGL *QTM* sin egne filtreringsalgoritme, LidarSense. Av e-post utveksling med Umansky (2022) i Applied Imagery LLC fremgår det at så vidt han vet eksisterer det ingen "white papers" som diskuterer eller evaluerer denne algoritmen. Det er derfor noe ukjent hvordan denne algoritmen klassifiserer punkter som bakkepunkter.

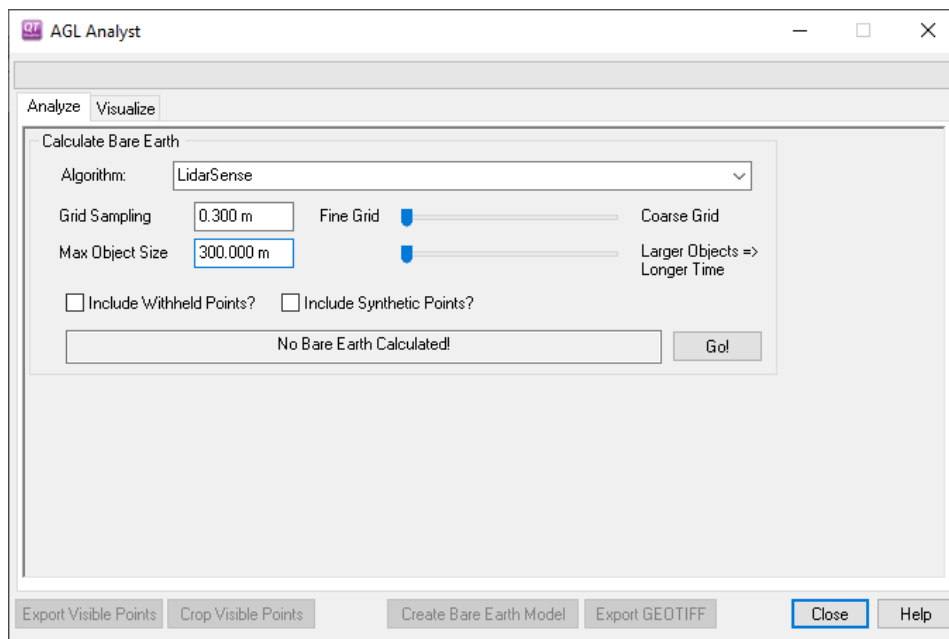
Av Applied Imagery LLC (2018) sin hjelpeside i *QTM* forklares prosesseringsstegene til AGL og de brukerdefinerte parameterne som leder frem til beregning av terrengoverflatemodell. Det er kun beregning av terrengoverflatemodell som er av interesse for dette forsøket, dermed vil ikke andre funksjoner i AGL enn de som er relevante for terrengoverflatemodellen gjøres rede for.

LidarSense er *QTM* sin beregning av terrengoverflate for punktsky, og er av *QTM* beskrevet som den mest nøyaktig. *QTM* har også algoritmen QT Basic, som er den tidligere gjeldene algoritmen for estimering av bakkepunkter. En forskjell mellom de to algoritmene som fremgår av Applied Imagery LLC (2018) sin hjelpeside i *QTM* er defineringen av rutenettsoppløsning.

Rutenettsoppløsning er en av de to brukerstyrte parameterne (Figur 21). For LidarSense foreslår *QTM* rutenettsoppløsning med bakgrunn i punktettheten til en aktuell punktsky. For QT Basic er denne brukerdefinert, og det kreves følgelig en del prøving og feiling for å finne riktig oppløsning. QT Basic vil ikke bli videre undersøkt i dette forsøket.

Definering av et objekts maksimale størrelse i punktskyen er den andre brukerstyrte parameteren (Figur 21). Dette viser til den maksimale størrelsen til, for eksempel et hus, bro eller lignende i punktskyen, og sørger for at disse ikke klassifiseres som terrengoverflate av algoritmen. Desto større et objekt velges å kunne være i punktskyen, desto lengre tid vil filtreringen av bakkepunkter ta (Applied Imagery LLC, 2018).

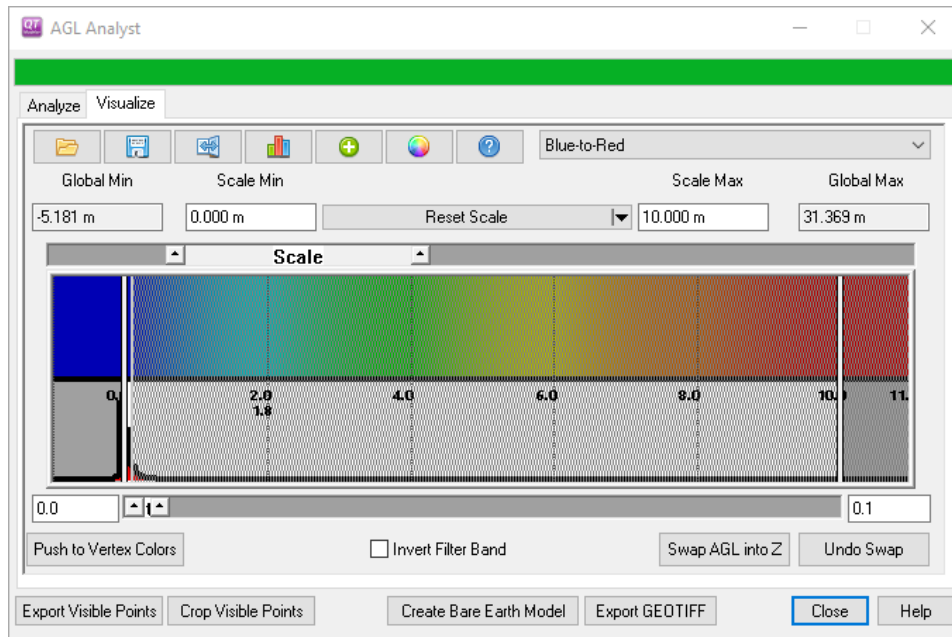
Rutenettoppløsning for LidarSense i AGL settes til det minste mulige på 30 cm, som følge av de opprinnelige punktskyenes høye punktetthet. Maksimal objektsstørrelse settes til 300 m for å ta høyde for større bygninger i testområde fem.



Figur 21: "Parameterne Grid Sampling" og "Max Object Size" for bakkefiltrering med filtreringsalgoritmen LidarSense i AGL Analyst i *QTM*.

Etter filtrering av punktsky ned LidarSense i AGL kan beregnet terrengoverflatemodell opprettes (Figur 22) (Applied Imagery LLC, 2018). Parametere for opprettelse og eksportering av terrengoverflatemodell i *QTM* omtales i henholdsvis kapittel 3.10.1 og 3.10.2.

Det er også utforsket en mulighet for å lagre en filtrert punktsky. Denne lagres ved å gjøre uttrekk av punkter med en relativ høyde for et spesifisert intervall (Figur 22). For visualisering og sammenligning av filtrerte punktskyers filstørrelser settes intervallet fra null (0 m) til ti cm (0.1 m) som vist i Figur 22.



Figur 22: Fordelingen av relative terreng høyder i AGL Analyst i QTM etter filtrering med LidarSense og uttrekkshøyder for filtrert punktsky.

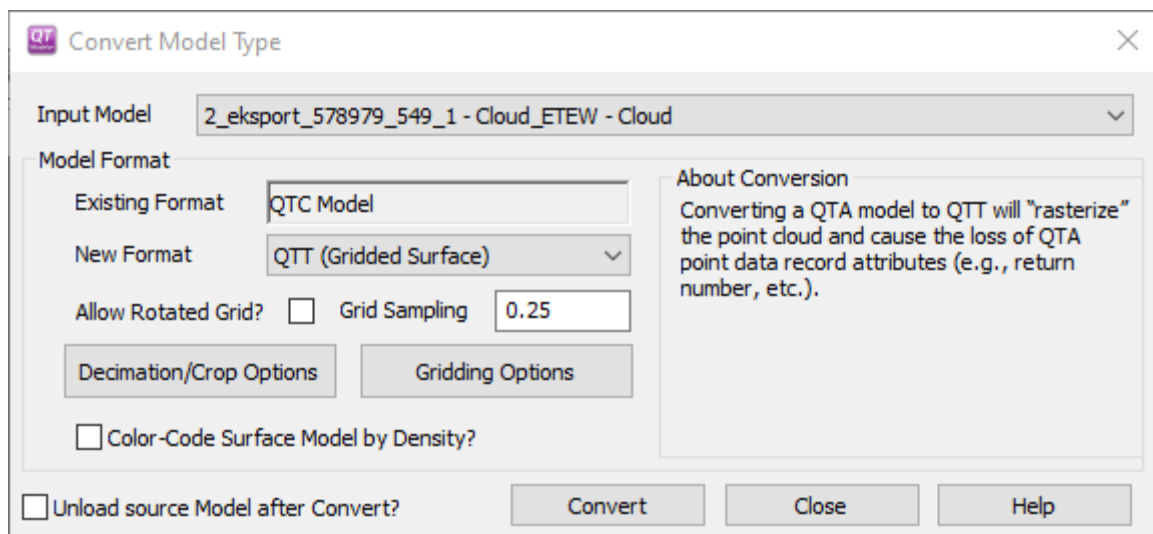
3.10 Opprettelse DTM

For å kunne sammenligne de ulike filtreringene av punktskyene velges samme metode for opprettelse av DTM for filtrerte punktskyer fra *ALDPAT* og *QTM*. *QTM* velges som programvare for opprettelse av DTM for å ikke tilføye flere programvarer for prosessering av punktskyene i forsøket. Videre er valget av *QTM* også naturlig med bakgrunn i beregning av terrengoverflate i *QTM* i AGL omtalt i kapittel 3.9.1.

Oppløsning ved opprettelse av alle DTM velges lik oppløsning fra DTM eksportert fra FvL Høydedata som omtalt i kapittel 3.3.5. Dette gir da teoretisk oppløsning på 25 cm for alle DTM.

3.10.1 Opprettelse DTM

Ved opprettelse av DTM fra punktsky i *QTM* betegnes prosessen som en konvertering av modelltype (Convert Model Type). *QTM* benytter en "rasterisering" av punktsky ved opprettelse av DTM. Prosessen utføres ved opprettelsen av et brukerspesifisert matematisk rutenett, der hovedparameter for å styre opprettelse er oppløsning på hver rute i rutenettet. Denne oppløsningen er gitt i enheten meter (Figur 23) (Applied Imagery LLC, 2018).



Figur 23: Initial parametere for konvertering av punktsky til DTM i *QTM*.

Videre evalueres alle punkter innenfor hver enkelt rute for bestemmelse av høydeverdi. Disse evalueres etter en av de fire følgende algoritmene for hver rutes høydeverdi (Figur 24) (Applied Imagery LLC, 2018):

- **Min Z**, velger høydeverdi for hver rute basert på laveste høydeverdi innenfor rutens utstrekking. Denne anbefales av *QTM* for å estimere terrengoverflate, samt at denne algoritmen er godt egnet for å eliminere "spikes" i DTM.
- **Max Z**, velger høydeverdien for hver rute basert på høyeste høydeverdi innenfor rutens utstrekking. Denne er i hovedsak anbefalt av *QTM* å brukes til opprettelse av DOM.
- **Mean Z**, velger høydeverdi for hver rute basert på gjennomsnittet av alle høydeverdiene innenfor en routes utstrekking. Denne er av *QTM* anbefalt for gjengivelse av DOM, og er noe dårligere på ekskludering av "spikes" i resulterende raster enn Min Z.
- **Max I**, velger høydeverdi for hver rute basert på høydeverdien på det punktet innenfor rutens utstrekking som har den høyeste intensitetsverdien tilknyttet seg.

(Applied Imagery LLC, 2018).

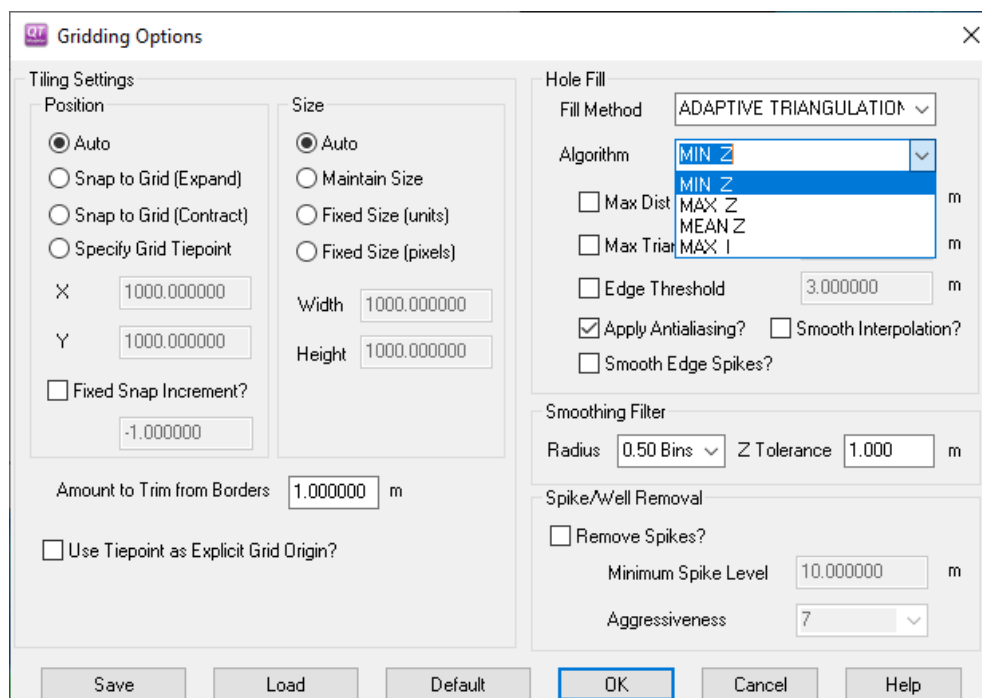
For dette forsøket er algoritmen Min Z valgt som høydebestemmelsesalgoritme. Dette er valgt ettersom alle punktskyer som det skal genereres DTM for i dette forsøket antas å være filtrerte terrengoverflater.

Videre ved opprettelse av DTM fra filtrert punktsky vil programvaren kunne måtte håndtere tomrom i deler av punktskyen. Dermed er et av de viktigste valgene ved opprettelse av DTM hvordan områder uten data skal tolkes av programvaren i opprettelsesprosessen. *QTM* har fire ulike valg for håndtering av ruter uten høydeverdi (Figur 25). De tre første metodene som nevnes for håndtering av ruter uten høydeverdier må sees på som et kontinuum (Applied Imagery LLC, 2018).

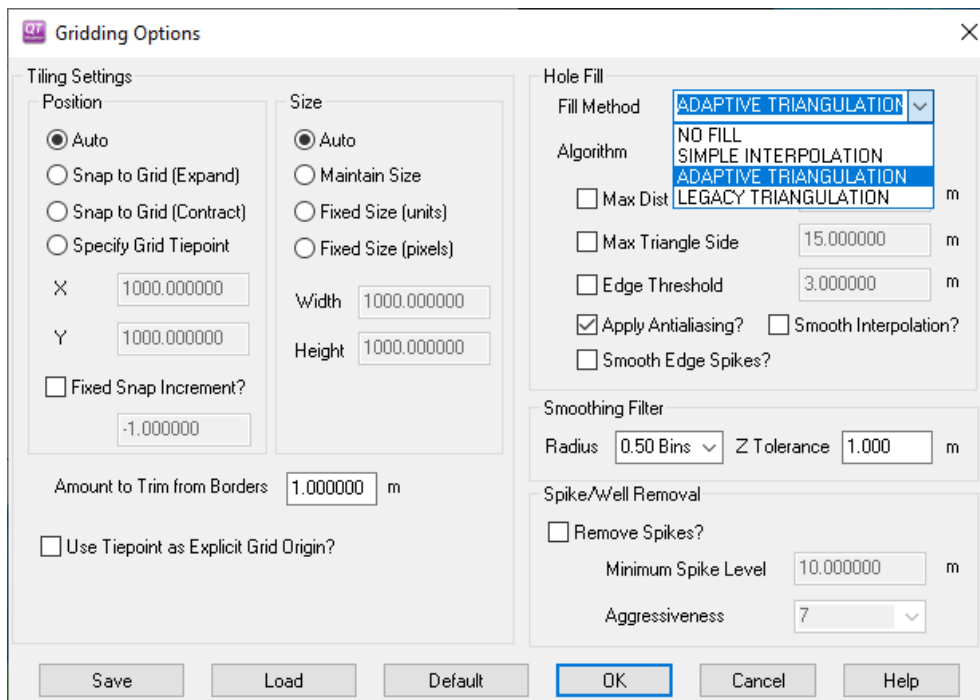
- No Fill, for ruter uten høydeverdi tilegnes verdien "null".
- Simple Interpolation, er en enkel interpolasjon av høydeverdi for de ruter uten høydeverdi som grenser til minimum fem ruter med ekte høydeverdi. Høydeverdi interpoleres basert på høydeverdien for minimum fem naboruter og maksimum åtte naboruter. Den interpolerte høyden i ruten er et resultat av gjennomsnittet av tilstøtende naboruter.
- Adaptiv Triangulation, utføres som et videre steg etter Simple Interpolation, der eventuelle gjenværende hull i DTM etter Simple Interpolation tettes med 3D-triangler. Deretter tilegnes høydeverdien fra triangelflatene til den underliggende tomme ruten.
- Legacy Triangulation, er *QTM* sin tidligere brukte trianguleringsmetoden. Denne metoden triangulerte DTM før rutenettdeling av området og er i ferd med å bli utfaset.

(Applied Imagery LLC, 2018).

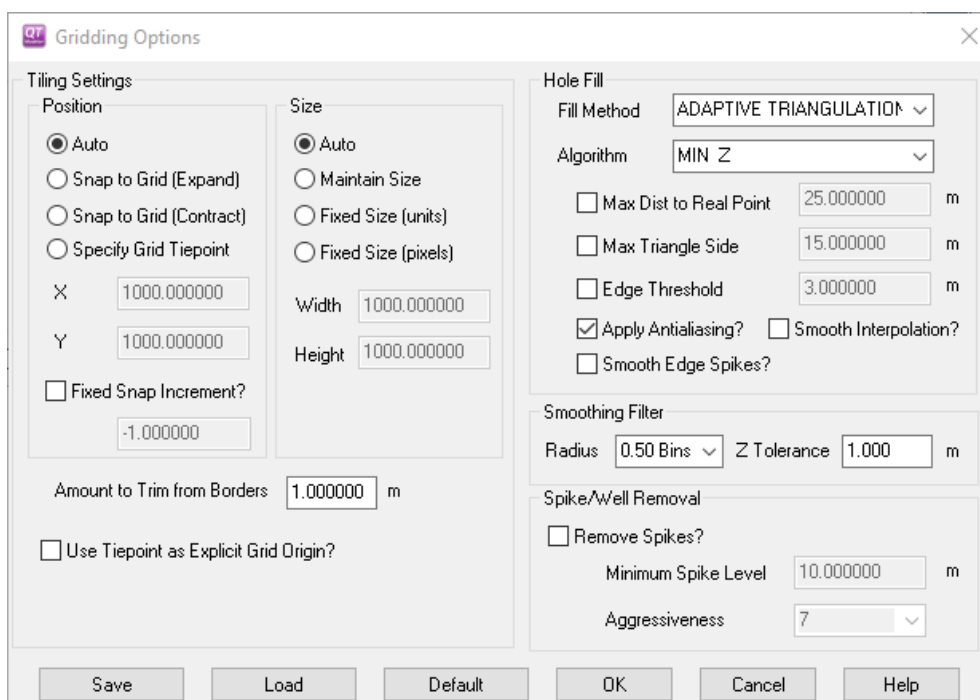
Ettersom det er flere større bygninger i minst ett av testområdene forventes større områder med "null" data fra filtreringen av punktsky. Adaptiv Triangulation velges med bakgrunn i denne antagelsen.



Figur 24: Skjermdump *QTM* Gridding Options for algoritmer for bestemmelse av høydeverdi i DTM.



Figur 25: Skjermdump *QTM* Gridding Options for metoder for interpolering av "null" verdier.



Figur 26: Parametere for opprettelse av DTM fra punktsky i *QTM*.

For Adaptive Triangulation er det mulig å sette begrensinger ved tettingen av hull i DTM. Begrensningene er de brukerdefinerte parameterne maksimal tillatte avstand til ekte punkt med høyde, maksimal tillatte triangelsidelengde og kantterskel for bygninger (Applied Imagery LLC, 2018). For dette forsøket settes det ikke begrensinger på disse parameterne.

Andre mulige parametere for opprettelse av DTM er bruken av Anti-Aliasing, Smooth Interpolation og Spike Removal (Figur 26).

Anti-Aliasing parameteren forsøker å forbedre presisjonen i trianguleringen ved å midlertidig dele hver rute i 16 like store segmenter, og henter informasjon om hvilket segment i ruten som inneholder punktet som definerer rutens høydeverdi. Ved å hensynta denne segmenteringen ved triangulering av DTM vil presisjonen for de avledede trianglene forbedres, ifølge Applied Imagery LLC (2018). Denne funksjonen benyttes i dette forsøket.

Smooth Interpolation aktiverer Smoothing Filter parameterne og utfører en glatting av punktskydatasettet før filtrering dersom valgt. Dette gjøres ved eliminering av punkter der høydeverdien mellom nabopunkter er signifikant forskjellige innenfor en definert radius. Denne funksjonen benyttes ikke i dette forsøket ettersom denne bidrar til mindre presis DTM.

Remove Spikes er en algoritme som forsøker å identifisere ruter som inneholder feilaktig høydedata som ikke er ønskelig å fremvise i filtrert modell. *QTM* evaluerer høydeverdi for hver rute relativ til de 20 nærmest liggende naborutene. Der telles antall ruter som oppfyller krav til "Minimum Spike Level" som er brukerdefinert. *QTM* vil telle hvor mange av de 20 omkringliggende rutene der differansen er mindre enn minimumskravet. Dersom denne tellingen returnerer mellom en og fem ganger antas ruten å være en "spike". Ved "spike" interpoleres ny høydeverdi for ruten ved "Simple Interpolation". Aggressiviteten i "Spike"-fjerning definerer hvor mange telte naboruter som definerer en "spike" (Applied Imagery LLC, 2018). Denne funksjonen er valgt å ikke benyttes i dette forsøket, ettersom dette vil skape usikkerhet om evalueringen av selve filtreringsalgoritmen LidarSense.

3.10.2 Eksportering DTM

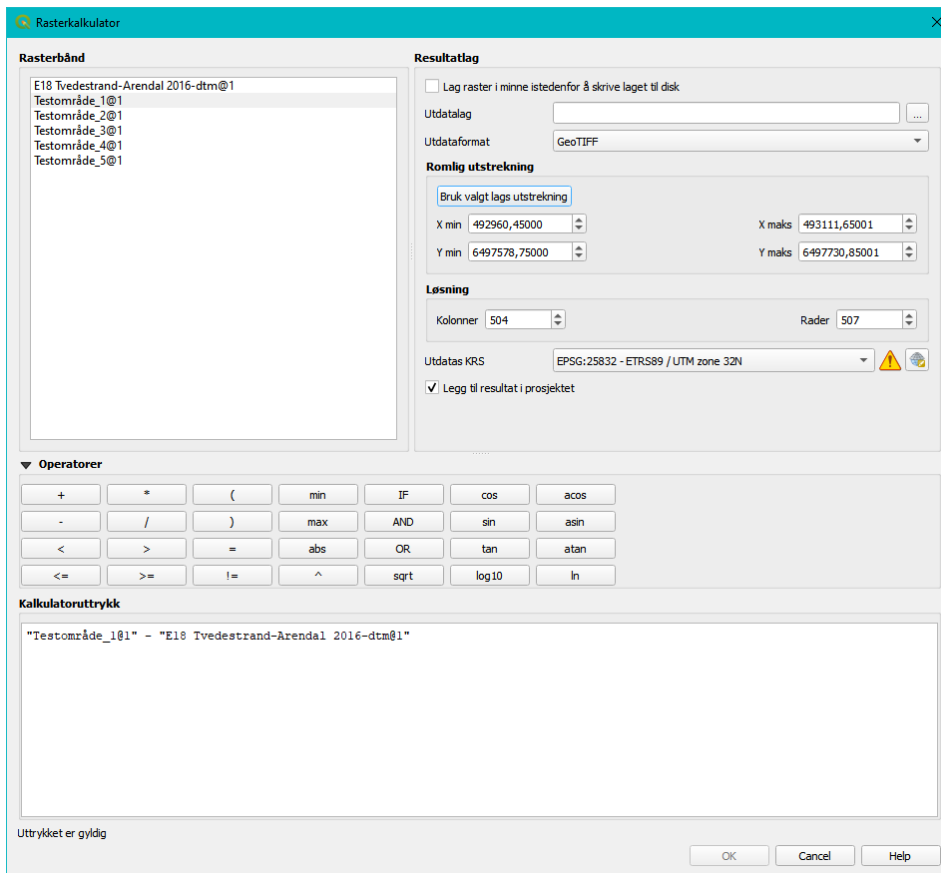
Alle DTM eksporteres fra *QTM*, dette gjøres ved å eksportere DTM generert i kapittel 3.10.1. til GeoTIFF-filformat.

3.10.3 Differensiert DTM

Normalisert DOM (nDOM) dannes ved å subtrahere DTM fra DOM for et sammenfallende område. nDOM er særlig egnet med hensyn på skoganalyse for blant annet deteksjon av høyder til trær over terrengoverflaten (Sefercik et al., 2014).

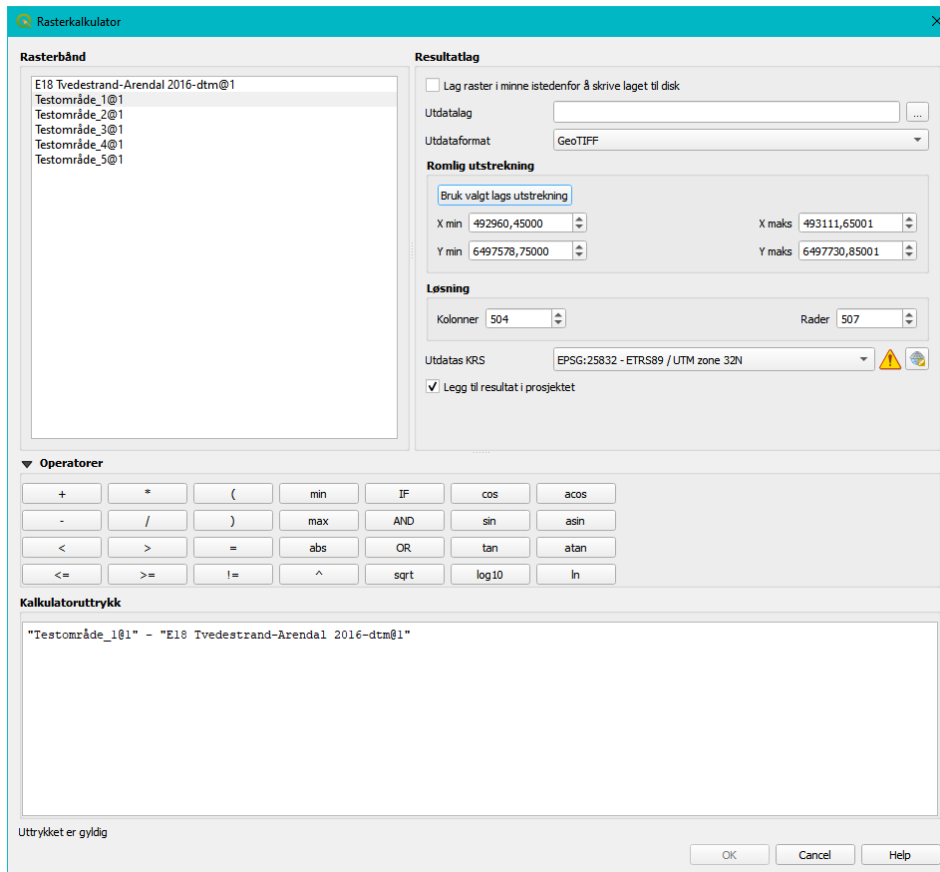
Prosedyren for å normalisere DOM benyttes i dette forsøket til deteksjon av differanser mellom flere DTM generert over samme område. GeoTIFF eksport av DTM generert fra alle filtrerte punktskyer normaliseres mot sammenligningsgrunnlaget fra FvL Høydedata.

Normaliseringen utføres i QGIS ved bruk av rasterverktøyet "Rasterkalkulator" (



Figur 27). Alle DTM avledet fra filtrerte punktskyer subtraheres mot sammenligningsgrunnlaget.

Utstrekningen for normaliseringen settes lik utstrekningen til det aktuelle testområdet filtrert DTM tilhører.



Figur 27: Skjermdump Rasterkalkulator i QGIS for normalisering av filtrert DTM mot sammenligningsgrunnlag.

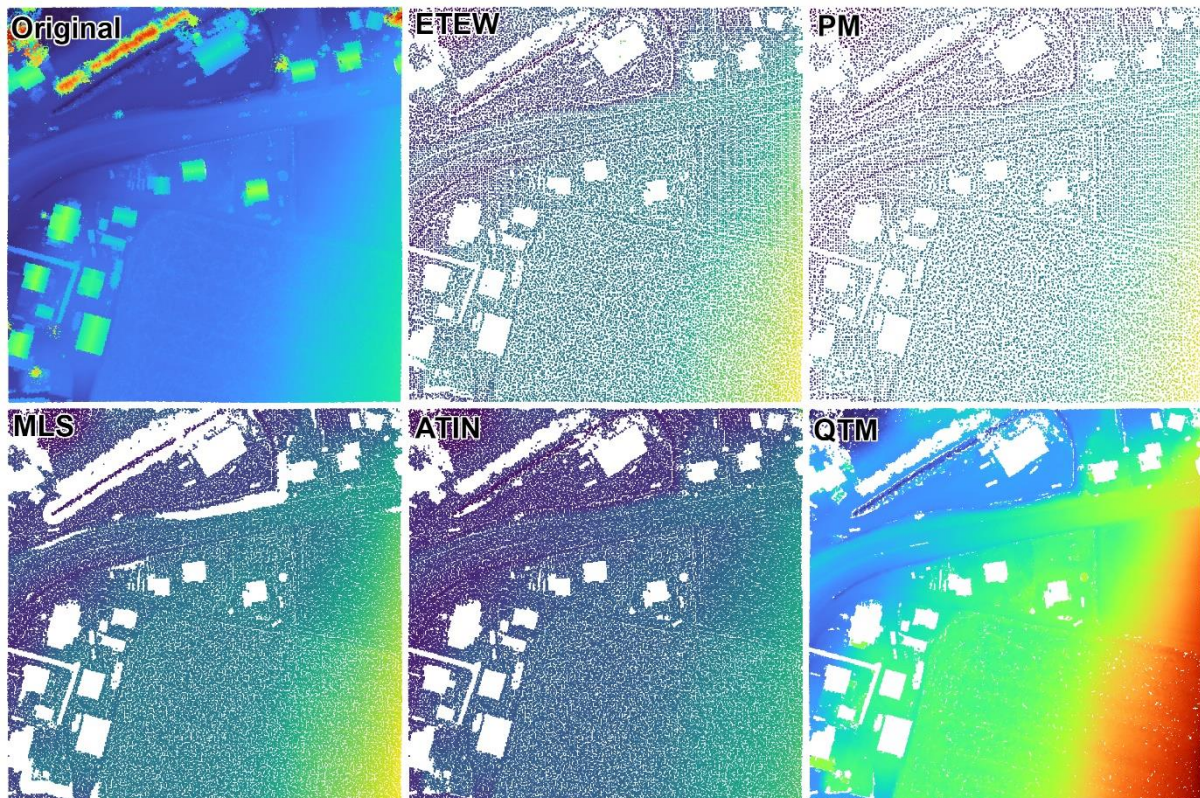
4. Resultater

Alle verdier i diagrammene er hentet fra tabell som kan sees i Vedlegg 1.

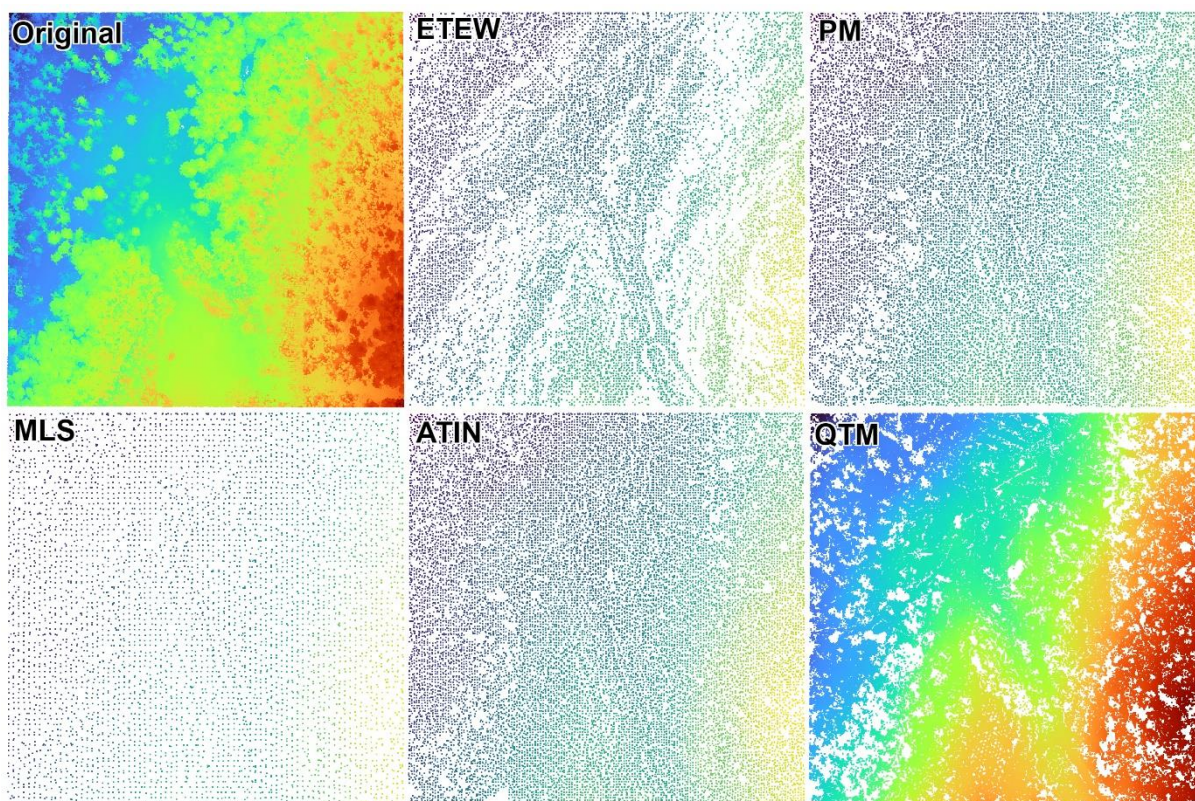
4.1 Filtrering Punktskyer

Resultater fra filtreringen av punktskyer for alle filtreringsalgoritmer per testområde presenteres i dette kapitlet. Disse presenteres som en sammenstilling av alle filtreringsalgoritmene per testområde sammen med den opprinnelige ufiltrerte punktskyen. Videre presenteres Testområde en, to, tre, fire og fem i Figur 28, Figur 29, Figur 30, Figur 31 og Figur 32

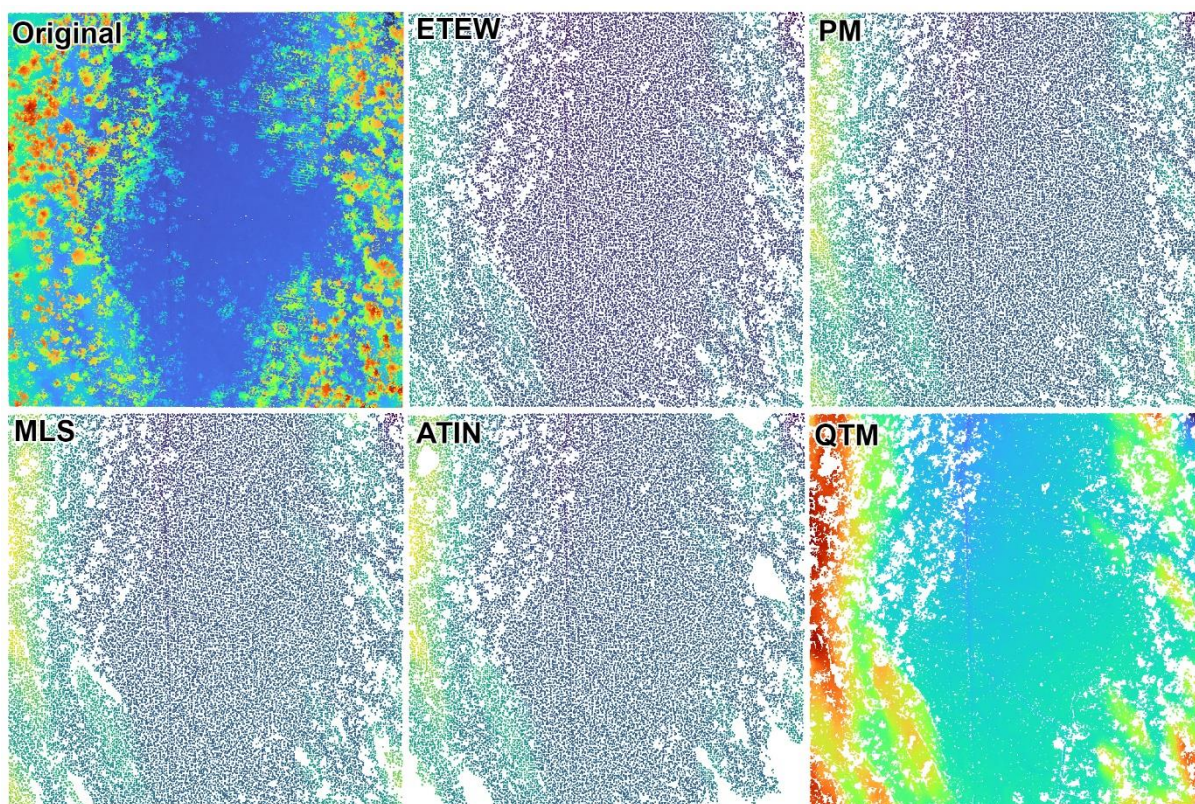
Først presenteres reduksjon av filstørrelse for *ALDPAT*-filtreringsalgoritmer, så for alle filtreringsalgoritmer, inklusiv *QTM* per testområde. Dette presenteres som diagrammer med prosentandel av gjenværende filstørrelse i Figur 33 og Figur 34.



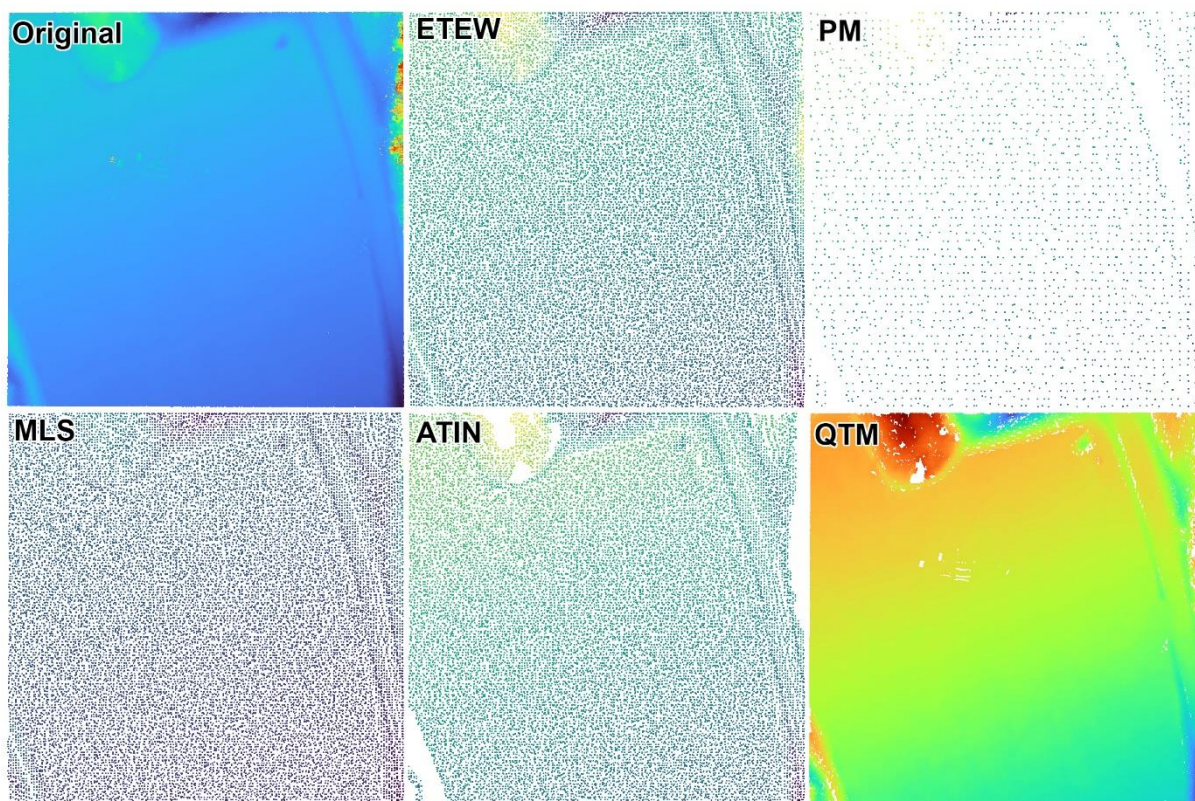
Figur 28: Sammenstilling av skjermdumper fra *QGIS* av ufiltrert punktsky, ETEW-, PM-, MLS-, ATIN- og *QTM*-filtrert punktsky for testområde en.



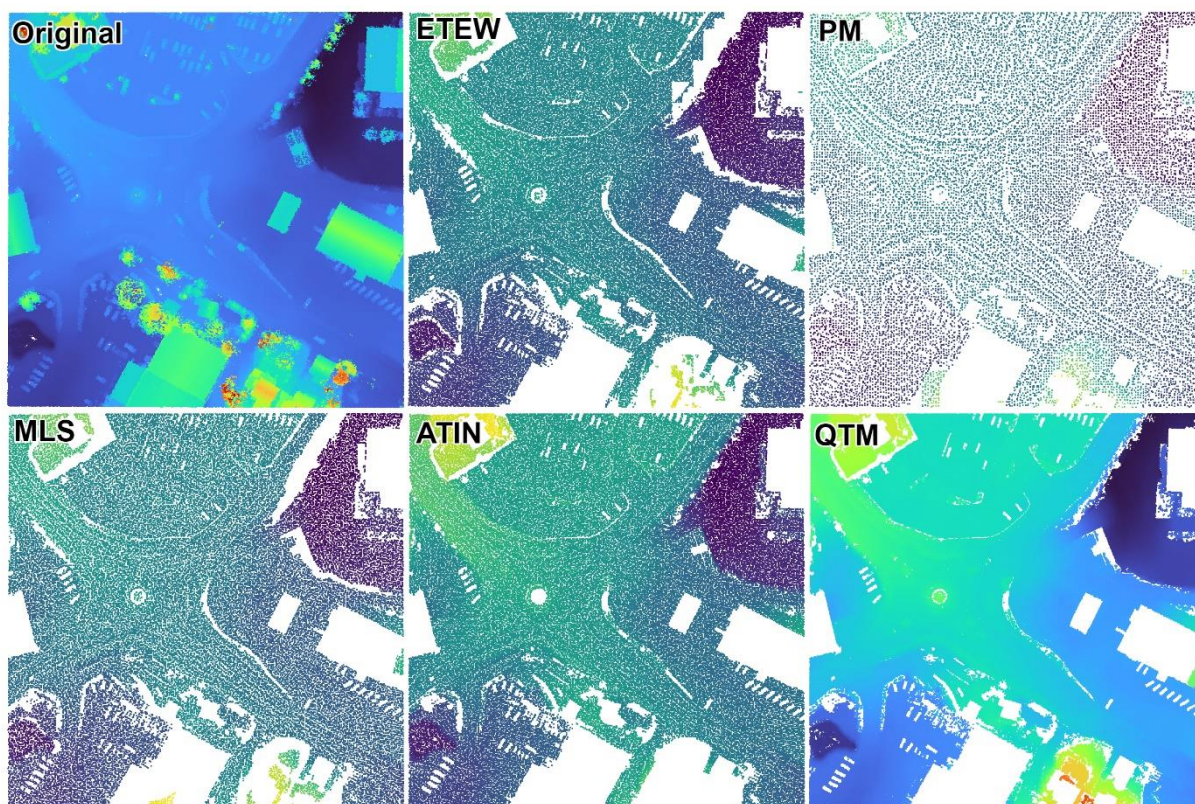
Figur 29: Sammenstilling av skjermdumper fra *QGIS* av ufiltrert punkttsky, ETEW-, PM-, MLS-, ATIN- og *QTM*-filtrert punkttsky for testområde to.



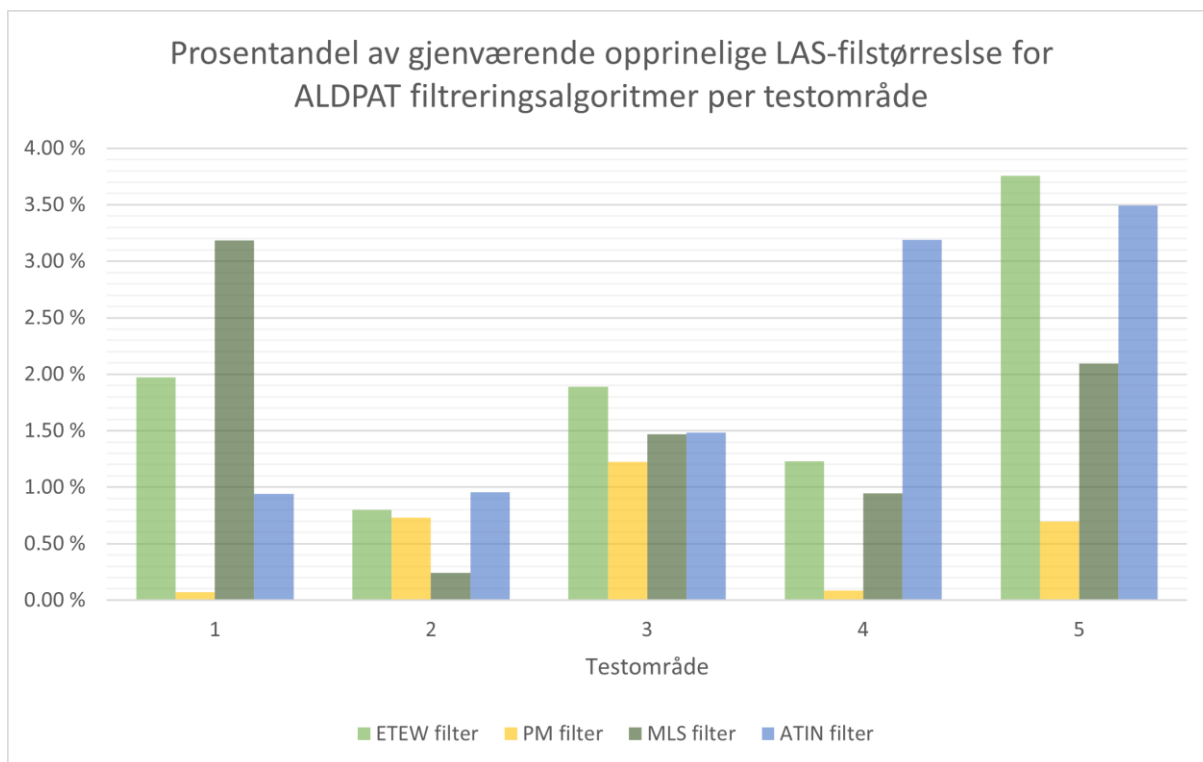
Figur 30: Sammenstilling av skjermdumper fra *QGIS* av ufiltrert punkttsky, ETEW-, PM-, MLS-, ATIN- og *QTM*-filtrert punkttsky for testområde tre.



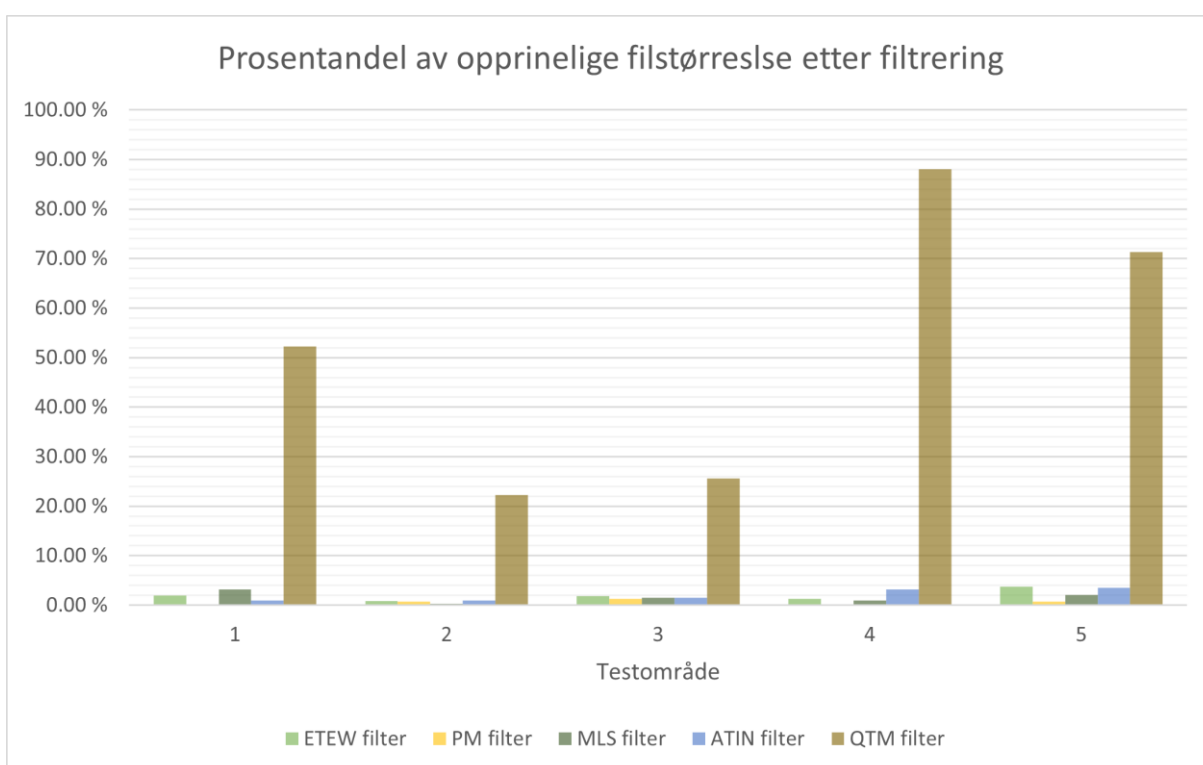
Figur 31: Sammenstilling av skjermdumper fra *QGIS* av ufiltrert punkttsky, ETEW-, PM-, MLS-, ATIN- og *QTM*-filtrert punkttsky for testområde fire.



Figur 32: Sammenstilling av skjermdumper fra *QGIS* av ufiltrert punkttsky, ETEW-, PM-, MLS-, ATIN- og *QTM*-filtrert punkttsky for testområde fem.



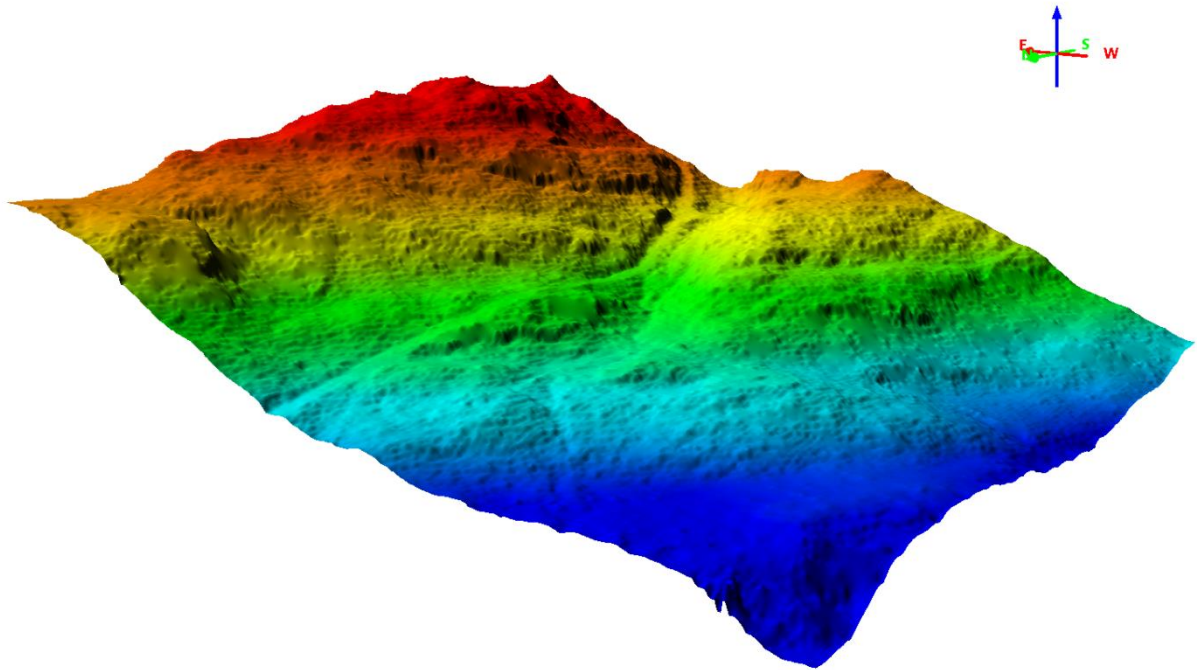
Figur 33: Prosentandel av gjenværende opprinnelig LAS-filstørrelse for ALDPAT-filtreringsalgoritmer per testområde.



Figur 34: Prosentandel av gjenværende LAS-filstørrelse for alle filtreringsalgoritmer per testområde.

4.2 Opprettelse DTM

En DTM opprettet fra filtrert punktsky over testområde to presenteres i Figur 35 som en illustrasjon på resultat fra opprettelse av DTM i *QTM*.

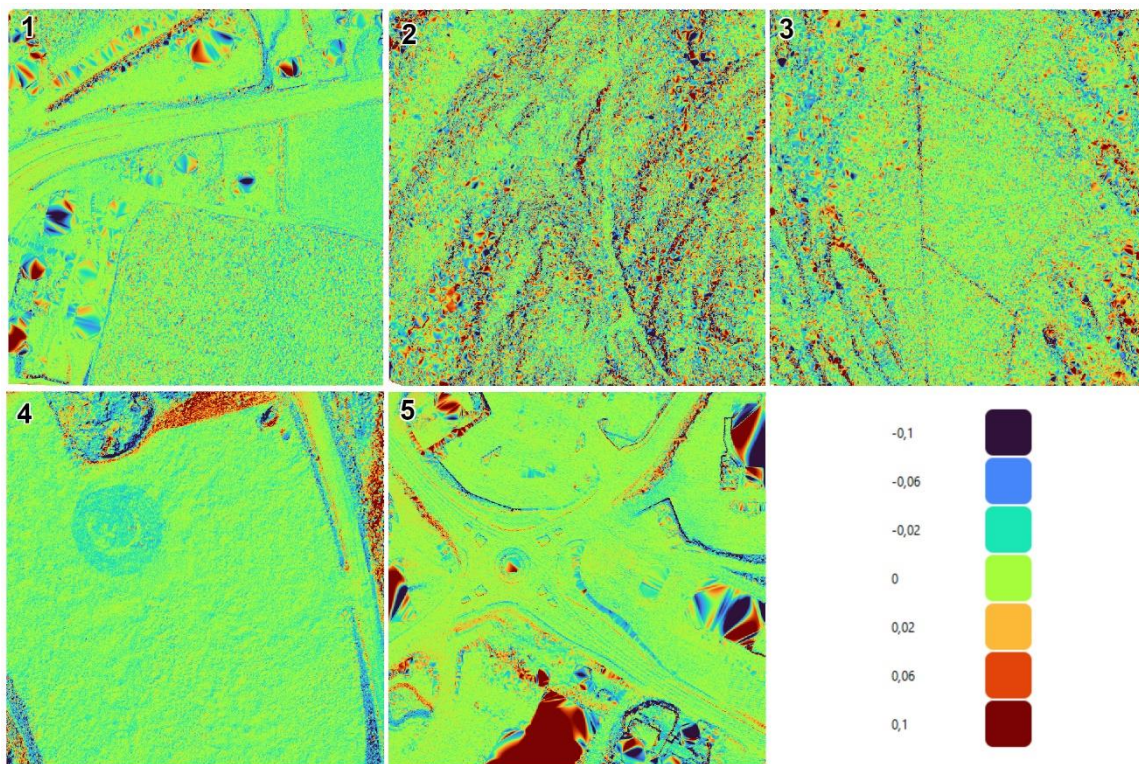


Figur 35: DTM generert fra filtreringsalgoritmen LIDARSense i *QTM* for testområde to.

4.2.1 Differanse modeller

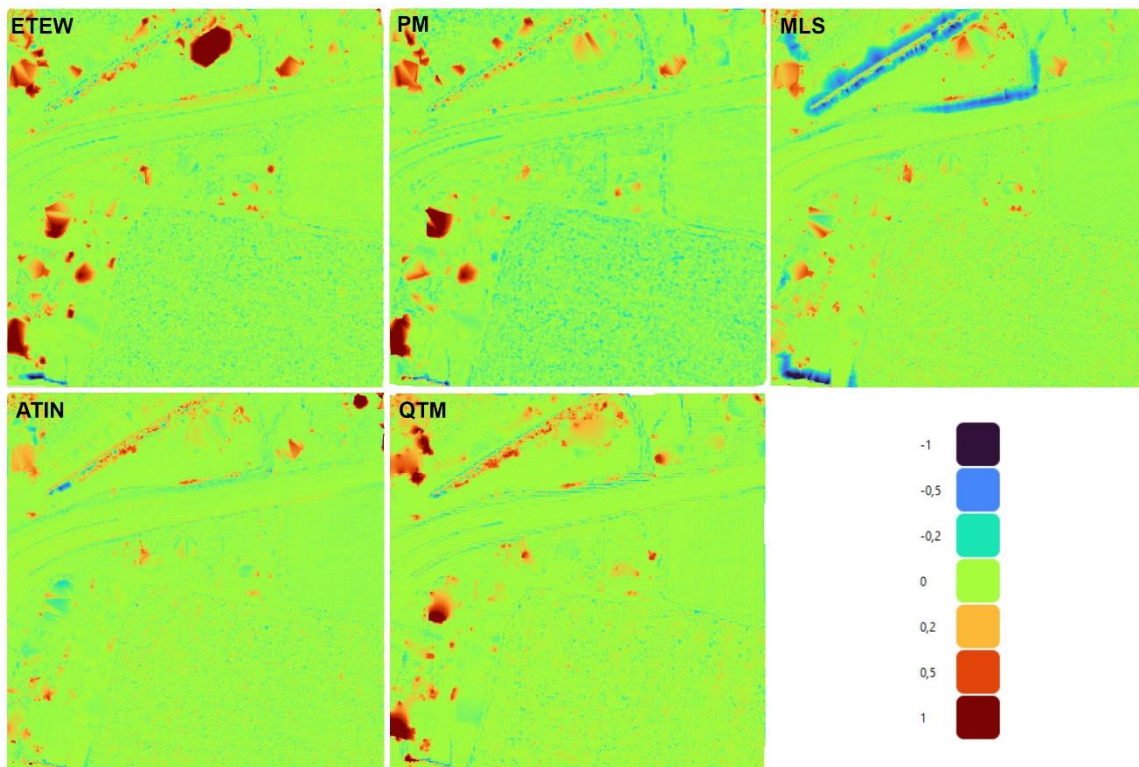
Differensiert terrengmodell generert fra de to DTM-ene omtalt i kapittel 3.5.2 for alle testområdene presenteres i Figur 36. For denne figuren er det viktig å bemerke at den har en annen skalering av fargeskala som presenterer høydedifferanser mellom de to DTM-ene. Alle høydedifferanser i de påfølgende figurene refererer til høyde i forhold til filtrert DTM. Differansmodellene for testområde en, to, tre, fire og fem presenteres i Figur 37, Figur 38, Figur 39, Figur 40 og Figur 41 og har samme skalering av fargeskala i meter. Skalering vist i hver figur er angitt i meter.

DTM Høydedata - DTM Klasse 2 QTM



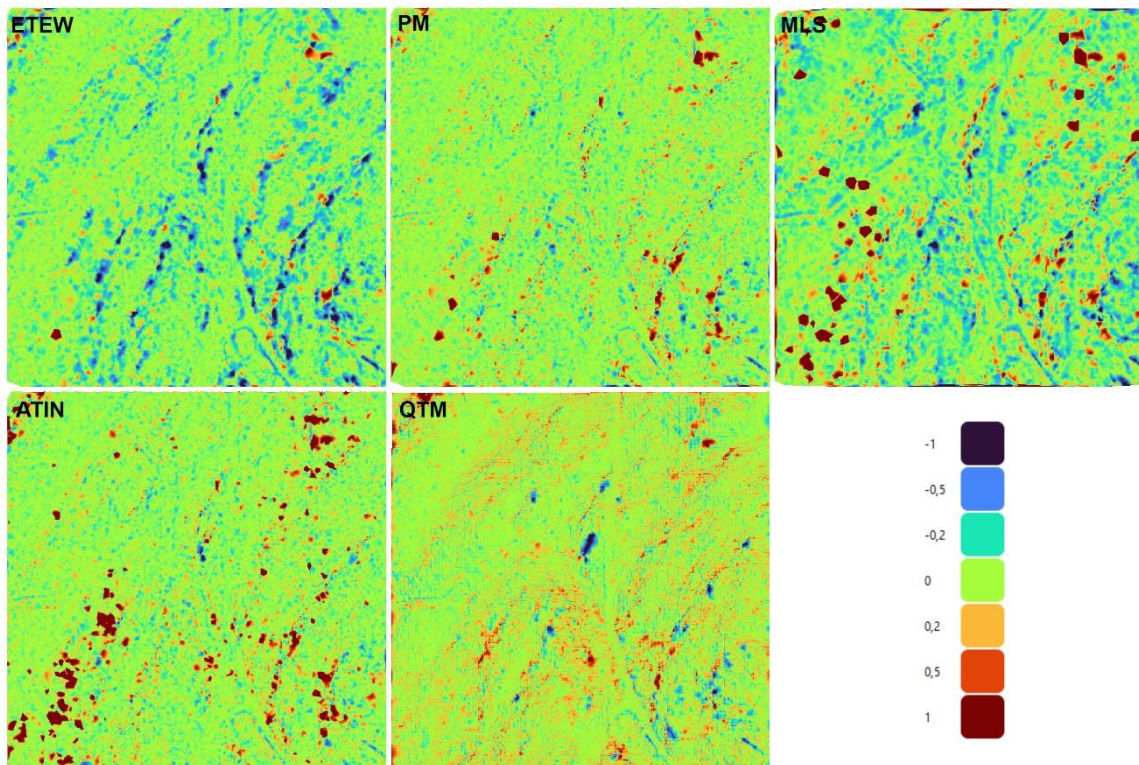
Figur 36: Differansmodell i meter fra DTM fra høydedata og DTM generert i *QTM* fra preklassifisert terrengpunkter.

Testområde en



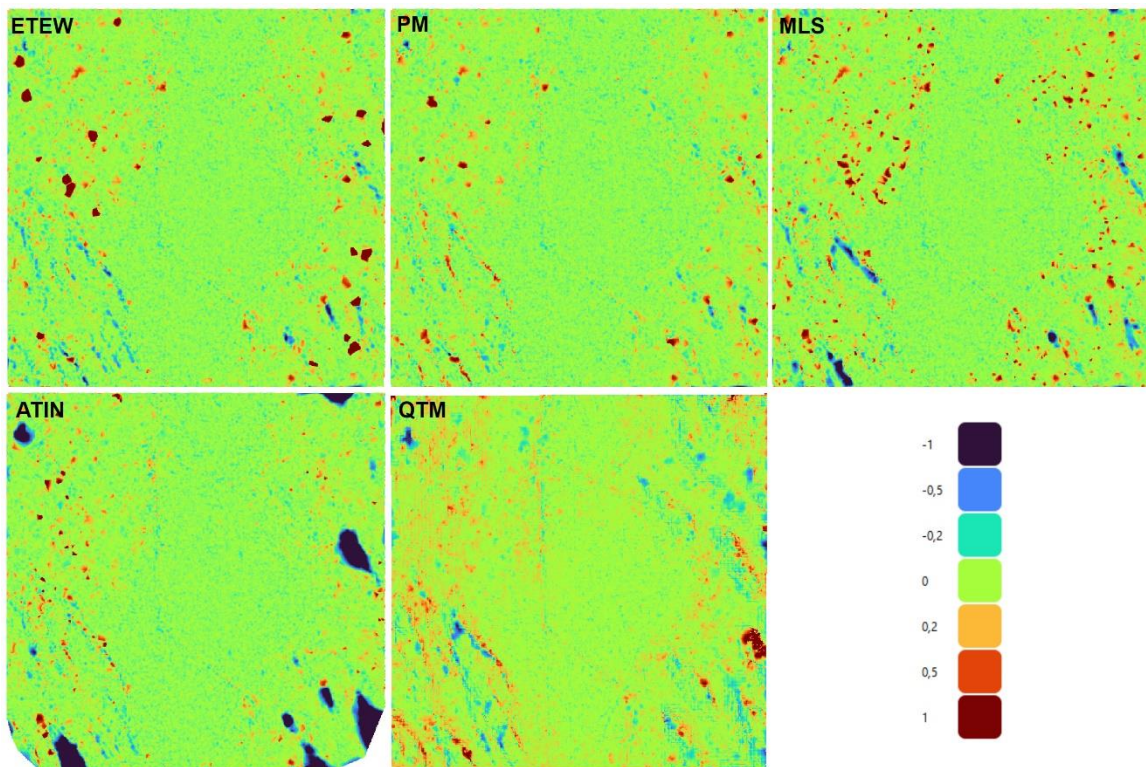
Figur 37: Differansemodell for alle filtreringsalgoritmer i testområde en.

Testområde to



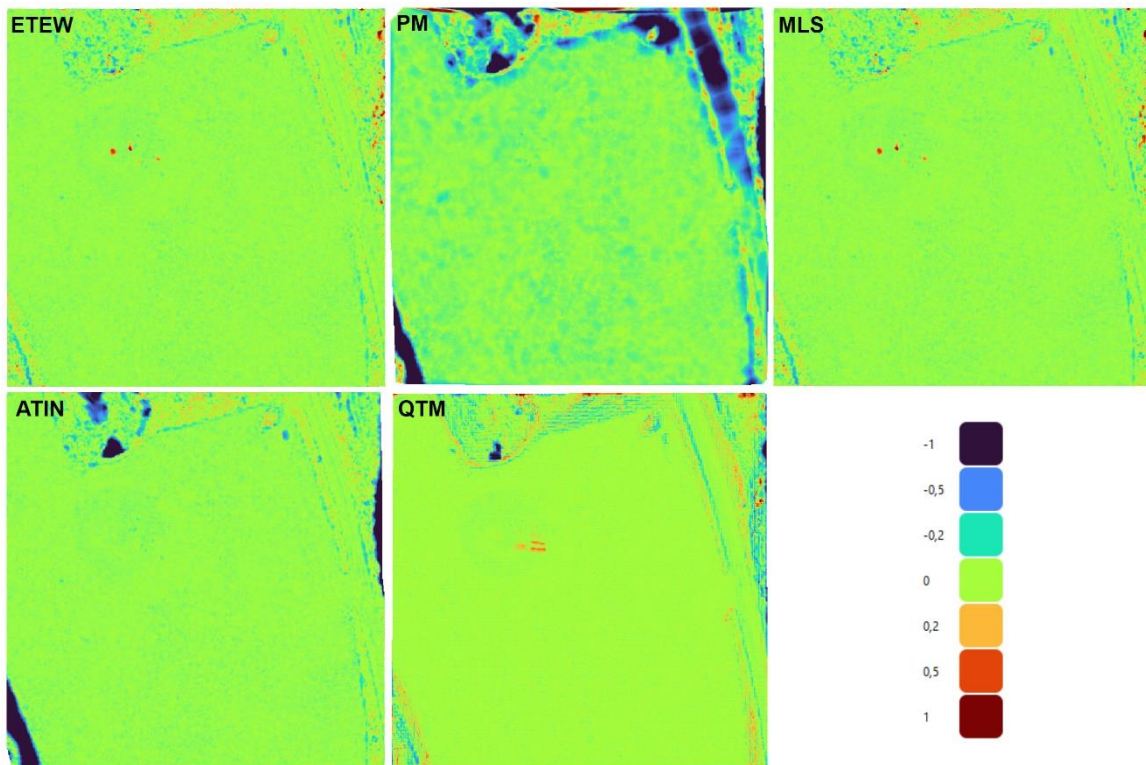
Figur 38: Differansemodell for alle filtreringsalgoritmer i testområde to.

Testområde tre



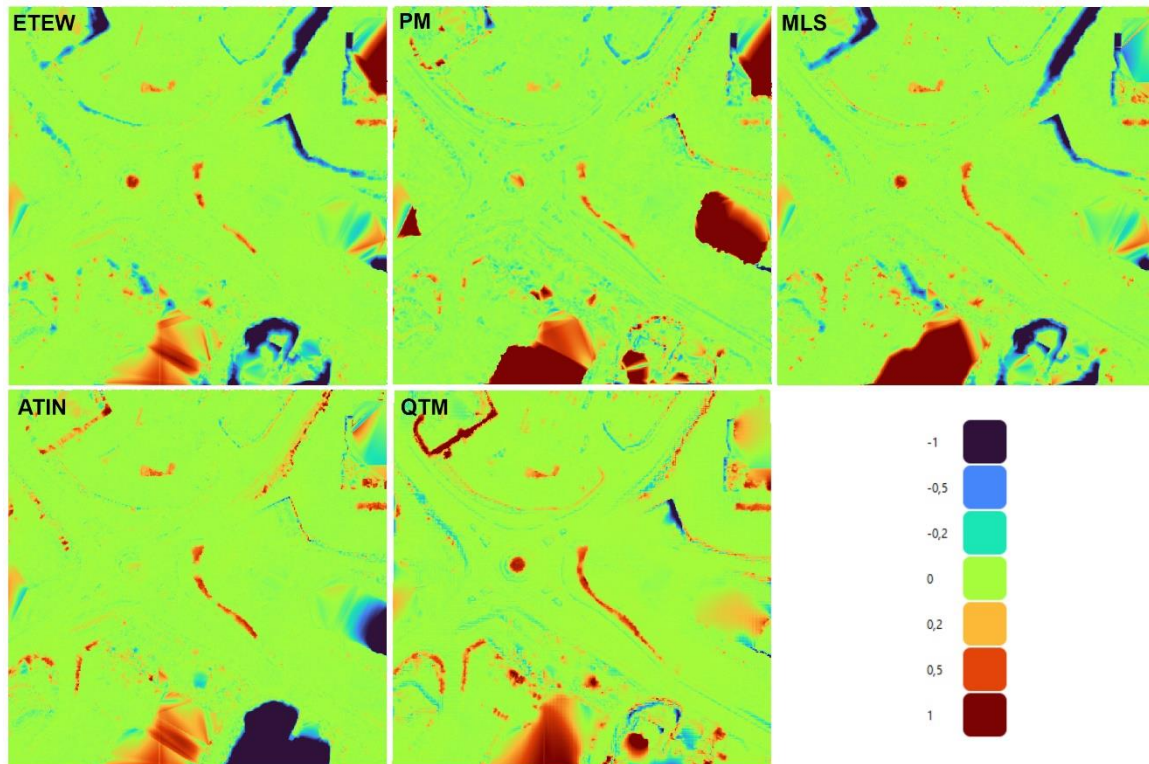
Figur 39: Differansemodell for alle filtreringsalgoritmer i testområde tre.

Testområde fire



Figur 40: Differansemodell for alle filtreringsalgoritmer i testområde fire.

Testområde fem

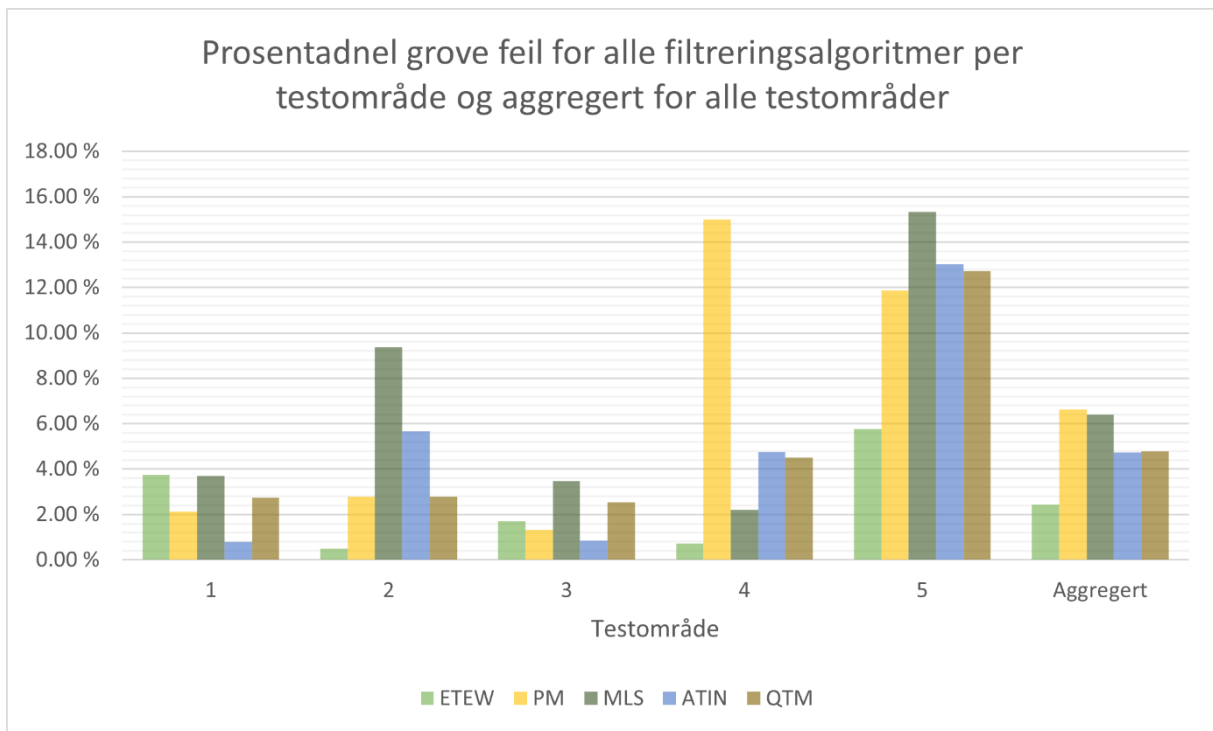


Figur 41: Differansemodell for alle filtreringsalgoritmer i testområde fem.

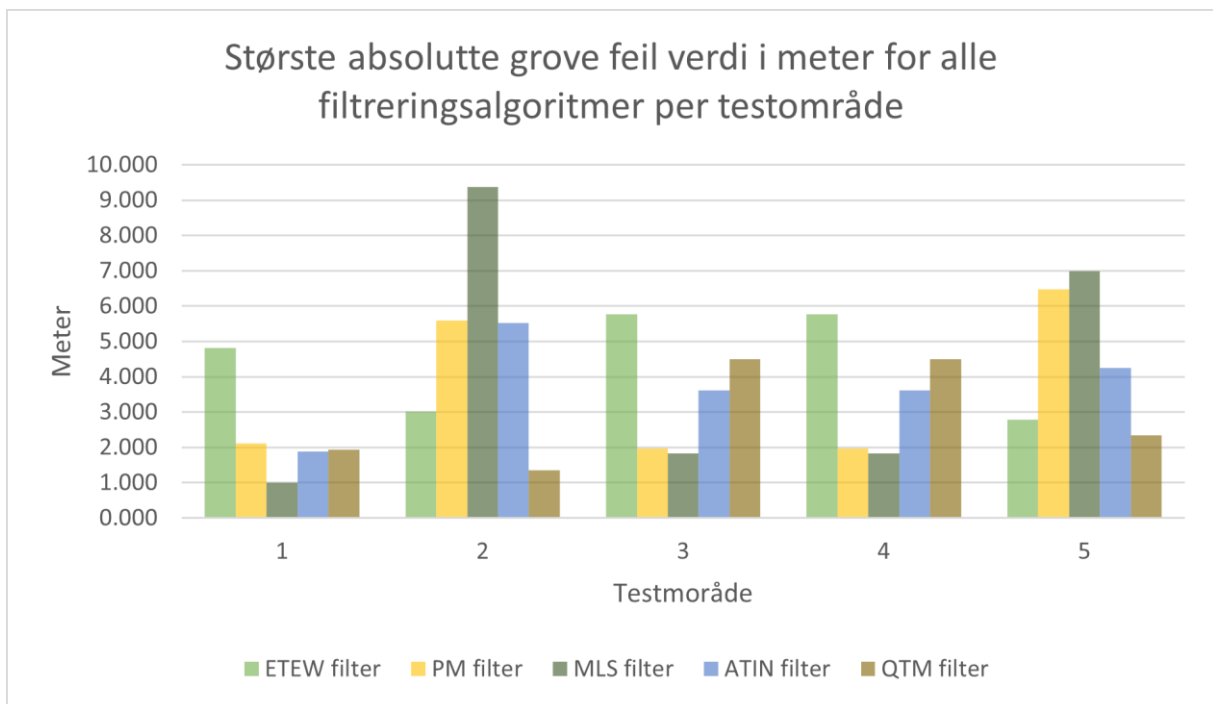
4.3 Geometrisk kontroll

4.3.1 Grove feil

Beregnet antall grove feil for hver filtreringsalgoritme er presentert som prosentandel av totalt antall stikkprøver per tekstområde i Figur 42. Største absolutte grove feil for hver filtreringsalgoritme per testområde er presentert i Figur 43.



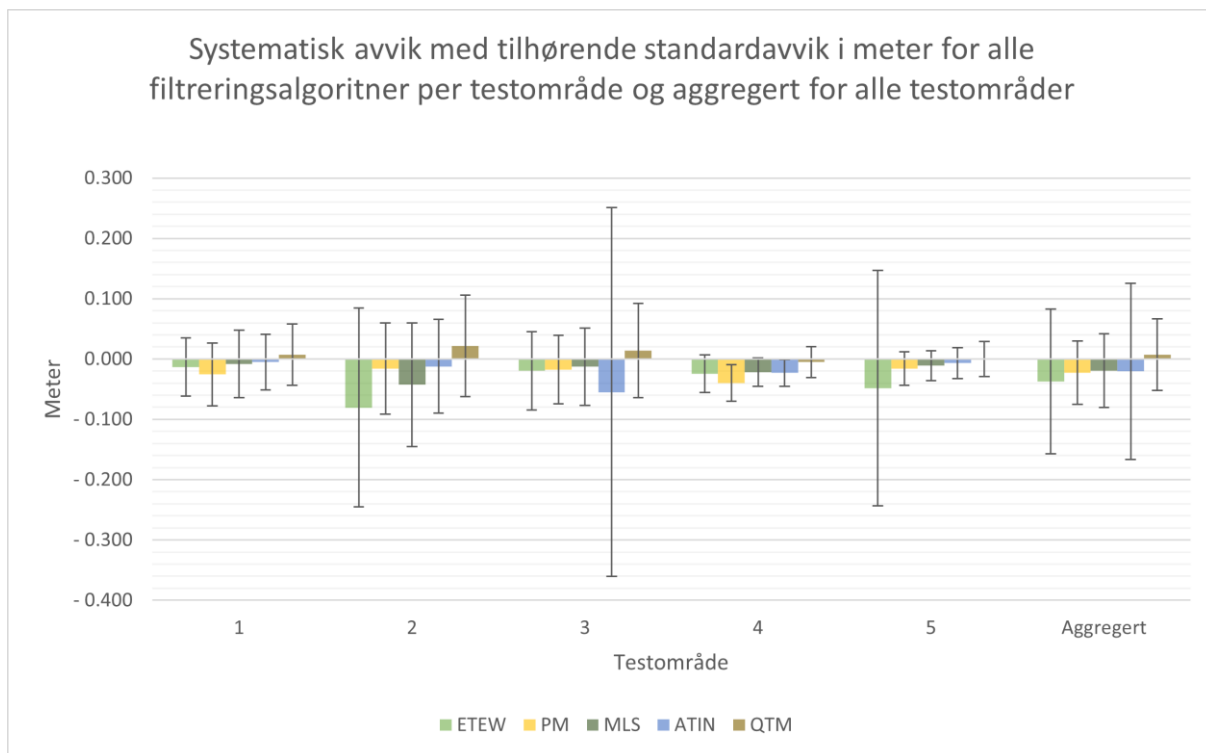
Figur 42: Prosentandel grovfeil for hver filtreringsalgoritme per testområde samt aggregert for alle testområder sett mot grensen på 5 % grovfeil.



Figur 43: Største absolutte grove feil verdi i meter for alle filtreringsalgoritmer per testområde.

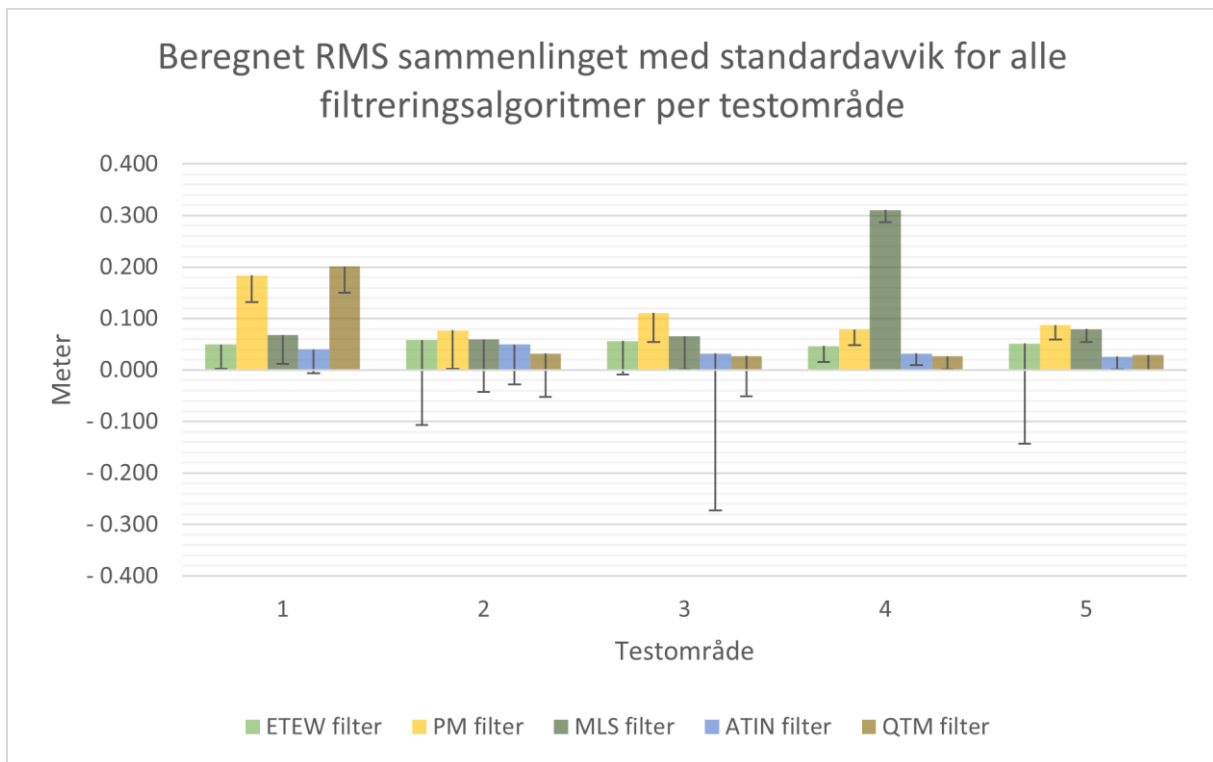
4.3.2 Systematisk avvik, standardavvik og RMS

Beregnet systematisk avvik med tilhørende standardavvik for alle filtreringsalgoritmer per testområde fremgår av Figur 44. Aggregert systematisk avvik og aggregert standardavvik for alle testområder per filtreringsalgoritme er også inkludert i diagrammet.



Figur 44: Systematisk avvik med tilhørende standardavvik i meter for alle filtreringsalgoritmer per testområde og aggregert for alle testområder.

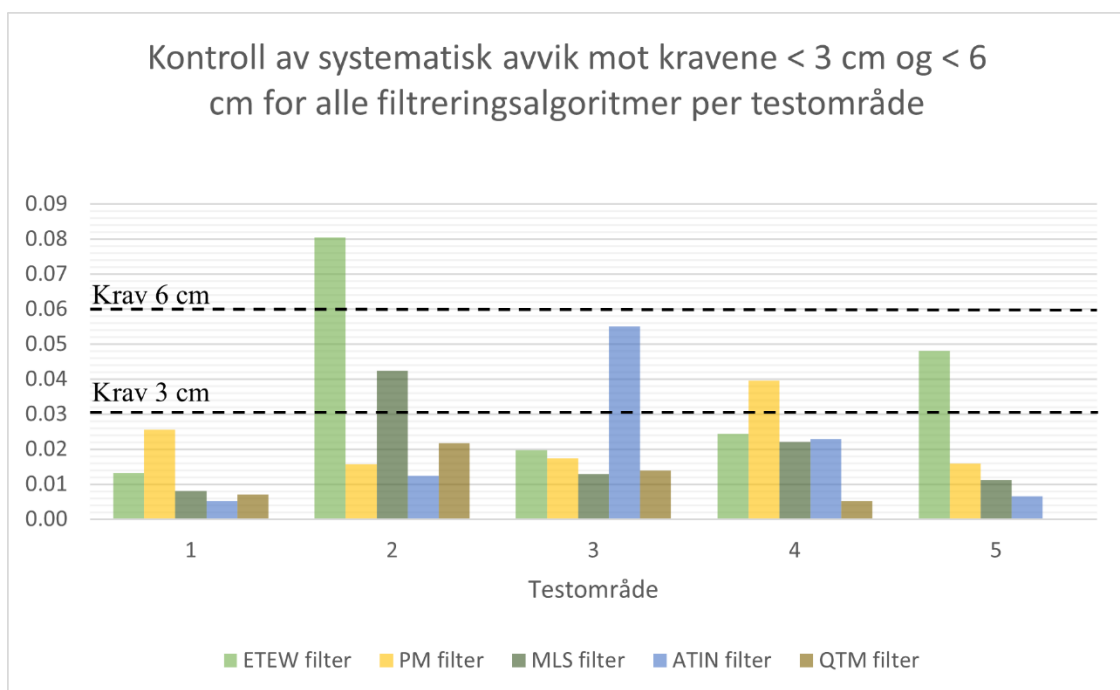
Beregnet RMS presenteres i Figur 45, der standardavviket tilhørende det systematiske avviket er vist som negative feilfelt.



Figur 45: Beregnet RMS sammenlignet med standardavvik for alle filtreringsalgoritmer per testområde.

4.3.3 Kontroll av systematisk avvik

Kontroll av systematiske avvik mot krav på henholdsvis 3 cm og 6 cm fremgår av diagrammet i Figur 46. Kravene er i diagrammet representert som stiplede linjer. Søylor med systematiske avvik som overskrider disse er ikke i henhold til kravet.



Figur 46: Kontroll av systematisk avvik mot krav på både 3 cm og 6 cm for alle filtreringsalgoritmer per testområde.

5. Diskusjon

5.1 Diskusjon resultater

5.1.1 Reduksjon av filstørrelse

For punkttskyer filtrert i *ALDPAT* er det av Figur 33 vist en svært stor nedgang i filstørrelse i forhold til original punkttsky. Dette gjenspeiles også i de resulterende punkttskyene i Figur 28, Figur 29, Figur 30, Figur 31 og Figur 32. For de nevnte figurene er punktettheten for original så høy at punktene ikke kan skilles fra hverandre. For de filtrerte punkttskyene er det tydelige mellomrom mellom punktene. For enkelte filtrerte punkttskyer som MLS i testområde to og PM i testområde fire, er svært få punkt synlig.

Generelt for *ALDPAT* sees en reduksjon på minst 96 % av punkttskyenes filstørrelse i LAS-filformatet. For de ovennevnte algoritmene i testområdene to og fire er reduksjonen opp mot 99.9 % av opprinnelig filstørrelse. Reduksjonen av filstørrelse anses å være en god indikator i forhold til reduksjon av antall punkter i punkttskyen.

For filtrering med *QTM* avledes ikke filtrert punkttsky på samme måte som for *ALDPAT*, dette er beskrevet i kapittel 3.9.1. Av Figur 34 har den eksporterte punkttskyen fra *QTM* svært mye høyere punktetthet i alle testområder. Reduksjon av filstørrelse er på så lite som 11 % for testområde fire for *QTM* i forhold til minste reduksjon på 96.8 % for *ALDPAT* i samme testområdet. Dette gjør det ulogisk å sammenligne denne reduksjonen av filstørrelse videre for *QTM*.

For testområde en og fem måtte filtreringsalgoritmene filtrere bort bygningsmasser. For alle algoritmene kan det i testområde en observeres punkt innenfor områder som antas å være bygninger. Det er forholdsvis vanskelig å skille fra hverandre hvilke algoritmer som har feilklassifisert flest punkt som bakkepunkt i testområde en. Ved visuell inspeksjon av Figur 28 fremstår det som at ETEW har flest punkter på bygninger inkludert som terrengoverflate.

For testområde fem virker det å være en høyere grad av feilklassifiserte punkter for de fleste algoritmene, dette vil også bli drøftet i kapittel 5.1.3. Det er for dette testområdet også vanskeligere å skille hvilket filter som klassifiserer flest punkt feil kun ved inspeksjon av de filtrerte punkttskyene.

For de øvrige testområdene to, tre og fire peker ulike filtre seg ut som mest egnet. For testområde to anses ETEW til å ha håndtert kombinasjonen av vegetasjon og utfordrende topografi best. De fire andre *ALDPAT*-filtrene er det vanskeligere å kunne trekke slutninger omkring, men ATIN og PM mistenkes å ha feilklassifisert en del vegetasjon som terrengoverflate. *QTM* har en så høy gjenværende punktetthet at det heller ikke her er mulig å trekke noen slutninger ved kun inspeksjon av resulterende punktsky.

Av Figur 30 over testområde tre skiller ATIN seg noe ut. Det observeres her flere større hull i punktskyen. Disse mistenkes å stamme fra for aggressiv filtrering som har medført at koller har blitt filtrert bort. Det samme virker også til og ha skjedd for testområde fire. Dette kan sees i Figur 31 for ATIN, der det er manglende data i randen av testområdet.

5.1.2 Differansemodeller

Av differansemodellene er Figur 36 særlig interessant, der differanse mellom DTM fra FvL Høydedata og DTM generert i *QTM* fra preklassifisert terrengoverflate fra Høydedata presenteres. For testområder en og fem fremstår særlig store differanser for områder der bygninger er filtrert bort. Det virker som at en del av differansene mellom de to DTM-ene også er forbundet med områder med brå høydevariasjon. Det mistenkes at differansene funnet mellom de to nevnte DTM-ene forplanter seg videre til de differensierte DTM-ene fra filtrerte punktskyer. Differansene kan være i opp mot 10 cm for enkelte områder. Disse differansene ses på som en følge av bruk av *QTM* til opprettelse av alle DTM for forsøket og sammenligning mot DTM fra Høydedata.

For differansemodellene fra testområde en skiller ATIN seg ut som det filteret med minst differanser til sammenligningsgrunnlaget. Derimot er det for ETEW, PM og *QTM* flere områder som er markant høye. Områdene som er forhøyet ser ut til å sammenfalle med bebygde områder. Dette er for øvrig områder som i Figur 36 fremstår som lavere enn sammenligningsgrunnlaget. Differansen i Figur 37 er også fem til ti ganger større enn den nevnte differansen mellom *QTM* DTM og Høydedata DTM. MLS har for samme testområdet lengre områder som er klart lavere enn sammenligningsgrunnlaget. De lave områdene er sammenfallende med områder med vegetasjon. For testområde en anses ATIN som filtreringsalgoritmen som presterer best med bakgrunn i differansemodellene.

Testområde to er det testområdet som på forhånd var forventet å gi størst differanser ved filtrering av punktsky. Forventningen var med bakgrunn i testområdets utfordrende topografi med mye stor skog for store deler av testområdet. Av Figur 38 fremstår det som at ETEW og MLS har likheter ved seg. Begge filtrerer brå høydevariasjoner i terrenget lavere enn sammenligningsgrunnlaget, men MLS er innbefattet med en del høye differanser. Disse høye differansene, som også er å finne i en viss utstrekning for ATIN, mistenkes å stamme fra feilklassifisering av vegetasjon som bakkepunkt. PM og *QTM* er de to filtrene som ved visuell inspeksjon av differansemodellen virker å resultere i minst høydeavvik. *QTM* ser ut til å ha en noe høy trend i avvikene enn hva som gjelder for PM. Enkelte avvik som er både markant høyere eller lavere enn sammenligningsgrunnlaget er å finne i begge filtrene, men ikke i like utstrakt grad som for de andre filtrene for dette testområdet.

Testområde tre er også et skogområde, men har en noe mer homogen terrengoverflate enn testområde to. Av Figur 39 peker ATIN seg klart ut med større områder som er markant lavere enn sammenligningsgrunnlaget. Områdene er sammenfallende med kollepartier i terrenget, og her mistenkes ATIN å ha filtrert bort kollepartiene som vegetasjon. For myra i midten av testområdet virker derimot filteret å ha vært svært vellykket. *QTM* filtrering har for de kuperte områdene i testområdet en noe høy trend. Dette gjaldt også for testområde to. På samme måte som for ATIN, og alle de andre filtrene, er filtreringen av vegetasjonene på myra i midten av testområdet svært vellykket med lite høydeavvik. De tre filtrene ETEW, PM og MLS har alle punktvis innslag av høye avvik. Disse avvikene kan sammenfalle med feilklassifisering av vegetasjon som terrengoverflate.

Testområde fire var på forhånd forventet å gi lite differanser mellom de genererte DTM-ene. Dette som følge av at testområdet i stor grad kun består av en større planert grusflate, med et fåtall skjæringer i kanten og minimalt med vegetasjon. Ved inspeksjon av differansemodellene for dette testområdet fremkommer flere svært lave områder for flere av algoritmene (Figur 40). De lave områdene er sammenfallende med hullene som kan sees i punktskyene for testområdet i Figur 31. Det er derfor nærliggende å anta at de negative differansene som sees særlig for PM og ATIN, er som følge av interpolasjon av hull i punktsky ved opprettelse av DTM. De to nevnte filtrene mistenkes dermed å ha filtrert for aggressivt, noe som har ført til tap av informasjon. Det synes å være spesielt at det for PM har oppstått hull for et område som er en flat vei i det øvre høyre hjørnet av testområdet. ETEW og MLS har i stor grad lite synlige differanser generelt på flaten, men det er noen høye

områder i høyre kant av testområdet. Her er det mistanke om at den lille stripen med vegetasjon i dette området ikke har vært filtrert bort i sin helhet.

Testområde fem har mange store differanser for alle filtrene. ATIN skiller seg noe ut med et større område med store negative differanser. Dette aktuelle området er bestående av et høyereliggende område med eneboliger avgrenset med en mur ned mot hovedveien. Det antas at denne utformingen har medført til at ATIN har feilklassifisert området som bygning, og dermed filtrert bort samtlige punkter. Utenom dette området fremstår ATIN som svært vellykket med å filtrere bort resterende objekter i området. ETEW og *QTM* har også forholdsvis få høye positive differanser i testområde fem. ETEW har ett markant høyt område i øvre høyre hjørne der bygningsmasse feilaktig er inkludert i DTM. Denne feilklassifiseringen sees også i PM for det aktuelle området. Videre har ETEW enkelte markante negative differanser for murkanter og ett bratt beplantet område mellom vei og parkeringsplass. Disse negative differansene er svært like for MLS i de samme områdene, men MLS har en dårligere filtrering av den store bygningsmassen i nedre del av testområdet. PM virker til å være det filteret som har feilklassifisert flest punkter på bygningsmassen som bakkepunkter. Det er allikevel ingen markante negative differanser å spore for denne filtreringsalgoritmen, og den øvrige delen av testområdet fremstår å ha forholdsvis lite differanser i forhold til sammenligningsgrunnlaget. Totalt sett basert på differansmodellene anses *QTM* algoritmen til å resultere i den beste filtreringen av testområde fem.

5.1.3 Grovfeilsøk

Ved søk etter grove feil er dette utført med to ulike krav definert etter overflatetype i Tabell 10 i kapittel 3.6.1, og krav for grove feil av tabell Tabell 12 i kapittel 3.6.5. Resultatet fra søk etter grove feil må da sees i sammenheng med den definerte overflatetypen for hvert testområde.

Med bakgrunn i de ulike grovfeilkravene er det dermed ikke unaturlig at det er større andel grove feil for testområdene fire og fem. Disse testområdene er definert som harde flater med mindre toleranse for størrelsen til grove feil. Særlig testområde fem har svært høy andel grove feil for alle overflater. Dette mistenkes å være delvis forbundet med grovfeilkravet.

En annen årsak til den høye andelen grove feil i testområde fem virker til å være korrelert med interpolasjonen av DTM under større bygninger ved opprettelse av DTM, som diskutert i kapittel 5.1.2. Dette fremgår også som en trend i Figur 36.

Det kan imidlertid ikke konkluderes med at de grove feilene for testområde fem kun er befangt med interpolasjonsalgoritme for tetting av hull i DTM. Det er forholdsvis store bygninger i testområde fem sammenlignet med de andre. Filtreringsalgoritmene PM og MLS har merkbart større absolutte grove feil for dette testområdet (Figur 43) sammenlignet med de andre filtreringsalgoritmene. Av Figur 32 kan det virke som enkelte bygninger ikke er fullstendig filtrert bort. Det vil være naturlig å anta at områdene der de største avvikene oppstår mellom referansegrunnlag og filtrerte DTM er i dette området for de to nevnte filtrene.

ETEW peker seg noe ut med tanke på andelen grove feil og har i snitt minst prosentandel grove feil for alle testområder. For tre av fem testområder har ETEW også minst andel grove feil. PM og MLS har en merkbar større andel grove feil i snitt enn de andre algoritmene. ATIN og *QTM* har i snitt tilnærmet lik prosentandel grove feil.

Testområde fem fremstår som en stor bidragsyter til at aggregert prosentandel grove feil for at særlig *QTM* og ATIN er nærmere PM og MLS enn ETEW.

5.1.4 Systematisk avvik, standardavvik og RMS

ETEW har til sammen de tre største systematiske avvikene med dertil store standardavvik. Det er også store systematiske avvik i testområdene to og fem for ETEW. For testområde tre har ATIN stort systematisk avvik og standardavvik. Størrelsen på standardavvikene fremstår som korrelerte med størrelsen på det systematiske avviket, men enkelte små systematiske avvik har også større standardavvik, som ATIN i testområde fem.

For alle *ALDPAT*-filtreringsalgoritmene er de systematiske avvikene konsekvent negative i forhold til sammenligningsgrunnlaget for samtlige testområder. Til motsetning er de systematiske avvikene positive for fire av fem testområder med *QTM*, mens testområde fem er tilnærmet null. Det mistenkes at dette har sammenheng med hvordan filtreringsalgoritmene i *ALDPAT* filtrerer punktskyene med utgangspunkt i laveste punkt innenfor, enten en definert rute i et rutenett eller et definert areal.

RMS for de ulike filtreringsalgoritmene er tidvis markant forskjellig fra beregnet standardavvik for de ulike filtrene per testområde. For ATIN i testområde tre er standardavviket flerfoldige ganger større enn RMS. I testområdet to er det også flere forekomster av standardavvik som er større enn RMS, men ikke med samme faktor som for ATIN. Enkelte algoritmer som har rimelig lite standardavvik har derimot forholdsvis stor RMS, som for MLS i testområde fire og PM og *QTM* i testområde en.

5.1.5 Kontroll systematisk avvik

Kontroll av systematiske avvik utføres som beskrevet i kapittel 3.7.4 mot krav for systematisk avvik beskrevet i kapittel 3.6.2.

Ved kontroll mot det strengeste kravet, vist i Figur 46, peker filtreringsalgoritmen ETEW seg særlig ut, ettersom denne er tydelig utenfor kravet for testområder to og fem. For testområde to er systematisk avvik for ETEW nesten tre ganger så stort som kravet. Også ATIN er markant utenfor kravet i testområde tre. Denne manglende oppfyllelsen av kravet for ATIN i testområde tre kan til en viss grad også sees av Figur 39, der det er flere større områder med store høydeavvik i forhold til sammenligningsgrunlaget.

Ved kontroll mot det mildeste kravet, vist i Figur 46, er det kun ETEW for testområde to som ikke er innenfor kravet. ATIN for testområdet tre er så vidt innenfor kravet, det samme med ETEW i testområde fem. For de resterende filtrene i alle testområdene er alle modellene innenfor kravet med god margin.

I de systematiske avvikene skiller *QTM* seg noe ut for alle testområdene. Dette er filteret som i snitt er klart innenfor kravene. De resterende filtrene har en noe større variasjon i marginen de enten er innenfor eller utenfor kravene med.

5.1.6 Oppsummering

Ved avgjørelse om de genererte DTM er av tilstrekkelig kvalitet er utgangspunktet kontroll av det systematiske avviket mot krav. Dog forteller ikke dette nødvendigvis hele sannheten omkring kvaliteten til datasettet. Andelen grove feil kan gi indikasjoner på utilstrekkelig filtrering av punktsky, dårlig interpolasjon ved opprettelse av DTM eller lignende. Standardavviket til det systematiske avviket gir også informasjon om presisjonen i datasettet, og bør også inngå som en del av det helhetlige bildet når kvaliteten til datasettene skal vurderes.

For kontroll mot det mildeste kravet er det kun ett datasett som faller utenfor. Dette er ETEW-datasettet i testområde to. ATIN-datasettet i testområde tre er så vidt innenfor kravet, mens ETEW i testområde fem er innenfor med en cm margin.

Ved videre kontroll av systematisk avvik mot det strengeste kravet er det totalt fem datasett som faller utenfor. ETEW-filteret står for to av disse, mens PM, MLS og ATIN står for hvert sitt. Med tanke på testområdene er det kun testområde en der alle datasettene er innenfor

kravet. Det er testområde to hvor det er flest datasett utenfor kravet med to stykker, mens testområdene tre, fire og fem alle har ett sett utenfor.

Basert på observasjonene fra de differensierte modellene kombinert med andelen grove feil vurderes allikevel enkelte andre datasett ikke å ha tilfredsstillende kvalitet. Av disse anses alle datasettene i testområde fem til ikke å være vellykket med tanke på prosentandelen grove feil, og utelukkes videre.

De resterende datasettene som er innenfor kravet i de fire gjenværende testområdene anses å være av tilstrekkelig kvalitet i henhold til de to kravene. Det er dermed indikasjoner på at følgende datasett er av tilstrekkelig kvalitet i forhold til det mildeste kravet: ETEW, PM, MLS, ATIN og *QTM* i testområde en, PM, ATIN og *QTM* i testområde to, ETEW, PM, MLS og *QTM* i testområde tre, og ETEW, MLS, ATIN og *QTM* for testområde fire.

Det strengeste kravet indikerer at følgende datasett har tilstrekkelig kvalitet: ETEW, PM, MLS, ATIN og *QTM* i testområde en, PM, ATIN og ATM i testområde to, ETEW, PM, MLS og *QTM* i testområde tre, og ETEW, MLS, ATIN og *QTM* i testområde fire.

For de fire resterende testområdene er det forsøkt utført en rangering av kvaliteten til de datasettene som er innenfor det strengeste kravet. For testområde en anses ATIN å ha prestert best. Videre følger *QTM* og MLS forholdsvis likt, før ETEW og PM. Testområde to indikerer at ATIN og PM presterer best, mens *QTM* er minimalt svakere. For testområde tre er det mindre differanser i det systematiske avviket mellom de fire filtrene som er innenfor kravet. Det er her utfordrende å rangere hvilket som er dårligst. MLS og *QTM* fremstår som noe bedre enn ETEW og PM. Testområde fire indikerer sterkest mot et filter, *QTM*, som best. De tre øvrige filtrene ETEW, MLS og ATIN presterer her forholdsvis likt, men en del dårligere enn *QTM*.

Testområdene har vært delt i to fraksjoner for dette forsøket, vegetasjon og harde flater. Testområdene en, to og tre har vært definert som vegeterte områder, mens testområdene fire og fem har vært definert som harde flater. For de harde flatene skiller *QTM* seg ut som det datasettet som virker til å ha minst systematisk avvik. For de vegeterte områdene er det dog noe mer variasjon i hvilket filter som presterer best. *QTM* er muligens det filteret som presterer best i snitt med hensyn til å være innenfor kravet for alle testområdene. Imidlertid virker det til at enkelte ALDPAT-filtre er minst like gode som *QTM* for enkelte av testområdene. Dette virker da å være særlig ATIN og MLS for testområde en, ATIN og PM for

testområde to. For testområde tre virker MLS best, men ETEW og PM gjør det også svært godt her.

5.2 Metodediskusjon

5.2.1 Sammenligningsgrunnlaget

Valg av sammenligningsgrunnlag for dette forsøket er et usikkerhetsmoment. For vurdering av presisjonen til DTM avledet fra filtrerte punktskyer har det oppstått tvil om bruken av prosjekt DTM fra FvL Høydedata var det mest fornuftige valget. Denne tvilen ga utslag i undersøkelse av differanse mellom nevnte DTM og DTM avledet fra klassifiserte bakkepunkter fra eksportert punktsky. Av resulterende differansemodell er det ikke usannsynlig at DTM fra bakkeklassifisering fra punktsky burde vært vurdert brukt som sammenligningsgrunnlag.

5.2.2 Kontrollmålinger

Bruken av stikkprøver i forsøket til bestemmelse av presisjonen til de genererte DTM har vært vurdert som fornuftig. Kontrollen av de ulike testområdene kunne også vært utført uten stikkprøver ved å gjøre en direkte sammenligning av hele utvalget gjennom rasteroperasjoner.

Feltmålinger med totalstasjon ville også vært naturlig å benytte som kontrollmålinger til geometrisk kontroll. Dette måtte vært utført dersom de genererte DTM-ene skulle vært benyttet til sluttdokumentasjon.

5.2.3 Konvertering filformater

Behovet for konvertering av punktskydata fra LAS til ASCII kan gi opphav til tap av presisjon av data. Ved at data som har vært prosessert i *ALDPAT* har blitt konvertert to ganger gir det usikkerhet om ivaretagelsen av de opprinnelige punktskydataene sin presisjon i de endelige filtrerte punktskyene.

6. Konklusjon

Begge programvarene viser god evne til filtrering av LiDAR-punktskyer for ulike topografi og vegetasjon i dette forsøkets testområder. *ALDPAT* har flere ulike filtreringsalgoritmer som det er antydninger til at kan egne seg godt til filtrering av LiDAR-punktskyer for enkelte overflater. Av disse algoritmene viser *ATIN* å egne seg svært godt for landlige vegeterte områder med lite kupering, mens *PM* og *MLS* presterer svært godt i vegeterte områder med mer utfordrende og variert topografi. Det er også indikasjoner til at *QTM* egner seg godt til filtrering av alle de ulike overflatene, og særlig godt for filtrering av harde overflater. For filtrering av det urbane testområder virker derimot alle filtrene i begge programvarer til å ha prestert dårlig.

Ut fra benyttede datasett, testområder og resultater fra geometrisk kontroll av høydeavvik for dette forsøket er det indikasjoner til at *QTM* totalt sett er best egent til filtrering av LiDAR-punktskyer for opprettelse av presis DTM til reguleringsplanlegging av modellbaserte veiprosjekter. Dette i henhold til krav til stedfestingsnøyaktighet for høydegrunnet i håndbok V770 Modellgrunnlag fra Vegdirektoratet.

6.1 Veien videre

Prestasjonen til filtrene i *ALDPAT* er sterkt korrelert med bestemmelse av parameterne til algoritmene. Hva som er de optimale parameterne for filtrering av et område, varierer med vegetasjonstypen og topografi. Optimalisering av parametere for et område er svært utfordrende og baserer seg mye på kvalifisert gjetning og statistisk testing av resultatet. En videre undersøkelse av optimale parametere ved bruk av maskinlæring for predikering av optimale parametere ville vært en interessant problemstilling. Dette vil kunne gi økt kunnskap om hvilke filtre og parametere som er optimale for ulike naturtyper og videre gi enda bedre filtrering av punktskyer i fremtiden.

Et annet forsøk som kunne vært interessant å utforske videre er kombinasjonen av flere filtreringsalgoritmer for filtrering av det samme området. Det er da tenkt som et forsøk der ulike filtre prosesserer det samme området etter hverandre, men mindre aggressivt enn hva som er gjort for dette forsøket. En vil da muligens kunne utnytte de ulike filtrenes styrker i forhold til filtrering av ulike objekter. Dette vil kunne resultere i en filtrert punktsky som muligens har høyere presisjon enn en som er filtrert av kun ett filter.

7. Litteraturliste

- Ali, M. E. N. O., Taha, L. G. E. L. D., Mohamed, M. H. A. & Mandouh, A. A. (2021). Generation of digital terrain model from multispectral LiDar using different ground filtering techniques. *The Egyptian journal of remote sensing and space sciences*, 24 (2): 181-189. doi: 10.1016/j.ejrs.2020.12.004.
- Applied Imagery LLC. (2018). *Quick Terrain Modeler* (Versjon 8.2.1). Programvare
- ASPRS. (2019). *LAS Specification 1.4 - R15*: The American Society for Photogrammetry & Remote Sensing Tilgjengelig fra: http://www.asprs.org/wp-content/uploads/2019/07/LAS_1_4_r15.pdf (lest 30.03.2022).
- ASPRS. (u.å.). *LASER (LAS) FILE FORAT EXCHANGE ACTIVITIES*. Tilgjengelig fra: <https://www.asprs.org/divisions-committees/lidar-division/laser-las-file-format-exchange-activities> (lest 30.30.2022).
- Axelsson, P. (2000). DEM Generation from Laser Scanner Data Using Adaptive TIN Models. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 33 (B4/1): 110-117.
- Bjørke, J. T. (2010). *Digitale Terrengmodeller* Universitetet for Miljø og Biovitenskap.
- Chen, Q., Wang, H., Zhang, H., Sun, M. & Liu, X. (2016). A Point Cloud Filtering Approach to Generating DTMs for Steep Mountainous Areas and Adjacent Residential Areas. *Remote Sensing*, 8 (1): 71.
- CloudCompare. (u.å.). *Cloud Compare Presentation*. Tilgjengelig fra: <http://www.cloudcompare.org/presentation.html> (lest 02.04.2022).
- ESRI. (1998). *ESRI Shapefile Technical Description*: Environmental Systems Research Institute. Tilgjengelig fra: <https://www.esri.com/content/dam/esrisites/sitecore-archive/Files/Pdfs/library/whitepapers/pdfs/shapefile.pdf> (lest 07.04.2022).
- Germak, O., Gugueva, O. & Kalacheva, N. (2021). Creation of digital terrain models using software applications. *E3S web of conferences*, 281: 5008. doi: 10.1051/e3sconf/202128105008.
- Li, Z., Hodgson, M. E. & Li, W. (2018). A general-purpose framework for parallel processing of large-scale LiDAR data. *International journal of digital earth*, 11 (1): 26-47. doi: 10.1080/17538947.2016.1269842.
- Lindsay, J. (2020). *zLidar File Specification Version 1.0 (DRAFT)*. Tilgjengelig fra: https://jblindsay.github.io/zLidar_spec/intro.html (lest 30.03.2022).
- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J. & Rhind, D. W. (2015). *Geographic information science and systems*. 4. utg.: John Wiley & Sons.
- Mahammad, S. S. & Ramakrishan, R. (2009a). *GeoTIFF - A standard image file format for GIS applications*, 29.03.2022: Geospatial World.
- Mahammad, S. S. & Ramakrishan, R. (2009b). *GeoTIFF - A standard image file format for GIS applications*: Geospatial World. Tilgjengelig fra: <https://www.geospatialworld.net/article/geotiff-a-standard-image-file-format-for-gis-applications/> (lest 29.03.2022).
- Maliqi, E., Penev, P. & Kelmendi, F. (2017). Creating and analysing the Digital Terrain Model of the Slivovo area using QGIS software. *Geodesy and cartography (Vilnius)*, 43 (3): 111-117. doi: 10.3846/20296991.2017.1376445.
- Montealegre, A., Lamelas, M. & Riva, J. (2015). Interpolation Routines Assessment in ALS-Derived Digital Elevation Models for Forestry Applications. *Remote sensing (Basel, Switzerland)*, 7 (7): 8631-8654. doi: 10.3390/rs70708631.
- QGIS. (2022). *Download QGIS for your platform*. Tilgjengelig fra: <https://qgis.org/en/site/forusers/download.html> (lest 02.04.2022).
- rapidlasso GmbH. (u.å.). *LAStools*. Tilgjengelig fra: <https://rapidlasso.com/lastools/> (lest 05.05.2022).

- Sefercik, U. G., Karakis, S., Bayik, C., Alkan, M. & Yastikli, N. (2014). Contribution of Normalized DSM to Automatic Building Extraction from HR Mono Optical Satellite Imagery. *European journal of remote sensing*, 47 (1): 575-591. doi: 10.5721/EuJRS20144732.
- Shafranovich, Y. (2005). Common format and MIME type for comma-separated values (CSV) files.
- Skjærpe, G., Hyllestad, C. & Storhaug, T. C. (2017). *Kvalitetsundersøkelse av laserdata til digitale terrengmodeller*. Masteroppgave. Ås: Norge miljø- og biovitenskapelig universitet. Tilgjengelig fra: <http://hdl.handle.net/11250/2464657> (lest 03.03.2022).
- Statens kartverk. (2013). *Produktspesifikasjon FKB-Laser versjon 2.0*. Tilgjengelig fra: http://sosi.geonorge.no/Produktspesifikasjoner/tidligere/fkb-laser-v20_2013-02-01.pdf (lest 11.04.2022).
- Statens kartverk. (2015). *Geodatakvalitet 1.0*. Tilgjengelig fra: <https://www.kartverket.no/globalassets/geodataarbeid/standardisering/standarder/standarder-geografisk-informasjon/geodatakvalitet-1.0-standarder-geografisk-informasjon.pdf>.
- Statens kartverk. (2018). *Produktspesifikasjon FKB-Laser versjon 3.0*. Tilgjengelig fra: https://register.geonorge.no/data/documents/Produktspesifikasjoner_FKB-Laser_v1_fkb-laser-v30-2018-01-01_.pdf (lest 25.04.2022).
- Statens kartverk. (2022). *Produktspesifikasjon Punktsky 1.0.2*. Tilgjengelig fra: https://sosi.geonorge.no/produktspesifikasjoner/Punktsky/1.0.2/Produktspesifikasjon_Punktsky_1.0.2.pdf (lest 05.04.2022).
- Statens kartverk. (u.å.-a). *Brukerdokumentasjon Høydedata*. Tilgjengelig fra: https://hoydedata.no/LaserInnsyn/help_no/index.htm?context=10 (lest 08.04.2022).
- Statens kartverk. (u.å.-b). *Høgdedata og djupnedata*. Tilgjengelig fra: <https://www.kartverket.no/api-og-data/terrengdata> (lest 08.04.2022).
- Statens Vegvesen. (u.å.-a). *Modellbaserte veiprosjekter*. Tilgjengelig fra: <https://www.vegvesen.no/fag/veg-og-gate/planlegging-prosjektering-og-grunnerverv/prosjektering/modellbaserte-vegprosjekter/> (lest 10.02.2022).
- Statens Vegvesen. (u.å.-b). *Om håndbøkene*. Tilgjengelig fra: <https://www.vegvesen.no/fag/publikasjoner/handboker/om-handbokene> (lest 12.05.2022).
- Sulaiman, N. S., Majid, Z. & Setan, H. (2010). DTM generation from LiDAR data by using different filters in open-source software. *Geoinformation Science Journal*, 10 (2): 89-109.
- Suleymanoglu, B. & Soycan, M. (2019). Comparison of filtering algorithms used for DTM production from airborne lidar data: a case study in Bergama, Turkey. *Geodetski vestnik*, 63 (3): 395-414. doi: 10.15292/geodetski-vestnik.2019.03.395-414.
- support@rapidlasso.de. (2021). *News about rapidlasso*. 19.25.28 utg. As you might know, Martin passed in September - a terribly sad loss for all of us. The future of LAStools, as Martin's legacy, is assured. We have re-established all services. LAStools will be maintained and developed. The open-source part will live on at <https://github.com/LAStools/LAStools>. For licensing of commercial tools please email lic...@rapidlasso.de. New website is www.rapidlasso.de. The LAStools google group has been re-activated and will be looked after by our new developer Jochen. Maybe not every question can be answered straight away, as Jochen will need some more days to fully dive into the code. We are sorry for any inconvenience. We thank you for patience and for your support, while we are working 24/7 to close the gaps. Best regards, Silke, CEO rapidlasso GmbH. : Google Groups.

- TerraTec. (2007). *Rapport - Flybåren laserskanning Arendal Tvedestrand Froland 2007*. Tilgjengelig fra: https://hoydedata.no/LaserInnsyn/ProsjektRapport?filePath=%5C%5Cstatkart.no%5Choydedata_orig%5Cvol5%5C745%5Cmetadata%5CArendal%20Tvedestrand%20Froland%202007_Projektrapport.pdf (lest 19.04.2022).
- TerraTec. (2014). *Rapport TIN-Modell Arendal-Tvedestrand*. Tilgjengelig fra: https://hoydedata.no/LaserInnsyn/ProsjektRapport?filePath=%5C%5Cstatkart.no%5Choydedata_orig%5Cvol5%5C554%5Cmetadata%5CE18%20Tvedestrand-Arendal%202014_Projektrapport.pdf (lest 19.04.2022).
- TerraTec. (2016). *Rapport NV-P001 Tvedestrand-Arendal*. Tilgjengelig fra: https://hoydedata.no/LaserInnsyn/ProsjektRapport?filePath=%5C%5Cstatkart.no%5Choydedata_orig%5Cvol4%5C549%5Cmetadata%5CE18%20Tvedestrand-Arendal%202016_Projektrapport.pdf (lest 19.04.2022).
- TerraTec. (2017). *NDH Froland-Tvedestrand-Vegårshei 5pkt 2017*. Tilgjengelig fra: https://hoydedata.no/LaserInnsyn/ProsjektRapport?filePath=%5C%5Cstatkart.no%5Choydedata_orig%5Cvol5%5C744%5Cmetadata%5CNDH%20Froland-Tvedestrand-Veg%C3%A5rshei%205pkt%202017_Projektrapport.pdf (lest 19.04.2022).
- TerraTec. (2019a). *Asbuilt dokumentasjon E18 Tvedestrand-Arendal 2019*. Tilgjengelig fra: https://hoydedata.no/LaserInnsyn/ProsjektRapport?filePath=%5C%5Cstatkart.no%5Choydedata_orig%5Cvol9%5C1116%5Cmetadata%5CE18%20Tvedestrand-Arendal%202019_Projektrapport.pdf (lest 19.04.2022).
- TerraTec. (2019b). *Rapport , Bilbåren laserskanning med bilde- og video opptak, Tvedestrand - Arendal 2019*. Tilgjengelig fra: https://hoydedata.no/LaserInnsyn/ProsjektRapport?filePath=%5C%5Cstatkart.no%5Choydedata_orig%5Cvol9%5C1143%5Cmetadata%5CE18%20Tvedestrand-Arendal%20mobil%202019_Projektrapport.pdf (lest 19.04.2022).
- Thomson, C. (2018). *Common 3D point cloud file formats & solving interoperability issues*. Tilgjengelig fra: <https://info.vercator.com/blog/what-are-the-most-common-3d-point-cloud-file-formats-and-how-to-solve-interoperability-issues> (lest 07.04.2022).
- Thorsen, T. S. (2022). *Høringsbrev: Ny retningslinje som skal erstatte V770 Modellgrunnlag og R700 Tegningsgrunnlag*. : Statens Vegvesen, . Tilgjengelig fra: <https://www.vegvesen.no/globalassets/fag/horinger/2022/21-11324-31-ny-retningslinje-som-skal-erstatte-v770-modellgrunnlag-og-r700-tegningsgrunnlag-frist-01-04-2022/hoeringsbrev-ny-retningslinje-som-skal-erstatte-v770-modellgrunnlag-og-r700-tegningsgrunnlag.pdf> (lest 07.04.2022).
- Umansky, M. (2022). *QuickTerrain Modeler artikler* (E-post til Applied Imageery LLC ved Michael Umansky 08.04.2022).
- Vegdirektoratet. (2016). *Håndbok V770 Modellgrunnlag*. Tilgjengelig fra: <https://www.vegvesen.no/globalassets/fag/handboker/2016.03.14-handbok-v770-modellgrunnlag.pdf>.
- Vegdirektoratet. (2022). *R000 Modellgrunnlag Høringsutkast*. Tilgjengelig fra: <https://www.vegvesen.no/globalassets/fag/horinger/2022/21-11324-31-ny-retningslinje-som-skal-erstatte-v770-modellgrunnlag-og-r700-tegningsgrunnlag-frist-01-04-2022/hoeringsutgave-ny-retningslinje-modellgrunnlag.pdf> (lest 05.04.2022).
- Vosselman, G., Maas, H. G. & ebrary, I. (2010). *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Dunbeath: Whittles Publishing.
- Wang, X., Pan, H., Guo, K., Yang, X. & Luo, S. (2020). *The evolution of LiDAR and its application in high precision measurement*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: IOP Publishing.

- Zhang, K., Chen, S.-C., Whitman, D., Shyu, M.-L., Yan, J. & Zhang, C. (2003). A progressive morphological filter for removing nonground measurements from airborne LIDAR data. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 41 (4): 872-882.
- Zhang, K. & Cui, Z. (2007). *Airborne LIDAR Data PProcessing and Anlysis Tools*. Tilgjengelig fra: <http://lidar.ihrc.fiu.edu/download/Doc/ALDPAT.pdf> (lest 05.04.2022).

8. Vedlegg

Vedlegg 1 – Tabell estimerte statistiske verdier geometrisk kontroll i meter og prosent

		ETEW- Ref.	PM-Ref.	MLS-Ref.	ATIN-Ref.	QTM-Ref.		
Testområde	1	Antall grovfeil (<0.30)	90	51	89	19	66	
		Prosentandel grovfeil	3.75 %	2.12 %	3.71 %	0.79 %	2.75 %	
		Maks	4.816	2.119	0.498	1.892	1.935	
		Min	-0.572	-0.313	-0.996	-0.363	-0.304	
		Standardavvik	0.048	0.052	0.056	0.046	0.051	
		RMS	0.050	0.058	0.056	0.047	0.051	
		Systematisk avvik	-0.013	-0.026	-0.008	-0.005	0.007	
		Median	-0.016	-0.024	-0.012	-0.011	0.000	
		Krav 0.03 m - syst.avvik	0.017	0.004	0.022	0.025	0.023	
		Krav 0.06 m - syst.avvik	0.047	0.034	0.052	0.055	0.053	
		2	Antall grovfeil (<0.30)	12	67	225	136	67
			Prosentandel grovfeil	0.50 %	2.79 %	9.37 %	5.66 %	2.79 %
Maks	3.017		5.596	9.380	5.518	1.345		
Min	-1.585		-1.325	-1.423	-0.774	-1.277		
Standardavvik	0.165		0.075	0.102	0.078	0.084		
RMS	0.183		0.077	0.111	0.079	0.087		
Systematisk avvik	-0.080		-0.016	-0.042	-0.012	0.022		
Median	-0.040		-0.017	-0.041	-0.017	0.015		
Krav 0.03 m - syst.avvik	-0.050		0.014	-0.012	0.018	0.008		
Krav 0.06 m - syst.avvik	-0.020		0.044	0.018	0.048	0.038		
3	Antall grovfeil (<0.30)		41	32	83	20	61	
	Prosentandel grovfeil		1.71 %	1.33 %	3.46 %	0.84 %	2.54 %	
	Maks	5.770	1.967	1.187	1.579	4.490		
	Min	-0.434	-0.762	-1.835	-3.614	-0.837		
	Standardavvik	0.065	0.057	0.064	0.306	0.078		
	RMS	0.068	0.059	0.065	0.311	0.079		
	Systematisk avvik	-0.020	-0.017	-0.013	-0.055	0.014		
	Median	-0.022	-0.022	-0.020	-0.023	0.009		
	Krav 0.03 m - syst.avvik	0.010	0.013	0.017	-0.025	0.016		
	Krav 0.06 m - syst.avvik	0.040	0.043	0.047	0.005	0.046		
	4	Antall grovfeil (<0.12)	17	359	53	114	108	
		Prosentandel grovfeil	0.71 %	14.99 %	2.21 %	4.75 %	4.50 %	

	Maks	0.646	1.168	3.924	0.162	0.459
	Min	-0.417	-3.885	-0.417	-3.500	-1.010
	Standardavvik	0.031	0.030	0.023	0.022	0.025
	RMS	0.040	0.050	0.032	0.032	0.026
	Systematisk avvik	-0.024	-0.040	-0.022	-0.023	-0.005
	Median	-0.023	-0.039	-0.023	-0.023	-0.006
	Krav 0.03 m - syst.avvik	0.006	-0.010	0.008	0.007	0.025
	Krav 0.06 m - syst.avvik	0.036	0.020	0.038	0.037	0.055
	Antall grovfeil (<0.12)	131	285	319	277	271
	Prosentandel grovfeil	5.77 %	13.47 %	15.32 %	13.04 %	12.72 %
	Maks	2.781	6.478	6.988	1.092	2.336
	Min	-2.144	-1.063	-2.182	-4.258	-1.275
	Standardavvik	0.195	0.028	0.025	0.026	0.029
5	RMS	0.201	0.032	0.027	0.026	0.029
	Systematisk avvik	-0.048	-0.016	-0.011	-0.006	0.000
	Median	-0.009	-0.015	-0.011	-0.008	-0.002
	Krav 0.03 m - syst.avvik	-0.018	0.014	0.019	0.024	0.030
	Krav 0.06 m - syst.avvik	0.012	0.044	0.049	0.054	0.060



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway