

Effekten af flyveparametre på terrænmodeller i forskellige naturtyper



10. SEMESTER PROJEKT
GRUPPE 13
SURVEYING, PLANNING AND LAND MANAGEMENT
AALBORG UNIVERSITET



AALBORG UNIVERSITET
STUDENTERRAPPORT

Det Tekniske Fakultet for IT & Design
Surveying, Planning and Land management
Strandvejen 12-14
9000 Aalborg
<https://www.tech.aau.dk>

Titel:

Effekten af flyveparametre på terrænmodeller i forskellige naturtyper

Tema:

Master Thesis

Projekt:

10. Semester

Projektperiode:

03. Februar 2025 - 28. Maj 2025

Projektgruppe:

Gruppe 13

Medlemmer:

Stefan Winther Nielsen

Vejleder:

Jens Peter Cederholm

Antal sider: 65

Antal PDF sider: 78

Appendiks: 7

Synopsis:

Dette kandidatprojekt er skrevet på baggrund af en interesse fra LE34 om at undersøge effekten af forskellige flyveparametre i forskellige naturtyper, med henblik på at identificere fremtidige retningslinjer for Lidarskanning med drone. Hertil arbejdes der ud fra en problemformulering "*Hvordan påvirkes terrænmodellen af forskellige flyveparametre under forskellige naturtyper?*". Til undersøgelse af denne problemformulering blev der foretaget seks flyvninger over tre naturtyper, hvor til der blev opmålt kontrol og terrænpunkter som kontrolgrundlag. På baggrund af syv kvalitetsparametre, sammenlignes de 18 datasæt, i forhold til absolutte, relative og komparative analyser. Resultatet af forsøgene var minimal påvirkning på kvaliteten af terrænmodellerne generelt som følge af ændret flyveparametre, mens effekten af naturtypen havde den største indflydelse på kvaliteten af terrænmodellerne. Blandt anbefalingerne til LE34 er en ny tilgang til opmåling af kontrolpunkter på terræn fremfor befæstet overflader, som hidtil har været standard praksis.

Rapportens indhold er frit tilgængeligt, men offentliggørelse (med kildeangivelse) må kun ske efter aftale med forfatterne.

Abstrakt

This master thesis explores the topics of ULS, nature types, flying parameters and DTM's. With the rapidly improvements of drone technology alongside more portable and better LiDAR scanners, they become more common within the field of land surveying. In this regards LE34 has requested a standardisation of procedures when using ULS, with the means of achieving the best possible results from the survey. This master thesis investigates the main question.

How are terrain models affected by different flight parameters in different nature types?

This question is based upon the aforementioned concerns from LE34, whereby answering the main question, it is possible to set some initial standard practices and procedures. To answer the main question, a study into what the use case, history and how the creation of terrain models (DTM) is necessary to understand the basics of what a DTM is. Through this chapter the DTM's have a long history of representing the terrain features, as more than just the highest points, further they are used within the construction industry as a means of identifying the terrain layout and elevations regarding earthwork. The next important question is what effects different parameters might have upon a point cloud and DTMs. Through here is understood that plenty of factors are at play when performing ULS, but to simplify the analysis, only flying height and velocity is included for further analysis. It is furthermore discovered that there is a multitude of ways to determine the effects whereas three comparisons are chosen: Absolute, Relative and Comparative analyses between terrain points and DTM's.

The main analysis is thus based upon three analyses, where the combined effects of flying parameters is examined, by comparison between datasets. Through this analysis it is found that flight parameters have a low influence upon the DTMs, where the randomness of the data had more significant impact, and were more spread out compared to the possible improvement changing flight parameters would have. It is therefore not possible to determine if the changes would be due to randomness or there would be slight improvements in the order of few millimetres to a couple of centimetres. This study also had a focus upon different nature types, whereas the same procedures and analyses were performed upon multiple nature types where significant patterns became obvious. The effects within the nature types were negligible, but the change between nature types were significant. As such the drone operator should pay more attention to the different nature types of which he is surveying with regards to error corrections, rather than focus on the flying parameters. One of the outliers in the dataset was lower altitudes above forests increased the accuracy of DTMs, which would need further investigations.

Forord

Kandidatprojektet er skrevet i forbindelse med 4. semester på Aalborg Universitet, af Stefan Winther Nielsen, ansat hos Landmålercompagniet. I forbindelse med projektudarbejdelsen skal der gives en stor tak til Peter Cederholm og Geodæsi gruppen, for deres store hjælp med vejledning og sparring igennem projektperioden. Foruden denne hjælp og vejledning havde det ikke været muligt at fuldende projektet. Der skal tillige siges mange tak til LE34 for at stille udstyr og mandskab til rådighed, til forsøgsudførelse og efterfølgende databehandling, hvortil Michael Houmann skal have en stor tak for hans tid og hjælp med at foretage skanninger og dannelse af terrænmodellerne. Uden denne hjælp var det ikke muligt at kunne udføre forsøget. Der gives en tak til Landmålercompagniet, for lån af totalstation og GNSS-rover. Den sidste tak give til studiekammeraterne Kresten F. Marcussen og Emil F. Knudsen for god sparring og godt humør igennem projektperioden.

Læsevejledning

Rapporten er skrevet som et sammenhængende skriftligt produkt, inddelt i to dele, før og efter forsøg. Det anbefales at læse projektet kronologisk, således alt information tilgås. Rapporten er hovedsageligt skrevet på dansk, hvortil der benyttes engelske fag ord og beskrivelser hvor relevant, i forbindelse med definitioner, navne og værktøjer.

I rapporten bliver kilder angivet ved brug af Harvard metoden på formen [Efternavn(e)/Virksomhed(er), år, evt. side] for kilder med mindre end 2 forfattere. Kilder med mere end 2 forfattere opstilles på formen [Efternavn/Virksomhed et al., år, evt. side]. Titler, forfatters fulde navne, udgiver mv. fremgår af rapportens litteratur. Ved en enkelt kilde benyttes notationen 'A' i stedet for 's', hvor dette refere til afsnit.

Der benyttes i rapporten en række forkortelser, hvor de mest gængse af disse er angivet i nedenstående tabel

Forkortelse	Udskrevet
ALS	Airborne Laser Skanner
TLS	Terrestrial Laser Skanner
ULS	Unmanned Laser Skanner
DTM	Digital Terræn Model
DOM	Digital Orthophoto Map
TS	Totalstation
TP	Terrænpunkt

Sleber

Navn Efternavn

Indholdsfortegnelse

Kapitel 1	Indledning	1
Kapitel 2	Problemformulering	2
Kapitel 3	Metode	3
3.1	Tidligere erfaringer	4
3.2	Forsøgsdesign	5
3.3	Projektstruktur	6
3.4	Anvendte metoder før forsøget	8
Kapitel 4	Terrænmodeller og LE34	10
4.1	Hvad bruges terrænmodeller til i dag	11
Kapitel 5	Påvirkningen af forskellige parametre	12
5.1	Før flyvning	13
5.2	Under flyvning	14
5.2.1	Kontrollerbare faktorer	14
5.2.2	Ukontrollerbare faktorer	16
5.3	Efter flyvning	17
5.4	Valg af parametre	17
Kapitel 6	Estimeringen af påvirkning	20
6.1	Påvirkning	20
6.2	Kontrolpunkter	21
6.3	Terrænkoter	21
6.4	Sammenligning mellem terrænpunkter og terrænmodeller	22
6.5	Sammenligning mellem terrænmodeller	23
6.6	Opsummering	24
Kapitel 7	Forsøgsopsætning	25
7.1	Forsøgsopstilling	25
7.1.1	Forsøgsområde	27
7.2	Udstyr	28
7.2.1	Matrice 350 RTK drone	28
7.2.2	Trimble GNSS rover	29
7.2.3	Trimble S5 totalstation	29
Kapitel 8	Forsøgsbeskrivelse	31
8.1	Klargøring til første flyvning	31
8.2	Kontrolmåling mellem flyvninger	32
8.3	Opmåling af terrænkoter og naturtyper efter sidste flyvning	33
8.3.1	Beskrivelse af naturområder	33

8.3.2	Opstilling af totalstationen	37
8.4	Opsummering	39
Kapitel 9	Databehandling	41
9.1	Databehandling af GNSS og totalstations målingerne	41
9.2	Dannelse af digital terrænmodel	41
9.3	Sammenligning mellem terrænmodel og terrænpunkter	43
9.4	Kvalitetsparametre og analysesammensætning	45
9.4.1	Hovedanalyser	46
9.4.2	Analysesammensætning	48
Kapitel 10	Resultater	49
10.1	Kontrolpunkter	50
10.2	Anvendelse af kvalitetsparametrene	50
10.2.1	Absolutte analyse	51
10.2.2	Relativ analyse	51
10.2.3	Komparativ analyse	52
10.3	Effekten af flyvehøjden	52
10.4	Absolutte analyse	53
10.5	Relative analyse	54
10.6	Komparativ analyse	55
10.7	Effekten af hastighed	56
10.8	Naturtypen som fejlkilde	57
Kapitel 11	Diskussion	59
11.1	Effekten af flyvehøjden	59
11.1.1	Undersøgelser og naturtyper	59
11.2	kontrolpunkter som fikspunkter	60
11.2.1	Targets	60
11.2.2	Placeringen af kontrolpunkter	61
11.3	Terrænmodellens opløsning	61
Kapitel 12	Konklusion	63
Kapitel 13	Anbefalinger til LE34	65
Litteratur		66

Terrænmålinger og modelleringen har gennem længere tid været et vigtigt værktøj til at formidle terrænets udformning. I det 16-århundrede blev kork bl.a. brugt til at lave modeller af byer og forsvarsværker, samt det omkring liggende terræn.[Terrain Models, U.D.] I nyere tid er brugen af terrænmodeller blevet udvidet til brug i andre sammenhænge end militærets. Indenfor for den civile verden, benyttes terrænmodeller til forskellige projekter, lige fra planlægning af vådområder[Danmarks Naturfredningsforening, U.D.] til beregning af volumen i kalkgrave[LE34, U.D.]. Med så bredt et spænd af forskellige anvendelser for terrænmodeller, bliver efterspørgslen på dem også større, og driver en udvikling indenfor forbedring af forskellige teknologier til dannelsen af disse terrænmodeller. I Danmark har der igennem det seneste årti eksisteret landsdækkende terrænmodeller, som bliver opdateret hvert 5. år[Klimadatastyrelsen, 2024][Klimadatastyrelsen, 2025]. Opmålingen til denne landsdækkende terrænmodel bliver foretaget på baggrund Lidarskanninger, monteret på fly, som skanner jordoverfladen[Klimadatastyrelsen, 2025]. Lidarskanning er dog ikke begrænset til kun fly, men eksistere også i andre applikationer, heriblandt monteret på droner. En af de firmaer som benytter sig af droner til dannelsen af terrænmodeller er LE34, som benytter forskellige metoder til dannelsen af terrænmodellerne heriblandt Lidar og fotogrammetri[LE34, U.D.]. I forbindelse med anskaffelsen af en ny drone, ønsker LE34 at undersøge mulighederne og begrænsningerne for dronen, med henblik på at kunne opstille en standard fremgangsmåde, hvorpå dronens udstyr kan benyttes på den mest optimale måde[LE34, U.D., s. 43]. Ifølge MacDonell et al. [2023] findes der en lang række parametre, som potentielt påvirker skannerens nøjagtighed, hvor ifølge Kucharczyk et al. [2018] specielt naturtyper har en betydelig effekt på lidarskanninger. Yderligere er lidarskanneren en aktiv dataindsamlingsmetode, hvor den har mulighed for at kunne trænge igennem tæt vegetation[Kucharczyk et al., 2018], hvorimod fotogrammetri er en passiv sensor, som kræver lys til at kunne foretage målinger. Dette giver Lidarskanning en fordel ved dannelsen af terrænmodeller i forskellige naturtyper, hvor terrænniveauet er dækket af forskellige typer vegetation. Dette leder op til problemformuleringen,

"Hvordan påvirkes terrænmodellen af forskellige flyveparametre under forskellige naturtyper?"

Hvordan påvirkes terrænmodellen af forskellige flyveparametre under forskellige naturtyper?

Til besvarelse af problemformuleringen er det nødvendigt at have en basal forståelse for nogle af de elementer som udgør problemformuleringen

Til besvarelse af problemformuleringen er det nødvendigt at have en basal baggrundsviden vedrørende enkelt elementer i problemformuleringen. Dette gøres med henblik på at kunne svare fyldestgørende på problemformuleringen. Til dette formål er en af de vigtige emner, hvad en terrænmodel er og i hvilken kontekst terrænmodellerne bliver benyttet. Gennem en forståelse herfor beskrives konteksten hvormed senere vurderinger af afvigelser kan anskues. Med en baggrundsviden om terrænmodeller undersøges hvordan disse kan blive dannet, i forlængelse af hvilke parametre som potentielt påvirker resulterende terrænmodeller. Det sidste delelement som undersøges, er kvantificeringen af påvirkningen, med henblik på at identificere forskellige metoder hvorpå potentielle effekter kan blive identificeret. Da projektet tager udgangspunkt i en pragmatisk tilgang, bliver resultaterne vurderet i kontekst af LE34 og hvorledes deres tilgang til dannelse, distribuering og benyttelse af terrænmodeller. Det er således denne praktiske tilgang, hvor forandringer bør have en praktisk betydning, før de bliver vurderet til at være af betydelig karakter.

På baggrund af den generelle forståelse for både dannelsen af terrænmodeller, undersøges den næste del i problemformuleringen "forskellige flyveparametre", hvor der gennem tidligere forsøg, undersøges hvilke parametre, som kan have en indflydelse på den endelige terrænmodel. På baggrund af den viden der i løbet af kapitel 5 på side 12 bliver samlet, udvælges to parametre som medtages i yderligere undersøgelser. Det er således disse tre parametre som bliver projektet fokuspunkt i senere analyser.

Det sidste element til den indledende forståelse af problemformulering, 'Hvordan påvirkes', beskrives i kapitel 6 på side 20 hvordan de udvalgte parametre kan påvirke terrænmodellen, og identificeringen af denne påvirkning, med udgangspunkt i tidligere forsøg, se tabel 3.1 på den følgende side. Med udgangspunkt i kerneforsøgene undersøges hvilke estimatorer der er benyttet til at kvantificere effekten.

Formålet med de tre indledende undersøgelser kan kondenseres til tre underspørgsmål, som angivet herunder

1. Hvordan bliver terrænmodeller lavet og til hvilket formål?
2. Hvilke flyveparametre og naturtyper har potentiale for at kunne påvirke terrænmodellerne?
3. Hvordan kan effekten af parametrene kvantificeres?

De tre underspørgsmål danner baggrundsviden for Lidarskannet terrænmodeller ved brug af drone. Der bliver her undersøgt forskellige elementer og parametre, der kan have betydning for dataindsamlingen, terrænmodellen og formål med terrænmodellerne, hvortil analyse af effekten som forskellige flyveparametre har på dronen kan undersøges i relation til en praktisk anvendelse af Lidarskanning fra drone. Forinden opstilling af forsøget, undersøges tidligere forsøg, hvor der er udvalgt fire undersøgelser, som udgør den primære del af baggrundserfaringer til forsøgsopsætningen.

3.1 Tidligere erfaringer

I dette projekt benyttes erfaringer fra tidligere forsøg, som inspiration til forsøgsdesign, betydelige parametre og generel information vedrørende Lidarskanning bliver der taget udgangspunkt i 4 forskellige forsøg, med en forskelligartet tilgang til at analysere de resulterende punktskyer. Disse aspekter er blevet sammenfattet i nedenstående tabel 3.1.

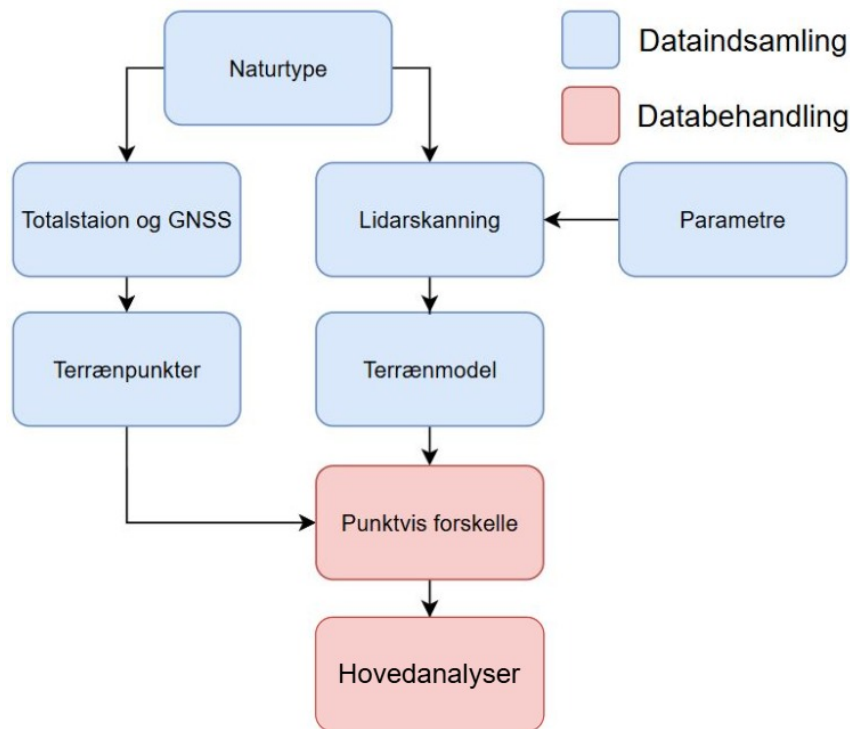
Forsøgsforfatter	[MacDonell et al., 2023]	[Kucharczyk et al., 2018]	[Bakula et al., 2019]	[Bakula et al., 2020]
Forsøgsudstyr	Helikopter drone	Helikopter drone	Helikopter drone	Fastvinget drone
Forsøgsparametre	Penetration af vegetation	Penetration af vegetationstyper	Tæthed, nøjagtighed og kalibrering	Flyvehøjde punktdensitet
Flyveparametre	70 m; 10 m/s	60 m; 7,7 m/s	100 m; 6 m/s	80 - 180 m;
Højde;Hastighed;				
Kontroludstyr	TLS; GNSS	Totalstation; GNSS	TLS; totalstation; GNSS	TLS;GNSS
Kontrol punkter	GCP, punktskyer	GCP; terrænpunkter	GCP, punktskyer, terrænpunkter	GCP, punktskyer
Sammenligningsmetode	Punktsky-punktsky Punktinterpolering	Point to point	DTM-terrænpunkt; Punktsky-terrænpunkter; Punktsky-punktsky	Punktsky-punktsky

Tabel 3.1. Oversigt over de fire kerneundersøgelser, der er anvendt som inspiration i rapporten. Forsøgene præsenteres med fokus på deres formål, anvendte metoder og udstyr, samt relevante parametre. Beskrivelserne er forenklet for overblikkets skyld, da flere af forsøgene også inkluderer yderligere delundersøgelser. Fælles for alle forsøg er, at de undersøger anvendelsen af Lidar-scanninger fra droner.

De fire primære undersøgelser er udvalgt på baggrund af relevansen til projektet, hvor de alle fire omhandler Lidarskanninger fra drone, i forskellige scenarier. Derudover er de valgt på baggrund af at være publiceret i nyere tid, hvor udviklingen indenfor Lidarskanning med drone er i hastig udvikling[DJI ENTERPRISE og BAAMTECH, U.D., s. 18]. Igennem forsøgene bliver der benyttet forskellige metoder både til udførelse af Lidarskanninger og indsamling af punkter til kontrolmålinger og sammenligninger. Der benyttes på tilsvarende vis forskellige typer af udstyr til at foretaget kontrolmålingerne, hvor det er muligt at dele dem op i tre kategorier; totalstation, terrestrisk laser skanner og GNSS-udstyr. Yderligere som det kan ses på tabel 3.1, er der benyttet forskellige metoder til at undersøges terrænmodellerne, hvor nogle benytter punkt til punkt sammenligning mens andre benytter sig af sammenligning mellem punktskyer eller terrænmodeller og kontrolpunkter.

3.2 Forsøgsdesign

De tidligere undersøgelser har udført deres forsøg på baggrund af forskellige kontrol og indsamlingsmetoder. På baggrund af de tidligere erfaringer, kombineret med problemformuleringen, er naturtyper angivet som en central faktor i analysen, som kan ses på figur 3.1.

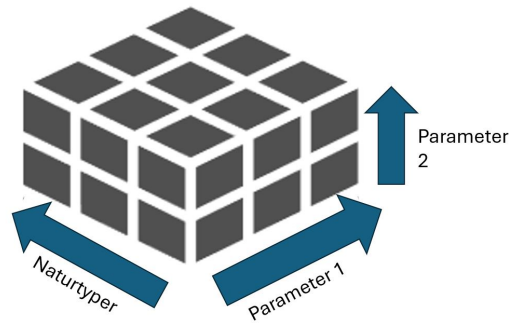


Figur 3.1. Forsøgsgennemførelsen i overordnet træk, opdelt i to dele, hhv. dataindsamling og databehandling. Forsøgsopsætninger er gjort på baggrund af inspiration fra tidligere erfaringer fra de fire forsøg angivet i tabel 3.1

Figur 3.1 er en skitsering af det generelle forløb ved dette projekts forsøgsgennemførelsen, hvor der er draget inspiration fra de fire kerneundersøgelser. De generelle træk er sammenlignelige med kerneforsøgene, hvor der har været benyttet forskellige opmålingsmetoder, som kan ses på tabel 3.1.

Forsøget kommer til at bestå af to dele, hvor den første del er dataindsamling som foretages bl.a. i projektområdet. Den anden del af forsøget er databehandling, hvor afvigelser mellem terrænmodeller og terrænpunkter beregnes. Resultaterne fra beregningerne opdeles efter naturtyper og flyveparametre, hvorefter der foretages komparativ analyse på baggrund af de forskellige klassificeringer som de beregnet datasæt er blevet tildelt. Dette bliver beskrevet i yderligere detaljer gennem kapitel 9.

På baggrund af tidsbegrænsninger for projektet, og med henblik på at mindske antallet af flyvninger, bliver der kun undersøgt 2 forskellige parametre, i forskellige naturtyper. Den komparative analyse bliver således udført i et tredimensionelt plan jf. figur 3.2.



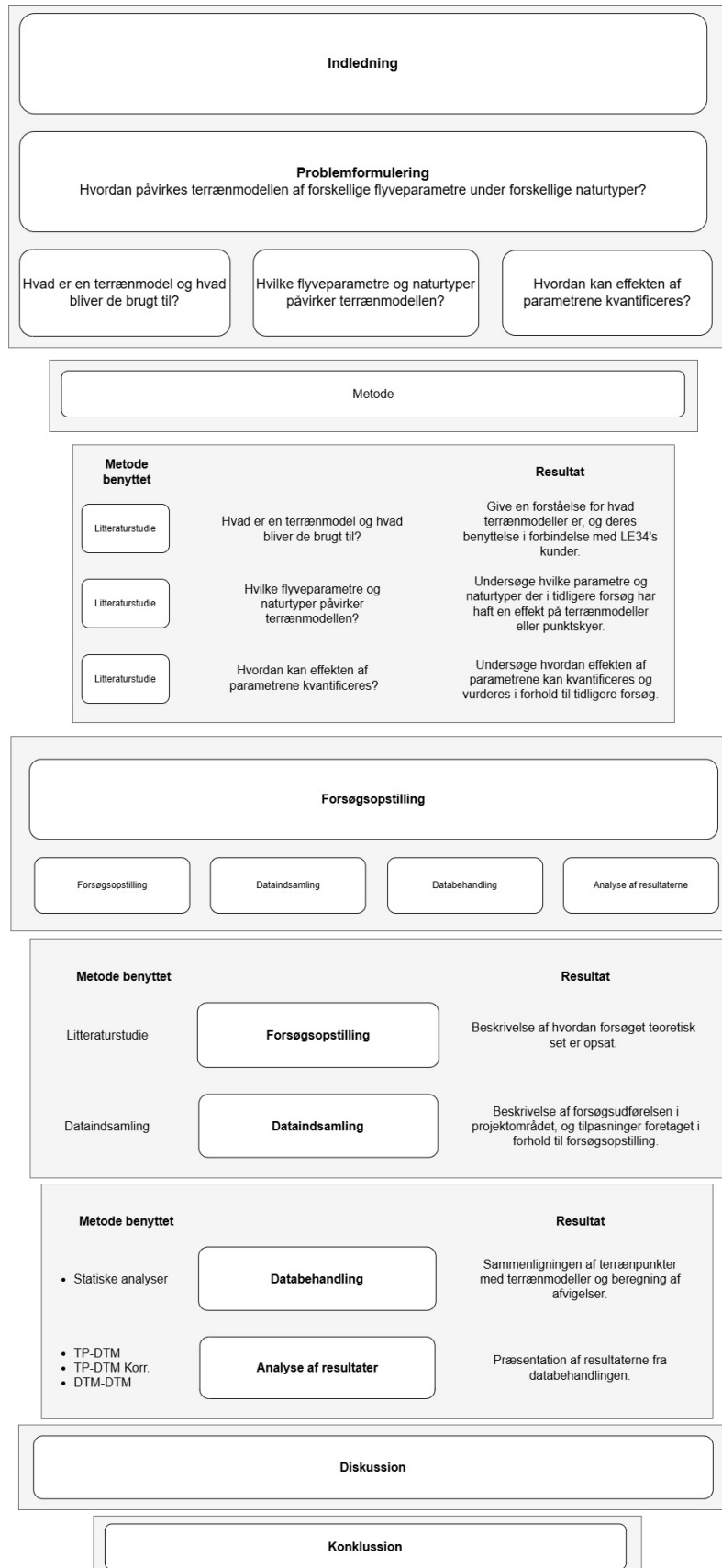
Figur 3.2. Visualisering af sammenspillet mellem parametre og naturtyper på et tre-dimensionelt plan. Naturtyper er angivet med tre felter mod venstre, mens parameter 1 har tre felter mod højre og parametre 2 har to felter i højden, med et samlet antal af 18 felter. Antallet af kasser er kun demonstrativt for udviklingen i antal datasæt på baggrund af antal parametre og underinddeling i parametrene.

De forskellige parameterindstillinger er repræsenteret ved felterne i figur 3.2, hvortil der udføres en komparativ analyse på baggrund af kvalitetsparametre for datakvaliteten, i relation til højdeafvigelse. Den komparative analyse udføres kun todimensionelt, hvor naturtypen indgår som den ene dimension. Det er således muligt at isolere parametrenes effekt på terrænmodellens kvalitet, på baggrund af hvilken naturtype skanningen er foretaget i.

Af de signifikante værdier som undersøges tages der udgangspunkt i kvantitative undersøgelser for det enkelte datasæt, til estimering af kvaliteten. bliver gjort på baggrund af statiske indikatorer såsom spredning, yderværdier, RMSD og gennemsnitsafvigelse. Disse udgør kvalitetsvurderingen af det enkelte datasæt, som efterfølgende kan sammenlignes på baggrund af en komparativ analyse. I denne komparative analyse, benyttes tendenser i kvaliteten, på tværs af ændringer i samme parametre, som estimatet for den enkelte parameters betydning for terrænmodellen. Dette bliver yderligere beskrevet i kapitel 5 på side 12 og kapitel 9 på side 41

3.3 Projektstruktur

Projektet er struktureret op omkring en indledende fase før forsøgsudførelsen og en databehandlingsfase efter forsøgsudførelsen. Den indledende fase omhandler informationsindsamling, primært ved brug af litteraturstudier, til at oplyse emnet som undersøges, hvortil den anden halvdel fokuserer på databehandling af de indsamlet data. Denne opdeling af projektet kan ses på nedenstående figur 3.3



Figur 3.3. Projektets struktur opdelt i en indledende og afsluttende del, yderligere underinddelt i kapitler, med beskrivelse af de forskellige metoder anvendt i de individuelle afsnit, samt formålet med afsnittene.

Igennem kapitel 4 på side 10 undersøges hvad en terrænmodel er, med henblik på at fastlægge hvordan terrænmodeller bliver konstrueret. Der bliver herigennem kortvarigt undersøgt den historiske baggrund for disse, samt undersøgt i hvilken sammenhænge disse modeller bliver anvendt i nutiden. Da projektet udføres i samarbejde med LE34, er benyttelse af terrænmodellerne, i forbindelse med de projekter som LE34 kan lave terrænmodeller til. Der bliver således benyttet litteraturanalyser og enkelte spørgsmål til Landinspektørfirmaer, i hvilken sammenhæng disse terrænmodeller bliver benyttet. Igennem undersøgelsen af hvorledes disse modeller bliver dannet, bliver nogle parametre som har betydning for terrænmodellerne identificeret.

I kapitel 5 på side 12 undersøges hvilke parametre, som har en indflydelse på den endelige terrænmodel, hvor der i forbindelse med disse undersøgelser benyttes litteraturstudier, af andre forsøg som udgangspunkt for hvilke parametre, der potentielt har en indflydelse på terrænmodellerne. Parametrene kategoriseres i forhold til hvornår de har indflydelse i processen, hvorefter to parametre, med formodet indflydelse under flyvning, udvælges til yderligere undersøgelser. Herudover undersøges hvilke og hvor meget forskellige naturtyper påvirker terrænmodellerne jf. tidligere forsøg og undersøgelser.

Igennem kapitel 6 undersøges og beskrives hvordan effekten af forskellige forhold kan blive identificeret og kvantificeret, på baggrund af tidligere forsøg, hvorfra der drages inspiration til egne kvantificerings metoder. Der bliver således benyttet litteraturstudier på baggrund af relevante forsøg som undersøger lignende emner, vedrørende Lidarskanning og forskellige parametre.

I de efterfølgende kapitler 7 og 8 beskrives forsøgsopsætning med inspiration fra tidligere forsøg, hvor der igennem kapitel 7, beskrives den teoretiske tilgang til hvorledes forsøget ideelt set skulle have været udført, og igennem kapitel 8 bliver det beskrevet hvorledes forsøget er blevet udført, med de tilpasninger som er blevet gjort undervejs på baggrund af de forhold som var tilstede i forsøgsområdet.

Kapitel 9 beskriver den proces hvorved de indsamlede data bliver behandlet, med henblik på estimering af kvaliteten for de enkelte terrænmodeller og efterfølgende beregninger, der ligger til grund for sammenligning mellem terrænmodellerne. Sammenligningerne mellem terrænmodellerne bliver præsenteret igennem kapitel 10 hvor resultatet præsenteres.

De efterfølgende kapitler diskuterer resultaterne af projektforsøgene, og hvordan resultaterne kan ligge til grund for en standard tilgang til droneflyvning hos LE34. Gennem kapitel 12 på side 63 konkluderes der på resultaterne og problemformuleringen besvares. Efterfølgende præsenteres anbefalingerne til LE34.

3.4 Anvendte metoder før forsøget

Igennem projektet er der benyttet forskellige videnskabsteoretiske metoder, af forskellige karakter. Igennem den første del af projektet, før forsøgsudførelsen, er der primært benyttet litteraturstudier, til at danne en baggrundsviden omkring emnet. Herved er det muligt at kunne opstille en undersøgelse af de relevante parametre.

Litteratursøgning er i projektet blevet udført med tanke på verificering af kilderne ved brug af CRAAP metoden, hvor kilderne vurderes på baggrund af 'Curreny, Relevance, Authority, Accuracy og Purpose'[Kampen, 2024]. Indenfor udviklingen med droners kvalitet og tilgængelighed kan nogle af kilderne relativt hurtigt blive forældet, afhængig af emne. Et eksempel herpå er forskellen mellem L1 og L2 Lidarskanneren fra DJI, hvor der skete en væsentlig forbedring i udstyret.[DJI ENTERPRISE og BAAMTECH, U.D.] Kilder omhandlende de seneste nye indenfor drone teknologier er således vurderet til at skulle være skrevet indenfor 5 år, medmindre andre elementer af kilderne benyttes. Relevansen af kilderne er den anden opvejning ved valg af kilder, hvor der kan benyttes ældre kilder, hvis indholdet af kilden er betydelig for rapporten, eller ikke er forældet. Generelt vurderes relevanskriteriet for alle kilderne, hvor der efterstræbes at benytte kilder som er autoritative og relevante på området. Autoriten er det tredje aspekt, hvor der indenfor droneflyvning og Lidar, ikke altid er muligt at benytte statsgodkendte eller statslige kilder. Der efterstræbes at benytte kilder som er eksperter indenfor emnet, eller merit baseret på længere tids erfaring. Eksempel herpå er FLYGUYS [2022], som er et amerikansk firma, med speciale i droneflyvning. På baggrund af erhverv og placering er kilden repræsentativ til at diskutere amerikanske forhold. Nøjagtigheden bliver vurderet på baggrund af de enkelte kilder, hvor der primært er benyttet google scholar til at finde videnskabelige artikler. På tilsvarende vis er der ved kildernes formål, efterstræbt at benytte kilder hvor formålet med kilden ikke ændre på præsentationen af den nødvendige information benyttet i projektet. Såfremt dette ikke er muligt efterstræbes det at benytte flere forskellige kilder. Undtagelser til dette er ekspertviden indenfor kvaliteten af udstyr, hvor Trimble [U.D.] er blevet benyttet til at beskrive udstyrets kvalitet, mens dette er et salgsdokument.

Udover litteraturstudie, er der samarbejdet med LE34 og Landmaalercompagniet, hvor begge landinspektørfirmaer har kunne belyse hvilken praksis, som benyttes indenfor landinspektørfaget i relation til opmåling. Korrespondancen med Landmaalercompagniet har været gennem et åbent spørgsmål, hvor de have fri mulighed for at kunne besvare spørgsmålet. Denne korrespondance er blevet foretaget på sms, hvor spørgsmål og svar kan ses i bilag B. Korrespondancen med LE34 har været på varierende form, hvor nogle spørgsmål er blevet besvaret gennem åbne spørgsmål underforsøgsudførelsen, mens andre spørgsmål har været fremsendt på mail. Spørgsmålene er ligeledes i form af åbne spørgsmål, hvor LE34 kunne svare frit på spørgsmålene. De mails som danner baggrund for elementer i dette projekt er vedhæftet i bilag C.

Igennem kapitel 6 på side 20 og 9 på side 41 beskrives flere tekniske metoder, som bliver benyttet til databehandling og efterfølgende sammenligning af datasæt.

I dette kapitel beskrives hvad en terrænmodel er, hvordan de bliver benyttet generelt, samt hvordan virksomheden LE34 arbejder med opmåling til terrænmodeller og hvad de pågældende terrænmodeller er påtænkt at kunne bruges til.

Kortlægning af landområder har længe været en disciplin med forskellige udfordringer, og på baggrund heraf været i udvikling gennem årtusinderne. Nogle af de udfordringer som de tidlige kartografer havde, var repræsentation af terrænniveau, så som bjerge og bakker. I de tidlige kort blev de repræsenteret gennem symboler, hvor små bakkeforme eller trekanten, repræsenterede enten en bakke eller bjerge. Disse bakker eller bjerge havde ikke indikationer af hvordan terrænet så ud, i forhold til hvor stor var bakken eller bjerget, hvor der ved udviklingen af bedre målemetoder gennem det 16-århundrede, så som kompas og kæde mål, muliggjorde bedre topografiske målinger. I denne sammenhæng begyndte topografien at blive beskrevet gennem højdekurver.[Mulcahy, 1995] Disse tidlige topografiske kort var primært benyttet af militæret.[Terrain Models, U.D.]

Udover de topografiske repræsentationer af terræn på todimensionelt plan, blev der, for mindre områder, udviklet terrænmodeller i det 1600-århundrede, som bestod af fysiske modeller der repræsenterede forsvarsværker eller byer, samt det omkringliggende terræn. Disse modeller kunne være lavet i mange forskellige materialer så som kork.[Terrain Models, U.D.]

Dataindsamlingen til både kort og modellerne blev forandret med opfindelse af flyvemaskinen, i den første halvdel af det 20-århundrede, hvor det blev muligt at benytte fotogrammetri til bestemmelse terrænkoter. Det var herved muligt med flybilleder at opmåle større området på kortere tid, med en højere præcision end tidligere.[Terrain Models, U.D.]

I den digitale alder, med udviklingen af computer begyndte konceptet vedrørende en digital terræn model (DTM), hvor i stedet for at arbejde med fysiske modeller, blev en 2D repræsentation af et område, tildelt en højdeværdi i intervaller. Herved var det muligt på en ny måde, digitalt at repræsentere terrænet, hvor der på baggrund af disse repræsentationer kunne foretages interpolationer. Denne definition af DTM, blev defineret af Miller og Laflame, som en statistisk model, til at repræsentere terrænet.[Warf, U.D.] I udviklingen af de digitale terrænmodeller, opstod flere forskellige typer af disse modeller som Digital Height Model og Digital Surface Model, hvor de fokuserer på forskellige aspekter af jordoverfladen.[Warf, U.D.]

En terrænmodel er således i den digitale repræsentation af et terræn baseret på statiske modeller, hvor Z-aksen kan repræsenteres som en given værdi til individuelle punkter. Disse værdier kan efterfølgende i digitale medier repræsenteres som en tredje dimension, hvor terrænoverfladen kan visualiseres i 3D.

4.1 Hvad bruges terrænmodeller til i dag

Terrænmodeller kan benyttes forskellige sammenhænge, hvor viden omkring terrænets udformning er af betydelige karakter. Eksempler herpå er erosions estimeringer, volumenberegninger[LE34, U.D.] og situationsplaner. Situationsplaner er ofte benyttet indenfor byggebranchen, hvor disse indgår som en del af byggeansøgninger til nybyggerier, hvor der angives terrænkoter på grunden[Brønderslev Kommune, U.D.]. Opmåling af terrænkoter i mindre områder, bliver foretaget med GPS målinger af bl.a. landinspektørfirmaer, på trods af landsdækkende terrænmodel. Ifølge en landinspektør hos Landmålercompagniet bliver den landsdækkende terrænmodel ikke opdateret ofte nok, til at kunne tage højde for de terræændringer, som sker løbende i områderne. Derfor er det nødvendigt at foretage egne opmålinger til terrænmodeller, med henblik på at levere en opdateret terrænoversigt, Se bilag B. Til opmåling af større områder benytter firmaer som LE34 droner til at danne terrænmodeller, hvilket spare tid og øger mængden af terrænpunkterne, sammenlignet med GNSS opmålingerne.[LE34, U.D.] Terrænmodellerne er ikke kun begrænset inden for byggeriet hvor de ifølge LE34 [U.D.] også kan benyttes til volumenberegning og erosionsestimering på baggrund af forskellen mellem terrænmodeller. I alle tre tilfælde, kan lidarskanninger bidrage positivt til opmåling af områderne hvor lidar har mulighed for at kunne foretage målinger gennem trækrone[r][Kucharczyk et al., 2018], hvor GNSS kan have udfordringer i disse omgivelser. Til opgaveløsningen af de forskellige opgaver kan der benyttes forskellige metoder, hvoriblandt fotogrammetri og Lidarskanning er nogle af de primære metoder til dannelsen af terrænmodeller over større områder.[LE34, U.D.] Efter opmåling med fotogrammetri eller lidar, benyttes kontrolpunkter til at korrigere punktskyerne efter. Kontrolpunkter bliver opmålt på faste hårde overflader, hvor det foretrukne er på vej eller anden hård overflade. Yderligere udvælges punkter der kan defineres på det horisontale plan, blandt andet vejmarkeringer bliver benyttet. Punkterne bliver indmålt med GPS, jævnt fordelt i området, afhængig af områdets udformning, hvor der indmåles omkring 9 punkter. Se bilag C

Påvirkningen af forskellige parametre

5

Lidar er en forkortelse for 'Light Detection And Ranging', eller på dansk detektering og afstandsbedømmelse med lys. Lidar bruger således lys eller laser til identificere objekter og foretage en afstandsmåling hen til objektet på baggrund af lysets hastighed. Et hverdagsseksempel på brugen af Lidar, kan f.eks. være digitale afstandsmålere, som benytter sig af laser til at måle afstanden mellem bunden af afstandsmåleren og objektet foran afstandsmåleren[Bosch, 2022]. I dette projekt er fokus på en anden type lidar, hvor disse bruges til at skanne overflader på baggrund af lyspulser og retningsbestemmelser[DJI ENTERPRISE og BAAMTECH, U.D.]. En af de stationære eksempler på en lidarskanner er typen terrestrisk Laserskanner, hvor den kan skanne omgivelserne, og danne en punktsky, der gengiver de synlige områder fra skannerens opstilling[NExT Lab, 2024]. En af de udfordringer som forekommer ved denne type skanner er skyggerne, som forskellige objekter kan skabe. Herved er det nødvendigt at skulle flytte TLS til en anden opstilling, for at kunne fjerne skyggerne. I de udendørs miljøer, har TLS ofte en begrænset rækkevidde, hvor ULS, som er en Lidardrone, har en større rækkevidde, og er mere mobil. ULS er designet til opmåling af terrænmodeller, hvor lidarskanneren herpå er rettet mod nadir[DJI ENTERPRISE og BAAMTECH, U.D.]. For at kunne registrere placeringen af de forskellige objekter som er blevet detekteret benyttes bl.a. IMU til at korrigere for dronens bevægelser, hvor andre droner samtidig benytter sig af GNSS til bestemmelse af punkternes absolutte nøjagtighed.[DJI ENTERPRISE og BAAMTECH, U.D., s. 4].

Et par af kerneprincipperne indenfor Lidarskanning er Footprint og returns. Footprint er et begreb benyttet til at beskrive hvor stor den koniske laserstråle er når den rammer jorden. Ved et bredere footprint, bliver der ramt flere objekter inden strålen rammer jorden hvortil, der kan detekteres flere objekter. Den anden faktor involveret er returns hvor dette beskriver hvor mange retursignaler eller objekter der kan registreres fra en enkelt stråle eller puls. Ofte er dette antal af retursignaler fem eller derunder, hvilket betyder at der kan blive registreret op til fem objekter per stråle.[DJI ENTERPRISE og BAAMTECH, U.D., s.17-18]. Da lidar er en aktiv sensor, og har mulighed for at kunne indsamle flere informationer på baggrund af samme stråle, og herved trænge igennem vegetation, gør det lidar til en egnet til opmåling af terræn til terrænmodeller i forskellige naturområder.

På baggrund af de metoder som lidar benytter sig af til opmåling, registrering og georeferering af terrænoverfladerne, kan der opstå unøjagtigheder, hvor disse kan blive påvirket af forskellige parametre ifølge MacDonell et al. [2023]. Disse parameter bliver i dette kapitel opdelt i tre overordnet kategorier, Før, under og efter flyvningen, på baggrund af hvornår parametrene kan ændres, eller har en effekt.

5.1 Før flyvning

I planlægningsfasen inden flyvninger, er der nogle parametre som kan blive bestemt på forhånd, som kan have en indflydelse på de endelige resultater, efter flyvningen. Fire af disse er blevet opstillet i nedenstående tabel, jf. overvejelser fra MacDonell et al. [2023].

1. Valg af drone
2. Valg af sensor
3. Valg af GNSS
4. Valg af koordinatsystem

Valg af drone eller generelt valg metode til laserskanning, om det er med fly, terrestrisk eller på en drone, bør vælges i planlægningsfasen, da de har forskellige egenskaber, og i nogle tilfælde egnet til specifikke opgaver. Udviklingen indenfor droner og Lidar, har muliggjort, Lidar skanning af mindre områder med drone, som et godt alternativ til flybårne LiDAR skanning, da dronen er billigere og mere effektiv end luftbårne lidar til at indsamle data.[Dai et al., 2022] Derudover har forskellige typer af droner forskellige fordele, hvor forskellene mellem fast vinget droner og helikopter droner, er en afvejning. En overvejende del af de undersøgte studier, benytter sig af helikopter type droner, som er tilfældet i [Bakula et al., 2019][Kucharczyk et al., 2018][MacDonell et al., 2023] hvor [Bakula et al., 2020] benyttede sig af et fastvinget fly.

Valg af sensor er en anden parameter som har indflydelse på dataindsamlingen. Forskellige sensor har forskellige indsamlings frekvenser og metoder samt mulighed for forskelligt antal retursignaler, hvor retursignalerne bestemmer hvor mange objekter den enkelte stråle kan opfange.[DJI ENTERPRISE og BAAMTECH, U.D., s. 18]

Valg af GNSS er en anden faktor, som yderligere kunne udvides til at omhandle valg af georeferering af punkterne. Georeferering er ofte gjort ved brug af to overordnet metoder, under eller efterbehandling af punkterne.[Eker et al., 2021, s. 12] I Danmark er der et landsdækkende netværk som kan benyttes til at udføre RTK korrektioner, mens der i udlandet, som for eksempel i Canada, skal opstilles en Basestation i god tid, for at kunne opnå RTK forbindelse og korrektioner i real tid.[Kucharczyk et al., 2018, s. 216] I forlængelse heraf er valg af koordinatsystemer og geoid modeller, til at repræsentere de forskellige højder, hvor der i translation mellem to forskellige geoid modeller kan forekomme systematiske fejl, på baggrund af forskellige beliggenhed af geoiderne.

5.2 Under flyvning

Under flyvningen er der et betydeligt antal parametre, som har en indflydelse på datakvaliteten, og kvaliteten af den endelige punktsky samt terrænmodel. Disse parametre bliver delt op i to kategorier, på baggrund af deres kontrollerbarhed. Deres kontrollerbarhed er bestemt ud fra potentialet for at kunne ændre denne parametre på dagen til en betydelig grad.

5.2.1 Kontrollerbare faktorer

Under dataindsamlingen er der en række af faktorer som kan have indflydelse på den endelige terrænmodel. En del af disse faktorer er blevet undersøgt eller overvejet gennem kerneforsøgene, hvor f.eks. Bakula et al. [2020] undersøgte flyvehøjder, mens Kucharczyk et al. [2018] har kommenteret på skanningsvinkel og MacDonell et al. [2023] har overvejet en række af faktorer som potentielt kunne have betydning for dataindsamlingen. De faktorer som er blevet overvejet i kerneforsøgene, er blevet opstillet herunder og bliver kortvarigt gennemgået med henblik på hvilken effekt de forskellige kontrollerbare parametre har.

1. Orientering af flyveretning
2. Hastighed [Bakula et al., 2019]
3. Højde [Bakula et al., 2019]
4. Skanningsvinkler
5. Procentvis overlap mellem flyvninger
6. Skanningsmønster
7. Skanningshastighed
8. Skanningsbredde
9. Kontrolpunkter
10. Retursignaler [Bakula et al., 2019]

Tabel 5.1. Den samlede liste er blevet udformet på baggrund af [MacDonell et al., 2023], [Bakula et al., 2019] og Kucharczyk et al. [2018] erfaringer og observationer

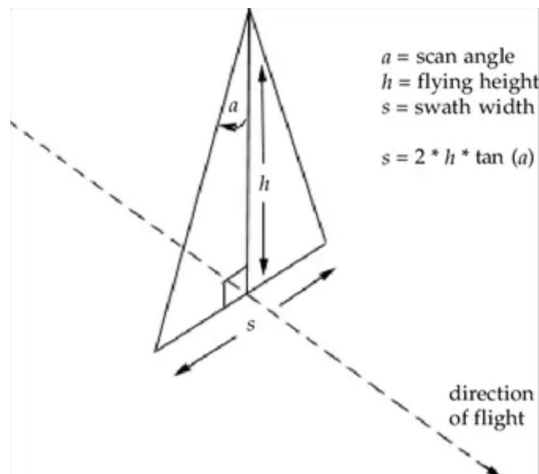
Flyveretning i relation til naturlige linjer i vegetationen kan forøge gennemtrængningsevnen, ved at flyve lige over åbninger i vegetationen, eller udnytte en højere vinkel, hvorved der kan skannes under grene eller anden vegetation.[MacDonell et al., 2023]

Flyvehøjde har betydning for punktdensiteten, og herved potentialet for at trænge igennem vegetation, hvorved der ved en lavere højde kan opnås en højere densitet. Udfordringer ved en for lav densitet er ifølge Bakula et al. [2019] at kunne identificere GCP'er med tilpas nøjagtighed. Signalforringelse kan yderligere have en betydelig påvirkning afhængig af flyvehøjden, da der på mørkere overflader bliver reflekteret mindre lys.[Bakula et al., 2019, s. 23]

Flyvehastighed Ifølge MacDonell et al. [2023] kunne der potentielt være en effekt ved brug af forskellige flyvehastigheder. På baggrund af de indledende forsøg blev en signifikant effekt på punktdensiteten observeret, hvilket ligger til grund for potentiel

påvirkning af resulterende terrænmodeller.[MacDonell et al., 2023] Mellem de fire primære forsøg benytttes der forskellige flyvehastigheder, se tabel 3.1 på side 4.

Skanningsvinkel har i nogle tilfælde en betydning for gennemtrængingsevnen for skanneren, hvor Kucharczyk et al. [2018] observere at der ved løvfældende træer, blev opnået et bedre resultat ved brug af nær nadir vinkler, fremfor en højere skanningsvinkel, da disse ikke kunne trænge igennem bladene på samme måde.Kucharczyk et al. [2018,A. 4.2] Skanningsvinkler har en betydning for bredden af det område som kan skannes for en given højde, hvor et eksempel på dette kan ses på nedenstående billede 5.1.



Figur 5.1. Sammenhængen mellem skanningsvinkel, skanningsbredden og flyvehøjden.
 Tilladelse indhentet til brug i rapport fra [Team Oxeltech, 2022].

Ved en større vinkel, eller en højere højde opnås en bredder skanningsbredde, hvorved et større område kan blive skannet på samme overflyvningen, hvilket reducere antallet af nødvendige flyvninger.

Overlap forbedre punktdensiteten, minimere laser skygger, ved at belyse området fra flere vinkler og minimere risikoen for huller i punktskyen ifølge ASPRS [2024, s. 142], hvor [MacDonell et al., 2023] vurderer at 50 % overlap er tilstrækkeligt over større områder, hvor flere flyvninger kan betyde et signifikant større tidsforbrug på opgaven[MacDonell et al., 2023, 5.3].

Skanningsmønster har ofte flere indstillinger i de fleste LiDAR skannere, hvor der bl.a. findes repetitive og ikke repetitive mønstre. Førstnævnte fungerer ved at skanne fra side til side, ortogonalt på flyveretningen, og sidstnævnte skanning fra side til side, mens der roteres omkring centrum af skanningsmønstret.[ASPRS, 2024, s. 142] Kucharczyk et al. [2018] Benyttede sig af repetitive patterns, hvor MacDonell et al. [2023] foreslår det som en potentiel parameter med indflydelse på kvaliteten af data.

Skanningsfrekvens af en af de parametre som potentielt kunne have en indflydelse på mængden af de punkter som bliver indsamlet, under en given flyvning. Ved højere indsamlingsfrekvenser bliver der flere punkter per sekund, hvilket resulterer i en højere punktdensitet ved samme hastighed. Ved en højere skanningsfrekvens kan flyvehastigheden forøges, mens der beholdes den samme punktdensitet.

5.2.2 Ukontrollerbare faktorer

Ude på flyveområdet kan der forekomme forskellige parametre, som har betydning for dataindsamlingen og hvilken kvalitet den resulterende terrænmodel har. Disse faktorer kan ikke kontrolleres eller justeres, hvormed det er nødvendigt at tilpasse sig disse omstændigheder.

1. Årstid
2. Vådområder
3. Naturtyper [Kucharczyk et al., 2018]
4. Geografiske forhold

Årstiden har en betydning for hvor godt Lidar kan måle terrænet, hvor der hen over det sene forår, sommeren og efteråret er blade på de løvfældende træer, giver det flere forstyrrelser for skanneren, med mere vegetation som den skal trænge igennem. Når Klimadatastyrelsen opdaterer deres landsdækkende terrænmodel, bliver flyvningerne udført i sen vinteren og det tidlige forår, mens der er færrest blade på træerne.[Klimadatastyrelsen, 2025] Ifølge Kucharczyk et al. [2018] giver vegetationen forskellige udfordringer hvor især de bundnære vegetationstyper giver udfordringer. På baggrund af årstid er det således muligt at minimere vegetationen, på skannings-tidspunktet. Dette er dog angivet som en ukontrollerbare faktor, da tidsfristen for skanningerne ikke altid tillader at der bliver fløjet i det første kvartal af året udelukkende.

Vådområder er en anden ukontrollerbar faktorer som forekommer i landskaberne. Nogle af de frekvenser som Lidar benytter til at skanne terrænoverfladen, bliver ikke reflekteret af vandoverflader, ifølge Team Oxeltech [2022] hvorved der opstår huller i datasættet. Ifølge MacDonell et al. [2023] opstår der en række udfordringer i forbindelse med kortlægning af terræn under vandoverfladen, ved brug af LiDAR, da der ikke opnås punkter under vandet. For at kunne estimere terræn under vandet er det således nødvendigt at bruge andre metoder som fotogrammetri.[MacDonell et al., 2023] Denne problematik er ikke kun til stede i vådområder specifikt, man kan også have en indflydelse når terrænet generelt er vådt, hvor der kan opstå usikkerhed i målinger grundet vandpytter eller anden vandsamlinger, som reflekterer lyset anderledes end tørre overflader.[Lee et al., 2023]

Naturtyper har forskellige påvirkning Lidar, afhængig af typen og generelle karakteristika. Ifølge Kucharczyk et al. [2018] give lav vegetation de største udfordringer for LiDAR, mens træer giver færre punkter på terræn, men at de punkter som trænger igennem ofte angiver terræn, forudsat der ikke eksistere tæt undervegetation.[Kucharczyk et al., 2018, s. 226] Denne parametre indeholder således flere dimensioner hvorpå to naturtyper kan være forskellige.

Geografiske forhold henviser til hvorledes området der skannes ind, er udformet. Ved kontrolmålinger på stejle hældninger, kan der ved små forskydninger mellem kontrolpunktet og sammenligningspunktet resultere i signifikante forskelle de to højdekoter.[Kucharczyk et al., 2018, s. 214]

5.3 Efter flyvning

De faktorer som spiller ind her er de faktorer som er relevant i forhold til dataproceseringen og metoder som bliver benyttet til at kunne isolere terrænpunkter, som bliver benyttet til dannelse af terrænmodellerne.

1. Dannelse af punktsky [MacDonell et al., 2023]
2. Sortering af punktsky [Bakula et al., 2019]
3. Klassificering af punkter [MacDonell et al., 2023]
4. valg af algoritmer [MacDonell et al., 2023]
5. Interpolering af punkter til raster eller anden model [MacDonell et al., 2023]
6. Vurdering af datakvalitet [MacDonell et al., 2023]

Til dannelsen af terrænmodeller findes der forskellige programmer, som på baggrund af forskellige interpoleringsmetoder kan danne terrænmodeller. Da projektets omfang omhandler de praktiske ændringer i flyveparametre, bliver efterbehandlingsprocessen udført på baggrund af ensartet indstilling, med henblik på at skabe sammenlignelige databehandlingsprocesser for de forskellige datasæt.

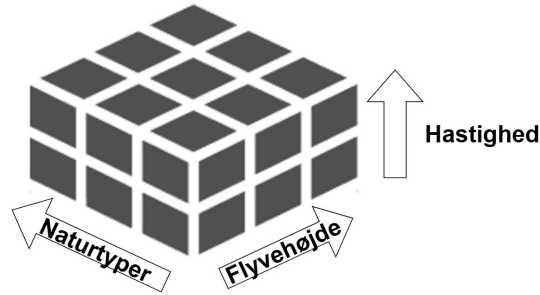
5.4 Valg af parametre

Projektet tager udgangspunkt i et begrænset antal parametre, hvor der gennem dette kapitel er blevet kortvarigt undersøgt, en række af de parametre, som potentielt kunne have indflydelse på terrænmodellerne. Formålet med projektet er yderligere at undersøge, nogle af de faktorer, som kan ændres af droneoperatøren, herved begrænses de potentielle parametre ned til flyveparametrene, som blev omtalt i afsnit 5.2. Af den række parametre som er muligt at undersøge, er der nogle parametre som har større tværgående effekt end andre parametre, hvor eksempelvis flyvehøjden, kan være en faktor i skanningsbredden. Derudover er parametre som påvirker punktdensiteten, er ifølge Kucharczyk et al. [2018] en faktor i forhold til pålideligheden af terrænmodellerne, hvor disse bliver dårligere, ved færre punkter på terrænet. [Kucharczyk et al., 2018, s. 229]

På baggrund af de to førnævnte faktorer, vælges hastighed og højde, som flyveparametrene. I tidligere forsøg har disse parametre været undersøgt, som det fremgår af tabel 3.1 på side 4. MacDonell et al. [2023] undersøgte effekten af flyvehastigheder i deres indledende forsøg, hvor det blev konkluderet at flyvehastigheden havde en effekt på punktdensiteten. Ifølge MacDonell et al. [2023] har en fordobling i hastigheden fra 5 m/s til 10 m/s, resulteret i næsten en halvering af initierende indsamlet punkter, fra 10.994.366 til 5.803.670 punkter. Dette har dog ikke haft en tilsvarende effekt efter databehandlingen, da begge indsamlingsmetoder resulterede i ca. 1.360.000 punkter, og en punktdensitet på hhv. 111 og 110 pkt/m^2 . [MacDonell et al., 2023] I andre forsøg er der blevet benyttet hastigheder af 6 m/s [Bakula et al., 2019] og 7.7 m/s [Kucharczyk et al., 2018]. Normalhastigheden på baggrund af forskellige flyvninger ligger således i et spænd mellem 5 til 10 m/s for droner af helikoptertypen.

Flyvehøjden blev undersøgt af Bakula et al. [2020], hvor der blev fløjet i åbent område, med en fastvinget drone. I denne sammenhæng blev der ikke konstateret nogle forskelle mellem de forskellige flyvehøjder. Dette projekt forsøger at kombinere den dokumenterede effekt af naturtyper, jf. Kucharczyk et al. [2018], med de førnævnte parametre, hvor der i de tidligere forsøg ikke har været taget højde for skiftende naturtyper.

Sammenspillet mellem de valgte parametre bliver således analyseret på baggrund af tre dimensioner, som illustreret på figur 5.2



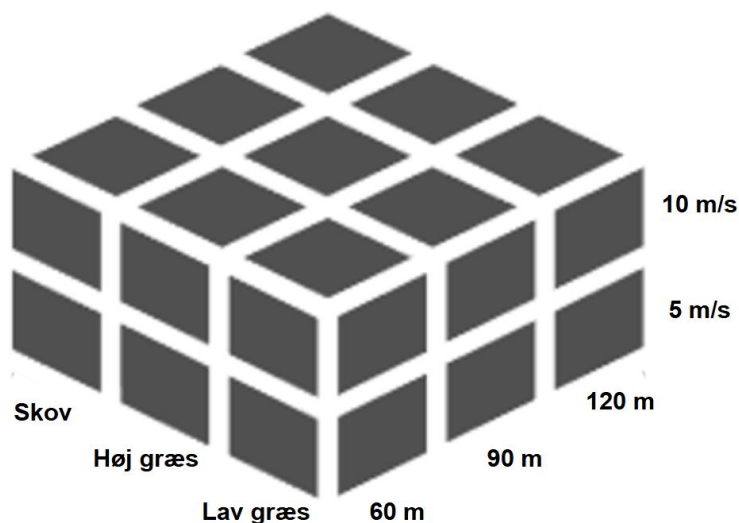
Figur 5.2. Sammenspillet mellem de valgte parametre og naturtyper. Ved hver af de forskellige parameterindstillinger kan området opdeles i bestemt antal underområder, på baggrund af antallet af naturtyper

På figuren er der illustreret hvordan de forskellige parametre kan undersøges, relativt til hinanden. Opdelingen af parametrene i tre dimensioner, kræver at parametrene er uafhængige af hinanden. Ved afhængige parametre kan ændringen af den ene parametre påvirke den anden parametre, hvorved en fastholdelse af denne parametre er besværliggjort. Et eksempel herpå kan være sammenspillet mellem skanningsbredde og flyvehøjden. For at beholde den samme skanningsbredde ved højere flyvehøjder, er det nødvendigt at justere skanningsvinklen, som jf. Kucharczyk et al. [2018] kan ændre antallet af terrænpunkt. Valget af de to flyveparametre er således også baseret på at de skulle være uafhængige.

Til undersøgelsen er det nødvendigt at vælge et passende interval for de to flyveparametre, hvor der under normale forhold bliver benyttet flyveparametrene. Der er igennem tre tidligere forsøg benyttet varierende hastigheder, hvor Bakula et al. [2019] benyttede sig af 6 m/s, mens Kucharczyk et al. [2018] benyttede 7.7 m/s. hertil undersøgte MacDonell et al. [2023] forskellen mellem 5 m/s og 10 m/s, i deres forsøg. I projektet benytttes intervallet 5 - 10 m/s, da det er sammenligneligt med resultaterne fra MacDonell et al. [2023], mens de benyttede hastigheder fra kerneforsøgene også er inkluderet i dette spænd.

Til estimering af den anden parametre, flyvehøjden, undersøges ligeledes de tidligere forsøg, hvor højderne spænder mellem 60 meter op til 180 meter. se tabel 3.1 på side 4. Da flyvningerne i 180 meters højde blev udført med en fastvinget drone, som er en anden type end den drone der benyttes i projektet vælges intervallet 60 m - 120 m.

På figur 5.3 kan fordelingen af parametrene ses, hvor der i højre side af modellen er angivet flyveparametrene, mens der på venstre side er angivet naturtyperne.



Figur 5.3. De tre valgte parametre, angivet med værdier, opdelt efter samme system som figur 5.2. Mod venstre ses naturtyperne, mod højre ses de valgte flyvehøjder, og opad ses de valgte flyvehastigheder.

Der vælges tre naturtyper, med potentiale for at kunne se forskellige kvalitetspåvirkninger mellem naturtyperne. Naturtyperne blev valgt på baggrund af resultaterne fra Kucharczyk et al. [2018] og de tilgængelige naturområder i forsøgsområdet, se figur 7.2 på side 27. De valgte naturområder er lavt græs, højt græs og skov eller krat. Ifølge Kucharczyk et al. [2018] har de tre valgte naturtyper forskellige artet fejlkilder, med variende afvigelser op mod 14 cm.

På baggrund af de udvalgte flyveparametre, kan der foretages seks forskellige flyvninger, hvor den enkelte flyvning kan opdeles i de tre forskellige naturtyper. Dette giver 18 forskellige datasæt som et sammenligningsgrundlag, hvor der gennem kapitel 6 bliver beskrevet hvordan datasættene kan sammenlignes.

I gennem kapitel 6 blev en række forskellige parametre, som ifølge de fire kerneforsøg på tabel 3.1 på side 4, har en potentiel påvirkning på terrænmodeller. I slutningen af kapitlet blev der udvalgt to flyveparametre og tre naturtyper, som udgangspunkt for videre analyse. I gennem dette kapitel undersøges og beskrives hvordan påvirkningen kan blive identificeret ved brug af forskellige metoder, med inspiration fra de fire kerneforsøg.

6.1 Påvirkning

Dette projekt har til formål at undersøge hvilken påvirkning forskellige flyveparametre har på terrænmodeller. I den forbindelse er der blevet udvalgt to flyveparametre, som bliver analyseret på. For at kunne estimere påvirkningen er det først vigtigt at definere hvilken påvirkninger der undersøges. Da baggrunden for projektet er påvirkning i en pragmatisk sammenhæng, bliver betydelig påvirkninger defineret som forbedringer på terrænmodellerne, større end den nøjagtighed som udstyret kan levere. Ved tegn på påvirkninger som er indenfor den usikkerhed som udstyret har, kaldes det mindre signifikante ændringer.

Påvirkningen i dette projekt defineres ud fra om det er muligt at se en ændring i terrænmodeller, mellem forskellige parametre benyttet i dataindsamlingen. Med henblik på at kunne vurdere denne påvirkning er det nødvendigt at kvantificere den effekt som ændringen af parametrene har haft. Til kvantificere af ændringerne, bliver terrænmodellerne sammenlignet med terrænpunkter, hvorefter afvigelserne mellem den sande terrænhøjde og terrænmodellen, bliver beregnet og efterfølgende vurderet. Vurderingen af resultaterne bliver foretaget på baggrund af en række kvalitetsparametre for den enkelte flyvning i den enkelte naturtype. Kvalitetsparametrene bliver efterfølgende sammenlignet primært indenfor samme naturtype, med henblik på at identificere forandringer i kvaliteten. Der bliver yderligere sammenlignet på tværs af naturtyperne, hvor det er muligt at undersøge om alle naturtyper har samme tendenser.

Ved at opdele de forskellige påvirkninger på denne måde, er det muligt at undersøge kvantitativt hvordan udviklingen er indenfor den samme naturtyper med forskellige parametre, hvortil det også er muligt at undersøge om alle parametre kvalitativt har lignende effekt hos de forskellige naturtyper. Ifølge Kucharczyk et al. [2018] har naturtypen en signifikant betydning for kvaliteten af den terrænmodel, der er mulig at opnå i de forskellige områder, hvor der med løvfældende træer var betydelige afvigel-

ser op mod 14 cm, samt højt græs hvor de midterste 50 % ligger op til 4 cm højere end den registreret højde, hvor enkelt måling på 10 cm for højt.[Kucharczyk et al., 2018, s. 227] En direkte sammenligning mellem naturtyper og udvikling mellem forskellige parametre, kan således være misvisende, da de ikke har samme udgangspunkt. På baggrund heraf betragtes også den relative forbedring ved forskellige naturtyper fremfor den absolutte forbedring.

Vurderingen af påvirkningen bliver således både vurderet internt indenfor de enkelte naturtyper gennem de absolutte ændringer mellem terrænmodeller, og eksternt mellem naturtyper på baggrund af relative ændringer. På baggrund af dette er det muligt at vurdere effekten af parametrene indenfor de enkelte naturtyper, således flyvningen kan tilrettelægges de enkelte naturtyper, og samtidigt give en forståelse for hvilken effekt flyvehøjde eller hastighed kan have på andre naturtyper, hvorved det er muligt at opveje mellem tid sparet på flyvning, og den kvalitet som terrænmodellerne kan leveres med. Se afsnit 6.4 og afsnit 6.5.

6.2 Kontrolpunkter

I de fire kerneforsøg som dette projekt tager udgangspunkt i, er der benyttet forskellige metoder til at danne et kontrolgrundlag. Eksempler på disse er TLS, GNSS og totalstation. Ved brug af TLS blev der dannet en punktsky, som blev sammenlignet med punktskyen fra dronen.[MacDonell et al., 2023]. Dette blev yderligere sammenholdt med kontrolpunkter indmålt med GNSS, langs en grusfyldt flodbanke. Hertil blev der benyttet targets rundt i projektområdet med henblik på at transformere punktskyerne ind til området.[MacDonell et al., 2023] Kucharczyk et al. [2018] benyttede lignende strategier, hvor der blev benyttet targets til justering af punktskyerne og GNSS målinger samt TS som kontrolpunkter, hvor afvigelserne fra disse kontrolpunkter dannede baggrund for undersøgelse af naturtypernes effekt på lidarskanninger[Kucharczyk et al., 2018, s. 228]. I dette projekt er kontrolpunkterne opmålt på veldefineret og befæstet områder, eller indmålt til et target. Sammenligningsgrundlaget som i de fire kerneforsøg blev referet til som kontrolpunkter, bliver diskuteret i næste afsnit som værende terrænpunkter.

6.3 Terrænkoter

De fire kerne forsøg har benyttet forskellige teknikker til at opnå sammenligningsgrundlaget mellem punktskyerne fra LiDAR og det sande terrænniveau. Nogle af de metoder som har været benyttet er terrestrisk laserskanning, sammenlignet med droneskanninger hvor punktskyerne er blevet sammenlignet på baggrund af deres evne til at danne detaljeret billeder af vegetationen og terrænet.[Bakula et al., 2019] I andre forsøg er der benyttet GNSS til at indmåle terrænpunkter, som sammenligningsgrundlag for punktskyerne og terrænmodellerne. I disse sammenligninger blev afvigelserne estimeret på baggrund af maksimale, minimale og middelværdier mellem terrænpunkterne og terrænmodellerne eller nærmeste punkt i punktskyen.[Kucharczyk et al., 2018, s. 227][MacDonell et al., 2023, s. 223-225] Indmåling af terrænkoter er

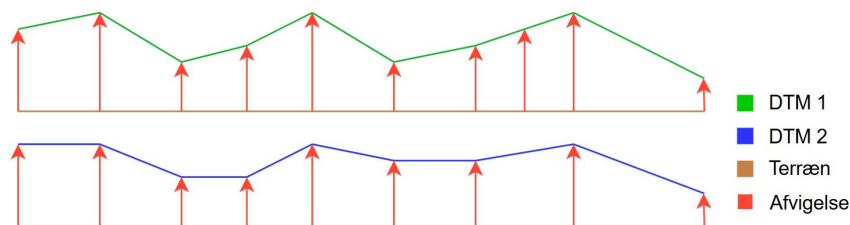
også blevet udført på forskellige måder hvor MacDonell et al. [2023] indmålte terrænpunkterne på forhånd, inden databehandlingen af punktskyerne, mens Kucharczyk et al. [2018] opmålt terrænkoter efterfølgende. Ved at måle terrænkoter ind efter databehandling, var det muligt at foretage sammenligning mellem LiDAR og GNSS på den samme placering, uden målingerne ville blive forringet af forskellige interpolerings metoder. Der blev dog i samme forsøg opmålt 300 tilfældige terrænpunkter, med en forhåbning om at mindst 20 kunne bruges til videre analyse.[Kucharczyk et al., 2018, s. 217-219]

6.4 Sammenligning mellem terrænpunkter og terrænmodeller

De fire kerneforsøg har benyttet sig af terrænpunkter i forskellige udstrækning, hvortil disse har ageret som sande terrænkoter. For at kunne sammenligne mellem de sande værdier, og terrænmodellerne eller punktskyerne, har Kucharczyk et al. [2018] interpoleret på baggrund af nærmeste punkt. Bakula et al. [2019] Dannede en terrænmodel på baggrund af punktskyerne, hvortil de sammenlignede forskellene mellem terrænpunkterne og terrænmodellen[Bakula et al., 2019, s. 9-10]. Med udgangspunkt i problemformulering, er formålet at undersøge effekten på terrænmodeller, hvor metode benyttet af Bakula et al. [2019], er en god mulighed. Der tages således udgangspunkt i at sammenligne punkter direkte mellem terrænmodellerne og terrænpunkterne, hvortil afvigelsen herimellem undersøges. Ved sammenligning mellem terrænmodel og enkelte punkter kan der opstå udfordringer mellem metoden hvorpå højden i terrænmodellen bliver angivet, og placeringen af terrænpunktet. Ved brug TIN modeller sker der en interpolering mellem punkterne, hvor der ved rastermodeller, bliver dannet en overflade med samme højde for hele kvadraten. Der kan på baggrund af disse forskellige metoder, til visualiseringen af terrænmodellen, blive introduceret yderligere fejlkilder. Denne problematik kan blive afhjulpet ved at vælge en højere opløsning for rastermodellerne, eller alternativt foretage interpoleringer af centrum for raster datasættet, hvis ikke der er en punktsky til rådighed. Da projektet omhandler de produceret terrænmodeller, og således det produkt der bliver leveret på baggrund af Lidarskanninger, bliver der ikke korrigeret for denne afvigelse, men blot inkluderet som en potentiel fejlkilde.

Absolutte analyse

Formålet i projektet ved sammenligning mellem terrænpunkter og terrænmodeller, er at undersøge de absolutte afvigelser mellem det sande terræn og terrænmodellen. Denne afvigelse kan beregnes mellem terrænpunkterne og terrænmodellen, ved at trække terrænpunkterne fra terrænmodellen, se figur 6.1

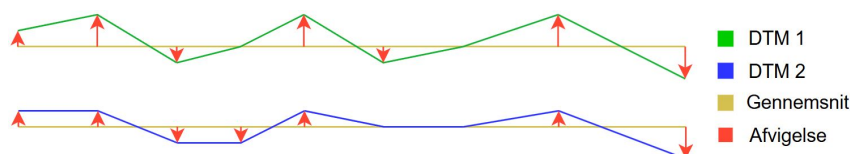


Figur 6.1. Figuren illustrere afvigelserne mellem det reelle terræn og terrænmodellen, hvor de punktvis sammenligningsgrundlag er demonstreret ved de røde pile. Længden af de røde pile er afvigelsen mellem Reelt terræn og modellen.

De absolutte afvigelser kan således sammenlignes mellem to eller flere modeller, på baggrund af de beregnede afvigelser, ved brug af de samme terrænpunkter. På figur 6.1 ses der tegn på systematiske afvigelser, da modellerne ligger højere end terrænet, hen over alle terrænpunkterne. Sammenligning på baggrund af absolutte afvigelser, er en metode benyttet af Kucharczyk et al. [2018], hvor denne blev benyttet til at identificere de systematiske fejl som forskellige naturtyper introducerede til skanninger i de udvalgte naturtyper [Kucharczyk et al., 2018, s. 228]. Som sammenligningsgrundlag blev der ikke benyttet flere forskellige flyvninger, men vurderingen blev foretaget på baggrund af samme flyvning.

Relativ analyse

Med henblik på at fjerne de systematiske fejl, undersøges flyveparameternes indflydelse på fordelingen af afvigelser, relative indenfor enkelte modeller. Figur 6.2 illustrer denne tilgang, hvor der bliver korigeret for de systematiske fejl.



Figur 6.2. Figuren illustrer de samme to terrænmodeller fra figur 6.1, hvor der er blevet korigeret for gennemsnitsafvigelserne. Den systematiske fejl er fjernet, da der ikke ses en ensidet forskydning. De røde pile angiver retningen og størrelse af afvigelserne.

På baggrund af korrektionerne er det muligt at sammenligne relative afvigelser indenfor terrænmodellerne, hvor der er mindre afvigelser mellem gennemsnitsværdien, og ydre punkter. Herved er det muligt at undersøge påvirkningen af forskellige flyveindstillinger i forhold til de relative afvigelserne indenfor samme model, og sammenligne med andre modeller. Ved at sammenligne spredninger for de relative afvigelser mellem terrænmodellerne, kan den relative afvigelse fra terrænet undersøges.

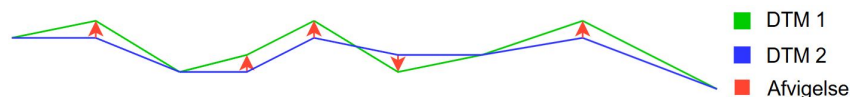
6.5 Sammenligning mellem terrænmodeller

En anden måde hvorpå påvirkningen af forskellige parametre kan undersøges er ved at sammenligne to terrænmodeller. Gennem denne sammenligning er det muligt at identificere afvigelser, hvor denne metode har været brugt af Elsner et al. [2018].

Dette blev gjort på baggrund af to punktskyer, hvor den ene var opmålt med TLS og den anden punktsky indskannet med lidarskanner monteret på et fly.[Elsner et al., 2018] Denne analyse kan udføres på forskellige måder, hvor Elsner et al. [2018] benyttede sig af hele punktskyer på stier, mens Alexiou et al. [2021] benyttede sig af terrænmodeller henover et større område.

Komparativ analyse

Da projektet er baseret på terrænpunkter, bliver der i projektet benyttet terrænpunkter som sammenligningsgrundlag for denne undersøgelse, hvorved de tre analyser i projektet er sammenlignelige, med udgangspunkt i det samme datagrundlag. På figur 6.3 er denne sammenligning mellem terrænmodeller illustreret



Figur 6.3. Sammenligning mellem de to terrænmodeller illustreret i figur 6.1 og 6.2.

De røde pile angiver størrelse og retning af afvigelserne. Ved sammenligning mellem to punktskyer, kan forskydningen mellem punktskyer blive undersøgt på baggrund af gennemsnitlig afvigelse. Retning af forskydningen er afhængig af beregningen og fortegn på gennemsnitsafvigelsen.

Det generelle princip ved punktvis sammenligning, i forhold til relative og absolut afvigelser mellem det modellen og terrænpunkter er potentialet for positiv udvikling for alle punkter generelt. Hvis en spredning på de relative afvigelser er forholdsvis høj, kan det være besværligt at identificere en forbedring i datasættet. En påvirkning er kun muligt at se i forhold til gennemsnitsafvigelserne for de absolutte afvigelser. En af udfordringerne ved de absolutte afvigelser, er en ukendt fordeling påvirkningerne, hvor der ved sammenligning af to terrænmodeller, kun bliver påvirket af udviklingen mellem flyveparametrene. Herved er det muligt at undersøge fordelingen af forbedringerne og tilfældige fejl.

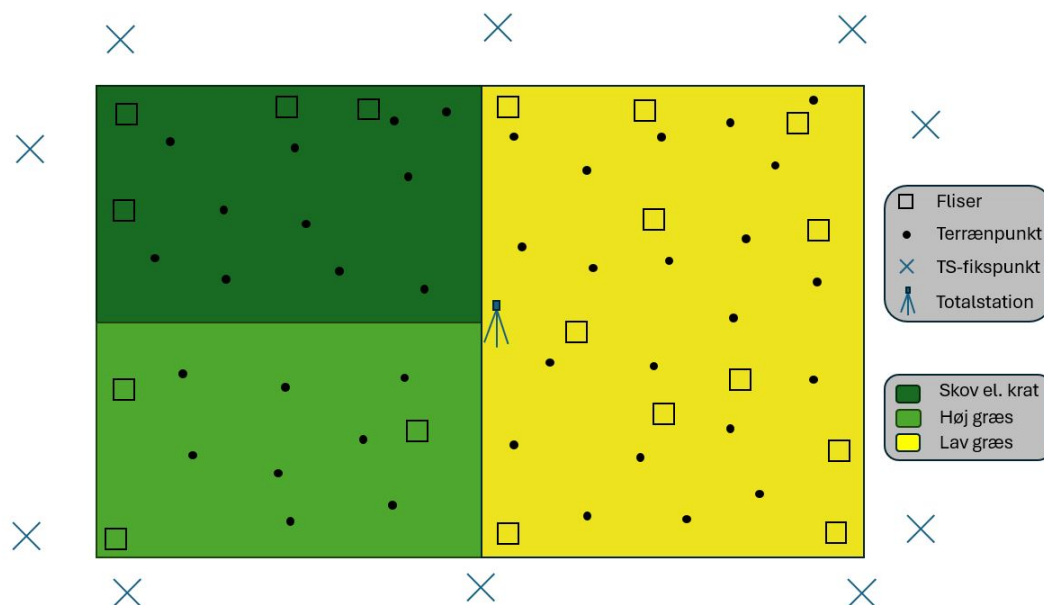
6.6 Opsummering

Identificering og kvantificering af påvirkningen bliver i dette projekt udført på baggrund af tre sammenligninger. De tre sammenligninger sker med udgangspunkt i Reelt terræn, gennemsnitsafvigelser og terrænmodeller imellem. Herved undersøges der for en påvirkning i forhold til absolutte nøjagtighed, relativ præcision og udvikling mellem punktskyerne. De absolutte og relative analyser udføres på baggrund kontrolpunkter, hvor resultaterne kan sammenlignes med Reelt terræn, mens der ved undersøgelse af udviklingen, sammenlignes to terrænmodeller. I forbindelse med analyserne bliver terrænmodellerne yderligere opdelt i forskellige naturtyper, med henblik på bedre estimering af systematiske fejl, og efterfølgende korrigerende herfor. Størrelsesordenen afvigelserne sammenholdes med den praktiske brug af udstyret, hvor der vurderes om ændringerne er signifikante. I kapitel 7 opsættes et forsøg til dataindsamling.

I kapitel 6 blev det beskrevet hvordan forskellige de tre parametre kunne påvirke terrænmodellerne, og hvorledes denne påvirkning bliver identificeret og efterfølgende kvantificeret. Der blev diskuteret terrænpunkter som blev benyttet i tidligere forsøg. Igennem kapitel 7 beskrives hvordan dataindsamlingen til terrænmodellerne og terrænpunkterne bliver foretaget, ved brug af tre typer udstyr. Den teoretiske forsøgsopstilling bliver beskrevet først, hvor fordelingen af kontrolpunkt og fikspunkter bliver diskuteret.

7.1 Forsøgsopstilling

Projektet tager udgangspunkt i en undersøgelse af naturtypernes effekt kombineret med flyveparameters effekt, hvor der ved forsøgsopstilling er behov for tre forskellige naturområder. Derudover blev der igennem afsnit 6.3 på side 21 beskrevet hvilke sammenligningsgrundlag tidligere forsøg har benyttet. Blandt de forskellige grundlag, blev terrænpunkter ofte benyttet. Disse terrænpunkter repræsenterer den reelle terrænoverflade, og fordeles jævnt i naturtyperne. En anden type kontrolpunkt, som blev benyttet af MacDonell et al. [2023], er kontrolpunkter på fast overflader, hvor den uforstyrret nøjagtighed af lidarskanneren kan estimeres. Denne type kontrolpunkter medtages i dette forsøg og er angivet med en flise jf. figur 7.1, hvor den generelle forsøgsopsætning er afbilledet. Ved at benytte en flise, er det muligt at oprette befæstet overflader, hvis der ikke eksisterer nogen i området.



Figur 7.1. Skitse over forsøgsopsætningen i en generel forståelse, hvor mørkegrøn er skovområder, lysegrøn er høj græs og gul er lav græs.

Figuren viser de forskellige elementer, som indgår i dataindsamlingen, hvor de tre forskellige baggrundsfarver repræsenterer de tre naturtyper, der indgår i denne analyse. Fordelingen i størrelsen mellem de forskellige naturtyper, er ikke repræsentativ for arealmæssige fordeling af de forskellige naturtyper, men blot illustration af forskellige naturtyper. Til dataindsamlingen benyttes en totalstation, som opstilles centralt i forhold til naturtyperne, med henblik på at minimere afstandsrelateret fejl på terrænpunkterne.

Til opstilling af totalstationen benyttes fikspunkter indmålt med GNSS som omkranser naturområderne. På figur 7.1 er disse fikspunkter symboliseret ved blå krydser, udenfor naturtyperne. Fejl på estimeringen af totalstationens placering og retning, er således mindre indenfor naturområderne, end beregnet ved opstilling af totalstationen. Se afsnit 9.1 på side 41, for yderligere informationer. Terrænpunkterne i figuren, bliver opmålt med totalstation, hvor punkterne fordeles ud i naturtypen, med det formål at danne en repræsentativ datamængde inden for naturtypen.

De sidste elementer i figuren er fliser, som repræsenterer vertikale fikspunkter. Som omtalt i [MacDonell et al., 2023] blev disse benyttet som kontrolpunkter for lidarskannerens evner, hvor disse på tilsvarende vis benyttes som kontrolpunkter for lidarskanneren. I forsøget anses disse som værende en fjerde naturtype jf. figur 5.3 på side 19. Fliser er valgt som repræsentation af befæstet overflader uden vegetation, med hvor estimeringen af terrænhøjden kun er afhængig af udstyrets kvalitet, og ikke yderligere påvirket af varierende vegetation jf. [Kucharzyk et al., 2018, s. 228]. Brugen af fliser, giver mulighed for at kunne fordele disse punkter rundt i naturtyperne og områderne, hvortil der kan oprettes en jævn fordeling af kontrolpunkterne i området. Samtidigt kan disse justeres således de ligger vandret. Målinger på fliserne hæver terrænet, hvormed terrænmodellerne ikke er præcise til terræn i nærheden af fliserne.

7.1.1 Forsøgsområde

Figur 7.1 angiver den teoretiske opsætning af forsøget, hvor der under gode forhold kunne blive opsat ved den angivne opsætning. Denne opsætning var ikke præcist muligt at udføre, på baggrund af de valgte projektområde, som kan ses på billede 7.2



Figur 7.2. Billede over forsøgsområdet, sammenstykket på baggrund af fotogrammetri. Området ligger på Sjælland ca. 2 kilometer syd for Frederikssund, og dækker et område på ca. 5,5 ha indenfor stierne. I bilag E er billede i fuld størrelse medtaget.

I projektområdet findes en blanding af forskellige naturtyper, hvor den mest dominerende naturtype er mellem til høj græs. Lidarskanningerne blev foretaget medio april måned, hvor denne naturtyper er domineret af sidste års beplantning. Som det kan ses på figur 7.2 går der en sti eller vej rundt om det meste af projektområdet. De befæstet områder, giver mulighed for at kunne placere kontrolpunkterne i yderkanten af projektområdet, hvor dette erstatter fliserne som kontrolpunkter.

7.2 Udstyr

På baggrund af introduktionen til forsøgsområdet, beskrives det udstyr som bliver benyttet til forsøgsudførelsen. Igennem de tidligere afsnit 7.1 blev de tre kategorier af udstyr, totalstation, drone og GNSS nævnt. Igennem dette afsnit gennemgås der i dybere detalje det benyttede udstyr.

7.2.1 Matrice 350 RTK drone

I forsøget benyttes en DJI Matrice 350 RTK drone, som LE34 benytter til fotogrammetri og Lidarskanninger med. Dronens dimensioner ifølge DJI [2025a] er i udfoldet tilstand er 81 cm lang, 61 cm bred og 43 cm høj med en vægt kapacitet på maksimalt 9,2 kg og en egenvægt på ca 6.5 kg[DJI, 2025a]. Hertil er det muligt at kunne flyve med omkring 2.7 kilo i ekstraudstyr. Maksimal hastighed for dronen er 23 m/s på det horizontale plan, med en nedstigningshastighed på 5 m/s og opstigning på 6 m/s. Dronen har således potentiale for at kunne flyve med de angivet flyvehastigheder på mellem 5 og 10 m/s. Dronen er begrænset til en flyvehøjde på 5000 meter over havets overflade, hvilket under danske forhold, er tilstrækkeligt til forsøgsudførelsen.[DJI, 2025a] Dette bliver vurderet på baggrund af Danmarks højeste på er målt til ca 171 meter[Breuning-Madsen et al., U.D.]. Til forsøgsudførelsen er der yderligere kun behov for at flyve mellem 60 og 120 meter over terræn. Matrice 350 RTK er således egnet til at kunne flyve med de udvalgte flyveparametre jf. kapitel 5 på side 12. Dronen er udstyret med RTK GNSS, hvorfra den kan flyve autonom, og bestemme sin egen position. RTK udstyret har ifølge DJI [2025a] en nøjagtighed på 1 cm horisontalt og 1.5 cm vertikalt.

Zenmuse L2 LiDAR skanner

På dronen er der mulighed for at montere forskellige typer af udstyr, hvor der i forbindelse med projektudførelsen er blevet monteret en DJI Zenmuse L2 LiDAR skanner, med indbygget IMU og RGB kamera, som kan støttes på en gimbal, der holder skanneren stabil.[DJI, 2025b] De forskellige specifikationer for skanneren er indsamlet fra DJI's salgshjemmeside på [DJI, 2025b]. LiDAR skanneren har en nøjagtighed på 5 cm horisontalt og 4 cm vertikalt på afstand opmod 150 meter. Hertil kommer der unøjagtigheder op mod 2 cm i forhold til afstandsmåler for LiDAR skanneren. Der kan indsamles punkter på opmod 240.000 enkeltpunkter eller 1.200.000 punkter ved flere retursignaler per sekund, hvoraf det maksimale antal retursignaler er 5.[DJI, 2025b]

De generelle indstilling benyttet til droneflyvninger er angivet i tabel 7.1

Drone model	M350 RTK	Altitude mode	Relative to takeoff point
Camera model	L2	Ortho GSD	3.22 cm/p
Lense	Lidarmapping	Altitude	60 - 120 m
Returns	Penta	Velocity	5 - 10 m/s
Sampling rate	240 hz	Side overlap	50%
Sampling mode	Repetitive	Forward overlap	83%

Tabel 7.1. Tabel over indstillinger benyttet under flyvningerne, med udgangspunkt i parametrene 120 meter og 5 m/s.

Der er benyttet de samme flyveindstillinger til alle flyvningerne, med variation af hastighed og højde. Hertil kan GSD bliver ændret, hvor der prioreres at holde sampling rate som en fast parameter. Dronens reference system blev indstillet til DKTM3 ETRS89 og DVR90.

7.2.2 Trimble GNSS rover

I forsøget benyttes Trimble R12i GNSS rover med RTK forbindelse til opmåling kontrolpunkter og TS-fikspunkter. Ifølge Trimble [U.D.] har GNSS roveren nøjagtighed på 1.5 cm i højden.[Trimble, U.D., s. 2] Opmåling af punkterne blev foretaget på baggrund af RTK-forbindelse, hvor der i det målte tidsrum på døgnet blev angivet afvigelser mellem -2 til 3 cm jf. Trimble [2024]. Dette er i overensstemmelse med Trimble [U.D., s. 2], hvor korrigeret af punkterne på baggrund af RTX, er angivet til 3 cm vertikalt. Til opmåling er der benyttet metoden topo point, hvor der foretages en midling af flere målinger til et samlet punkt.

Da forsøgsområdet er beliggende på Sjælland, hvortil der er benyttet ETRS89-DKTM3-DVR90 som reference systemer, for de indmålte punkter. Denne reference opsætning bliver også benyttet af 350 dronen, hvorved der ikke er behov for translatering mellem reference systemer.

7.2.3 Trimble S5 totalstation

Der benyttes en totalstation i forsøget, til at udføre terrænmålingerne som bliver sammenligningsgrundlaget for den efterfølgende databehandling og analyse. Totalstationen bliver benyttet fremfor GNSS da der ifølge ASPRS [2024, s. 24] er anbefalet at benytte udstyr der har mindst dobbelt så god nøjagtighed, som det udstyr der testes.[ASPRS, 2024] Da dronen som testes er udstyret med GNSS RTK systemer og er angivet til at have lignende nøjagtighed som GNSS roveren, kan GNSS punkterne som enkeltstående punkter ikke benyttes til at måle terrænpunkter med. De forskellige naturtyper som undersøges, kan blokere RTK signalet fra GNSS roveren, som er tilfældet i tætte træer eller anden høj vegetation. I disse tilfælde er det muligt at benytte totalstationen til at indsamle terrænpunkter under træer, hvorved disse kan bruges som sammenligningsgrundlag.

Totalstationen, som benyttes i forsøget er af typen Trimble S5 med 3 mgon zenitnøjagtighed. Ved brug af tracking, til indmåling af punkter kan totalstationen opmåle punkter med en afstandsnøjagtighed på $4 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$. [Trimble, 2024] Nøjagtigheden for totalstationen er således væsentligt bedre end den nøjagtighed som dronen er angivet til. For at kunne beregne totalstationens placering og udgangssigte benyttes TS-fikspunkter indmålt med GNSS. Nøjagtigheden for fikspunkterne er mindre end den nøjagtighed som totalstationen har, hvorved der benyttes flere punkter til at overbestemme totalstationen placering.

I kapitel 7 blev udstyret og de generelle overvejelser til forsøgsopsætningen beskrevet. Af udstyr benyttes der totalstation, GNSS-rover og drone til opmåling af området, mens der opsættes targets og laves kontrolpunkter i området. Fremgangsmåden hvorved udstyret blev benyttet bliver igennem det kapitel beskrevet. Forsøgsudførelsen blev udført i tre dele, opdelt i relation til droneflyvningerne. På figur 5.3 på side 19 er der angivet 6 flyvninger i alt, de efterfølgende forsøgsudførelser bliver opdelt i de tre dele, før, mellem og efter flyvningen, hvor der mellem hver del bliver udført tre flyvninger.

8.1 Klargøring til første flyvning

Den første del omhandler klargøring til første flyvning. Inden de første flyvninger blive foretaget, blev der udlagt targets langs projektområdets ydrekant. Yderkanten er i første omgang defineret af stierne som omkranser området. Placeringen af targets kan ses på figur 8.11 på side 39.

Efterfølgende indmåles targets med GNSS, hvor der langs den omkring liggende sti og på befæstet overflader males en række kontrolpunkter, som efterfølgende indmåles. Ved at sprede kontrolpunkterne ud langs kanten, sikres der en god kontrol og korrigering af terrænmodellerne. Eksempler på et malet kontrolpunkter kan ses på figur 8.1



Figur 8.1. Eksempel på et kontrolpunkt, spraymalet på asfalt, som i dette forsøg bliver benyttet til at identificere hvor henne tidligere målinger er blevet foretaget, med henblik på gentagende målinger af det samme punkt.



Figur 8.2. Billede af de targets, som blev lagt ud i projektområdet. Targets kan identificeres på det digitale orthofoto, hvor forskydningerne kan undersøges. I dette projekt bliver targets benyttet kontrolpunkter

Der blev i alt malet omkring 47 kontrolpunkter, og udlagt omkring 10 targets. Til opmålingen af alle punkterne i dette forsøg blev der benyttet DKTM3, DVR90 og ETRS89 som referencesystem. Efterfølgende bliver de første tre flyvninger udført med en hastighed på 5 m/s og variable flyvehøjde. Referencesystemet for dronen blev indstillet til DKTM3 DVR90 ETRS89, hvor de generelle flyveindstillinger for dronen er beholdt som anbefalet af DJI medmindre de ændrede ved hastighed eller højden. Indstillingerne er angivet på tabel 7.1 på side 29.

8.2 Kontrolmåling mellem flyvninger

Efter de tre første flyvninger indmåles kontrolpunkterne igen. I denne forbindelse blev der oprette kontrolpunkter på cykelstien i områdets vestlige ende. Opmålingen af kontrolpunkterne bliver udført med indstilling Topo punkt på GNSS-roveren, hvor der foretages 3-4 epoker af målinger og efterfølgende midles på baggrund af disse. se afsnit 7.2 på side 28. Opmålingen af kontrolpunkterne sker før, mellem og efter flyvningerne, således de er foretaget samtidig som flyvningerne er udført og hermed under de samme satellitkonstellationer og forhold. Herved sikres en større sammenlignelighed med dronflyvningerne, hvor målingerne foretages samtidigt. Nogle af targets var placeret på græs, hvorved de blev løftet lidt over terrænniveau. Ved indmålingen af de pågældende targets blev GNSS-staven med forsigtighed løftet, så-

ledes den ikke trykkede target ned mod jorden. Efter opmåling af kontrolpunkterne bliver de sidste tre flyvninger gennemført, her med 10 m/s og variable højde.

8.3 Opmåling af terrænkoter og naturtyper efter sidste flyvning

Efter den sidste omgang flyvninger indmåles kontrolpunkterne for sidste gang. Herefter identificeres de relevante naturtyper i projektområdet, hvor deres udstrækning i samråd med LE34 bliver vurderet.

8.3.1 Beskrivelse af naturområder

I forsøgsområdet blev der identificeret tre forskellige naturområder, som kunne have interesse i forbindelse med forsøget som tilnærmelsesvist faldt indenfor kategorierne skov, højt græs og lav græs. Disse naturtyper blev udvalgt til undersøgelsen i området, på baggrund af deres forventet påvirkning jf. [Kucharczyk et al., 2018] og afsnit 5.4 på side 17. Da forsøget blev udført i tidlig april måned, var der de forskellige naturtyper ikke sprunget ud endnu. På de løvfældende træer var der ikke kommet en ordentlig bladsætning, mens græsset ikke havde haft tid til at vokse sig højt. På dette tidspunkt var området stadig dækket af vissent plantemateriale fra sidste år, hvilket potentielt kunne give andre udfordringer end undersøgt i andre undersøgelser som [Kucharczyk et al., 2018], [MacDonell et al., 2023] og [Bakuła et al., 2019] som er blevet foretaget i sommerhalvåret.

Lav græs

I projektområdet var der et afgrænset område som tidligere har været en indkørsel, hvortil græsset efterfølgende er vokset op igennem. I dette område var der ikke større mængder dødt plantemateriale, hvorved det var muligt at se terrænet under vegetationen. Græsset var relativt tyndt, således det ikke havde karakter af græsplæne. Højde på græsset er estimeret til at være mellem 5-10 cm højt, som det fremgår af billederne herunder



Figur 8.3. Billede af naturtypen lavgræs, hvor det kan ses at græsset ikke er særligt højt og gror på en plan overflade.



Figur 8.4. Billede af det lave græs på tættere afstand hvor højden af græsset ikke er særlig højt. Det kan yderligere ses at det er beliggende på en grussti

Billederne herover viser det område som i denne undersøgelse bliver kaldt lav græs. Dette er ikke repræsentativt af en græsplæne, men var det nærmeste mulige af vedligeholdet græstype, eksisterende i projektområdet.

Høj græs

Som nævnt tidligere blev forsøget udført primo april måned, hvor sidste års vegetation stadig var til stede, og dannede et tykt lag af vissent plantemateriale over terrænet. I samråd med droneoperatøren fra LE34 blev et område som tidligere havde været højt græs, udpeget som interesse område. Området havde tidligere været højt græs som på forsøgstidspunktet var blevet lagt ned, og dannede et tykt og tæt lag over terrænet. Det var ikke muligt at kunne se terræn gennem græsset, men kun ane dets forløb, på baggrund konjunkturerne i græsset. Naturtypen kan ses på billederne herunder



Figur 8.5. Billede af det høje græs, som bliver undersøgt i efterfølgende analyse. Græsset har været højt sidste år og har lagt sig ned. Enkelte knolde kan være fra muldvarper eller undervegetation som holder det oppe i en knold



Figur 8.6. Græsset ligger meget tæt pakket, hvor det kan være svært at se igennem græsset. Der er potentiale for at Lidar har besvær ved at trænge igennem denne naturtype

På overstående billederne er det visne græs synlig, og konjunkturerne af terrænet kan følges. De toppe som ses på billedet, kunne være muldvarpeskud eller græs som dækkede en anden plante og således ikke altid repræsentativ af det underliggende terræn. Det døde græs blev anslået til at have været i lærhøjde, før det blev lagt ned.

Krat eller skov

Til undersøgelse af krat eller skovområder blev der identificeret et lille læbælte hvor der stod en række af træer, som tilnærmelsesvist kunne være skovområde. Dette område var dog ganske lille, hvor der er potentiale for at dronen med skanneren kunne skanne med en højere vinkel, hvis ikke det var muligt at kunne skanne det hele fra toppen. Yderligere var skoven udpræget af løvfældende træer som i april måned ikke var sprunget ud. Skoven var således forholdsvis gennemsigtig, på nær ved dataindsamling hvor dette krævede to personer. Der blev ikke taget billede af denne naturtype, dog er nedenstående billede en god repræsentation skovens udseende.



Figur 8.7. Billede af de skovlignende forhold i marken, taget på dagen. Som det kan ses på billedet, er krattet ikke særlig tæt i forhold til at blokere lys, hvorved det er muligt at kunne se igennem krattet.

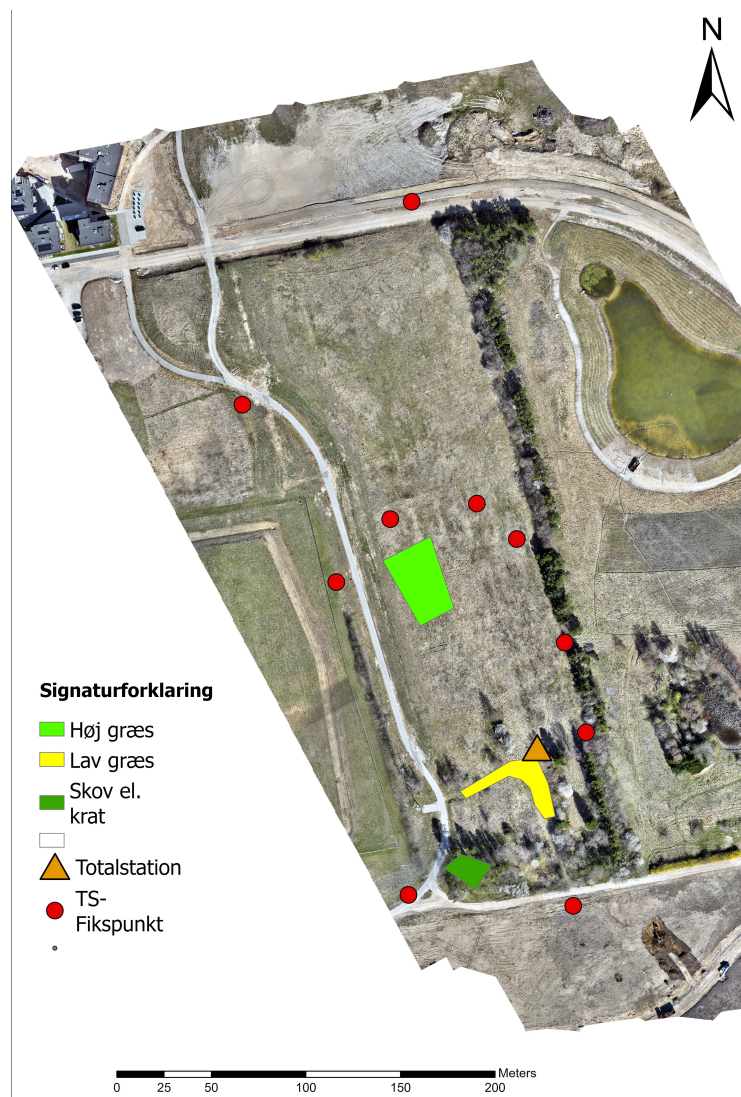


Figur 8.8. skovområde lignede det naturområde benyttet i forsøget. Billedet er taget medio april, hvortil træerne er begyndt at sprænge ud.

Skovbunden var fri for de fleste blade og anden undervegetation, som potentielt kunne give udfordringer for Lidar. Krat og skov er således ikke repræsenteret korrekt i dette forsøg, da nogle af de udfordringer som Lidar har i skovområder, kan omgås ved at det samme terræn kan skannes fra flere vinkler. Området er dog mere lignede et krat, hvor måling med GNSS i nogle tilfælde er besværliggjort på baggrund af dårligt signal.[Kucharczyk et al., 2018, s. 224-225]

8.3.2 Opstilling af totalstationen

Efter udpegning af naturområderne blev totalstationen opstillet centralt mellem skov krat og højt græs, i nærheden af lavet græs, som kan ses på figur 8.9



Figur 8.9. Billede illustrerer opstilling af totalstationen, mellem de tre naturtyper, hvor fikspunkterne benyttet til opsætning af totalstationen er markeret med røde cirkler.

Opstillingen af totalstationen blev foretaget på baggrund af 9 TS-fikspunkter til beregning af den fire opstilling kan ses på figur 8.9. Fra den placering var det muligt at se alle tre naturtyper. På figur 8.10 kan de benyttede fikspunkter ses, og de beregnede netspændinger for TS-fikspunkterne angivet.

N	E	Kote
1186976.449	623157.484	16.585
1186884.734	623150.681	17.525
1186890.520	623063.607	20.309
1187055.919	623025.421	19.685
1187149.689	622975.757	21.842
1187256.954	623065.251	17.640
1187097.433	623099.706	17.055
1187078.635	623120.919	16.546
1187023.877	623146.194	15.516
-0.006	0.004	0.005
0.000	0.006	-0.018
-0.001	-0.003	-0.011
-0.005	-0.013	-0.020
0.005	0.000	-0.011
0.008	0.004	-0.009
-0.007	0.001	-0.010
-0.002	0.003	-0.009
0.011	-0.001	0.001

Figur 8.10. Tabel over net spændinger i opstilling af totalstationen, hvor den sidste kolonne angiver afvigelserne på højden. De nederste grå felter angiver afvigelserne.

Afvigelserne på fikspunkterne lå indenfor de forventede afvigelser, som ses på GNSS med 2-3 cm vertikal nøjagtighed. Alle TS-fikspunkter blev således beholdt og indgik i beregning af den frie opstilling.

Opmåling af terrænpunkter

Efter opstilling af totalstationen blev terrænpunkterne opmålt i de forskellige naturtyper. Opmålingen blev foretaget med et 360 prisme monteret på en teleskobstang. Foden af teleskobstangen var spids, hvor der under opmåling af terrænpunkterne var fokus på at holde spidsen på jordens overflade og ikke lade den synke i jorden. På baggrund af denne metode var det muligt at måle terrænpunkterne ind. I naturtypen skov eller krat, var det nødvendigt at være to personer til opmåling af terrænpunkterne, hvilket er årsagen til der kun blev opmålt et lille antal terrænpunkter i denne naturtype.

8.4 Opsummering

Fordelingen af kontrol og terrænpunkter i projektet området er illustreret på figur 8.11



Figur 8.11. Fordeling af kontrol, TS-fiks og terrænpunkter i projektområdet. Kontrolpunkterne er angivet med blå farve, mens terrænpunkterne er angivet med deres respektive farve jf. figur 7.1. TS-fikspunkterne er angivet med røde punkter, hvor punktet nord for de gule punkter er TS opstillingen jf. figur 8.9. Figuren er i fuld størrelse på bilag F.

Projektområdet blev begrænset til den sydvestlige halvdel af området, hvor alle naturtyperne var repræsentative, og området relativt fladt. Indmålingen af kontrolpunkterne blev foretaget to-tre gange, både før, mellem og efter flyvningerne med henblik på GNSS målinger under sammenlignelige forhold som dronen havde. Efter de seks flyvninger blev totalstationen opstillet med fri udsigt til de tre naturtyper, hvorefter der med forsigtighed blev foretaget terrænpunktsmålinger i de enkelte na-

turtyper. Antallet af målinger i naturtypen skov eller krat blev forholdsvis lille, da opgaven krævede to personer for at kunne foretage målingerne. Efter dataindsamlingen af punkterne illustreret på figur 8.11 er punktskyerne og punkterne klar til databehandling, som bliver beskrevet igennem kapitel 9.

Efter forsøgsudførelsen er der blevet indsamlet en række af data som skal efterbehandles og beregnes for at kunne foretage analyser og konklusioner på baggrund af de resultater, som er blevet observeret i marken. Gennem dette kapitel bliver det beskrevet hvilken fremgangsmåde som bliver benyttet til databehandlingen, og hvordan dataen er blevet samlet i processen mellem dataindsamling og behandling. Det første skridt i databehandlingen, er indsamlingen og eksportering af terræn, fiks og kontrolpunkterne, som beskrives i det kommende afsnit 9.1.

9.1 Databehandling af GNSS og totalstations målingerne

GNSS punkterne blev i marken indstillet til DKTM3 og DVR90, da målingerne blev foretaget på Sjælland, og dette referencesystem blev vurderet til at være bedst egnet, samt et bekendt referencesystem at benyttet. Til opstilling af fikspunkter for totalstationen er samme GNSS blevet benyttet hvortil totalstationens reference system også er i DKTM3 DVR90. Under den frie opstilling af totalstationen beregner den selv dens placering i marken, og konvertere de indmålte punkter fra lokalt koordinatsystem til det angivet reference system. Punkterne der indmåles bliver således lagret lokalt i DKTM3. Efterfølgende er koordinaterne eksporteret gennem VPN, til en firmaserver, hvorfra punkterne er blevet eksporteret til CSV-fil. Efterberegning af totalstationens opstilling kan ses i bilagsmappen, under totalstation, hvor rettelserne til TS-fikspunkterne er indenfor 10 millimeter. Netspændinger i opstilling anses derfor til at være minimale, og TS-fikspunktsnettet uden grovfejl.

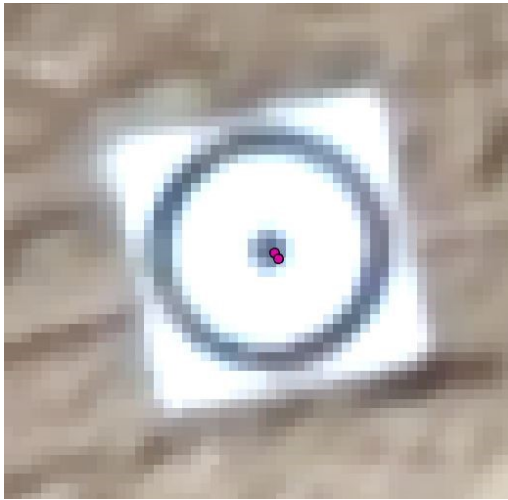
9.2 Dannelse af digital terrænmodel

Dannelsen af digital terrænmodel er blevet udført i DJI's eget program, af LE34, på baggrund af de seks flyvninger der blev udført og beskrevet i kapitel 8 på side 31. Til dannelse af denne terrænmodel er det nødvendigt at fremkalde punktskyen fra skanningerne, da disse punkter udgør fundamentet for terrænmodellen. I DJI er der flere forskellige muligheder, når punktskyen generes og behandles. I første omgang kan der udføres noget statistik, hvortil flere overlappende punkter kan samles i midlet punkter, hvilket tynder ud i en punktsky, og gør de medtaget punkter mere pålidelige, på baggrund af det samme objekt observeret flere gange. Til dette forsøg er 100 %

af punkterne valgt at blive medtaget, således der ikke er punkter som bliver midlet, eller samlet.

Ud over at medtaget 100 % af punkterne, er der blevet benyttet DJI terra's standard indstilling, hvor alle punkter i en afstand mellem 3-300 meter fra sensoren er inkluderet[DJI, 2024], samt optimering og udjævning af punktskyen er blevet udført. Ground Point Classification er blevet udført, således DJI selv klassificere hvilke punkter, der er beliggende på terrænet og hvilke der er tilhørende anden klassificering. Det bliver udført på baggrund af TIN modeller af området, samt vinkler mellem de laveste punkter og nærliggende punkter.[DJI, 2024, s. 44] Dannelsen af Digitale elevation model er på baggrund af ground points som danner en terrænmodel for området[DJI, 2024, s. 44-45], hvor begge disse processor har været benyttet til dannelsen af terrænmodellerne.

En af de sidste elementer i genereringen af DTM i DJI terra, er kontrolpunkter eller GCP'er, hvor disse kan benyttes til at kontrollere hvor god den initierende model er, og efterfølgende kan DJI mindske afvigelserne ved at forskyde modellen vertikalt, så den passer bedst muligt til kontrolpunkterne. Igennem dette forsøg er der ikke blevet foretaget denne korrektion af punktskyen, med henblik på at minimere antallet af ukendte processer. Der blev under alle flyvningerne taget billeder med henblik på farvelægningen af punktskyerne, hvorfra der blev generet digitalt ortofoto. Ortofoto er fastlagt ved brug af dronens RTK, hvor nedenstående figurer 9.1 til 9.4 på modstående side illustrerer afvigelserne mellem dronen og GNSS roveren



Figur 9.1. Afvigelse i det nordvestlige hjørne



Figur 9.2. Afvigelse i det nordøstlige hjørne.



Figur 9.3. Afvigelse i det sydvestlige hjørne.



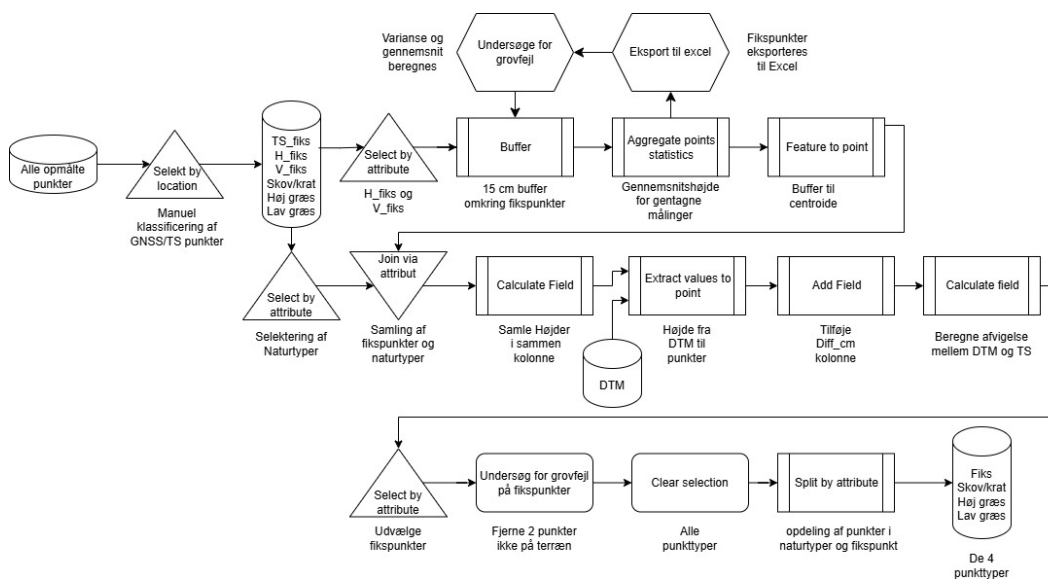
Figur 9.4. Afvigelse i det sydøstlige hjørne.

Billederne 9.1 til 9.4 viser afvigelse mellem dronen og de indmålte targets. De benyttet targets er 50 cm brede, hvor punkterne blev målt ind i midten targets. Den største afvigelse ses på figur 9.2 med en samlet afvigelse på 5 cm. De fire billeder er et udpluk af de omkring 10 targets der blev lagt ud i området. Terrænmodellerne antages på baggrund af denne undersøgelse af være overvejende retvisende.

9.3 Sammenligning mellem terrænmodel og terrænpunkter

Når terrænmodellen er blevet dannet i DJI, er den efterfølgende eksporteret som en TIF fil til ArcGis Pro, hvor sammenligning mellem terrænpunkterne målt i terrænet, sammenlignes med højden på terræn angivet i den digitale terrænmodel. Fremgangsmåden hvorpå højderne fra terrænmodellen bliver overført til punkterne er beskrevet

i nedenstående diagram.



Figur 9.5. Diagram over databehandlingsproces fra punktdata og terrænmodeller, til punkt data med afvigelser for højderne

Det første skridt i sammenligning består i klassificering af de indmålte punkter i hhv terrænpunkter, kontrolpunkter og TS-fikspunkter. Formålet herved er at isolere naturtyperne, og fjerne TS-fikspunkterne da punkterne ikke er indmålt på terræn. Kontrolpunkterne undersøges for grovfejl hvor de grove fejl fjernes og efterfølgende midles de resterende kontrolpunkter.

Det næste skridt består i samling af kontrolpunkter og terrænpunkter til en samlet punktfil. Det næste skridt består i overførelse af højde data til de enkelte punkter, hvor der på baggrund af den celle som punkterne er placeret i bliver overført en højde til punkterne. På baggrund af den første terrænmodel undersøges kontrolpunkterne for grovfejl, hvor punkter ikke målt på terræn bliver fjernet. Efterfølgende fortsættes den samme proces for alle terrænmodellerne, hvor der dannes et nyt punktdatasæt til de enkelte terrænmodeller og flyveparametre. På de enkelte punktdatasæt beregnes efterfølgende afvigelserne mellem terrænpunkter og terrænmodellerne, i en separat kolonne. Processen for databehandling er beskrevet i yderligere detaljer i bilag A. Resultaterne af databehandlingerne er tre naturtyper for hver af de seks flyvninger, hvor standardopstilling af datasættet er vidst eksemplificeret på tabel 9.1

Pkt. nr.	TS højde m	DTM højde m	d_1 cm
1	17,863	17,939	7,6
2	17,876	17,956	8,0
3	17,896	17,977	8,1

Tabel 9.1. Eksempel på det specielle dataudtræk, der er resultatet af databehandlingen i ArcGis. Eksemplet er et udtræk fra høj græs, 120 m, 10 m/s, hvor de første tre punkter er medtaget.

De fire informationer angivet i ovenstående tabel bliver samlet for hver naturtyper, hvor der i bilag D kan ses den fulde liste af oplysninger.

9.4 Kvalitetsparametre og analysesammensætning

Efter databehandlingen igennem ArcGIS, hvor den rå data blev sammensat på baggrund af højde fra totalstationen, højden fra terrænmodellerne og forskellene mellem de to højder, se tabel 9.1, bliver resultaterne vurderet på baggrund af en række kvalitetsparametre og analyser.

De kvalitetsparametre som benyttes til at vurdere effekten mellem to flyveparametre, er angivet i listen herunder, hvor af 3σ benyttes som grovfejlsgrense.

I Excel er der blevet beregnet følgende statistisk værdier på baggrund af afvigelserne 'd' mellem terrænmodellerne og terrænpunkter.

1. Gennemsnitsafvigelser
2. Root Mean Square Difference (RMSD)
3. Mindste værdi
4. Største værdi
5. σ
6. 3σ
7. Spredning på spredning

Beregningen af gennemsnitsafvigelserne er foretaget ved brug af ligning 9.1

$$\bar{d} = \frac{\sum d}{n} \quad (9.1)$$

Hvortil RMSD er beregnet ved brug af ligning 9.2.

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i d_i^2} \quad (9.2)$$

ligning 9.2: Formel til beregning af RMSD, med inspiration fra [Eriksen og Lauritzen, 2004].

RMSD benyttes som udtryk da der referes til en forskel mellem to datasæt, som i dette tilfælde er en sammenligning mellem terrænpunkt og terrænmodel. Ved de førnævnte tilfælde er der tendenser til at underestimere afvigelserne hvorved disse bliver beregnet på baggrund $n-1$. Dette ses også som tilfældet ved ligning 9.3, hvor der i nævneren er angivet $n-1$. [Eriksen og Lauritzen, 2004, s. 20] Beregningen af spredningen tager således udgangspunkt i ligning 9.3, og benyttes til relative analyser.

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2} \quad (9.3)$$

ligning 9.3: Formel for beregning af σ hvilket er tilsvarende en estimeret spredning på det enkelte datasæt. [Eriksen og Lauritzen, 2004, s. 15]

Ligeledes benyttes 3σ som en grovfejlsgrænse for de observeret differenser. Igennem denne kontrol opdages tre tilfælde, hvor det samme punkt i naturtypen 'høj græs' overskrider denne grænse. Det er valgt at medtage punktet i analyserne, da dette datasæt består af 90 punkter, og overskridelsen er maksimalt 2 millimeter over grænsen. Indflydelsen af denne grovfejl er vurderet til ikke at have signifikant forskel på resultaterne.

Den sidste kvalitetsparametre som benyttes er spredningen på spredningen, hvor denne er beregnet ved brug af ligning 9.4

$$spr(\sigma) = \frac{\sigma}{\sqrt{2d}} \quad (9.4)$$

ligning 9.4: Beregning af spredningen på spredningen jf. Eriksen og Lauritzen [2004, s. 22]

Disse 7 kvalitetsparametre danner grundlag for vurdering og sammenligning mellem forskellige forsøg og flyvninger.

9.4.1 Hovedanalyser

Til undersøgelse af effekten som flyveparametrene har i de forskellige naturtyper opsættes tre overordnet analyser, til at beskrive effekten kvaliteten af terrænmodellerne, og efterfølgende udviklingen mellem terrænmodellerne jf. kapitel 5 på side 12. De tre analyser er opstillet i nedenstående liste.

1. **Absolutte analyse** $DTM - TS$
2. **Relative analyse** $DTM - TS$
3. **Komparative analyse** $DTM_a - DTM_b$

Analyserne er navngivet på baggrund af de generelle sammenligningsgrundlag, hvor på de bliver beregnet. De tre analyser understøtter hinanden, ved at undersøge forskellige aspekter af udviklingen mellem flyveparametrene og naturtyper.

Absolutte analyse

Analysen af de absolutte afvigelser er den første analyse, hvor afvigelserne mellem terrænpunkterne, indmålt med totalstation, og højden angivet i terrænmodellen, bliver beregnet og analyseret. Beregningen af afvigelserne er blevet foretaget ved brug af ligning 9.5

$$d_1 = DTM - TS \quad (9.5)$$

ligning 9.5: Beregning af afvigelserne mellem terrænpunkter og terrænmodellen.

Beregning er foretaget punktvis, således antallet af afvigelser er tilsvarende antallet af terrænpunkter. TS er forkortelse for totalstation. Beregning inspireret af figur 6.1.

Der regnes en afvigelse for alle terrænpunkterne individuelt. De beregnede afvigelse udgør grundlaget for de efterfølgende analyser. Eksempel på sådanne datasæt kan ses på tabel 9.1 på side 44.

Relative analyse

Den anden analyse tager udgangspunkt i gennemsnitsafvigelserne for de enkelte flyvehøjder og hastigheder. Gennemsnitsafvigelserne bliver trukket fra afvigelserne, hvorved det antages at systematiske fejl bliver fjernet fra datasættet.

$$d_{2i} = d_{1i} - \bar{d}_1 \quad (9.6)$$

ligning 9.6: Relative præcision for terrænmodellen, bliver beregnet på baggrund af denne beregning. beregningerne foretages på alle punkterne individuelt. Beregning er inspireret af figur 6.2 og afsnit 6.4 på side 22.

Formålet med denne analyse er at undersøge fordelingen af afvigelserne omkring gennemsnitsafvigelserne, $\bar{d}$, hvor det er muligt at undersøges den relative præcision af terrænmodellen.

Komparativ analyse

Den sidste analyse som udføres, er en komparativanalyse, hvor udviklingen mellem to terrænmodeller sammenlignes. Dette sker på baggrund af ligning 9.7

$$d_3 = DTM_L - DTM_H \quad (9.7)$$

ligning 9.7: Beregning af udviklingen (d_3) mellem punktskyerne, hvor der ved sammenligningen trækkes den høje terrænmodel fra en lavere terrænmodel. Et eksempel herpå er 90-120 m eller 5-10 m/s, hvor det altid er det højeste parametre som bliver trukket fra den mindre parametre. Se tabel 9.3 hvor sammenligningerne er opstillet i tabelform. Beregning inspireret af figur 6.3.

Formålet med denne analyse er at undersøge udviklingen mellem to punktskyer, på udvalgte punkter. Ved brug af denne metode er det muligt at analysere på hvilken forskel der sker mellem to punktskyer, ved forskellige parametre, uafhængigt af afvigelserne fra terrænniveau. De udvalgte punkter til analysen er de samme punkter benyttet i de to tidligere analyser, uden sammenligning med terrænhøjden, hvorledes der kun benyttes de horisontale værdier fra punkterne.

9.4.2 Analysesammensætning

Forsøgssammensætningen er opstillet i tabel 9.2, hvor de to første analyser er samlet, mens tabel 9.3 viser opsætningen af den tredje analyse.

Flyveparametre		Analyse metode	
Hastighed	Højde	DTM - TS	DTM - TS(korr.)
5 m/s	120 m	11	21
	90 m	12	22
	60 m	13	23
10 m/s	120 m	14	24
	90 m	15	25
	60 m	16	26

Tabel 9.2. Overblik over de analyser som bliver udført i projektet, på baggrund af flyvehastighed og højde, samt to af de tre analytiske metoder som benyttets i projektet, med henblik på estimering af nøjagtighed og præcision. Forsøgsnummerne angiver hvilket analytisk metode er benyttet gennem det første ciffer, mens andet ciffer angiver flyveparametrene benyttet. Bemærk at der skiftes hastighed midtvejs, hvor de samme højder benyttes igen.

$DTM_a - DTM_b$		
5 m/s	90-120 m	31
	60-120 m	32
	60-90 m	33
10 m/s	90-120 m	34
	60-120 m	35
	60-90 m	36
120 m	5-10 m/s	37
	90 m	38
	60 m	39

Tabel 9.3. Overblik over de analyser som bliver udført i projektet, på baggrund af flyvehastighed og højde, samt den sidste analysemetode på baggrund af punktvis udvikling mellem terrænmodeller. Forsøgsnummerne angiver hvilket analytisk metode er benyttet gennem det første ciffer, mens andet ciffer angiver flyveparametrene benyttet. Bemærk at der skiftes sammenligningsgrundlag ved forsøg 37-39, hvor hastigheden er en variable og højden er fastholdt

I tabellerne er de forskellige flyveparametre som indgå i hver forsøg angivet i de to venstre kolonner, hvor disse angiver de flyveparametre der er benyttet i den enkelte analyse. Tabellerne er yderligere en simplificeret udgave, hvor der til hver analyse, er tre naturtyper. Denne fulde tabel kan ses i bilag D. Nummerinddelingen afhænger af analyse typen, som det første ciffer, og overvejende anvendt højde som andet ciffer, hvor **1** er 120 m, **2** er 90 m og **3** er 60 meter. Denne klassificering er ikke gennemført igennem den tredje analyse på tabel 9.3, hvor der sammenlignes mellem to højder. I bilag D angiver det tredje ciffer naturtypen, hvor xx1 er lav græs, xx2 er høj græs og xx3 er skov eller krat.

Med kendskab til hvordan analyserne bliver udført, bliver der igennem næste afsnit gennemgået resultaterne af de syv kvalitetsparametre og de tre overordnet analyser.

I kapitel 9 blev metoderne til databehandlingen præsenteret, sammen med tre forskellige analyse og 7 kvalitetsparametre. Disse udgør vurderingsparameterne for den påvirkning, som flyveparametre og naturtyper har på terrænmodellerne. Igennem dette afsnit præsenteres resultaterne fra de tre analyser, hvor der først præsenteres udvalgte kvalitetsparametre for kontrolpunkter, og efterfølgende gennemgås naturtypen høj græs, med alle tre analyser og alle 7 vurderingsparametre. Efterfølgende samles resultaterne i tabeller tilsvarende tabel 9.2 og 9.3, med henblik på at undersøges udvikling på tværs af parametre. Opsætningen af projektområdet er angivet på billede 8.11 på side 39.



Figur 10.1. Billede over området, klassificeret i de forskellige punkttyper som blev opmålt i området.

10.1 Kontrolpunkter

Igennem dette afsnit præsenteres udvalgte kvalitetsparametre for kontrolpunkterne jf. afsnit 9.4 på side 45. I tabel 10.1 er resultaterne for kvalitetsparametrene præsenteret.

5 m/s	120 m	90 m	60 m	10 m/s	120 m	90 m	60 m
$\bar{d}_1$	1,8 cm	0,6 cm	0,8 cm		1,2 cm	1,2 cm	0,6 cm
RMSD	2,5 cm	1,9 cm	1,9 cm		2,3 cm	2,1 cm	1,9 cm
Minimum	-3,7 cm	-5,5 cm	-3,8 cm		-4,6 cm	-4,3 cm	-4,1 cm
Maximum	5,7 cm	4,4 cm	5,7 cm		6,9 cm	4,1 cm	5,3 cm
Spredning	1,8 cm	1,8 cm	1,8 cm		2,0 cm	1,7 cm	1,8 cm
3x spred	5,5 cm	5,4 cm	5,3 cm		5,9 cm	5,2 cm	5,5 cm

Tabel 10.1. Udvalgte kvalitetsparametre beregnet for kontrolpunkterne, for alle seks flyvninger. Vær opmærksom på at referencegrundlaget for opmålingerne er foretaget på baggrund GNSS og totalstation. På venstre side ses resultaterne for 5 m/s og på højresiden resultaterne ved 10 m/s

Tabel 10.1 viser udvalgte kvalitetsparametre, hvor den absolutte analyse kan udføres ved sammenligning af gennemsnitsafvigelserne og RMSD værdierne. De gennemsnitlige afvigelser ligger mellem 0,5 cm og knap 2 cm, afhængig af flyveparametrene. Der ses således en tendens til at terrænmodellerne ligger højt sammenlignet med kontrolpunkterne.

Ved sammenligning af RMSD-værdierne er de stabile omkring 2 cm, for alle 6 flyvninger hvor afvigelserne på tværs af flyveparametrene er ensartet. Denne konklusion bekræftes af spredningerne som ligger omkring 1.8 cm fordelt på alle 6 flyvninger. Ved Sammenligning af grovfejlgrænsen og ekstremaerne, ligger ekstremaerne ikke betydeligt udenfor grovfejlgrænsen. Da spredningerne ligger omkring 2 cm, og afvigelserne fra reelt terræn ligger indenfor denne afvigelse også, kan de observeret tendenser være på baggrund af tilfældige udfald. Der ses dog en systematik til at estimeringen af terrænmodellen ligger for højt.

Tabel 10.1 er baseret på kontrolpunkterne, som er blevet ind målt med en blanding af GNSS og totalstation på befæstet områder. Der blev opmålt 57 kontrolpunkter af varierende kvalitet, hvor resultaterne i tabellen er behæfte med større usikkerheder end terrænpunkterne. Tabel 10.1 kan således benyttes som sammenligningsgrundlag til de resultater, der præsenteres i de efterfølgende analyser. Analyserne som præsenteres herefter er baseret på terrænpunkter, medmindre der specifikt henvises til kontrolpunkter.

10.2 Anvendelse af kvalitetsparametrene

Den primære basis for sammenligning sker på baggrund af ensartet naturtyper, og med kun en variable parametre. Igennem denne initierende resultatanalyse, undersøges kun naturtypen høj græs ved 5 m/s, hvor flyvehøjden er variable. I denne naturtyper er der benyttet 90 terrænpunkter som kontrolgrundlaget.

10.2.1 Absolutte analyse

Resultaterne for den første analyse, absolutte afvigelser, er summeret i tabel 10.2

5 m/s	120 m	90 m	60 m
$\bar{d}_1$	9,5 cm	8,9 cm	9,8 cm
RMSD	9,9 cm	9,2 cm	10,1 cm
Min	4,2 m	4,4 cm	5,9 cm
Max	17,3 cm	16,1 cm	14,8 cm

Tabel 10.2. Statistiske værdier på de tre flyvehøjder med 5 m/s, i naturtypen høj græs. Beregningen af værdierne er foretaget uden korrigering af systematiske fejl eller midling af udgangsdata. Afrunding af data ned til millimeteren er blevet foretaget. De tre forsøg i tabellen er 11, 12 og 13 jf. Tabel 9.2, for naturtypen høj græs

På baggrund af gennemsnitsafvigelsen, angivet ved $\bar{d}_1$, ses der tegn på systematiske afvigelser, da forskellene mellem de tre gennemsnitsafvigelser ligger højt, og stabilt omkring 9.3 cm for højt. Dette bliver yderligere understøttet gennem ekstremaerne hvor de mindste værdier i datasættet ligger 4 og 6 cm for højt. Denne systematiske fejl påvirker RMSD værdierne for datasættet, da der på alle afvigelserne er tillagt en standard fejl.

10.2.2 Relativ analyse

Igennem den relative analyse, korrigeres der for de systematiske fejl, hvorved afvigelserne kan undersøges relativt indenfor terrænmodellen. Resultaterne for analysen er samlet i tabel 10.3. Til korrigering af de systematiske fejl, er der benyttet gennemsnitsafvigelserne fra tabel 10.2 til de respektive flyvehøjder.

RELATIV 5 m/s	120 m	90 m	60 m
$\bar{d}_2$	0,0 cm	0,00 cm	0,00 cm
Min	-5,4 cm	-4,5 cm	-5,0 cm
Max	7,8 cm	7,3 cm	7,0 cm
σ	2,7 cm	2,6 cm	2,5 cm
3σ	8,0 cm	7,7 cm	7,6 cm
$Spr(\sigma)$	0,20 cm	0,19 cm	0,19 cm

Tabel 10.3. Statistiske værdier for naturtypen høj græs beregnet på baggrund af korrigeret data. Der er korrigeret for systematiske fejl, ved brug $\bar{d}_1$ fra det ukorrigeret datasæt, se tabel 10.2. De tre forsøg i tabellen er 21, 22 og 23 jf. Tabel 9.2, for naturtypen høj græs

Da gennemsnitsafvigelserne ($\bar{d}_1$) er blevet trukket fra d_1 , er gennemsnitsafvigelsen ($\bar{d}_2$) 0 cm for alle tre flyvehøjder. Der ses således ikke tegn på systematiske fejl, på hverken gennemsnitsafvigelserne eller ekstremaerne, da de er jævnt fordelt omkring 0. Spredningen henover de tre flyvehøjder forbedres med 0.1 cm per flyvehøjde, hvor denne forbedring sammenlignet ekstremaerne og spredningerne kan være grundet tilfældige udfald. Herved ses der i den relative analyse ikke nogen forbedring af terrænmodellen ved lavere flyvehøjde.

10.2.3 Komparativ analyse

Den sidste analyse omhandler sammenligning mellem to terrænmodeller, som omtalt i afsnit 9.4. Der undersøges herved udviklingen mellem to terrænmodeller, med henblik på at se om der er en ensartet forbedring eller forværring af den samlede terrænmodel, mellem forskellige højder. Resultaterne for denne analyse, på baggrund af naturtypen højt græs er samlet i tabel 10.4

	90m-120m	60m-120m	60m-90m
$\bar{d}_3$	-0,7 cm	0,2 cm	0,9 cm
RMSD	1,0 cm	0,6 cm	1,2 cm
Minimum	-2,2 cm	-1,0 cm	-0,8 cm
Maximum	1,9 cm	1,7 cm	2,3 cm
σ	0,8 cm	0,6 cm	0,8 cm
3x spred	3,1 cm	1,9 cm	3,7 cm

Tabel 10.4. Udvikling mellem flyvehøjderne angivet øverst i tabellen. Værdierne er angivet i cm. Rækkefølgen angiver hvordan de punkter er blevet beregnet, efter ligning 9.7 på baggrund af flyvehøjden. Positive udvikling er således en forværring fejlene, mens negative værdier giver en forbedring. De tre forsøg i tabellen er 31, 32 og 33 jf. tabel 9.3, for naturtypen høj græs

Med udgangspunkt i at forbedring er indikeret på baggrund af negative værdier, ses der en generel forbedring på 0,7 cm mellem 90 m og 120 m, hvor der ved 60 meter sker en forværring på 0,2 cm. Der ses således ikke en tendens til hverken forbedring eller forværring af terrænmodellen på baggrund af varierende flyvehøjde. De skiftende forhold mellem terrænmodellerne er yderligere minimale, da spredningerne generelt er større end det skift som sker mellem terrænmodellerne. Ved at sætte det i kontekst af de gennemsnitsafvigelser fra tabel 10.2, var afvigelserne omkring 9 cm, hvor denne forskydning er på 0,7 cm, hvilket ikke er af større betydning.

10.3 Effekten af flyvehøjden

Der er gennem afsnit 10.2, blevet gennemgået en undersøgelse af resultaterne af 9 forsøg, alle sammen i naturtypen høj græs og med 5 m/s, hvor højden var variabel. Der blev ikke konstateret nogen betydelig forskel på baggrund af de forskellige flyvehøjder. På baggrund af denne fremgangsmåde bliver de resterende parametre vurderet, hvor resultaterne samles i større tabeller, således det muligt foretage flere sammenligninger samtidigt. Der bliver fastholdt i præsentation af data på baggrund af de tre hovedanalyser i jf. afsnit 9.4 på side 45, hvor der i de kommende analyser kan sammenlignes på tværs af naturtyper også. For at kunne sammenligne på samme grundlag og på en overskuelig måde, bliver enkelte kvalitets parametre som har relevans præsenteret afgang.

10.4 Absolutte analyse

Den første analyse undersøger de absolutte afvigelser mellem terrænpunkterne og terrænmodellerne, hvor der her sammenlignes gennemsnitsafvigelser, for den enkelte forsøg under denne analyse. Resultaterne for analysen er samlet i tabel 10.5, hvor udvikling i naturtypen høj græs blev gennemgået i afsnit 10.2

$\bar{d}_1$ 5 m/s	120 m	90 m	60 m	n
Lav græs	4,3 cm	3,9 cm	3,9 cm	37
Høj græs	9,5 cm	8,9 cm	9,8 cm	90
Skov eller krat	8,6 cm	8,1 cm	7,1 cm	16
$\bar{d}_1$ 10 m/s				
Lav græs	3,2 cm	3,8 cm	3,4 cm	37
Høj græs	8,5 cm	9,1 cm	9,7 cm	90
Skov eller krat	8,6 cm	8,6 cm	6,5 cm	16

Tabel 10.5. Samling af gennemsnitligeafvigelser, $\bar{d}_1$, mellem terrænpunkter og terrænmodel, fordelt på forskellige højder, naturtyper og kategoriseret efter hastighed, hvor der i øverste halvdel er fløjet med 5 m/s og 10 m/s i nederste halvdel. n angiver antallet af terrænpunkter i naturtype. Forsøgene i denne tabel er forsøg 11-16 jf. tabel 9.2

Ved sammenligning af gennemsnitsafvigelser, ses der forholdsvis stabile værdier ved forskellige flyvehøjder. Der ses yderligere tegn på systematiske afvigelser, ved de forskellige flyvehøjder, hvor den systematiske afvigelse ikke konsekvent henover forskellige naturtyper. Der ses en forholdsvis lighed mellem naturtyperne høj græs og skov eller krat, hvor $\bar{d}_1$ er omkring 8.5-9 cm, med enkelte undtagelser for skov krat, hvor der ses en betydelige forbedring på 1.5-2 cm ved laveste flyvehøjde, for begge hastigheder. Her bør der tages forbehold for en lavere testmængde, som kan have en betydning for resultaterne. De systematiske fejl som datasættet indeholder, påvirker spredninger som kan ses på tabel 10.6.

RMSD 5 m/s	120 m	90 m	60 m	n
Lav græs	4,6 cm	4,3 cm	4,5 cm	37
Høj græs	9,8 cm	9,2 cm	10 cm	90
Skov eller krat	9 cm	8,6 cm	7,5 cm	16
RMSD 10 m/s				
Lav græs	3,7 cm	4,3 cm	3,3 cm	37
Høj græs	8,8 cm	9,4 cm	9,9 cm	90
Skov eller krat	9 cm	9,1 cm	6,9 cm	16

Tabel 10.6. RMSD beregnet i relation til **Absolutte analyse**. Sat op efter samme metode som tabel 10.5. Tabellen er delt op i en øvre del med 5 m/s og en nedre del med 10 m/s i relation til flyvehastighed.

RMSD-værdierne på de ukorrigeret punktskyer, følger gennemsnitsafvigelserne, som ses i tabel 10.5. Herved ses der tegn på systematiske afvigelser henover alle flyvninger og naturtyper, hvor størrelsen af de negative værdier i datasættet er minimale. På RMSD værdierne ses der tilsvarende en forbedring for naturtypen skov eller krat, hvor der ved lavere flyvehøjde opnåes bedre et bedre estimat af terrænhøjde. Til

denne udvikling bør der tages højde for antallet af terrænpunkter hvor der i denne naturtype kun er foretaget 16 målinger.

10.5 Relative analyse

For at undersøges de relative afvigelser indenfor terrænmodellen, er der udført en korrigerende af datasættet på baggrund $\bar{d}_1$ jf. afsnit 9.4. På baggrund af den korrigerende som er blevet foretaget, er alle $\bar{d}_2$ 0, hvilket kan ses på tabel 10.3. Tabel 10.7 indeholder derfor spredningerne på baggrund af den relative analyse

σ_2 5 m/s	120 m	90 m	60 m	n
Lav græs	2,3 cm	1,9 cm	2,4 cm	37
Høj græs	2,7 cm	2,6 cm	2,5 cm	90
Skov eller krat	2,6 cm	2,9 cm	2,2 cm	16
σ_2 10 m/s				
Lav græs	2 cm	1,9 m	2,2 cm	37
Høj græs	2,6 cm	2,5 cm	2,5 cm	90
Skov eller krat	2,8 cm	3,1 cm	2,3 cm	16

Tabel 10.7. Tabellen indeholder spredningerne for de **relative afvigelser** mellem terrænpunkter og terrænmodellen. Der er korrigeret på baggrund af de enkelte gennemsnitsafvigelser.

På baggrund af de korrigeret spredninger i tabel 10.7, ses der ikke betydelige forskel mellem naturtyperne, flyvehøjden eller hastigheden. I naturtypen skov eller krat, ses der en forbedring i terrænmodellen, hvor afvigelserne er mindre spredt ved 60 meters højde, sammenlignet med 90 og 120 meter. I tabel 10.8 er spredningerne for spredninger angivet

spr(σ) 5 m/s	120 m	90 m	60 m	n
Lav græs	0,26 cm	0,22 cm	0,28 cm	37
Høj græs	0,2 cm	0,19 cm	0,19 cm	90
Skov eller krat	0,47 cm	0,51 cm	0,4 cm	16
spr(σ) for 10 m/s				
Lav græs	0,23 cm	0,22 cm	0,25 cm	37
Høj græs	0,19 cm	0,19 cm	0,18 cm	90
Skov eller krat	0,49 cm	0,54 cm	0,4 cm	16

Tabel 10.8. Tabellen indeholder spredningernes spredninger til den relative afvigelse mellem kontrolpunkter og terrænmodellen.

Sammenlignes forskellene mellem spredningerne i naturtypen skov eller krat, ses en forbedring på op mod 0,8 cm. Dette er kun lidt over 0,3 cm over spredningen på spredningen, hvor der dette udfald, kan skyldes tilfældigheder, og således ikke er signifikant. Der ses således ikke nogle signifikante forbedringer af de relative afvigelser i terrænmodellerne, ved varierende hastighed eller højde.

10.6 Komparativ analyse

Den sidste analyse undersøger systematiske flytninger mellem terrænmodellerne. Sammenligningerne mellem terrænmodellerne følger tabel 9.3, hvor dette opdeles i to afsnit, hvor der i første afsnit er fokus på højden og i andet afsnit er fokus på hastigheden, se tabel 10.11. Gennemsnitsforskydningen ($\bar{d}_3$) for alle sammenligningerne for højden er samlet på tabel 10.9.

$\bar{d}_3$ 5 m/s	90-120 m	60-90 m	60-120 m	n
Lav græs	-0,3 cm	-0,1 cm	-0,4 cm	37
Høj græs	-0,7 cm	0,9 cm	0,2 cm	90
Skov eller krat	-0,5 cm	-1 cm	-1,5 cm	16
$\bar{d}_3$ 10 m/s				
Lav græs	0,6 cm	-0,5 cm	0,2 cm	37
Høj græs	0,6 cm	0,6 cm	1,2 cm	90
Skov eller krat	0,0 cm	-2,1 cm	-2,1 cm	16

Tabel 10.9. Komparativ analyse, hvor gennemsnitsudviklingen er opstillet i tabellen, på baggrund af naturtypen og sammenligningsgrundlag, som kan ses øverste række. Tabellen er opdelt i to dele hvor den øverste del er for 5 m/s og nederste del er for 10 m/s. Negative værdier betyder et gennemsnitligt fald mellem terrænmodellerne. Antallet af observationer for de enkelte naturtyper er angivet i sidst kolonne.

Udviklingen mellem terrænmodellerne variere i retning og størrelse, hvor den største udvikling sker i naturtypen skov og krat, ved omkring 2 cm forskydning mellem 90 meter og 60 meters højde og tilsvarende ved 120 m og 60 m. Der kan potentielt opnås en bedre terrænmodel ved at flyve med lav højde over skovarealer. Forskellen er stadig indenfor 2σ jf. tabel 10.10.

σ 5 m/s	90-120 m	60-90 m	60-120 m	n
Lav græs	0,7 cm	1,0 cm	0,9 cm	37
Høj græs	1,0 cm	0,6 cm	1,2 cm	90
Skov eller krat	1,0 cm	1,8 cm	1,5 cm	16
σ 10 m/s				
Lav græs	1 cm	0,9 cm	0,9 cm	37
Høj græs	0,9 cm	1,4 cm	0,9 cm	90
Skov eller krat	1,4 cm	2,5 cm	2,6 cm	16

Tabel 10.10. Tabel over spredningerne fra den **komparative analyse**, på baggrund af fast hastighed. I øverste tabel er 5 m/s angivet, mens den nederste halvdel er på baggrund af 10 m/s.

Ved undersøgelse af spredningerne i tabel 10.10, ses der ikke en systematisk sammenhæng, hvor spredningerne blive mindre, ved lavere flyvehøjder. Yderligere ses der at forskellen mellem to terrænmodeller er minimale, hvilket understøtter resultaterne fra tidligere analyser, hvor der blev set ubetydelig forskelle mellem terrænmodellerne.

10.7 Effekten af hastighed

Med den konstatering af der ikke ses nogen betydelige forskel mellem terrænmodellerne på baggrund af flyvehøjden, undersøges påvirkningen som hastigheden har på terrænmodellerne igennem dette afsnit. Gennemsnitsudviklingen for sammenligningen på tværs af hastighederne er summeret i tabel 10.11

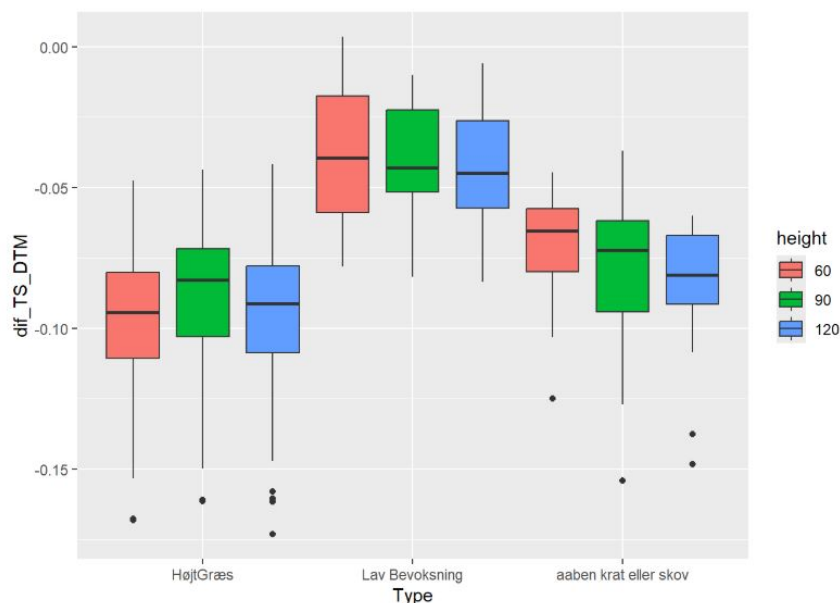
$\bar{d}_{3-hast}$	120 m	90 m	60 m	n
Lav græs	1,1 cm	0,1 cm	0,5 cm	37
Høj græs	1,1 cm	-0,3 cm	0,1 cm	90
Skov eller krat	0 cm	-0,5 cm	0,6 cm	16

Tabel 10.11. Gennemsnitlige afvigelser mellem to terrænmodeller, på baggrund af **Komparativ analyse**. Sammenligningerne tager udgangspunkt i varierende hastigheder med fælles højde. Værdierne i tabellen afspejler udviklingen i absolutte fejl, hvor negative værdier betyder lavere terrænmodel ved lavere hastigheder. Tabellen er dannet på baggrund af 371-393 på tabel 9.3

På tabellen ses en overraskende udvikling, hvor der ved lavere hastighed i 120 m højde potentielt kunne ske en forværring af terrænmodellen ved at flyve langsommere. Forbedringen i naturtypen høj græs, ville være minimal sammenlignet med de absolutte afvigelser opstillet i tabel 10.5 på side 53. Derimod kunne der forekomme betydelige forbedringer ved hurtigere hastighed over lavt græs, hvor afvigelserne mellem terræn og modellen er mindre. De resterende forskelle i tabel 10.11 er af en ubetydelig størrelse, da de er i størrelsesordenen millimeter, hvor tilfældigheder har større påvirkning end den forbedring, som ville ske ved eventuel lavere hastighed. Det kan herved konkluderes at hastighed har en lille indflydelse på terrænmodellerne, hvor der potentielt er andre faktorer som har større betydning.

10.8 Naturtypen som fejlkilde

Ved gennemgangen af resultaterne for analyserne, blev der observeret små ubetydelige forbedring, på baggrund af de forskellige parametre, som blev undersøgt. Ved den første analyse, summeret i tabel 10.5, ses generelle tendenser henover de forskellige naturtyper, hvor de har stabile systematiske afvigelser. På baggrund af den observation er følgende boxplot for 5 m/s blevet lavet, se figur 10.2.



Figur 10.2. Boxplot over de 9 datasæt for de forskellige flyvehøjder og naturtyper. På boxplottet er der tre grupperinger af kasser, tilsvarende naturtyperne med mindre afvigelser. Beregningen af forskellene mellem terrænmodellen og terrænpunkterne er byttet rundt, hvormed afvigelserne på figuren er angivet med omvendt fortegn.

På figur 10.2 ses de 3 flyvehøjder, grupperet på naturtype. Medianen er angivet med en vandret sort streg i kasserne. Der ses mindre afvigelser mellem medianerne, hvor de stadig er indenfor kvantilerne, for de andre højder i samme naturtype. På boxplottet kan det ses at afvigelserne ligger grupperet efter naturtype, og ikke påvirket i betydelig grad af flyvehøjden. Naturtypen har således en betydelig indflydelse på terrænmodellen. Der blev igennem de relative analyser på tabel 10.7, og ved sammenligning med RMSD værdierne, konstateret væsentlige forbedring for de enkeltet naturtyper, hvor spredninger var sammenlignelige i intervallet 1 til 2 centimeters afvigelsen.

Ved den sidste undersøgelse af naturtypens betydning, sammenlignes naturtypen med kontrolpunkter, som blev opmålt på befæstet overflader, så som asfalt eller grusstier. Resultaterne heraf kan ses i tabel 10.12.

$\bar{d}_1$ 5 m/s	120 m	90 m	60 m	n
Lav græs	4,3 cm	3,9 cm	3,9 cm	37
Høj græs	9,5 cm	8,9 cm	9,8 cm	90
Skov eller krat	8,6 cm	8,1 cm	7,1 cm	16
Kontrolpunkter	1,8 cm	0,6 cm	0,8 cm	57
$\bar{d}_1$ 10 m/s				
Lav græs	3,2 cm	3,8 cm	3,4 cm	37
Høj græs	8,5 cm	9,1 cm	9,7 cm	90
Skov eller krat	8,6 cm	8,6 cm	6,5 cm	16
Kontrolpunkter	1,2 cm	1,3 cm	0,6 cm	57

Tabel 10.12. $\bar{d}_1$ mellem TS og GNSS højder sammenlignet med terrænmodel, fordelt på flyvehøjder. Øverste halvdel er for en hastighed på 5 m/s og nederste halvdel angiver for 10 m/s.

På tabel 10.12 er kontrolpunkter tilføjet som en kategori. Disse er indmålt ved brug af en kombination GNSS punkter og totalstationsmålinger, hvorved deres præcision ikke er af samme kvalitet, som for terrænpunkterne. På trods af de forskellige unøjagtigheder, ses der en tendens til gennemsnitsafvigelse omkring 1 cm, eller derunder for de fleste flyvehøjder. Naturtyper er således den største faktor, som påvirker terrænmodellerne, hvor der sker ændringer op mod 7-8 cm, ifølge tabel 10.12, mellem kontrolpunkterne og høj græs eller skov eller krat.

Igennem dette projekt er der blevet undersøgt to parameters, hhv. højde og hastighed, påvirkning på terrænmodeller i forskellige naturtyper. Der blev gennem præsentationen af resultaterne opdaget forskellige sammenhæng mellem datasætterne, ved sammenligning på baggrund af de enkelte parametre. Disse sammenhæng og resultater vil igennem dette afsnit blive diskuteret.

11.1 Effekten af flyvehøjden

Igennem kapitel 10 på side 49 blev der præsenteret resultaterne for flyvehøjderne, hvor der blev observeret minimal effekt ved forskellige højde. Det blev konkluderet på baggrunden af spredningen og i forlængelse af den pragmatiske brug af dronen, at forbedringer omkring 1 cm var af minimal effekt, når der blev sammenlignet med spredningen på målingerne, som var i størrelsesorden 2 cm. Disse resultater er i overensstemmelse med resultaterne som Bakula et al. [2020] beskrev, hvor der blev set minimal påvirkning af terrænmodellerne på baggrund flyvehøjden. En undtagelse til disse minimale forskydninger, var ved lav flyvehøjde over skov eller krat. I denne naturtyper blev der beregnet en gennemsnitsforbedring på op til 2 cm på de absolutte fejl for terrænmodellerne. Resultatet af dette kan der være mange årsager til, hvor en af disse er tilfældigheder, på baggrund af det lave antal terrænpunkter. En anden forklaring jf. MacDonell et al. [2023] og Kucharczyk et al. [2018] kunne være de naturlige linjer og åbninger i træerne. Ved en lavere flyvehøjde, bliver skanningsbredden mindre, hvorved der skal benyttes flere overflyvninger af området til at skanne det ind. Der er således potentiale for at dronen har fløjet lige over åbninger i trækronerne, ved 60 meters højde, hvilket gav en bedre estimering af terrænniveauet. Kucharczyk et al. [2018] identificerede en sammenhæng i deres skovområder, en tendens til at nær-nadir skanningsvinkler var bedre til at trænge igennem skovområdet, og ned til terræn[Kucharczyk et al., 2018, s. 224-225]. På baggrund heraf

11.1.1 Undersøgelser og naturtyper

I tidligere forsøg er de fleste naturtyper ikke kategoriseret forskellige men nærmere som værende 'projektområdet', eller undgået. Der er således i forsøgene beregnet gennemsnitspåvirkninger for områderne, eller afvigelser mellem datasæt. Denne fremgangsmåde kan potentielt skjule forandringer i bestemte naturtyper som resultat af gennemsnitlig påvirkning, fra mange forskellige naturtyper. I tidligere afsnit blev det omtalt at den mindre forskydning ved lavere flyvehøjde for krat eller skov, kun-

ne være forårsaget af forskellige faktorer, hvor der bør undersøges yderligere hvilke aspekter som potentielt giver denne forbedring. Ved forsøg på kvantificering af nøjagtigheden eller kvaliteten for lidardroner, som MacDonell et al. [2023] udforsker, bør der tages højde for forskellige naturtyper, hvor der ifølge Kucharczyk et al. [2018] kan ses en forskel på afvigelserne, hvilket igennem denne rapport også er blevet bekræftet. Afhængig af hvilken type undersøgelse som foretages, kan der således komme et fejlbidrag fra forskellige naturtyper, hvor dette bidrag kan være forskellige artet, på baggrund af forskellige parametre, som var tilfældet naturtypen skov eller krat.

11.2 kontrolpunkter som fikspunkter

I projektet blev der ikke benyttet kontrolpunkter i den traditionelle forstand, som MacDonell et al. [2023] og Kucharczyk et al. [2018], hvor punktskyerne og eventuelt terrænmodellerne bliver korrigeret ind efter disse. Herved korrigeres der ikke for eventuelle systematiske fejl mellem GNSS-rover og GNSS-modtageren på dronen, hvor der kunne blive introduceret betydelige systematiske fejl til terrænskyerne. Dette valg er blevet foretaget på baggrund af de pragmatiske tilgange som LE34 benytter til opmåling af terrænmodeller hvor der ikke benyttes targets til kontrol af områderne, men nærmere benyttes faste overflader i terrænet til denne korrigering. Dette kunne være en af de årsager til at der igennem analyserne for afvigelserne mellem terrænpunkter og modellen bliver observeret større gennemsnitsafvigelser end afvigelserne som Kucharczyk et al. [2018, s. 227] har opnået. Ved sammenligning af resultaterne i tabel 10.12 på side 58, er det muligt at se denne potentielle korrektion, som ville have været minimal påvirkning på terrænmodellerne med en forskydning på omkring 1 cm op mod 2 cm i et enkelte tilfælde. I naturtypen lavt græs ville dette betyde en væsentlig forbedring, hvor der for de to andre naturtyper kun betyder mindre forbedringer.

11.2.1 Targets

De benyttede targets i dette forsøg er tilsvarende de targets, som blev benyttet i andre forsøg som GCP'er, heriblandt Kucharczyk et al. [2018]. Til indmåling af targets blev der benyttet samme metode som Kucharczyk et al. [2018] benyttede, hvor der opmåling af disse punkter blev udført med forsigtighed, således disse ikke blev skubbet ned til jorden. Programmet DJI, fjernede i forbindelse med klassificeringen af terræn, disse punkter hvortil enkelte targets var angivet til at ligge for højt i forhold til terræn. Dette var i enkelte tilfælde op mod 6-10 cm, hvilket i dette projekt blev anset som værende en grov fejl. Placering af targets bør således placeres med omhu, hvor der ved brug af metoder til dannelse af terrænmodellerne, kan blive udjævnet for punkter som ikke er på terræn.

11.2.2 Placeringen af kontrolpunkter

Brugen af targets, kan give misvisende resultater, afhængig af hvordan kontrollerne bliver udført, hvor der gennem dette projekt også er benyttet kontrolpunkter. Kontrolpunkterne består både af targets og punkter målt på befæstet overflader. Punkterne på de befæstet underlag, er ikke løftet fra terræn hvormed de antages ikke at blive fjernet i databehandlingen fra DJI. Dette kræver dog at disse punkter ikke bliver indmålt tæt på stejle overflader eller skrænter, hvor der kan forekomme udjævning af koterne i DJI eller andet program. Yderligere som det blev omtalt i tidligere afsnit 10.8 på side 57, kunne de befæstet områder blive anset som værende sin egen selvstændige naturtype, hvilket er tilfældet ved sammenligning af $\bar{d}_1$ værdierne mellem alle naturtyperne i tabel 10.12 på side 58. Ved korrigerende af terrænmodeller, bør der således også tages højde for hvilken naturtype, kontrolpunkterne bliver placeret i. Ved opmåling af kontrolpunkter i en naturtype som ikke er dominerende eller repræsentativ for arbejdsområdet som skannes, kan der forekomme ukorrigeret systematiske fejl i de naturtyper som ikke blev repræsenteret i kontrolmålingerne.

11.3 Terrænmodellens opløsning

I projektet blev der benyttet en rastermodel til repræsentation af terrænmodellen. Ved brug af denne metode til at repræsentere terrænmodellen bliver terrænet pixeleret, hvor det antages at terrænet har samme højde indenfor det samme kvadrat. Opløsningen af de undersøgte terrænmodeller i dette projekt er 50 cm, hvor hver pixel dækker et areal på $0.25m^2$. Der kan i forbindelse med antagelsen om at terrænet er plan og vandret, forekomme betydelige fejl, ved terræner hvor der forekommer hældninger under denne antagelse. Kucharczyk et al. [2018] benyttede formelen $V_{error} = \tan(\theta)RMSE_r$ til beregning af fejlbidraget fra terrænets hældning på. $RMSE_r$ refererer til de absolutte radiale fejl på de horisontale plan, hvor der ved forskydning af punktet kunne forekomme en anden højde end højden opmålt med GNSS.[Kucharczyk et al., 2018, s. 221] Der kunne potentielt benyttes den samme metode til at estimere fejlbidraget ved brug af rastermodeller, som repræsentation af terrænmodellerne. I tabel 11.1 er hældningen beregnet for naturtypen høj græs

Pkt. sammenligning	Afstand m	Højdeforskel m	Hældning grader	fejlbidrag m
NN	17,70	0,751	2,43	0,030
SS	14,70	0,676	2,63	0,032
VV	26,82	0,251	0,54	0,007
ØØ	32,00	0,176	0,32	0,004
NvSø	36,93	0,927	1,48	0,018
NøSv	30,00	0,500	0,95	0,012

Tabel 11.1. Tabel over sammenligning mellem fire yderpunkter i naturtypen høj græs, hvor der blev observeret den største hældning i området. Der er benyttet kompasretningerne til at navngive punkterne hvor NN beskriver de to nordlige punkter mens NvSø er krydsmål mellem Nordvestlige punkt hen til det sydøstlige punkt. Enheden i tabellen er meter og grader. Gennemsnittet for afvigelserne blev beregnet til 1.38 grader, hvilket ligger indenfor krydsmålene.

Som det fremgår af tabel 11.1 kan vinklerne for terrænet, højdeafvigelserne, distancerne og potentielt fejlbidraget ses. Fejlbidraget er angivet i meter, hvorved den potentielle usikkerhed ved brug af 50 cm rasteropløsning, kan medbringe betydelige usikkerheder, i terræn med større hældninger. Til beregning af fejlbidraget blev der benyttet 70 cm afstand for at demonstrere det værste tilfælde hvor bidragene mere realistisk er omkring det halve med udgangspunkt fra centrum af kvadrat fremfor udgangspunkt i hjørne til hjørne. Den gennemsnitlige hældning i området blev beregnet til at være 1,38 grader, hvorved fejlbidraget er 0.017 m i værste tilfælde. Bidraget til usikkerhederne er således i størrelsesordenen af spredningerne for terrænmodellerne og kunne således være en potentiel fejlkilde ved brug af terrænmodeller som sammenligningsgrundlag.

En alternative tilgang til sammenligningsgrundlaget har været ved brug af punkt-vise sammenligninger på baggrund af punktskyer, hvor nærmeste punkt benyttes. Kucharczyk et al. [2018] benyttede denne metode, hvor punkter opmålt med totalstation blev sammenlignet med det nærmeste punkt i punktskyen, i en maksimal afstand af 0.15 m [Kucharczyk et al., 2018, s. 220]. Hældningen af terrænet har stadig et bidrag, men bliver mindsket ved at benyttet en kortere afstand mellem sammenligningspunkterne. En lignende metode blev benyttet af MacDonell et al. [2023], hvor der blev brugt en afstand af 0.1 m omkring GNSS punkterne, hvor alle de nærliggende Lidarpunkter blev medtaget og en orthometriske højde blev beregnet på baggrund af Lidarpunkternes gennemsnit. MacDonell et al. [2023, A. 3.5] I besværligt terræn benyttede Bakula et al. [2019] 50 cm rasterterrænmodeller som sammenligningsgrundlag, hvor denne fremgangsmåde er sammenlignelig med metoden benyttet i dette projekt [Bakula et al., 2019, s. 9-10]. Der kan benyttes forskellige metoder til undersøgelse af resultaterne hvor der igennem dette projekt, som omtalt i afsnit 6.4, var udgangspunktet i terrænmodellerne.

Der er igennem dette projekt undersøgt problemformuleringen "Hvordan påvirkes terrænmodellen af forskellige flyveparametre under forskellige naturtyper?". I den forbindelse er det blevet undersøgt hvad en terrænmodel er, hvor dette er en repræsentation af terrænet. I moderne tid er terrænmodellerne ofte digitale repræsentationer, betegnet DTM, Digital Terrain Model.

Gennem kapitel 5 blev forskellige parametre undersøgt, på baggrund af erfaringer fra andre forsøg. Parametrene blev opdelt i forhold til før, under, og efter flyvning, afhængig af hvornår parametrene kunne ændres, eller havde en effekt. I 'underflyvnings'-kategorien blev flyveparametrene samlet, hvor der blev udvalgt to parametre, højde og hastighed, som udgangspunkt for videre analyse. Der blev yderligere valgt 3 forskellige naturtyper, høj græs, lav græs og skov eller krat. Disse parametre benyttes til at besvare problemformuleringen. Til undersøgelse sammenhænge og forskelle mellem parametrene blev en der opstillet en multivariable analyse, på baggrund af tre dimensioner hhv. naturtype, højde og hastighed. Forsøget blev udført på Sjælland, hvor der blev opmålt terrænpunkter med totalstationen, og foretaget seks droneflyvninger, hen over de tre naturtyper. Resultaterne fra de seks flyvninger blev igennem kapitel 9 analyseret på baggrund af tre overordnet analyser, absolutte, relative og komparative analyse. Der blev yderligere fremsat syv kvalitetsparametre som terrænmodellerne blev vurderet på. Resultaterne herfor blev præsenteret i kapitel 10, hvor de efterfølgende blev diskuteret i kapitel 9.

Der blev på baggrund af resultaterne konkluderet at hastighed og flyvehøjde havde en minimal effekt kvaliteten af terrænmodellen, hvor de forandringer, som blev observeret mellem terrænmodellerne, var minimale og i enkeltstående tilfælde, tilfældige. Der blev således på generelt plan ikke identificeret nogen udvikling mellem forskellige flyveparametre, på nær en enkelt. I naturtypen skov eller krat blev der observeret en mindre forbedring af de absolutte fejl, ved 60 meters flyvehøjde for begge hastigheder. Denne afvigelse blev diskuteret i kapitel 11, hvor der kunne være flere årsager til denne afvigelse. Det var således ikke muligt at konkludere, at denne forbedring var grundet en lavere flyvehøjde, eller anden relateret årsag. Påvirkningen af hastigheden og højden kan således ikke bekræftes til at have nogen betydelig effekt på kvaliteten af terrænmodellen. Dette er i overensstemmelse med de resultater som tidligere forsøg har konkluderet, hvor dette også er tilfældet i det undersøgte naturtyper fra dette projekt.

Det andet aspekt som denne analyse undersøger gennem problemformuleringen, er fordeling af forandringerne på de enkelte naturtyper. Der blev i denne forbindelse set tendenser til stabile forskellige absolutte afvigelser indenfor naturtyperne. Na-

turtyperne er således den mest betydningsfulde parameter i denne analyse, som introducerer systematiske afvigelser. Fejlene som blev introduceret, var systematiske i den forståelse af de var ensartet indenfor de enkelte naturtyper, men at der i det fleste områder kan forekomme forskellige naturtyper, som kan introducere forskellige afvigelser til terrænmodellerne.

Gennem dette projekt er der blevet konstateret ubetydelige påvirkninger af terrænmodeller, på baggrund af flyveparametrene. Flyveparametrene har herved ikke en betydning for kvaliteten af den endelige punktsky. Ved skanninger hen over skovarealer, ses der ved lavere flyvehøjde for begge hastigheder en forbedring på hhv. en og to cm. Der kan potentielt være fordele ved lavere flyvehøjde hen over skovarealer. Dette bør dog sættes i kontekst af gennemsnitsafvigelser op mod 6 cm, hvor spredningen for 10 m/s med 60 m, er 2,3 cm. Afvigelsen kan således stadig være en tilfældighed, hvor den er opstået to gange. De relative spredninger for punkterskyerne ligger mellem to og tre cm, hvor der ses tegn på en systematisk afvigelse, som ikke påvirker spredningen af punktskyen signifikant. Flyveparametrene har ikke en påvirkning på spredningerne, hvor droneoperatøren kan vælge de mest formålstjenestelige hastigheder og højder til udførslen af opgaven. Til udvælgelsen af disse parametre kan tabel 13.1 være behjælpelig

Afvigelse 5 m/s	120 m	90 m	60 m	n
Lav græs	4,3 cm	3,9 cm	3,9 cm	37
Høj græs	9,5 cm	8,9 cm	9,8 cm	90
Skov eller krat	8,6 cm	8,1 cm	7,1 cm	16
Afvigelse 10 m/s				
Lav græs	3,2 cm	3,8 cm	3,4 cm	37
Høj græs	8,5 cm	9,1 cm	9,7 cm	90
Skov eller krat	8,6 cm	8,6 cm	6,5 cm	16

Figur 13.1. Identisk tabel, som tabel 10.5, hvor gennemsnitsafvigelserne fra den absolutte analyse er opstillet. De forskellige parametre indstillinger er grupperet i kasser

Figur 13.1 viser de gennemsnitlige absolutte afvigelser fra den første analyse, hvor resultaterne fra de enkelte parametre er blevet grupperet i samme kasse. På baggrund af systematiske fejl, anbefales det at vælge flyveparametre, hvor gennemsnitsafvigelserne er tættere grupperet. Herved er de systematiske afvigelser ens, hvorved korrigering heraf, approksimere terrænniveauet bedre.

Den sidste anbefaling er en ændring i metoden hvormed terrænmodellerne kontrolleres og korrigeres. Kontrollen af terrænmodellerne bør udføres på baggrund af den mest udbredte naturtype i arbejdsområdet. Herved bliver de systematiske fejl bedre estimeret og korrigering heraf tilrettelagt den mest dominerende naturtype. Der bør om muligt at korrigeres forskelligt, på baggrund af forskellige naturtyper. Ved korrigering i henhold til den mest udbredt bevoksning, er der potentiale for overkompensation på befæstet overflader, hvor droneoperatøren bør være opmærksom på denne effekt.

Litteratur

- Alexiou et al., 2021.** Simoni Alexiou, Georgios Deligiannakis, Aggelos Pallikarakis, Ioannis Papanikolaou, Emmanouil Psomiadis og Klaus Reicherter. *Comparing High Accuracy t-LiDAR and UAV-SfM Derived Point Clouds for Geomorphological Change Detection*. ISPRS International Journal of Geo-Information, 10, 1–23, 2021. doi: <https://doi.org/10.3390/ijgi10060367>. Læst: 16-04-2025.
- ASPRS, 2024.** ASPRS. *ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data, Edition 2, version 2*. ISBN: 1-57083-104-1, PDF. asprs, 2024. doi: [10.14358/ASPRS.PAS.2024](https://doi.org/10.14358/ASPRS.PAS.2024). læst: 17-03-25.
- Bakula et al., 2019.** K. Bakula, M. Pilarska, W. Ostrowski, A. Nowicki og Z. Kurczyński. *Evaluation of Uncrewed Aircraft Systems' Lidar Data Quality*. ISPRS International Journal of Geo-Information, 8, 1–25, 2019. doi: <https://doi.org/10.3390/ijgi8120532>. Læst: 12-03-2025.
- Bakula et al., 2020.** K. Bakula, M. Pilarska, W. Ostrowski, A. Nowicki og Z. Kurczyński. *UAV LIDAR DATA PROCESSING: INFLUENCE OF FLIGHT HEIGHT ON GEOMETRIC ACCURACY, RADIOMETRIC INFORMATION AND PARAMETER SETTING IN DTM PRODUCTION*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 43, 21–26, 2020. doi: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2020-21-2020>. Læst: 12-03-2025.
- Bosch, 2022.** Bosch. *UniversalDistance 40C*. <https://www.bosch-diy.com/dk/da/p/universaldistance-40c-0603672101>, 2022.
- Breuning-Madsen et al., U.D.** Henrik Breuning-Madsen, Mads Holst og Sigvard S Villadsen. *Danmarks højeste terrænpunkter naturlige så vel som menneskeskabte gennem de sidste 150 år*, U.D. læst: 17-03-25.
- Brønderslev Kommune, U.D.** Brønderslev Kommune. *Hvad er en situationsplan?* <https://www.bronderslev.dk/borger/flyt-byg-og-bolig/hvad-er-en-situationsplan>, U.D. læst: 17-05-25.
- Dai et al., 2022.** Wenxia Dai, Qingfeng Guan, Shangshu Cai, Rundong Liu, Ruibo Chen, Qing Liu, Chao Chen og Zhen Dong. *A Comparison of the Performances of Unmanned-Aerial-Vehicle (UAV) and Terrestrial Laser Scanning for Forest Plot Canopy Cover Estimation in Pinus massoniana Forests*. Remote sensing, 14, 1–18, 2022. doi: <https://doi.org/10.3390/rs14051188>. Læst: 02-05-2025.

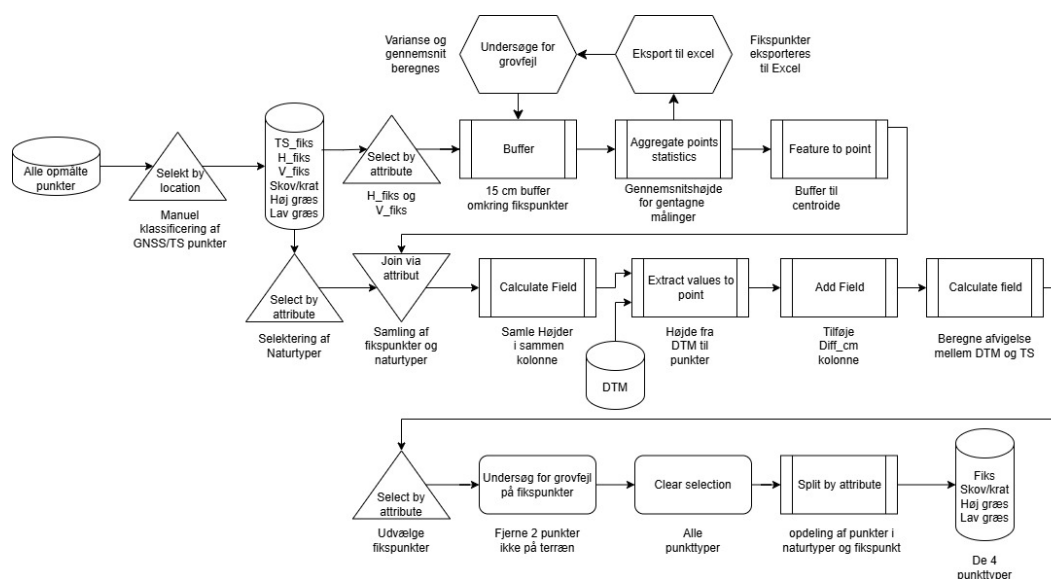
- Danmarks Naturfredningsforening, U.D.** Danmarks Naturfredningsforening. *Lavbundsjorde*.
<https://www.dn.dk/vi-arbejder-for/landbrug/lavbundsjorde/>, U.D. læst: 04-03-25.
- DJI, 2024.** DJI. *DJI TERRA Operation Guide*, DJI,
<https://dl.djicdn.com/downloads/dji-terra/20241008/DJI%20Terra%20operation%20Guide%20v4.2.pdf>, 2024. læst: 04-05-25.
- DJI, 2025a.** DJI. *Specs*. <https://enterprise.dji.com/matrice-350-rtk/specs>, 2025a. læst: 17-03-25.
- DJI, 2025b.** DJI. *Specs*. <https://enterprise.dji.com/zenmuse-l2/specs>, 2025b. læst: 17-03-25.
- DJI ENTERPRISE og BAAMTECH, U.D.** DJI ENTERPRISE og BAAMTECH. *DJI ZENMUSE L2 ACCURACY ANALYSIS AND USE CASE EXPLORATION*, DJI ENTERPRISE, U.D. læst: 17-03-25.
- Eker et al., 2021.** Remzi Eker, Ece Alkan og Abdurrahim Aydın. *A Comparative Analysis of UAV-RTK and UAV-PPK Methods in Mapping Different Surface Types*. European Journal of Forest Engineering, 7, 12–25, 2021. doi: <https://doi.org/10.33904/ejfe.938067>. Læst: 02-05-2025.
- Elsner et al., 2018.** Paul Elsner, Uwe Dornbusch, Ian Thomas, Dan Amos, James Bovington og Diane Horn. *Coincident beach surveys using UAS, vehicle mounted and airborne laser scanner: Point cloud inter-comparison and effects of surface type heterogeneity on elevation accuracies*. Remote Sensing of Environment, 208, 15–26, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.02.008>. Læst: 16-04-2025.
- Eriksen og Lauritzen, 2004.** Poul S. Eriksen og Steffen L. Lauritzen. *Teknisk måling*. ISBN:, PDF. Aalborg universitetsforlag, 2004. læst: 17-03-25.
- FLYGUYS, 2022.** FLYGUYS. *The Evolution of LiDAR*.
<https://flyguys.com/the-evolution-of-lidar/>, 2022.
- Kampen, 2024.** Kaitlyn Van Kampen. *Evaluating Resources and Misinformation*.
<https://guides.lib.uchicago.edu/c.php?g=1241077&p=9082343>, 2024. Læst: 18-12-24.
- Klimadatastyrelsen, 2024.** Klimadatastyrelsen. *Danmarks Højdemodel - Højdekurver*. <https://dataforsyningen.dk/data/926>, 2024. læst: 17-03-25.
- Klimadatastyrelsen, 2025.** Klimadatastyrelsen. *Flyfotos og laserscanning*.
<https://www.klimadatastyrelsen.dk/kortlaegning/flyfotos-og-laserscanning>, 2025. læst: 17-03-25.
- Kucharczyk et al., 2018.** Maja Kucharczyk, Chris H. Hugenholtz og Xueyang Zou. *UAV-LiDAR accuracy in vegetated terrain*. Journal of Unmanned Vehicle Systems, 6, 212–234, 2018. doi: <https://doi.org/10.1139/juvs-2017-0030>. Læst: 12-03-2025.

- LE34, U.D.** LE34. *Droner*. <https://www.le34.dk/da/droner/>, U.D. læst: 04-03-25.
- Lee et al., 2023.** Minyoung Lee, Ji-Chul Kim, Moo Hyun Cha, Hanmin Lee og Sooyong Lee. *Identifying Puddles based on Intensity Measurement using LiDAR*. Journal of Sensor Science and Technology, 32, 267–274, 2023. doi: <http://dx.doi.org/10.46670/JSST.2023.32.5.267>. Læst: 16-04-2025.
- MacDonell et al., 2023.** Craig John MacDonell, Richard David Williams, Georgios Maniatis, Kenny Roberts og Mark Naylor. *Consumer-grade UAV solid-state LiDAR accurately quantifies topography in a vegetated fluvial environment*. Earth Surface Processes and Landforms, 48, 2211–2229, 2023. doi: <https://doi.org/10.1002/esp.5608>. Læst: 12-03-2025.
- Mulcahy, 1995.** Karen A. Mulcahy. *Cartographic Terrain Depiction Methods*. http://www.geo.hunter.cuny.edu/terrain/ter_hist.html, 1995. læst: 16-04-25.
- NExT Lab, 2024.** NExT Lab. *BLK360 Terrestrial LiDAR Scanner*. <https://ms-kb.msd.unimelb.edu.au/next-lab/3d-scanning/guides/leica-blk-360>, 2024.
- Team Oxeltech, 2022.** Team Oxeltech. *All about LiDAR Technology – Complete Guide*. <https://oxeltech.de/en/lidar-technology/>, 2022. læst: 16-04-25.
- Terrain Models, U.D.** Terrain Models. *History of Terrain Models*. <https://terrainmodels.ethz.ch/history/>, U.D. læst: 16-04-25.
- Trimble, U.D.** Trimble. *Trimble R12i GNSS SYSTEM*, https://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-950413/022516-511G_Trimble%20R12i%20GNSS%20Receiver_SS_USL_0225_LR_SEC.pdf, U.D. læst: 17-05-25.
- Trimble, 2024.** Trimble. *Rover integrity*. <http://everest.gpsnet.dk/RoverIntegrity/data/Year.23/Month.Jan/Day.26/Rover%20Integrity%20.%20Default%20.%2020230125%20000802-20230126%20000802%20.%2020230126%20010744.html>, 2024. læst: 17-05-25.
- Trimble, 2024.** Trimble. *Trimble S5 TOTALSTATION*, https://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-781705/022516-153I-en-UK_TrimbleS5_Specsheet_A4_1224_LR_SEC.pdf, 2024. læst: 01-05-25.
- Warf, U.D.** Barney Warf. *Digital Terrain Model*. Encyclopedia of Geography, pages 754–756, U.D. doi: <https://doi.org/10.4135/9781412939591.n288>. Læst: 16-04-2025.

Bilag A

Databehandling i GIS

Når terrænmodellen er blevet dannet i DJI, er den efterfølgende eksporteret som en TIF fil til ArcGis Pro, hvor sammenligning mellem terrænpunkterne målt i terrænet, sammenlignes med højden på terræn angivet i den digitale terrænmodel. Fremgangsmåden hvorpå højderne fra terrænmodellen bliver overført til punkterne er beskrevet i nedenstående diagram.



Figur 1. Diagram over databehandlingsproces fra punktdata og terrænmodeller, til punkt data med afvigelser for højderne. Se sidste side i dette bilag for fuld størrelse billede

Til denne del af databehandlingen bliver der benyttet to typer af datasæt, hvor det ene punkterne opmålt med GNSS og TS, som bliver klassificeret baseret på deres placering, gennem visuel undersøgelse af ortofoto foretaget af droneoverflyvning. Det andet datasæt som benyttes, er de terrænmodeller som er blevet produceret af DJI på baggrund af flyvningerne.

Den første del af processen består i klassificering af GNSS/TS punkter, hvor de bliver delt op 6 kategorier; TS-fiks, H-fiks, V-fiks, skov/krat, høj græs og lavt græs. H og V-fiks er horisontale og vertikale fikspunkter hvor punktskyen kan kontrolleres på baggrund af nærheden til disse punkter. TS-fiks er punkterne benyttet til opstilling af totalstationen, hvor de tre sidste er naturtyperne. Da fikspunkterne er indmålt af flere omgang er det nødvendigt at midle resultaterne herfor, både på det horizontale plan og det vertikale plan. til dette formål er der benyttet en buffer på 15 omkring alle punkter, hvortil overlappende buffer er blevet dissolved, således de har en fælles

polygon. Efterfølgende benyttes 'Aggregate points statistics' som benytter sig af polygoner, til at beregne statistikker på punktdata. På baggrund af denne funktion, bliver gennemsnits højden for to eller tre punkter beregnet, og overført til bufferne. Efter denne overførelse er alle fikspunkterne grupperet efter hvilket punkt de tilhøre, samt gennemsnitshøjden for punktet. De er efterfølgende blevet eksporteret Excel, hvor der på baggrund af gennemsnitshøjden er blevet beregnet afvigelse for alle GPS punkterne. På baggrund af afvigelserne er der blevet beregnet en spredning, som benyttes til at kontrollere for grovfejl i intervallet $\pm 3\sigma$. Denne fase er kontrol sløjfen af fikspunkterne, hvortil grovfejl bliver fjernet og en gennemsnitsværdi bliver beregnet. Herefter benyttes feature to point, som benytter sig af centroide for polygoner til at identificere midten af polygonerne, hvorved denne metode er benyttet til at udpege en middelværdi for alle fikspunkternes placering. Der er således estimeret et middel for alle fikspunkterne på det vertikale og horisontale plan.

Det næste skridt i processen er at samle alle terrænpunkterne i en samling, hvorved dette gøres gennem en join mellem naturtyper, selekteret på baggrund skov/krat, høj græs, og lav græs, med fikspunkterne omtalt tidligere. Højderne på de forskellige punkter er fordelt ud på forskellige kolonner, hvor der benyttes en calculate field, på en af kolonnerne til at samle alle højderne i en kolonne.

Den efterfølgende efterbehandling er foretaget seks gange, tilsvarende det antal terrænmodeller som er blevet dannet.

For at kunne sammenligne punkterne med terrænmodellen, benyttes 'Extract values to point' funktionen som laver en ny kolonne og angiver højderne fra terrænmodellen til de enkelte punkter. Herefter oprettes endnu en kolonne, hvorved afvigelserne mellem de målte højder og terrænmodellen bliver beregnet på baggrund 'terrænmodel - observerede højde'. De positive afvigelser betyder således at terrænmodellen ligger for højt, og negative værdier betyder at terrænmodellen ligger for lavt i forhold til de indmålte højder.

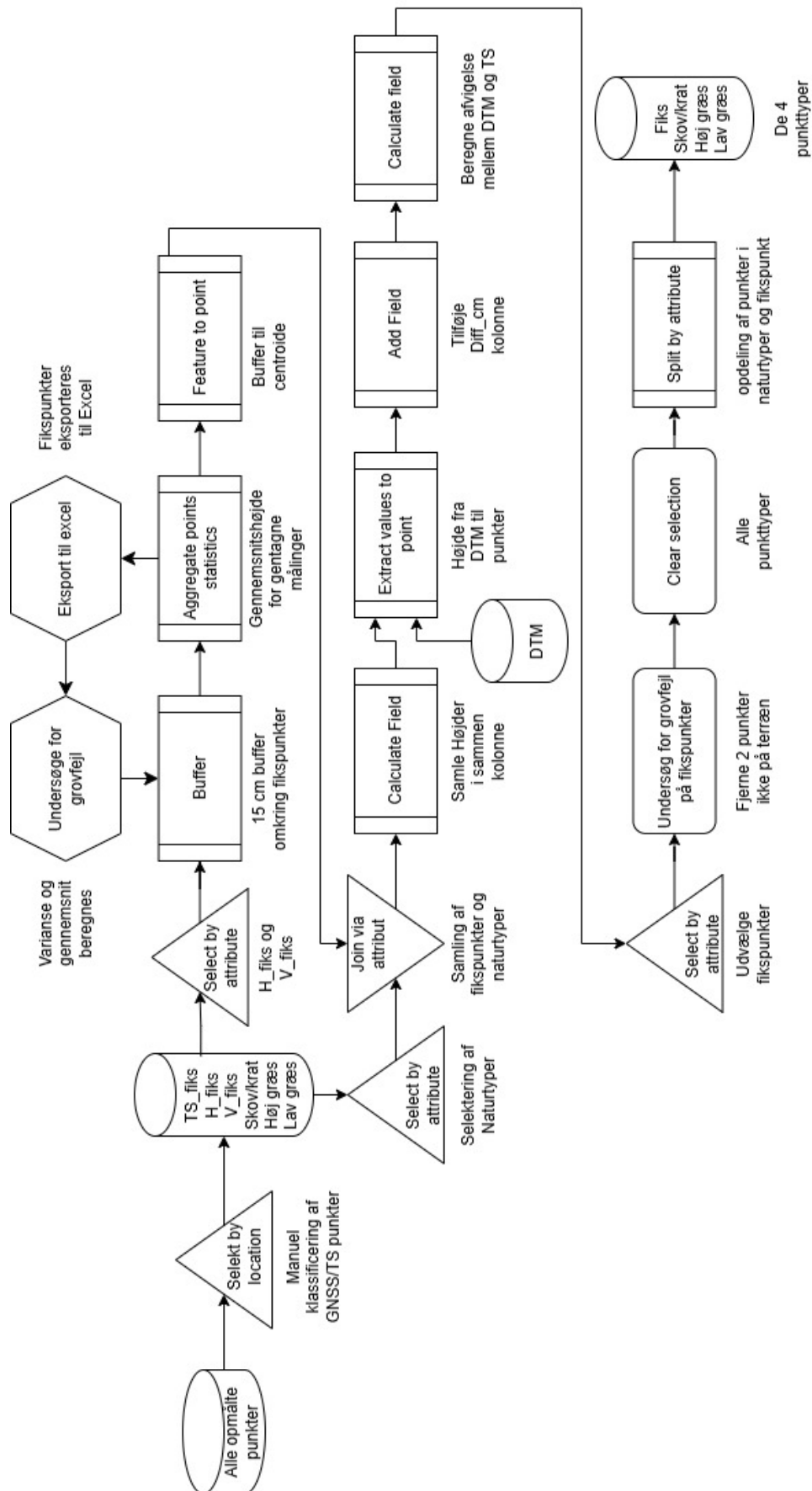
Ved den første DTM kontrolleres der for grovfejl på afvigelserne, som undersøges. Generelt er alle punkter placeret for højt, hvorved der primært undersøges punkter som ligger for lavet.

	OBJECTID1 *	SHAPE *	OBJECTID	COUNT	COUNT1	MEAN_Field4	ORIG_FID	RASTERVALU	Diff_cm
1	51	Point	51	136	3	12,668333	51	12,22019	-44,81461
2	43	Point	46	136	3	13,332	43	13,23497	-9,702704

Figur 2. De to punkter som ligger for højt i forhold til terrænmodellen.

Gennem denne undersøgelse blev to punkter identificeret som ikke lå på terræn og efterfølgende blev disse punkter fjernet fra datasættet. Ved visuel undersøgelse af ortofoto, blev det bestemt at disse fikspunkter indeholdte grovfejl, på baggrund af at de ikke var placeret på terræn, men på anden type kunstig overflade, i dette tilfælde et betonrør og en palle.

Efterfølgende opdeles de forskellige punkter i deres naturtyper og Fikspunkterne samles i en fil. Herefter blev de enkelte data eksporteret til Excel til yderligere databehandling.



Figur 3. Skitsering af dataprocessen til samling af de punktvis højde med udgangspunkt i kontrol og terrænpunkterne

Bilag B

Sms samtale med Landmaalerkompagniet

Stefan Winther Nielsen

"Hvorfor hyrer byggefirmaer en landinspektør til at udføre terræn målinger (situationsplan) i stedet for bare at tage udgangspunkt i den landsdækkende terrænmodel?"

Landmaalerkompagniet:

"Det gør de fordi at den landsdækkende terrænmodel er unøjagtigt, og ikke giver et øjebliksbillede. Hvis du f.eks. har lavet en byggemodning i et område for at lave vej osv. Så er alt terræn oftest ændret, og så passer højdemodellen ikke mere indtil næste gang den bliver lavet. Højdemodellen er også meget unøjagtig i større bevoksninger."

Bilag C

Mail korrespondance med Droneoperatør fra LE34

25-04-2025

Stefan Winther Nielsen:

“Hvad er standarden når I afleverer punktskyer til kunderne?”

Droneoperatør:

“I dette tilfælde har jeg fået DJI Terra til at lave højdemodeller med 0,5 meter per pixel.”

10-05-2025

Stefan Winther Nielsen:

“(…) Kan du beskrive hvordan I måler kontrolpunkter til punktskyen?”

Droneoperatør:

“(…) Her er lidt tekst om GPS-punkter.

For at lave KS og evt. kunne justere punktsky/højdemodel måler vi oftest med GPS en række punkter (måske 9) fordelt i området. Gerne på jævne, flade, hårde steder uden vegetation, fx asfalt. Hele modellen kan så justeres i højden til gennemsnittet.”

Bilag D

Absolutte og relative analyse

Parameter			Analyse metode	
Hastighed	Højde	Naturtype	DTM- TS	DTM-TS(korr.)
5 m/s	120 m	Lav	111	211
		Høj	112	212
		Skov	113	213
	90 m	Lav	121	221
		Høj	122	222
		Skov	123	223
	60 m	Lav	131	231
		Høj	132	232
		Skov	133	233
10 m/s	120 m	Lav	141	241
		Høj	142	242
		Skov	143	243
	90 m	Lav	151	251
		Høj	152	252
		Skov	153	253
	60 m	Lav	161	261
		Høj	162	262
		Skov	163	263

Tabel 1. Tabel over forsøgsopstillinger i forhold til de to analysemetoder. Tabellen er opdelt, hvor den venstre side angiver de tre parametre som indgår i den enkelte analyse, og i toppen er det angivet hvilken type analyse det er. Nummereringen af forsøgene er på baggrund af Analysemetode, flyvnings nummer og naturtype. Flyvningsnummer henviser til kombinationen af højden og hastigheden.

Komparativ analyse

Hastighed	Højde	Naturtype	DTM-DTM
5 m/s	90-120m	Lav	311
		Høj	312
		Skov	313
	60-120m	Lav	321
		Høj	322
		Skov	323
	60-90m	Lav	331
		Høj	332
		Skov	333
10 m/s	90-120m	Lav	341
		Høj	342
		Skov	343
	60-120m	Lav	351
		Høj	352
		Skov	353
	60-90m	Lav	361
		Høj	362
		Skov	363
120 m	5-10 m/s	Lav	371
		Høj	372
		Skov	373
90 m	5-10 m/s	Lav	381
		Høj	382
		Skov	383
60 m	5-10 m/s	Lav	391
		Høj	392
		Skov	393

Tabel 2. Tabel over forsøgsopstillinger i forhold til den tredje analysemetode. Tabellen er opdelt, hvor den venstre side angiver de tre parametre som indgår i den enkelte analyse, og i toppen er det angivet hvilken type analyse det er. Nummereringen af forsøgene er på baggrund af analysemetode og naturtype, hvor det midterste ciffer er opsat efter tilfældig rækkefølge, afhængig af sammenligningsgrundlaget.

Bilag E

Projektområdet



Figur 4. Ortofoto for projektområdet, billederne er indsamlet og processeret i forbindelse med projektudførelsen.

Bilag F

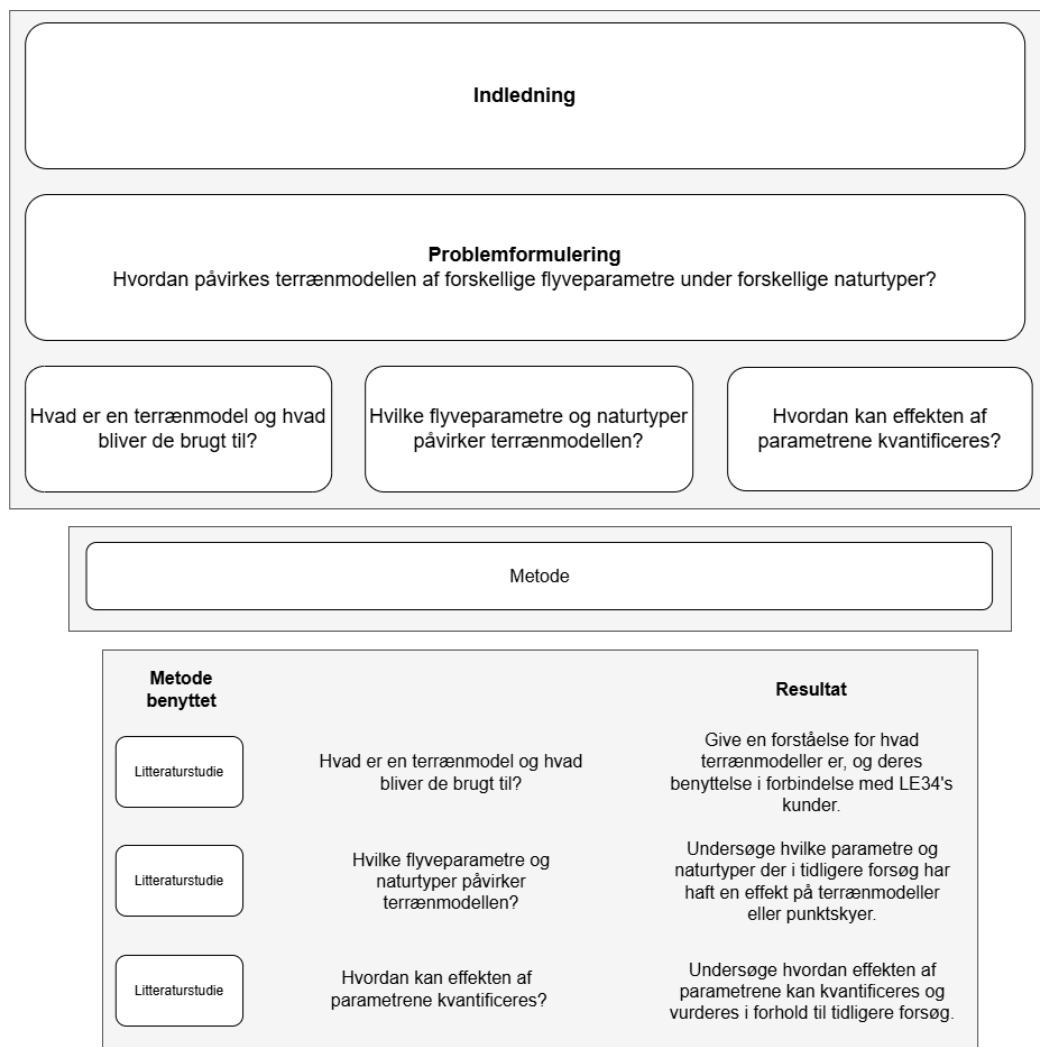
Kontrol, fiks og terrænpunkter opmålt i projektområdet



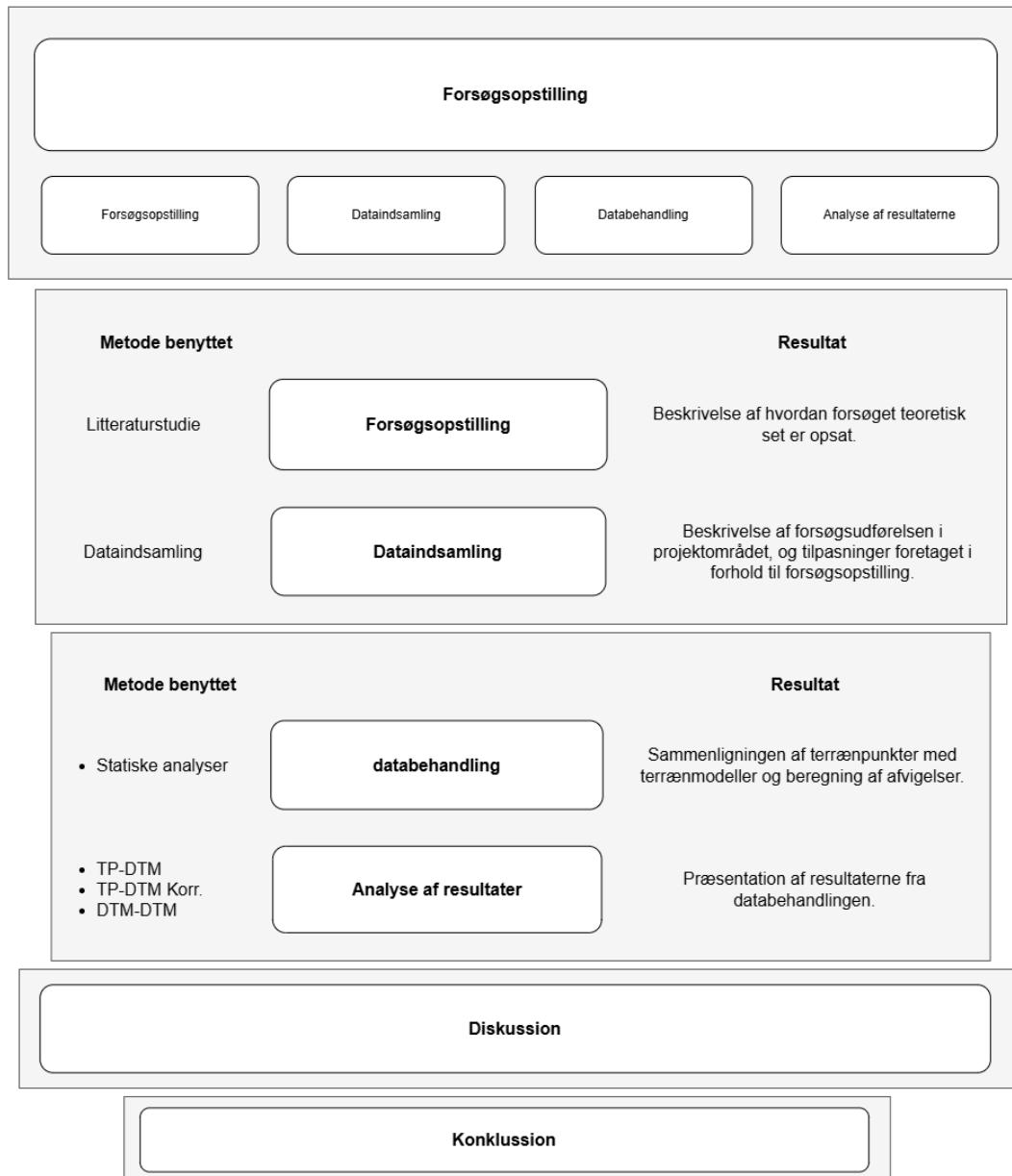
Figur 5. Ortofoto over projektområdet, hvor de opmålt punkter er markeret afhængig af deres klassificering og naturtype.

Bilag G

Projektstrukturen opdelt i to billeder



Figur 6. Øverste halvdel af projektstrukturen, hvor næste afsnit er forsøgsopstillingen.



Figur 7. Nederste halvdel af projektstrukturen, hvor der startes med projektopstilling og afsluttes med konklusionen.