# DIGITAL TERRÆNMODELLERING I ET NYT PERSPEKTIV

EN UNDERSØGELSE AF TERRÆNMODELLERING VHA. SKRÅFOTOS FRA FIRE OPTAGELSESRETNINGER



Institut for Samfundsudvikling og Planlægning Landinspektøruddannelsen Afgangsprojekt 2009

CHRISTIAN ØSTER PEDERSEN

Titel:	Digital terrænmodellering i et nyt perspektiv - En undersøgelse af terrænmodel- lering vha. skråfotos fra fire optagelsesretninger
Title:	Digital terrain modelling in a new perspective - A study of terrain modelling by means of oblique images from four directions of shooting
Projektperiode:	2. februar 2009 – 10. juni 2009
Forfatter:	Christian Øster Pedersen
Hovedvejleder:	Professor, Joachim Höhle
Bivejleder:	Lektor, Jens Juhl
Oplagsantal:	5
Sideantal:	118
Appendiksantal:	6
Bilagsantal:	8
Forsideillustration:	Samlet højdemodel og terrænmodel fra fire optagelsesretninger
Copyright:	Gengivelse er tilladt med tydelig kildeangivelse

## **Synopsis**

Rapporten behandler digital terrænmodellering vha. skråfotos fra fire optagelsesretninger, nord, syd, vest og øst. Rapporten er opdelt i to processer, fremstilling og kontrol. Fremstillingen behandler orientering af stereomodeller, fremstilling af højdemodeller vha. korrelation, filtrering af højdemodeller og interpolation/udfyldning af huller. Der fremstilles fem terrænmodeller, én for hver optagelsesretning og én samlet. Kontrollen foretages i forhold en eksisterende 2x2 m DTM, hvor forskellige faktorers indflydelse på nøjagtigheden og fuldstændigheden analyseres. Dernæst kontrolleres den af de fem terrænmodeller med den bedste nøjagtighed i forhold til GNSS RTK opmålte kontrolpunkter for tre forskellige områdetyper, åbne områder, nær bygninger og skovområder.

Fremstillingen har været præget af, at det anvendte program (Z/I ImageStation) til orienteringen og fremstillingen af højdemodellerne ikke er beregnet til at behandle skråfotos. Dette har betydet at der er foretaget justeringer, der har besværliggjort fremstillingen samtidig med at fordelene ved skråfotos ikke er blevet optimalt udnyttet.

Af de analyserede faktorers indflydelse konkluderes det at filtreringen, interpolationen og kombinationen af højdedata fra fire optagelsesretninger har størst indflydelse på nøjagtigheden. Filtreringen foretages overordnet tilfredsstillende, men har problemer i kanterne af højdemodellerne, der filtreres. Interpolationen er forbundet med stor usikkerhed, da de største fejl forekommer i områder hvor der er interpoleret nye punkter og da nøjagtigheden stiger mærkbart efter interpolationen. Kombinationen af højdedata fra fire optagelsesretninger kompenserer for de døde områder, der forekommer i højdemodeller fremstillet for én optagelsesretning. Herved forbedres nøjagtigheden og fuldstændigheden.

Nøjagtigheden (RMSE) i den samlede terrænmodel er 0,55 m i forhold til den eksisterende DTM, mens den inden for de tre områdetyper er 0,44 m i åbne områder, 0,19 m nær bygninger og 0,47 m i skovområder.

# Abstract

The report deals with digital terrain modelling by means of oblique images from four different direction of shooting, north, south, west and east. The report is divided into two processes, production and control. The production deals with orientation, production of the height models by means of matching, filtering of height models and interpolation of gaps. Five terrain models are produced, one for each direction of shooting and one combined. The terrain models are compared to an existing 2x2 m terrain model, and different factors influence on the accuracy and completeness are analysed. The best of the five terrain models is furthermore compared to GNSS RTK measured checkpoints for three different area types, open areas, near buildings and forest areas.

The production has been influenced by the fact that the program (Z/I ImageStation) for the orientation and production of the height models not are designed for oblique images. Therefore it was necessary to make some adjustments, which has made the production more difficult. Furthermore the advantages of the oblique images are not used fully.

It's conclude that following factors have the most influence on the accuracy and completeness, the filtering, the interpolation of gaps and the combination of height data from four direction of shooting. Overall the filtering is performed satisfying, but there are some problems in the edges of the models. The interpolation of gaps is associated with uncertainty, because the greatest errors are located in the interpolated areas. Furthermore the accuracy increases when the interpolation have been performed. The combinations of height data from the four direction of shooting compensates for dead areas, which often are seen in a height model from only one direction of shooting. Furthermore the combination improves the accuracy and completeness.

The accuracy (RMSE) in the combined terrain model is 0,55 m compared to the existing terrain model, and the accuracy in the three areas are 0,44 m in open areas, 0,19 m near buildings and 0,47 m in forest areas.

# Forord

Denne rapport er udarbejdet på Institut for Samfundsudvikling og Planlægning ved Aalborg Universitet af Christian Øster Pedersen på landinspektøruddannelsens 10. semester. Rapporten er udarbejdet i perioden primo februar til medium juni 2009.

Rapporten er et afgangsprojekt og behandler fremstillingen af terrænmodeller vha. skråfotos fra fire optagelsesretninger og efterfølgende kontrol og analyse af nøjagtighed, fuldstændig og automatiseringsgrad.

Der rettes en tak til COWI, herunder især Peter Knudsen og Lone Hendriksen, der venligst har stillet skråfotos, DTM og deres hjælp til rådighed.

Kildehenvisninger i rapporten er angivet efter Harvard metoden, dvs. med forfatterens efternavn, årstal for udgivelse samt eventuelt sidetal, f.eks. (Hansen 2007, s. 78). Refereres der til en hjemmeside, angives hjemmesidens ejer som forfatter eller titlen på hjemmesiden. Figurer og Tekstbokse er nummereret fortløbende i hvert kapitel, f.eks. angives figur 6 i kapitel 3, som Figur 3.6.

Der er i forbindelse med projektet udarbejdet Appendiks og Bilag. Derudover er der vedlagt en DVD, der er placeret i en plastlomme, bagerst i rapporten, hvorpå relevant data er gemt. Referencer til Appendiks er benævnt i alfabetisk orden, mens Bilag benævnes med romertal. Med hensyn til DVD'en refereres der til en nummereret mappestruktur, der ses i bilagslisten.

Christian Øster Pedersen

# Indholdsfortegnelse

1 Indledning	6
2 Foranalyse	10
2.1 Skråfotos	10
2.1.1 Klassifikation af luftfotos	10
2.1.2 Indre og ydre orientering	11
2.1.3 Måleforhold og objekter i skråfotos	12
2.1.4 Opsummering	13
2.2 Beskrivelse af skråfotosdata	13
2.2.1 Kamera	14
2.2.2 Optagelsesforhold	14
2.2.3 Opsummering	15
2.3 Fremstilling af DTM vha. nadirbilleder	15
2.3.1 Klassifikation af højdemodeller	16
2.3.2 Fremstilling af DTM vha. nadirbilleder	16
2.3.3 Elementers indflydelse på nøjagtigheden	16
2.3.4 Opsummering	17
2.4 Fremstilling af DTM vha. skråfotos	18
2.4.1 Modelkonfigurationer	18
2.4.2 Diskussion af modelkonfigurationer	18
2.4.3 Opsummering	20
2.5 Fremstilling at DSM/DTM vha. ikke-nadirbilleder	20
2.5.1 Multi-image matching for orthoimage production	
2.5.2 Convergent multi-image photogrammetry with automatic correlation	
2.5.3 Opsummering	
2.6 Opsamling af den initierende problemstilling	22
3 Problemformulering	25
	26
4 Metode og struktur	
4 Metode og struktur 4.1 Projektmetode	
4 Metode og struktur 4.1 Projektmetode 4.2 Projektstruktur.	
4 Metode og struktur 4.1 Projektmetode 4.2 Projektsruktur	26
4 Metode og struktur 4.1 Projektmetode 4.2 Projektstruktur 5 Fremstilling af DTM 5 I Område og detabaskriveles	26 26 28 <b>29</b>
4 Metode og struktur 4.1 Projektmetode 4.2 Projektstruktur 5 Fremstilling af DTM 5.1 Område- og databeskrivelse 5.1 J. Voispard – Aalbarg	26 26 28 29 29
4 Metode og struktur 4.1 Projektmetode 4.2 Projektstruktur 5 Fremstilling af DTM 5.1 Område- og databeskrivelse 5.1.1 Vejgaard - Aalborg 5.1.2 DDShy Danmarks Digitale Skråfste	26 26 28 29 29 29 29
<ul> <li>4 Metode og struktur</li></ul>	26 26 28 29 29 29 29 
<ul> <li>4 Metode og struktur</li></ul>	20 26 28 29 29 29 31 32 32
<ul> <li>4 Metode og struktur</li></ul>	20 26 28 29 29 29 29 31 32 32 34
<ul> <li>4 Metode og struktur</li></ul>	20 26 28 29 31 32 32 32 34 34
<ul> <li>4 Metode og struktur</li></ul>	20 26 28 29 29 29 31 32 32 32 34 35 36
<ul> <li>4 Metode og struktur</li></ul>	20 26 28 29 29 29 31 32 32 32 32 34 35 36 39
<ul> <li>4 Metode og struktur</li></ul>	20 26 28 29 29 31 32 32 32 34 35 36 39 39
<ul> <li>4 Metode og struktur</li></ul>	20 26 28 29 29 31 32 32 34 35 36 39 39 39 41
<ul> <li>4 Metode og struktur</li></ul>	20 26 28 29 29 29 31 32 32 32 32 34 35 36 39 39 39 39 41 43
<ul> <li>4 Metode og struktur</li></ul>	20 26 28 29 29 29 29 31 32 32 32 34 35 36 39 39 39 39 41 43 43
<ul> <li>4 Metode og struktur</li></ul>	20 26 28 29 29 29 31 32 32 34 35 36 39 39 39 39 41 43 43 43 43
<ul> <li>4 Metode og struktur</li></ul>	20 26 28 29 29 29 29 31 32 32 34 35 36 39 39 39 39 41 43 43 43 43 43
<ul> <li>4 Metode og struktur</li></ul>	20 26 28 29 29 29 31 32 32 34 35 36 39 39 39 39 39 41 43 43 43 43 43 43 43
<ul> <li>4 Metode og struktur</li></ul>	20 26 28 29 29 29 31 32 32 34 35 36 39 39 39 39 39 41 43 43 43 43 43 443 43 443
<ul> <li>4 Metode og struktur</li></ul>	20 29 29 29 31 32 32 34 35 36 39 39 39 41 43 43 43 43 43 45 48 48 48 50
<ul> <li>4 Metode og struktur</li></ul>	20 26 28 29 29 31 32 32 34 35 36 39 39 39 41 43 43 43 43 43 43 43 45 48 48 49 50 50
4 Metode og struktur	20 26 28 29 29 31 32 32 32 34 35 36 39 39 39 39 41 43 43 43 43 43 43 43 43 50 50 50 50 50
<ul> <li>4 Metode og struktur</li></ul>	20 26 28 29 29 31 32 32 32 32 34 35 36 39 39 39 39 41 43 39 41 43 43 43 43 45 45 48 48 49 50 50 55
<ul> <li>4 Metode og struktur</li></ul>	20 26 28 29 29 29 31 32 32 34 32 34 35 36 39 39 39 39 41 43 43 43 43 43 45 43 43 50 50 55 55
4 Metode og struktur	20 26 28 29 29 29 29 31 32 32 34 34 35 36 39 39 39 39 39 39 39 39 39 39 39 39 39
<ul> <li>4 Metode og struktur</li></ul>	20 26 28 29 29 29 31 32 32 34 35 36 39 39 39 39 39 41 43 43 43 43 43 43 55 50 50 51 55 55 55 55 55

6 Kontrol og analyse af DTM	
6.1 Planlægning af kontrol	62
6.1.1 Identificering	62
6.1.2 Planlægning	63
6.1.3 Planlægning af spredningsberegning	64
6.1.4 Planlægning af analyse af nøjagtigheden og fuldstændigheden	67
6.1.5 Planlægning af kontrol af nøjagtighed	
6.2 Spredningsberegning	71
6.2.1 Normalfordelt eller ej	72
6.3 Analyse af nøjagtigheden og fuldstændigheden	73
6.3.1 Analyse af kalibrering	73
6.3.2 Analyse af filtreringen og interpolationen	74
6.3.3 Analyse af højdedata fra flere optagelsesretninger	77
6.3.4 Analyse af optagelsesretning og fordeling af punkter i punktskyerne	
6.3.5 Analyse af det varierende måleforhold og basis/højde forholdet	81
6.3.6 Opsummering	83
6.4 Kontrol af nøjagtigheden	83
6.4.1 Kontrol i forhold til DTM 2x2 m	83
6.4.2 Kontrol i forhold til GNSS opmålte kontrolpunkter	85
6.4.3 Opsummering	87
7 Konklusion	
8 Perspektivering	
Appendiks A Diverse formler	
Appendiks B Fremstilling af DTM vha. nadirbilleder	
	100
Appendiks C Parametre i isuwi	
Appendiks D Parametre i ISAE	
Appendiks E Filbetegnelser og -ekstension	
Appendiks F Spredningsberegning	
Kildeliste	115
Bilagsliste	

# 1 Indledning

Skråfotos er det nye hit inden for kortlægning og visualisering fra luften, men skråfotos er ikke noget nyt fænomen, da de første billeder optaget fra luften blev optaget i et skråt perspektiv. Billederne blev optaget i 1858 over Paris i 1.200 fods højde af Gaspard Felix Tournachon. (Kraus 2007, s. 5)

Der er siden 1858 sket en kolossal udvikling inden for fotogrammetrien med hensyn til kameraer, software, flyveplanlægning, automatisering, georeferering osv. En væsentlig del af fotogrammetriens udvikling har været stereofotogrammetrien, der i høj grad har præget den fotogrammetriske kortlægning verden over. Stereofotogrammetrien har igennem de sidste årtier dannet grundlaget for den geografiske og topografiske kortlægning i Danmark, herunder f.eks. tekniske kort, Digitale TerrænModeller (DTM) og ortofotos.

Skråfotos har de senere år haft en væsentlig fremgang på kortlægningsmarkedet, hvilket i høj grad skyldes en stærk offensiv fra Pictometry (en amerikansk producent), deres licensbruger (BlomInfo, der har eneret til at optage skråfotos med Pictometry i Europa) og deres konkurrenter (f.eks. hollandske Track'Air og deres MIDAS system, der er solgt til COWI). Derfor optages der på nuværende tidspunkt skråfotos af langt de fleste større byer i de højtudviklede lande, herunder Danmark (Petrie 2009).

Kortlægningsfirmaerne udbyder skråfotos som et supplement til ortofotos, hvor det er muligt at se detaljer på facader og andre vertikale flader, hvilket bevirker at det nu er muligt at opleve byområder og -rum i et helt nyt perspektiv. Anvendelserne af skråfotos er mange, men anvendelserne er i høj grad præget af visualisering, dokumentation og informationsformidling, hvilket tydeliggøres af nedenstående anvendelser.

- Indsatsplanlægning og beredskab
- Site-hunting til telekommunikation
- Byplanlægning
- Ejendoms- og bygningsforvaltning
- Salgsannoncer

(COWI 2007) (Karbo & Simmons 2007)

I Danmark udbydes skråfotos fra de to konkurrerende kortlægningsfirmaer COWI og BlomInfo. COWI optager skråfotos med Track'Airs MIDAS system, mens BlomInfo anvender Pictometry systemet, og begge systemer vil kortfattet blive beskrevet i det efterfølgende.

### Skråfotosystemer

Der findes på markedet flere forskellige former for skråfotosystemer, der tjener forskellige formål og overordnet kan skråfotosystemerne opdeles i tre kategorier alt efter deres konfiguration. I det nedenstående beskrives de tre kategorier kortfattet og i Figur 1.1 ses principskitser for billedkonfigurationerne.

- Vifte-konfiguration, hvor flere linser placeres på en linje for at opnå den videst mulige dækning på tværs af flyveretningen.
- Blok-konfiguration, hvor flere linser samles i en regulær gruppe for at opnå et større dækningsområde.
- Malteserkors-konfiguration, hvor typisk fire kameraer placeres med forskellige optageretninger for at opnå et skråt perspektiv og et kamera placeres lodret for at optage et nadirbillede.

(Petrie 2009)



Figur 1.1: Principskitser af billedkonfigurationer for vifte-, blok- og malteserkors-konfigurerede skråfotosystemer. Frit tegnet efter Petrie (2009).

Vifte- og blok-konfigurationerne beskrives ikke yderligere, da deres overordnede formål er at forbedre og forøge dækningen i ét eksponeringsøjeblik. Malteserkors-konfigurationen beskrives yderligere, da systemets overordnede formål er at optage billeder i et skråt perspektiv, der er egnet til visualiserings- og formidlingsopgaver, hvilket findes interessant, da dette give nye anvendelsesmuligheder.

De to tidligere beskrevne systemer Pictometry og MIDAS, der anvendes i Danmark, er begge designet efter malteserkors-konfigurationen, og i det nedenstående vil de to systemers overordnede konfiguration kortfattet blive beskrevet. Men udover Pictometry og MIDAS, findes der en række andre producenter af forskellige skråfotosystemer, herunder blandt andet Azicam (malteserkors – 1 roterende kamera) og Intergraph (blok – 8 kamera, 4 x pan, R, G, B, IR). Disse systemer vil dog ikke blive beskrevet yderligere, da fokus er skråfotosystemer tilgængelige i Danmark (Petrie 2008).

#### Danske skråfotosystemer

Pictometry er et amerikansk patenteret skråfotosystem og MIDAS er et hollandsk udviklet skråfotosystem. Begge systemer er baseret på malteserkors-konfigurationen og leverer georefererede skråfotos, hvilket muliggør at billederne kan visualiseres sammen med raster- og vektordata. Georefereringen sker i begge systemers tilfælde gennem direkte georeferering, det vil sige at billederne georefereres uden brug af paspunkter. Den direkte georeferering kræver som minimum Inertial Measurement Unit (IMU), Global Navigation Satellit System (GNSS) og et ur til synkronisering af data indsamlet fra de forskellige enheder.

Tilknyttet Pictometry er det udviklede program Electronic Field Study (EFS), hvori det er muligt at foretage opmålinger af bygningshøjder, afstande, enkelte koordinater, koter osv. Opmålingen sker i et enkelt billede (monoopmåling) gennem en patenteret metode, hvor hver enkel pixel georefereres og tilknyttes en DTM (Pictometry 2006). Der findes på markedet lignende programmer, der dog ikke tilknytter sig et specifikt skråfotosystem, herunder f.eks. programmer MultiVision og ObliVision (Petrie 2008). Disse programmer er ligeledes baseret på monoopmåling, hvor der er tilknyttet en DTM til billederne.

BlomInfo har i Europa eneret til at sælge og optage billeder med Pictometry, og har i denne forbindelse planlagt at kortlægge alle vesteuropæiske byer med et indbyggertal over 50.000, hvilket tæller cirka 900 byer og cirka 100.000 kvm (Karbo & Simmons 2007).

COWI har erhvervet MIDAS og er på nuværende tidspunkt i gang med at kortlægge større byer i Danmark, herunder kan det nævnes at København, Århus, Aalborg, Odense m.fl. allerede er kortlagt (Krak 2009).

#### Indgangsvinkel til projektet

Generelt for begge skråfotosystemer er, at de producerede skråfotos primært anvendes til visualiserings- og formidlingsopgave, og selvom det er muligt at opmåle bygningshøjder, koter osv. sker dette med ringe nøjagtighed, se Tekstboks 1.1. Den ringe nøjagtighed og de begrænsede muligheder for at foretage opmålinger i billederne vurderes at være den primære årsag til at skråfotos er et visualiserings- og formidlingsværktøj frem for et kortlægningsværktøj. Et interessant arbejdsområde kunne derfor være at undersøge mulighederne for at anvende skråfotos til andre opgaver end visualisering og formidling, herunder f.eks. opmåling af terræn- og facadepunkter, fremstilling af DTM, Digitale SurfaceModeller (DSM) og fotorealistiske 3D-bymodeller. Nye anvendelsesmuligheder af skråfotos er tidligere blevet undersøgt ved Aalborg Universitet. Undersøgelsen viste at det gennem en stråleudjævning, hvor de indre og ydre orienteringer estimeres på baggrund af en række paspunkter, er muligt at opnå en væsentlig forbedret nøjagtighed, se Tekstboks 1.1, hvilket muliggør anvendelsesområder udover visualisering og formidling.

Spredninger beregnet på baggrund af opmåling i EFS, RMSE på en højde 0,6 meter (seks bygningshøjder), RMSE på en direkte afstand på jorden 1,5 meter (47 direkte afstande) og RMSE<sub>x</sub> 1,5 meter og RMSE<sub>y</sub> 1,9 meter (40 plankoordinater). (Overbye 2007)

Spredninger beregnet efter udført stråleudjævning, 26 kontrolpunkter på terræn RMSE<sub>E</sub> 0,14 meter, RMSE<sub>N</sub> 0,14 meter og RMSE<sub>H</sub> 0,11 meter – 13 facadepunkter RMSE<sub>E</sub> 0,09 meter, RMSE<sub>N</sub> 0,27 meter og RMSE<sub>H</sub> 0,20 meter. (Johannessen et al. 2008)

#### Tekstboks 1.1: Nøjagtighedsundersøgelser af opmåling i skråfotos.

Muligheden for at anvende skråfotos til andre opgaver end visualisering og formidling er interessant, da skråfotos inden for de sidste år er blevet et udbredt produkt på kortmarkedet, hvorfor alle anvendelsesmuligheder bør undersøges. Samtidig er det allerede vist, at det er muligt at forbedre nøjagtigheden gennem en stråleudjævning og derved åbne op for nye arbejdsområder, hvilket gør emnet endnu mere interessant.

Et interessant arbejdsområde er hvorvidt det vha. skråfotos fra et malteserkors-konfigureret skråfotosystem, er muligt at fremstille en DTM. Denne undersøgelse findes interessant i forhold til to aspekter. (1) En naturlig nysgerrighed for at undersøge hvorvidt det kan lades sig gøre og under hvilke forudsætninger, samt hvilke forhold, der har indflydelse på nøjagtigheden. (2) Inden der kan foretages opmåling i EFS, MultiVision eller ObliVision (monoprogrammerne) skal der tilknyttes en DTM. Det vil sige at der skal fremstilles eller købes et ekstra produkt. I så fald at det er muligt at fremstille en anvendelige DTM på baggrund af skråfotos ville ét produkt blive sparet og det ville ligeledes være muligt at fremstille produkter til EFS, MultiVision eller ObliVision for områder, hvor for der ikke findes en eksisterende DTM.

Et andet interessant arbejdsområde i forhold til anvendelsen af skråfotos, er muligheden for at fremstille en DSM. Fremstillingen af en DSM vha. skråfotos vil udnytte de umiddelbare fordele ved skråfotos, at se én bygning fra flere forskellige vinkler samtidig med at facaderne tydeligt fremstår.

Med udgangspunkt i de ovenstående interesser afgrænses projektet til kun at behandle ét af de to ovenstående arbejdsområder, fremstillingen af en DTM vha. skråfotos.

#### Initierende problemstilling

Udbredelsen og anvendelsen af skråfotos er steget kraftigt de sidste år, hvilket har betydet at næsten alle større byer i Danmark i dag skal have skråfotos. Fokusanvendelserne af skråfotos er visualisering og formidling og den primære opmåling i skråfotos sker via monoprogrammer som EFS, MultiVision eller ObliVision, hvor opmåling sker på halvmeterniveau. Det er dog tidligere vist at det er muligt at anvende skråfotos til opmåling på decimeterniveau.

På baggrund af en naturlig nysgerrighed og med udgangspunkt i at opmålinger i skråfotos kan foretages på decimeterniveau er det interessant at undersøge om det er muligt at fremstille en DTM vha. skråfotos. I så fald og afhængig af nøjagtigheden, ville det være muligt at tilknytte DTM'en til billederne og efterfølgende anvende monoprogrammer som EFS, MultiVision og ObliVision. Interessen for skråfotos og muligheden for at fremstille en DTM leder op til dette projekts initierende problemstilling.

# "Kan skråfotos fra et malteserkors konfigureret skråfotosystem anvendes til fremstilling af en digital terrænmodel og under hvilke forudsætninger?"

#### Rapporten

I det nedenstående vil rapportens indhold kort blive beskrevet, hvilket skal give et indledende og kortfattet indblik i rapportens indhold og struktur. Rapporten inddeles overordnet i tre elementer, en foranalyse, en problemformulering og en hovedanalyse.

Foranalysen har til formål at belyse den initierende problemstilling, hvilket sker gennem et litteraturstudie af forudsætningerne for at fremstille en DTM generelt og vha. skråfotos. Dette indebærer at der skabes et indgående kendskab til principperne bag skråfotosystemet og fremstilling af en DTM. Yderligere vil det blive undersøgt hvorvidt der er foretaget lignende undersøgelser, der kan belyse den initierende problemstilling.

Problemformuleringen danner grundlaget for strukturen og indholdet af hovedanalysen, og indeholder en konkret problemformulering, der afgrænser rapportens arbejdsområde.

Hovedanalysen har til formål at besvare problemformuleringen gennem analyser og vurderinger, der bearbejdes vha. teori og empiri. Hovedanalysen opdeles i to kapitler, et fremstillingskapitel og et kontrol kapitel.

Første kapitel i hovedanalysen behandler fremstillingen af en eller flere terrænmodeller. Dette indebærer orientering af billeder og modeller, automatisk fremstilling af højdemodeller og filtrering af højdemodellerne til en eller flere terrænmodeller.

Andet kapitel i hovedanalysen behandler en kontrol og analyse af det færdige produkt med hensyn til nøjagtighed, fuldstændig osv.

# 2 Foranalyse

Formålet med dette kapitel er at belyse og afgrænse projektets initierende problemstilling, så der kan udarbejdes en problemformulering, der skal danne grundlag for hovedanalysen.

Belysningen og afgrænsningen af projektets initierende problemstilling sker gennem et litteraturstudie og en forudgående beskrivelse af tilgængelig data. I litteraturstudiet vil der blive set på matematikken og geometrien bag skråfotos, samt forudsætningerne og principperne for at fremstille en DTM, hvilket vil blive diskuteret i forhold til skråfotos. Yderligere vil tidligere og relevante undersøgelser blive beskrevet.

I afsnit 2.1 *Skråfotos* vil matematikken og geometrien bag skråfotos blive beskrevet. Der vil blive lagt vægt på generelle fotogrammetriske beskrivelser, herunder f.eks. måleforhold samt indre og ydre orientering. Beskrivelsen vil ligeledes ske for nadirbilleder, da dette vil synliggør forskellene mellem to produkter.

I afsnit 2.2 *Beskrivelse af skråfotosdata* beskrives det skråfotodata, der er tilgængeligt i Danmark. Beskrivelsen foretages på baggrund af tilgængeligt markedsføringsmateriale samt artikler og beskriver blandt andet flyvehøjde, pixelstørrelse, kamera, overlap osv.

I afsnit 2.3 *Fremstilling af DTM vha. nadirbilleder* vil principperne og forudsætningerne for fremstillingen af en DTM vha. nadirbilleder blive beskrevet. Beskrivelsen vil fokusere på de generelle principper for fremstilling af en DTM, herunder stereomodeller, korrelation og filtrering.

I afsnit 2.4 *Fremstilling af DTM vha. skråfotos* diskuteres fremstillingen af en DTM vha. skråfotos i forhold de generelle principper for fremstilling af en DTM vha. nadirbilleder som blev præsenteret i afsnit 2.3. Diskussion foretages yderligere på baggrund af databeskrivelsen i afsnit 2.2.

I afsnit 2.5 *Fremstilling af DSM/DTM vha. ikke-nadirbilleder* vil tidligere og relevante undersøgelser blive beskrevet. Undersøgelserne belyser blandt andet fremstilling af en DSM på baggrund af terrestriske billeder.

I afsnit 2.6 *Opsamling af den initierende problemstilling* samles der op på de erfaringer, der gøres gennem foranalysen i forhold til den initierende problemstilling og på denne baggrund udarbejdes der en problemformulering.

## 2.1 Skråfotos

Formålet med dette afsnit er at tilegne en viden omkring skråfotos, herunder forskellene mellem skråfotos og nadirbilleder. Dette indebærer en generel og kortfattet beskrivelse af matematikken og geometrien bag skråfotos og nadirbilleder.

Indledningsvis beskrives de grundlæggende forskelle mellem nadirbilleder og skråfotos illustrativt, hvorefter orienteringsparametrene (indre og ydre) beskrives. Til sidst beskrives det hvilke konsekvenser det har at et billede er optaget i et skråt perspektiv for henholdsvis måleforhold, objekter i billedet osv.

## 2.1.1 Klassifikation af luftfotos

Definitionen af hvorvidt, der er tale om et nadirbillede eller et skråfoto afhænger af hældningen af billedet. Alle billeder er optaget med en hældning, da det er sjældent at optageretningen er sammenfaldende med nadirpunktet.

Der tages i projektet udgangspunkt i en tredelt klassifikation af luftfotos på baggrund af deres hældning ( $\tau$  - nadirviklen), se Figur 2.1. Det vil sige at luftfotos med en hældning mindre end 5 grader defineres som nadirbilleder og luftfotos med en hældning større end 5 grader defineres som skråfotos. Der differentieres yderligere mellem skråfotos alt efter om horisonten er synlig i billedet eller ej. Er horisonten synlig, er der tale om et skråfoto med høj hældning og hvis ikke, et skråfoto med lav hældning. (Warner, Graham & Read 1996, s. 9)



Figur 2.1: Klassifikation af luftfotos på baggrund af hældningen. Frit tegnet efter Warner, Graham & Read (1996).

### 2.1.2 Indre og ydre orientering

Orienteringen af et billede er defineret ved den indre og ydre orientering. Den indre orientering definerer billedets koordinatsystem og er en orientering af kameraets indre, mens den ydre orientering definerer billedets placering i et lokalt eller globalt referencesystem.

#### Indre orientering

Den indre orientering er ikke bestemt af billedet men af kameraet, der optager billedet. Et billede, digitalt eller analogt, er defineret ved et koordinatsystem, der enten er specificeret i pixelkoordinater eller billedkoordinater, se Figur 2.2. Billedformatet kan ligeledes enten være defineret i pixels (rækker og koloner) eller enheder (centimeter eller millimeter). Billedformatet er kendt, men placeringen af billedkoordinatsystemet er ukendt og denne bestemmes gennem en kamerakalibrering.

Kamerakalibreringen bestemmer følgende parametrene af den indre orientering, (c) – kamerakonstant, som repræsenterer afstanden fra kameraets projektionscenter vinkelret op i billedplanet, ( $x_{pp}$ ,  $y_{pp}$ ) – hovedpunkt, som repræsenterer en forskydning af billedets midtpunkt og linsefortegning, som kan opdeles i radial og tangentiel linsefortegning. Radialfortegningen er en forskydning af et billedpunkts teoretiske korrekte placering. Den tangentielle fortegning er et produkt af fejl i produktionen af linsekomponenterne, og findes ofte kun inden for kommercielle kameraer, hvorfor der ofte ses bort fra denne.

(Kraus 2007, 2.1.2, 2.2.2, 3.1.1)



Figur 2.2: (Venstre) Billedkoordinatsystem for analogt kamera. (Højre) Billedkoordinatsystem og pixelkoordinatsystem for digitalt kamera. Frit tegnet efter Kraus (2007).

Der er ingen forskel i den indre orientering for henholdsvis et skråfoto og et nadirbillede.

#### Ydre orientering

Den ydre orientering defineres gennem seks parametre, projektionscentrets tre koordinater O(X<sub>0</sub>, Y<sub>0</sub>, Z<sub>0</sub>) og tre rotationer D( $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$ ) omkring de tre akser X, Y og Z.

I det tidligere afsnit blev orienteringen kun beskrevet i forhold til én rotation (hældningen), men billedet er ofte roteret i forhold til alle tre akser. De tre rotationer er  $\omega$  (drejning omkring x),  $\varphi$ (drejning omkring y) og  $\kappa$  (drejning omkring z), se Figur 2.3. Rotationerne beskriver sammen med projektionscentret og en skala forholdet mellem billedets koordinatsystem og det definerede referencesystem.



Figur 2.3: Forhold mellem billedkoordinatsystem og referencesystem. Frit tegnet efter Luhmann et al. (2006).

Normaltilfældet af et billede er defineret som tilfældet hvor der ingen rotationer er, det vil sige at der er tale om et nadirbillede. Med hensyn til et skråfoto vil der altid være mindst én mærkbar rotation og i langt de fleste tilfælde to. Én rotation, der definerer med hvilke hældning billedet bliver optaget og én, der definerer hvorvidt billedet er optaget mod nord, syd, øst eller vest.

## 2.1.3 Måleforhold og objekter i skråfotos

Måleforholdet i et nadirbillede anses for at være konstant for et fladt terræn, mens det i et skråfoto varierer, som konsekvens af billedets hældning. Et estimat for måleforholdet i et nadirbillede og et skråfoto beregnes efter formlerne i Tekstboks 2.1.

Måleforhold i nadirbillede	$m_{B-NADIR} = \frac{h}{c}$	(Kraus 2007)
hvor h er flyvehøjden c er kamerakonstanten		
Måleforhold i skråfoto	$m_{B-SKR\AA} = \frac{h \times \cos(\beta - \tau)}{c \times \cos(\beta)}$	(Höhle 2008A)
hvor βer vinklen mellem lodlinjen og τer vinklen mellem lodlinjen og	g strålen til et tilfældigt punkt P på jorden g optageaksen (nadirdistancen)	

Tekstboks 2.1: Beregning af estimat for måleforholdet for henholdsvis nadirbilleder og skråfotos, se Figur 2.4.



Figur 2.4: Principskitser for beregning af måleforhold for henholdsvis nadirbilleder (højre) og skråfotos (venstre).

Det ses at måleforholdet i et skråfoto kan varierer væsentligt, hvilket betyder at objekter illustreres forskelligt alt efter hvor i billedet de ligger. Forrest i billedet er Ground Spatial Distance (GSD) lav og det er muligt at se relative små objekter (f.eks. brønddæksler), mens den bagest i billedet er høj og det derfor kan være svært at se selv samme objekt. Det ville sige at det varierer hvilke objekter, der er mulig at genkende og dermed opmåle. Udover at objekter varierer i størrelse vil objekter ofte blive fortegnet i forhold deres oprindelige form, da de er optaget i skråt perspektiv. Dette betyder at objekterne inden for et område ikke vil blive afbilledet ens, da de er optaget i forskelligt måleforhold og fra forskellige optagelsesretninger, hvilket er illustreret i Figur 2.5.



Figur 2.5: Fortegnet brønddæksel alt efter optagelsesretning.

Afbildet objekter vil også kunne variere i farver og kontrast, eftersom de vil reflektere lys forskelligt i forhold til kameraet, alt efter hvor de er fotograferet fra. Yderligere er det heller ikke sikkert at et vilkårligt objekt eller punkt kan ses i hvilket som helst billede, da der ofte vil være områder, der ligger bag bygningerne eller lignende (døde områder). De døde områder er et gennemgående problem ved skråfotos og afhængigt af bygningshøjderne i et område vil mindre eller større områder være døde.

## 2.1.4 Opsummering

Et skråfoto er karakteriseret ved en nadirvinkel over 5 grader, hvilket betyder at der i billedet er et varierende måleforhold og forskel i GSD'en. Derudover sker der ligeledes en fortegning af objekter pga. det skrå perspektiv og fortegningen varierer alt efter optagelsesretning og måleforhold. Det skrå perspektiv er ligeledes skyld at ofte kan fremstræder døde områder, afhængigt af bygningshøjden.

Med hensyn til orienteringen af det enkelte billede vil et skråfoto normalt altid have mindst én mærkbar rotationer og hyppigst to. Én der definerer hældningen og én der definerer optagelsesretningen.

## 2.2 Beskrivelse af skråfotosdata

Formålet med dette afsnit er at tilegne viden om tilgængeligt skråfotodata på det danske marked, hvilket sker gennem en beskrivelse heraf. Beskrivelsen foretages på baggrund af tilgængeligt markedsføringsmateriale samt artikler og beskriver blandt andet flyvehøjde, pixelstørrelse, kamera, overlap osv.

BlomInfo og COWI optager begge skråfotos i Danmark og begge med et malteserkorskonfigureret skråfotosystem, hvorfor data fra såvel BlomInfo og COWI vil blive beskrevet. De to beskrivelser er

opbygget efter følgende struktur, først beskrives systemerne generelt, hvorefter kameraerne beskrives og til sidst optagelsesforholdene.

BlomInfo anvender det amerikanske skråfotosystem Pictometry, udviklet af Pictometry International Corp. Pictometry er et malteserkors konfigureret skråfotosystem med fem kameraer (1 x nadir og 4 x skrå).

COWI anvender det hollandske skråfotosystem Multi-cameras Integrated Digital Acquisition System (MIDAS), der er udviklet af Track'Air Aerial Survey Systems. MIDAS er ligeledes et malteserkors konfigureret skråfotosystem og består af fem kameraer (1 x nadir og 4 x skrå).

Forskellene mellem de to skråfotosystemer er primært den indre konfiguration af kameraerne og under hvilke forhold optagelserne foretages, hvilket vil blive synliggjort i de kommende afsnit.

### 2.2.1 Kamera

MIDAS skråfotosystem er opbygget af fem CANON EOS kameraer og Pictometry skråfotosystem er ligeledes opbygget fem kameraer. Hvilken type kameraer Pictometry anvender vides ikke specifikt, men det menes at Pictometry anvender kameraer udviklet af IMPERX (amerikansk kameraproducent) jf. Petrie (2008). I Tekstboks 2.1 ses information vedrørende de to kamerasystemers indre orientering.

	COWI/MIDAS	BlomInfo/Pictometry		
Kamerakonstant (skråkamera)	51,0 mm	85,0 mm		
Kamerakonstant (nadirkamera)	23,8 mm	65,0 mm		
Pixelstørrelse (kvadratisk)	7,2 μm	9,0 μm		
Billedformat	4992 x 3328 pixels	4008 x 2672 pixels		
	36 x 24 mm	36 x 24 mm		
Åbningsvinkel (skråkamera)	38,8 x 26,4 grader*	24,0 x 16,1 grader*		
Tekstboks 2.2: Estimat for den indre orientering af kameraerne for de to skråfotosystemer				
MIDAS og Pictometry (Jacobsen 2008	8) (Höhle 2008A). * er beregne	t efter Formel 3 i Appendiks		

A.

### 2.2.2 Optagelsesforhold

Optagelsesforholdene beskrives ikke for kameraerne, men for de to producenter COWI og BlomInfo. I Tekstboks 2.3 ses information, der beskriver under hvilke forhold de to firmaer optager og hvilken betydning dette har for GSD'en.

	COWI/MIDAS	BlomInfo/Pictometry
Flyvehøjde	400 m	910 m
Hældning	45 grader	50 grader
GSD <sub>FL</sub>	7,6 cm*	15,1 cm*
GSD <sub>ML</sub>	11,3 cm*	23,3 cm*
GSD <sub>BL</sub>	19,8 cm*	34,0 cm*
GSD <sub>FB</sub>	6,4 cm*	12,8 cm*
GSD <sub>MB</sub>	8,0 cm*	15,0 cm*
GSD <sub>BB</sub>	10,4 cm*	18,0 cm*
GSD (nadirbillede)	12,0 cm	14,0 cm
Overlap (skråfoto)	-	-
Overlap (nadirbillede)	60 % længdeoverlap	-
	40 % sideoverlap	
Punkt synlig i # skråfotos	12-16	optil 12

Tekstboks 2.3: Optagelsesforhold for henholdsvis COWI og BlomInfo (COWI 2009) (Höhle 2008A). \* er beregnet efter Formel 4 og Formel 5 i Appendiks A og illustreret i Figur 2.6.

I Tekstboks 2.3 ses det, at det ikke har været muligt at finde information vedrørende overlappet skråfotos i mellem, udover at et punkt er synligt i op til 16 skråfotos. Det har dog været muligt at konstruere dækningspolygoner, der kan give et indblik i overlappet, se Figur 2.6.

Normalt er længdeoverlappet defineret med flyveretningen og sideoverlappet på tværs af flyveretningen. Men da skråfotos optages forskelligt i forhold til flyveretningen alt efter optagelsesretningen, vil længde- og sideoverlappet i forhold til skråfotos blive defineret anderledes. Længdeoverlappet mellem to skråfotos defineres som overlappet langs optagelsesretningen mens sideoverlappet mellem to skråfotos defineres som overlappet på tværs af optagelsesretningen.

Det ses at der er skiftende overlap og at sideoverlappet cirka er 50 til 60 procent alt efter hvor i billedet det beregnes samt et længdeoverlap på cirka 50 procent.



Figur 2.6: (Venstre) Illustration af GSD i et skråfoto. (Højre) Længde- og sideoverlap af skråfotos optaget med MIDAS mod nord. Frit tegnet efter Jacobsen (2008).

#### 2.2.3 Opsummering

De to skråfotosystemer Pictometry og MIDAS er begge bygget op af kameraer med et billedformat 36 x 24 mm. Forskellen mellem de to systemer ligger primært i kamerakonstanterne og pixelstørrelsen, hvilket har væsentlig betydning for hvordan henholdsvis BlomInfo og COWI optager deres billeder.

COWI optager i en væsentlig lavere flyvehøjde og med mindre kamerakonstant (h 400 meter og c 51 mm) end BlomInfo (h 1000 meter og c 85 mm), hvilket betyder at COWI dækker et mindre areal end BlomInfo. Forskellen i flyvehøjde og kamerakonstant de to systemer imellem har betydning for GSD'en, hvilket kan anses som den reelle forskel mellem de to systemer. GSD'en for COWI varierer fra 6,4 x 7,6 til 10,4 x 19,8 cm, mens den for BlomInfo varierer fra 12,8 x 15,1 til 18,0 x 34,0 cm. Det vil sige at det i COWI's skråfotos er muligt at se mindre objekter, men dækker ligeledes et mindre areal ved én fotografering.

Overlappet mellem skråfotos varierer afhængigt af hvor i billedet det måles. Sideoverlappet svinger fra 50 til 60 procent, mens længdeoverlappet cirka ligger konstant på 50 procent. Yderligere kan et vilkårligt punkt ses i op til 16 skråfotos.

## 2.3 Fremstilling af DTM vha. nadirbilleder

Formålet med dette afsnit er at tilegne en viden omkring fremstillingen af DTM gennem stereofotogrammetri og vha. nadirbilleder. Det vil sige hvilke metoder, der anvendes og hvad forudsætter anvendelsen af metoderne. Yderligere vil det blive belyst hvilke elementer, der har indflydelse på det færdige produkts nøjagtighed.

Indledningsvist beskrives begrebet højdemodeller og der skabes en forståelse for produktet. Efterfølgende beskrives metoderne for fremstillingen af en DTM kortfattet, hvorefter det beskrives hvilke elementer, der har indflydelse på det færdige produkts nøjagtighed, som f.eks. basis/højde-forhold, skrående terræn osv.

## 2.3.1 Klassifikation af højdemodeller

Definitionen af en højdemodel er forskellig fra land til land, da der anvendes forskellige begreber, samtidig med at der findes forskellige former for højdemodeller. Det er derfor vigtigt at definere hvilke begreber, der anvendes for hvilke højdemodeller. Overordnet arbejdes der i Danmark med to højdemodeller, en Digital TerrænModel (DTM) og en Digital SurfaceModel (DSM).

En DTM er en højdemodel, der gengiver det faktiske terræn, og ved terræn forstås et områdes jordoverflade. En DSM er en højdemodel, der gengiver terrænet, toppen af bygninger og skove. Den store forskel mellem de to højdemodeller er at der i en DTM er fjernet alt form for bebyggelse og bevoksning, mens dette er at finde i en DSM. Illustrativt ses forskellen på en DTM og en DSM i Figur 2.7.



Figur 2.7: (Venstre) DSM - (Højre) DTM. (COWI 2006).

## 2.3.2 Fremstilling af DTM vha. nadirbilleder

Fremstillingen af en DTM vha. nadirbilleder (stereofotogrammetri) kan opdeles i fem delprocesser, se Figur 2.8, og hver af de fem delprocesser vil i Appendiks B blive gennemgået med hensyn til principper og metoder.

1	Planlægning	Planlægning af flyvelinjer mv., optagelse af billeder og indsamling af orienteringsdata vha. GNSS, IMU osv.
2	Orientering	Indre og ydre orientering af billeder og modeller
3	Fremstilling af højdemodel	Fremstilling af højdemodel rå og i net, gennem struktur- og/eller arealbaseret korrelation af gråtoneværdier
4	Fremstilling af DTM	Filtrering af højdemodel for grove fejl og punkter, der f.eks. ligger på bygninger, træ osv.
5	Kvalitetskontrol	Kvalitetskontrol af fremstillet DTM gennem markmålte koordinater eller eksisterende DTM

Figur 2.8: Fremstillingsprocessen for en DTM.

Beskrivelsen af de fem delprocesser vil danne udgangspunkt for diskussionen af anvendelsen af skråfotos til fremstilling af en DTM gennem stereofotogrammetri i afsnit 2.4.

## 2.3.3 Elementers indflydelse på nøjagtigheden

Nøjagtigheden af en DTM er en funktion af en række forskellige elementer, der hver især har større eller mindre indflydelse. Følgende elementer spiller en væsentlig rolle i den enkelte terrænmodels nøjagtighed:

- Terrænets udformning og art
- Geometrien i stereomodellen
- Punkttæthed

(Li, Zhu & Gold 2004, 8.1.4)

#### Terrænets udformning og art

Terrænets udformning og art kan defineres efter tre parametre, højdespring, bølgelængde og hældning. De tre parametres indbyrdes forhold kan ses i Tekstboks 2.4.



Tekstboks 2.4: Parametre for terrænets udformning og art. Figur (b) er en matematisk forsimplet udgave af Figur (a). Frit tegnet efter Li, Zhu & Gold (2004).

Højdespringene definerer områdets vertikale dimension, det vil sige at den fortæller hvor store højdespring der er i området. Bølgelængderne definerer den horisontale dimension og fortæller hvor ofte der sker ændringer i terrænet. Små bølgelængder lig ofte ændringer og omvendt. Hældningen sammenbinder de to parametre. Parametrene kan beregnes på baggrund af en test i det givne område, hvor enten en profil af en eksisterende DTM anvendes eller hvor en profil opmåles (Li, Zhu & Gold 2004, 2.3.1).

De ovenstående parametre har en betydning i forhold til genereringen af en DTM. F.eks. hvis der ofte er ændringer i bølgelængderne og store højdespring kan det være nødvendigt at have et tættere grid i DTM'en end hvis bølgelængderne er store og næsten ingen højdespring.

#### Geometrien i stereomodellen

Basis/højde forholdet har væsentlig betydning på højdenøjagtigheden og mindre betydning på plannøjagtigheden. Hvis forholdet er 1:1 opnås den bedste højdenøjagtighed og jo mindre forholdet bliver, jo dårligere bliver højdenøjagtigheden. Dette skyldes at der opnås en bedre skæring af strålerne når basis/højde forholdet er 1:1. Dette illustreres i Appendiksfigur 4 i Appendiks B hvor tre stereomodeller med samme måleforhold og forskellige basis/højde forhold illustreres.

#### Punkttæthed

Punkttætheden i en DTM har stor betydning for den endelige nøjagtighed. F.eks. hvis et område med små bølgelængder beskrives med få punkter vil nøjagtigheden blive dårlig, da der vil være mange højdespring, der ikke vil blive beskrevet. Derimod vil det være unødvendigt at beskrive et fladt område med store bølgelængder med mange punkter, da en del af punkterne vil være direkte overflødige. Det er derfor nødvendigt at se på terrænets udformning og art inden punktætheden i et net vælges.

### 2.3.4 Opsummering

Inden en DTM kan fremstilles er der en lang række processer, der skal gennemgås og en lang række parametre, der skal indstilles alt efter hvilken nøjagtighed, der ønskes i det færdige produkt.

Indledningsvis skal stereomodellen eller -modellerne orienteres, enten gennem orientering af hver model for sig eller i en samlet aerotriangulation. Begge orienteringer sker på baggrund af velfordelte paspunkter og sammenknytningspunkter, hvor paspunkterne udspænder den størst mulige polygon inden for den enkelte model. Efterfølgende udvælges der automatisk interessepunkter i billederne, der sammenknyttes og opmåles i stereomodellerne på baggrund af korrelation, hvor der søges langs epipolarlinjerne. Herefter reduceres den rå DTM til et ønsket format f.eks. et grid og der filtreres for grove fejl og punkter, der er opmålt på bygninger, træer og lignende. Afslutningsvis foretages der en kontrol af det færdige produkt. Hvilken nøjagtighed der opnås i det færdige produkt afhænger i høj grad af terrænets udformning og art, geometrien i stereomodellen og hvilken punkttæthed DTM'en har. Hvis terrænet har små bølgelængder og relativ store højdespring er det nødvendigt at beskrive terrænet gennem flere punkter, end hvis terrænet har store bølgelængder og små højdespring

## 2.4 Fremstilling af DTM vha. skråfotos

Formålet med dette afsnit er at diskutere og tilegne viden omkring fremstillingen af en DTM vha. skråfotos. Fremstillingen af en DTM vha. skråfotos vil blive diskuteret med udgangspunkt i afsnit 2.2 *Beskrivelse af skråfotosdata*, afsnit 2.3 *Fremstilling af DTM vha. nadirbilleder* og Appendiks B.

Afsnittet tager sit udgangspunkt i fire mulige modelkonfigurationer til fremstilling af en DTM vha. skråfotos og stereofotogrammetri. På denne baggrund vil det blive diskuteret fordele og ulemper der er ved de fire modelkonfigurationer i forhold til principperne og metoderne i stereofotogrammetrien.

## 2.4.1 Modelkonfigurationer

Det blev i afsnit 2.2 *Beskrivelse af skråfotosdata* beskrevet at der både eksisterer side- og længdeoverlap (50-60 procent og 50 procent). Yderligere blev det beskrevet at et vilkårligt punkt kan ses i optil 16 skråfotos fra optil fire forskellige optagelsesretninger. Det vil sige at der er flere forskellige muligheder for at danne modelområder end der ved anvendelse af nadirbilleder, da et enkelt område er dækket af flere skråfotos end nadirbilleder. I Figur 2.9 ses de fire modelområder, der vurderes at have størst chance for succes ved en fremstilling af en DTM.

- Modelområde 1 dannes gennem sideoverlappet af to skråfotos med samme optagelsesretning.
- Modelområde 2 dannes gennem længdeoverlappet af to skråfotos med samme optagelsesretning.
- Modelområde 3 dannes gennem sideoverlappet af to skråfotos med modsatte optagelsesretninger.
- Modelområde 4 dannes gennem længdeoverlappet af to skråfotos med opsatte optagelsesretninger.



## 2.4.2 Diskussion af modelkonfigurationer

De fire konfigurationer er vidt forskellige, hvilket har væsentlig betydning for fremstillingen af en DTM. Derfor vil modeller blive diskuteret i forhold til følgende principper og metoder i stereofotogrammetrien basis/højde forholdet, orienteringen, stereosyn, interessepunkter og korrelation, fremstilling af højdemodel, filtrering og kvalitetskontrol.

### Basis/højde forhold

I Appendiks B er det beskrevet at nøjagtigheden på en højdemåling er afhængig af basis/højde forholdet. På baggrund af en visuel vurdering af basis/højde forholdet, se Figur 2.9, og under den

forudsætning at alle skråfotos er optaget under samme forhold (flyvehøjde osv.), vil modelkonfigurationerne 3 og 4 give den bedste nøjagtighed i højden, da basis/højde forholdet her er størst, mens modelkonfigurationerne 1 og 2 vil give den dårligste nøjagtighed.

#### Orienteringen

Med hensyn til orienteringen af de fire konfigurationer ses der ikke nogle umiddelbare problemer herved, så længe der eksisterer sammenfaldende punkter, der kan anvendes som paspunkter. Dette kan dog være et problem i modelkonfigurationerne 3 og 4, da der her er flere døde områder end i modelkonfigurationerne 1 og 2, da der optages med modsatte optagelsesretninger, se Figur 2.10. Dette vurderes dog at være et mindre problem i forhold til orienteringen, da det vurderes at der ofte vil være sammenfaldende og fritliggende brønddæksler, riste osv.



Figur 2.10: Illustration af døde områder for modelkonfigurationerne 1, 2, 3 og 4.

#### Stereosyn

Med hensyn til hvorvidt det er muligt at se stereo kan dette ligeledes diskuteres. Den umiddelbare vurdering er at det vil være muligt under en række forudsætninger. Hvilke er, at de optagede skråfotos har samme optagelsesretning og måleforhold, så objekter bliver afbildet tilnærmelsesvis ens i de to skråfotos. Hvis ikke forudsætningerne er opflydt vurderes det svært, da der vil være varierende måleforhold mellem de to skråfotos (stiger og falder modsat af hinanden i modellen). Et andet problem er at bygningerne og facaderne ses fra forskellige retninger, hvilket højst sandsynlig vil ødelægge muligheden for at se stereo. Stereosynet er dog ikke et krav så længe der kan foretages korrelation, men hvorvidt de to ting hænger sammen diskuteres senere.

#### Interessepunkter og korrelation

I forhold til at udvælge interessepunkter vurderes dette ikke at være noget problem, da der altid vil være punkter i det enkelte billede, der lokalt skelner sig ud og globalt er sjældne. Problemet vurderes mere at være selve korrelationen. Problemet vurderes dog at variere i størrelse alt efter model-konfiguration.

Modelkonfigurationerne 3 og 4 vurderes at have de største problemer i forhold til at foretage korrelation, da billederne er optaget med modsatte optagelsesretninger og derfor har modsatte måleforhold. Den modsatte optagelsesretning bevirker at objekter afbildes i forskellige størrelser (ikke ens måleforhold) og farveværdier (optaget forskelligt i forhold til solen). Dette bevirker at det kan være svært at foretage korrelation, da objekterne derfor ikke er afbildet ens de to skråfotos imellem, hvilket er en forudsætning for korrelationen

Modelkonfiguration 2 vurderes at have mindre problemer i forhold korrelation, da de to skråfotos er optaget i forskelligt måleforhold og objekter derfor vil blive afbildet forskelligt i størrelse.

Modelkonfiguration 1 vurderes at have de største chancer for at have succes i forhold til korrelation, da de to skråfotos er optaget under ens forhold og objekter derfor er afbildet umiddelbart ens de to skråfotos imellem.

#### Fremstilling af højdemodel

Fremstillingen af en højdemodel afhænger i høj grad af en succesfuld korrelation som blev diskuteret i det tidligere, men som tidligere beskrevet kan der ikke foretages korrelation eller opmåling inden for døde områder og der kan derfor heller ikke fremstilles en højdemodel. Dette betyder at model-konfigurationerne 3 og 4 vil have en ringere fuldstændig end modelkonfigurationerne 1 og 2.

#### Filtrering

Filtreringen afhænger ikke direkte af billederne, da filtreringen foretages på en række 3D koordinater. Hvis der ses bort fra den varierende fuldstændighed de forskellige konfigurationerne i mellem, vurderes der ikke at være nogen problemer i forhold til filtreringen.

#### Kvalitetskontrol

Kvalitetskontrollen foretages ens hvad enten DTM'en er fremstillet vha. nadirbillede eller skråfotos, hvorfor der ikke beskrives yderligere.

## 2.4.3 Opsummering

Fremstillingen af en DTM vha. skråfotos kan ske på baggrund af flere forskellige modelkonfigurationer, hvor de hver især har sine fordele og ulemper. I Tekstboks 2.5 er fordelene og ulemperne for de fire modelkonfigurationer i Figur 2.9 opsummeret.

	Fordele	Ulemper
Modelkonfiguration 1	<ul> <li>+ Skråfotos optaget under ens forhold (ens optagelsesretning og måleforhold)</li> <li>+ Gode muligheder for stereosyn</li> <li>+ Gode muligheder for korrelation</li> </ul>	- b/h dårligst → dårlig højdenøj- agtighed
Modelkonfiguration 2	+ Skråfotos optaget i samme optagelsesretning	<ul> <li>Forskellige måleforhold i model- len</li> </ul>
Modelkonfiguration 3 og 4	+ b/h bedst →god højdenøjagtig- hed	<ul> <li>Skråfotos optaget under forskel- lige forhold (ikke ens optagel- sesretning og måleforhold)</li> <li>Dårlige muligheder for stereosyn</li> <li>Dårlige muligheder for korrela- tion</li> <li>Mange døde områder</li> </ul>

Tekstboks 2.5: Fordele og ulemper ved de fire mulig modelkonfigurationer.

Hvilken modelkonfiguration, der anvendes, diskuteres først i afsnit 2.6 Opsamling af den initierende problemstilling.

## 2.5 Fremstilling af DSM/DTM vha. ikke-nadirbilleder

Formålet med dette afsnit er at tilegne viden omkring tidligere og relevante undersøgelser, der belyser emnet "fremstilling af en DTM på baggrund af ikke-nadirbilleder", for derigennem at kunne drage fordele at tidligere erfaringer.

Først vil de væsentligste konklusioner fra hver af de udvalgte undersøgelser blive beskrevet, hvorefter der opsummeres på de forskellige konklusioner. Følgende undersøgelser vil blive beskrevet:

- Multi-image matching for architectural and archaeological orthoimage production (Patias & Tsioukas 1999)
- First experiments with convergent multi-image photogrammetry with automatic correlation applied to differential rectification of architectural facades (Garcia-Leon, Felicisimo & Martinez 2003)

Under hver beskrivelse af undersøgelserne, vil hovedvægten blive lagt på formål, datagrundlag, test og resultat.

#### 2.5.1 Multi-image matching for orthoimage production

Formålet med denne undersøgelse har været at belyse fremstillingen af en DSM og ortofoto på baggrund af terrestriske billeder med forskellige konvergens. Datagrundlaget for undersøgelsen har været tre terrestriske billeder optaget af en cylinderformet facade. Billederne er optaget med et ukalibreret Sony Mavica digital kamera og med 100 procent overlap.

Testen er udført i et Digital Fotogrammetrisk Program (DFP), hvilket har medført en række indledende problemer, da de fleste DFP'er hovedsagligt anvender korrelationsalgoritmer, der er beregnet til nadirbilleder optaget fra luften. Yderligere understøttes flerbillede korrelation ikke. Af ovenstående årsager er der inden indlæsning af billederne i det anvendte program dannet epipolarbilleder.

Epipolarbillederne indlæse og der søger efter interessepunkter som efterfølgende sammenknyttes på baggrund af korrelation, hvor der søges langs epipolarlinjerne. Der fremstilles på denne baggrund to DSM'er, én der fremstilles på baggrund af ét billedpar og én der fremstilles på baggrund af to billedpar. Til kontrol er der opmålt 98 punkter manuelt.

Resultatet var en standardafvigelse på 10 cm for et billedpar (middelfejl 6 cm, maksimalfejl 34 cm, punkter 85) og 5 cm for to billedpar (middelfejl 3 cm, maksimalfejl 12 cm, punkter 68). Fordelen ved flere billeder/stereomodeller for samme område blev anvendt til at fjerne grove fejl. Derudover blev billederne, selvom det ikke umiddelbart var muligt på baggrund af store vinkler, implementeret i et DFP, der normalt kun anvendes til nadirbilleder optaget fra luften.

#### 2.5.2 Convergent multi-image photogrammetry with automatic correlation

Formålet med denne undersøgelse har været at belyse fremstillingen af en DSM på baggrund af konvergentbilleder i stedet for billeder i normaltilfældet. Datagrundlaget for undersøgelsen har været 2 x 11 billeder (to forskellige filmtyper), der er optaget med 100 procent overlap af en kirkemur. Det midterste billede af 11 er optaget vinkelret på muren, mens de 10 andre billeder er optaget med et interval på 5 grader til begge sider af midten, se Figur 2.11. Billederne er optaget med et semimetrisk Rolleiflex 6008 kamera og digitaliseret med en UltraScan 5000 scanner.



Figur 2.11: Billedkonfiguration (Garcia-Leon, Felicismo & Martinez 2003)

Testen er udført i Erdas Imagine 8.5 sammen med OrthoBasee Pro som er et DFP, der håndterer orientering af konvergent billeder og automatisk korrelation til DSM fremstilling. Der fremstilles 110 DSM'er (55 for hver filmtype), hvor alle kombinationer af billedpar anvendes. Til kontrol er der manuelt opmålt 75 punkter.

Resultatet viser at der er en sammenhæng mellem skæringsvinkel og antal af korrelerede interessepunkter. Jo mindre skæringsvinkel, jo flere korrelerede interessepunkter. Resultatet viser ligeledes at nøjagtigheden af en DSM er afhængig af skæringsvinklen. Jo mindre vinklen er mellem et billedpar jo bedre er nøjagtigheden, se Figur 2.12. Dette resultat strider dog i mod den normale teori, hvor den optimale situation er ved en skæring mellem 60 og 90 grader, altså store vinkler. Årsagen til det modstridende resultat er den anvendte software. Derudover ses der en tendens til sammenhæng mellem nøjagtigheden og stereomodellernes indfaldsvinkel på muren, hvor der opnås det bedste resultater hvor billeder omtrent er optaget vinkelret på muren, se Figur 2.12.



og stereomodel (indfaldsvinkel). (Garcia-Leon, Felicisimo & Martines 2003).

### 2.5.3 Opsummering

De to beskrevne undersøgelser er udført terrestrisk, men tendenserne i de to undersøgelser kan overføres til skråfotos, da billederne, der behandles er optaget i et skråt perspektiv.

En af de første tendenser er at ikke alle DFP'er er egnet til at behandle de store orienteringsvinkler, der ofte er forbundet med terrestriske billeder og skråfotos. Dette løses i Patias & Tsioukas (1999) ved at omdanne billederne til epipolarbilleder, hvorefter det er muligt at fremstille en DSM. Et tydeligt eksempel på at DFP'er ikke kan håndtere skråfotos til fremstilling af DSM er i Garcia-Leon, Felicisimo & Martinez (2003), hvor resultatet direkte strider i mod den normale teori. Resultatet siger at nøjagtigheden bliver dårligere med højere skæringsvinkel, mens teorien siger at de bedste resultater opnås ved skæringsvinkler mellem 60 og 90 grader.

En anden tendens er at stereomodellens indfaldsvinkel på fladen, hvor for der skal fremstilles en DSM har betydning for nøjagtigheden. De bedste nøjagtigheder opnås når billederne er optaget omkring vinkelret på fladen.

En sidste tendens er at der korreleres flest interessepunkter når skæringsvinklen er lille, eller rette sagt når billederne i stereomodellen er optaget under ens forhold.

## 2.6 Opsamling af den initierende problemstilling

Formålet med dette afsnit er at afrunde foranalysen, hvilket sker ved at belyse den initierende problemstilling, "Kan skråfotos fra et malteserkors konfigureret skråfotosystem anvendes til fremstilling af en digital terrænmodel og under hvilke forudsætninger?"

Den initierende problemstilling besvares på to niveauer. Først vurderes det hvorvidt det teoretisk kan lade sig gøre og efterfølgende hvordan det i så fald rent praktisk kan ske. Afslutningsvis opsamles der på de problemer og muligheder, der vurderes at være i forbindelse med anvendelse af skråfotos til DTM fremstilling.

### Teoretisk

I gennem foranalysen er det blevet belyst at der en række parametre, der skal være opfyldt for at det er muligt at fremstille en DTM gennem stereofotogrammetri.

- Overlap
- Orientering
- Korrelation

Først og fremmest skal der være et overlap imellem de skråfotos, der skal danner grundlag for fremstillingen en DTM. Hvis overlappet ikke eksisterer, er det ikke muligt at skabe et modelområde og dermed heller ikke muligt at foretage målinger. I afsnit 2.2 *Beskrivelse af skråfotosdata* er det

konstateret at der eksisterer såvel side- og længdeoverlap, hvor sideoverlappet varierer fra 50 til 60 procent, mens længdeoverlappet er 50 procent.

Efterfølgende skal billedparret orienteres og modellen skabes, hvilket sker gennem en enkeltvis orientering af modeller eller gennem en aerotriangulation. Der ses ingen teoretiske forhindringer i at foretage orienteringen, da der blot er tale om to billeder, der skal orienteres i forhold til hinanden og så længe der er overlap og nok sammenfaldende punkter kan modellerne orienteres.

Efter at modellen eller modellerne er orienteret skal der foretages korrelation af interessepunkter. Det vurderes at korrelationen kan skabe problemer, hvis interessepunkterne ikke er afbildet ens i forhold til størrelse, form og farve. Dette skyldes helt banalt at det ikke er muligt at korrelere objekter, der ikke er afbildet ens. Det vurderes derfor at en succesfuld korrelation vil kræve at de to skråfotos er optaget under samme forhold (optagelsesretning, måleforhold osv.).

Det vurderes overordnet at det teoretisk ville være muligt at fremstille en DTM på baggrund af skråfotos, dog afhængig af modelkonfigurationen.

#### Praktisk

Det er vurderet, at det teoretisk kan lade sig gøre at fremstille en DTM vha. skråfotos, men hvordan skal det ske? I foranalysen er fire modelkonfigurationer blevet diskuteret i forhold til fordele og ulemper. På denne baggrund vurderes det, hvilken eller hvilke af de fire modelkonfiguration, der skal anvendes i det videre projektforløb.

	Fordele	Ulemper
Modelkonfiguration 1	+ Skråfotos optaget under ens forhold (ens optagelsesretning og måleforhold) + Gode muligheder for stereosyn + Gode muligheder for korrelation	- b/h dårligst → dårlig højdenøj- agtighed
Modelkonfiguration 2	+ Skråfotos optaget i samme optagelsesretning	- Forskellige måleforhold i model- len
Modelkonfiguration 3 og 4	+ b/h bedst →god højdenøjagtig- hed	<ul> <li>Skråfotos optaget under forskel- lige forhold (ikke ens optagel- sesretning og måleforhold)</li> <li>Dårlige muligheder for stereosyn</li> <li>Dårlige muligheder for korrela- tion</li> <li>Mange døde områder</li> </ul>

Tekstboks 2.6: Fordele og ulemper ved de fire mulige modelkonfigurationer.



Modelkonfiguration 3 og 4 fravælges, da billederne i modellerne ikke er optaget under samme forhold, hvilket vurderes at have en væsentlig betydning i forhold til muligheden for at se stereo og

foretage korrelation. Dette underbygges ligeledes i afsnit 2.5 *Fremstilling af DSM/DTM vha. ikke-nadirbilleder*, hvor tidligere undersøgelser viser at der korreleres et mindre antal interessepunkter jo højere vinklen mellem to stråler er. Yderligere vil fuldstændigheden blive dårlig, da der er døde områder fra to retninger i stedet for kun én, se Figur 2.10.

Modelkonfiguration 2 fravælges til dels, da der er forskelligt måleforhold mellem billederne i modellen, hvilket igen vurderes at have væsentlig betydning for korrelation og muligheden for at se stereo.

Modelkonfiguration 1 vurderes til at være den bedst egnede, da billederne er optaget under samme forhold (optagelsesretning, måleforhold osv.,), hvilket giver gode muligheder for at se stereo og foretage korrelation. Modelkonfiguration 1 er ligeledes den model, der kommer tættest på et modelområde dannet ud fra nadirbilleder, da der er tilnærmelsesvis ens måleforhold i billederne og da objekterne er optaget fra samme retning. Fremtidige modeller i projektet afgrænses derfor til at være konfigureret efter modelkonfiguration 1 vist i Figur 2.13.

#### Problemer

I afsnit 2.5 *Fremstilling af DSM/DTM vha. ikke-nadirbilleder* viste tidligere undersøgelser, at der kan opstå problemer med softwaren, da den ofte ikke er beregnet til at håndtere billeder med store orienteringsvinkler. Derudover kan det forventes at nøjagtigheden ikke vil være optimal efter som et skråt perspektiv i forhold fladen, har en negativ indflydelse på nøjagtigheden.

#### Muligheder

I afsnit 2.2 *Beskrivelse af skråfotosdata* blev det beskrevet at ét enkelt punkt kan ses i optil 16 billeder, alt efter producent, og fra fire forskellige vinkler. Dette betyder umiddelbart det fotograferede områder er betydelig bedre dækket end hvis der blot er tale om nadirbilleder. Denne mulighed kan ses som en fordel, da dette betyder at der umiddelbart ikke vil være nogen døde område og at der vil være flere stereomodeller til rådighed inden for det samme geografiske område.

# **3** Problemformulering

Formålet med dette kapitel er at opstille en problemformulering for projektet. Problemformuleringen udarbejdes på baggrund af foranalysen, samt en diskussion heraf. Diskussionen, der leder op til problemformuleringen tager udgangspunkt i den initierende problemstilling, "Kan skråfotos fra et malteserkors konfigureret skråfotosystem anvendes til fremstilling af en digital terrænmodel og under hvilke forudsætninger"

En DTM er en højdemodel, der beskriver terrænet, hvilket indebærer at alle bygninger, træer eller andre objekter, der ikke er en del af terrænet, er filtreret fra. De danske højdemodeller og terrænmodeller fremstilles normalt på baggrund af Luftbåren Laser Scanning (LLS) eller gennem stereofotogrammetri vha. nadirbilleder. Men er det muligt at fremstille en DTM på baggrund af skråfotos? Dette spørgsmål er indledende blevet besvaret gennem foranalysen og svaret er, ja teoretisk set er det muligt.

I foranalysen blev det vurderet at skråfotos opfylder de forudsætninger, der skal til for at fremstille en DTM gennem stereofotogrammetri, det være sig overlap, orientering og mulighed for korrelation. Denne vurdering ligger til grund for, at det vurderes teoretisk muligt at fremstille en DTM vha. skråfotos.

Der er overlap billederne i mellem, både side og længde. Dette betyder at billederne kan orienteres i en stereomodel, hvilket kan ske enkeltvis eller gennem aerotriangulation. Det vurderes derudover muligt at udvælge interessepunkter og foretage korrelation, hvis den rette modelkonfiguration anvendes.

Men selvom det vurderes muligt at fremstille en DTM vha. skråfotos, forudses der en række problemer. DFP'er kan ofte ikke håndtere billeder med store orienteringsvinkler, som det er tilfældet med skråfotos. Nøjagtigheden i DTM'en er afhængig af nadirvinklen og er faldende med stigende nadirvinkel. Det varierende måleforhold i modellen har betydning på nøjagtigheden og muligheden for at foretage korrelation. Fuldstændigheden forringes inden for et enkelt modelområde, da der er flere døde områder i skråfotos end i nadirbilleder, herunder især indenfor områder med høje bygninger. Inhomogen nøjagtighed, grundet det varierende måleforhold i billederne.

Men det skrå perspektiv har også sine muligheder, hvilke bør udnyttes så de bliver til fordelene ved skråfotos. Ét enkelt punkt kan ses i op til 16 skråfotos og fra fire forskellige optagelsesretninger, hvilket betyder at døde områder måske kan fjernes ved at kombinere stereomodeller fra flere eller alle fire optagelsesretninger.

Det vil sige at der både er problemer og muligheder i at forsøge at fremstille en DTM på baggrund af skråfotos. Det kan derfor diskuteres hvad der i sidste ende vejer tungest, problemerne eller mulighederne. Ét udfald kunne være at den bedre dækning opvejer nadirvinklens indflydelse på nøjagtigheden. Det vil derfor være interessant foretage en undersøgelse af hvilken nøjagtighed og fuldstændighed, der kan opnås i en DTM fremstillet vha. skråfotos. Denne interesse og foranalysens vurdering leder op til dette projekts problemformulering. Tilknyttet problemformuleringen er en række undersøgelsen.

# Hvilken nøjagtighed og fuldstændighed kan der opnås i en digital terrænmodel fremstillet vha. skråfotos fra et malteserkors konfigureret skråfotosystem?

Hvilken betydning har filtreringen og udfyldningen af hullerne? - Hvilken betydning har flere overlappende terrænmodeller for nøjagtigheden og fuldstændigheden? - Hvilken og hvor stor betydning har det varierende måleforhold? - Hvor automatisk sker processen?

Projektet afgrænses til at behandle fremstillingen af en DTM inden for et mindre geografisk område i Aalborg, hvor for det er muligt at låne skråfotos.

# 4 Metode og struktur

Formålet med dette kapitel er at beskrive projektets overordnede anvendelse metoder og strukturen i projektet. Kapitlet tager udgangspunkt i den udarbejdede problemformulering og er opdelt to afsnit, der henholdsvis omhandler projektmetoden og projektstrukturen.

## 4.1 Projektmetode

Formålet dette afsnit er at beskrive projektets anvendelse af metoder. Det sker for at give et indblik i hvordan problemformuleringen metodisk bearbejdes over i en konklusion. Indledningsvist vil grundelementer og principper i et problemorienteret projekt blive forklaret, hvorefter de anvendte metoder i dette projekt vil blive beskrevet. Afslutningsvis vil den overordnede projektstruktur blive beskrevet.

### Grundelementer og principper i et problemorienteret projekt

De grundlæggende elementer i et hvert projekt, der har til formål at tilegne sig viden omkring et specifikt emne, spørgsmål, problemformulering eller hypotese, er vidensproduktionens grundelementer (problemformulering, konklusion, teori og empiri) se Figur 4.1.



Figur 4.1: Vidensproduktionens hovedelementer og arbejdsgang (Andersen 2008).

De fire grundelementer sammenkobles gennem analyser og tolkninger, der skaber en samlet forståelse eller forklaring på den indledende problemformulering eller spørgsmål. I analyserne og tolkningerne anvendes forskellige metoder til at sammenkoble to eller flere af grundelementerne og derigennem tilegne sig viden. Viden kan gennem analyserne og tolkningerne tilegnes ud fra følgende to fremgangsmetoder, deduktion og induktion. Deduktion tager udgangspunkt i en teori, som efterfølgende anvendes til at beskrive, belyse eller analyse et enkelt tilfælde. Induktion tager modsat fat i et enkelt tilfælde (empiri), som efterfølgende anvendes til at beskrive et generelt princip eller teori. Det er ofte vanskeligt at adskille de induktive og deduktive arbejdsgange i samfundsvidenskabelige og tekniske projekter, da de er sammenknyttede og foregår samtidig. (Andersen 2008)

## Problemformuleringens mål

Det er vigtigt at gøre sig klart, hvilke mål problemformuleringen indeholder, for derigennem at kunne identificere de metoder, der bedst opnår målene.

Problemformuleringen er todelt, hvorfor projektet ligeledes er todelt. Det første mål i problemformuleringen er at fremstille en DTM vha. skråfotos. Dette indebærer en række opgaver, såsom indsamling af paspunkter, orientering af stereomodeller, fremstilling af højdemodel, filtrering osv. Det andet mål med problemformuleringen er at der foretages en kontrol af den fremstillede DTM i forhold til nøjagtighed og fuldstændighed, herunder hvilken indflydelse forskellige faktorer har på nøjagtigheden, såsom optagelsesretning og varierende måleforhold. Dette indebærer at kontrollerne skal identificeres samtidig med at der skal indsamles eller rekvireres kontroldata.

#### Projektdel 1 – Fremstilling af DTM

Projektdel 1 indebærer fremstilling af en DTM for et defineret geografisk område. Metoden der anvendes til fremstillingen er stereofotogrammetri, hvilket indebærer at der er en række logiske processer, der skal gennemarbejdes. For at sikre og dokumentere at alle processerne er gennemarbejdet korrekt og for at sikre at det færdige produkt ikke er behæftet grove fejl tages der udgangspunkt i Figur 4.2, der er en procesmodel for fremstilling af en DTM udarbejdet på baggrund af Appendiks B.



Figur 4.2: Procesmodel for fremstilling af en DTM.

Første del beskriver området hvor for DTM'en skal fremstilles og hvilke data, der er tilgængelige. Efterfølgende foretages planlægningen, hvilket indebærer, at der udarbejdes foreløbige modelområde, udvælges skråfotos, planlægges strategi og udvælges software. På denne baggrund findes der paspunkter, som efterfølgende opmåles og anvendes i orienteringen af modelområderne, hvad enten det sker hver enkel model for sig eller gennem en aerotriangulation. Efter orienteringen fremstilles der højdemodeller for hvert af modelområderne, hvilket sker gennem korrelation af interessepunkter. Højdemodellerne filtreres afslutningsvist for grove fejl og punkter, der ikke ligger på terræn.

#### Projektdel 2 – Kontrol af DTM

Projektdel 2 indebærer en kontrol af de fremstillede DTM'er. Metoden, der anvendes er en statistisk kontrol, hvor der indsamles eller rekvireres kontroldata, der repræsenterer området, hvor for der er fremstillet DTM'er. For at sikre og dokumentere at kontrollen er gennemarbejdet korrekt og for at sikre at den ikke er behæftet grove fejl tages der udgangspunkt i modellen i Figur 4.3.



Først opstilles kriterierne for kontrollen, det vil sige hvilke DTM'er skal kontrolleres og hvordan. Dernæst skal det specificeres hvilke metoder der anvendes, herunder interpolationsmetode, beregning af spredningen osv. Samtidig skal der rekvireres kontroldata, hvilke ligeledes skal beskrives. Herefter foretages de specificerede kontroller, som f.eks. kontrol af fuldstændighed, højdenøjagtighed osv. og afslutningsvis præsenteres resultatet.

## 4.2 Projektstruktur

Formålet med dette afsnit er at beskrive projektstrukturen. Dette sker for at give et indblik i projektets opbygning herunder de enkelte kapitler og afsnit imellem, samt metodeanvendelsen.

Projektstrukturen som fremgår af Figur 4.4 er udarbejdet med baggrund i de to modeller i Figur 4.2 og Figur 4.3, og danner udgangspunkt for den resterende del af projektet. Projektet består overordnet af en foranalyse og en hovedanalyse. Foranalysen blev foretaget som et led i bearbejdelsen af den initierende problemstilling over i en problemformulering. Hovedanalysen bliver foretaget for at besvare problemformuleringen og foretages overordnet induktiv, da analyserne foretages på baggrund af empiri for efterfølgende at vurdere resultatet. Projektstrukturen for projektet er dog udarbejdet efter en deduktiv arbejdsproces, hvor kendt teori er anvendt, herunder metoden for fremstilling af en DTM på baggrund af stereofotogrammetri.

Hovedanalysen er som tidligere beskrevet todelt, hvor projektdel 1 behandler fremstillingen af DTM og projektdel 2 behandler kontrol af DTM. Projektdel 1 behandles i Kapitel 5 *Fremstilling af DTM*, mens projektdel 2 behandles i Kapitel 6 *Kontrol og analyse af DTM*.



Figur 4.4: Strukturdiagram.

# **5** Fremstilling af DTM

Formålet med dette kapitel er at fremstille en DTM for et mindre geografisk område og samtidig beskrive processen og de valg og vurderinger, der er forbundet hermed.

Fremstillingen og procesbeskrivelsen sker efter den beskrevne metode og procesmodellen for fremstilling af en DTM gennem stereofotogrammetri, se Figur 4.2. Fokus i kapitlet vil være at beskrive og begrunde de valg, der foretages, hvilket vil ske struktureret og i overensstemmelse og procesmodellen, så det sikres at der ikke sker fejl.

I afsnit 5.1 *Område- og databeskrivelse* vil det afgrænsede projektområde og de lånte data blive beskrevet. Det afgrænsede projektområde vil blive beskrevet med hensyn til udformning og art, og yderligere vil det blive beskrevet hvorfor området er valgt. De lånte data vil blive beskrevet med hensyn til specifikationerne, herunder flyvehøjde, kamerakonstant, billedformat osv.

I afsnit 5.2 *Planlægning* vil planlægningen blive beskrevet. Dette indebærer indledningsvist planlægning af antal modelområder, deres konfiguration og efterfølgende planlægning og strategi for paspunktsopmålingen. Herefter vil softwaren, der anvendes, blive beskrevet og der vil blive foretaget nogle indledende undersøgelser. Afslutningsvist vil der blive udarbejdet en strategi for fremstillingen af DTM'en, hvilket sker på baggrund af den indledende planlægning.

I afsnit 5.3 *Orientering af skråfotos og modelområder* vil orienteringen af modelområderne blive beskrevet. Dette indebærer beskrivelse af de parametre og indstillinger, der anvendes og hvorfor. Herudover vil nøjagtigheden af orienteringen for hver enkel model blive beskrevet. Orientering vil ske i overensstemmelse med den udarbejde strategi i afsnit 5.2 og hvis det vurderes at en kalibrering vil kunne forbedre nøjagtigheden, vil der blive foretaget en kalibrering og en ny-orientering.

I afsnit 5.4 *Fremstilling af højdemodel* beskrives det hvordan højdemodellen fremstilles. Dette indebærer beskrivelse af de parametre og indstillinger, der anvendes og hvorfor. Fremstillingen af højdemodellerne vil ske i overensstemmelse med den udarbejde strategi i afsnit 5.2.

I afsnit 5.5 *Filtrering af højdemodel* vil filtreringen af højdemodellerne blive beskrevet, hvilket indebærer beskrivelse af parametrene og indstillingerne for fjernelse af grove fejl, bygninger, skovarealer osv. Filtreringen vil ske i overensstemmelse med den udarbejde strategi i afsnit 5.2.

I afsnit 5.6 *Opsamling af fremstilling af DTM* vil kapitlet blive afsluttet ved en opsamling af de problemer og konstateringer, der er forekommet gennem kapitlet.

## 5.1 Område- og databeskrivelse

Formålet med dette afsnit er at beskrive det udvalgte projektområde og begrunde valget, samt at beskrive de lånte data. Dette sker så der opnås et indgående kendskab til såvel projektområde som data, da dette har indflydelse på senere beslutninger.

Indledningsvist beskrives projektområdet overordnet og det begrundes hvorfor netop dette område er udvalgt, hvorefter terrænet beskrives. Efterfølgende beskrives det lånte data med hensyn til flyvehøjde, billedformat, overlap osv.

## 5.1.1 Vejgaard - Aalborg

Det udvalgte projektområde er beliggende i den nordlige del af Vejgaard i Aalborg, se Figur 5.1, og består primært af lav bymæssig bebyggelse, mindre åbne områder og mindre skovarealer.

Kriterierne for valg af projektområde har været, at området skal bestå af lav bymæssig bebyggelse, åbne områder og mindre skovarealer. Kriterierne er valgt ud fra den betragtning at der er et mindre antal døde områder i et område med lav bymæssig bebyggelse end i et område med høj bymæssig bebyggelse. Det mindre antal døde områder vil i sidste ende give en bedre fuldstændighed i DTM'en, da mere terræn kan ses.

Kriterierne er yderligere valgt ud fra den vurdering, at et projektområde bestående af flere forskellige områdetyper (bebyggelse, mark og skov) vil give en bedre og bredere undersøgelse, specielt i forhold til den filtrering og nøjagtigheden.



Figur 5.1: Afgrænsning af indledende projektområde. "DDO © COWI".

### Beskrivelse af terræn

Beskrivelsen af terrænet vil primære ske visuelt på baggrund af den tidligere beskrevne metode i afsnit 2.3.3. Beskrivelsen foretages for tre profilsnit langs E-aksen i referencesystemet UTM32N. De tre profilsnit udtrækkes fra 2x2 m DTM fremstillet gennem LLS af COWI. DTM'en har en specificeret nøjagtighed på 0,10 m jf. COWI (2006).

Der registreres med udgangspunkt i afsnit 2.3.3 halve bølgelængder og højdespring og beregnes stigninger for hver af de tre profiler. De halve bølgelængder er afstanden mellem to punkter i profilen, hvor mellem der konstant sker en stigning eller et fald, og hver gang terrænet ændre sig (fra stigning til fald eller omvendt) starter en ny halv bølgelængde. Højdespringet er højdeforskellen mellem start og slutpunktet i en halv bølgelængde. Stigningen beregnes efter formlen i Tekstboks 2.4 side 17. Beregningerne er foretaget i MatLab og de anvendte scripts og in- og output findes på DVD 01.01.

I Tekstboks 5.1 ses den minimale, maksimale og gennemsnitlige højde for området, mens profilerne og højdespringene er illustreret i Figur 5.2.

Min. højde:	3,08 m	
Maks. højde:	54,40 m	
Gennemsnitlig højde	31,71 m	

Tekstboks 5.1: Min., maks. og gennemsnitlig højde for projektområdet



Figur 5.2: Tre profilsnit af projektområdet. De røde vektorer markerer hvor der sker et skift fra fald til stigning eller omvendt. Vektorernes højde markerer stigningen eller faldet siden sidste skift. Vektorerne er faktor 3 større.

Ud fra de tre profilsnit og de minimale og maksimale højder for området konstateres det, at der er tale om et forholdsvist fladt terræn. Det ses dog visuelt i profilsnittene, at der til tider er tendens til større stigninger eller fald i terrænet.

### 5.1.2 DDSby – Danmarks Digitale Skråfoto

De skråfotos, der anvendes i projektet er udlånt af COWI og er en del af deres DDSby datasamling. Billederne er optaget med fire forskellige kameraer, et kamera for hver optagelsesretning, se Tekstboks 5.2, og et kamera, der optager nadirbilleder. Nadirkameraet vil dog ikke blive beskrevet yderligere, da fokus for projektet er skråfotos. Til hvert kamera er der tilknyttet en individuel kalibreringsrapport, se Bilag I. Billedformatet er 4992 x 3328 pixels eller 36 x 24 mm med en pixelstørrelse på 7,2 µm.

	Kameraorientering	Optagelsesretning
Kamera 1	Bagud	Vest
Kamera 2	Venstre	Nord
Kamera 3	Fremad	Øst
Kamera 4	Højre	Syd

Tekstboks 5.2: Sammenhæng mellem kamera, kameraorientering og optagelsesretning.

Billederne er optaget i en flyvehøjde af cirka 410 m og med en nadirvinkel omkring de 45 grader, hvilket jf. tidligere beregning i afsnit 2.2.2 giver følgende GSD'er 6,4 x 7,6 cm (bund af skråfoto) til 10,4 x 19,8 cm (top af skråfoto). Flyveretningen er øst og i Figur 5.3 ses flyvelinjerne og optagelsespositionerne for de lånte skråfotos. Pilene i Figur 5.3 indikerer hvilke billeder, der i den udlånte samling er optaget fra den pågældende position.

Dimensionen af et enkelt skråfoto er cirka 520 m bred i toppen, 320 m bred i bunden og 400 m høj. Side- og længdeoverlappet varierer, men på baggrund af et mindre udsnit dækningspolygoner, se Figur 5.3, er følgende side- og længdeoverlap beregnet. Sideoverlappet varierer fra 58 til 72 procent i toppen og fra 48 til 65 procent i bunden. Længdeoverlappet varierer fra 38 til 43 procent. Det skal igen pointeres at længdeoverlappet mellem to skråfotos i dette projekt defineres som overlappet langs optagelsesretningen mens sideoverlappet mellem to skråfotos defineres som overlappet på tværs af optagelsesretningen. Årsagen hertil er at skråfotos optages forskelligt i forhold til flyveretningen alt efter optagelsesretningen.



Figur 5.3: (Venstre) Flyvelinjer og optaget billede fra optagelsesposition. (Højre) Udvalgte dækningspolygoner. "Copyright © Kort & Matrikelstyrelsen".

Billederne er leveret i jpeg-format og er komprimeret til cirka 1/15 af det originale billede. Den radiometriske opløsning er 24 bit, 8 bit for hver farvekanal rød, grøn og blå (RGB).

## 5.2 Planlægning

Formålet med dette afsnit er at planlægge fremstillingen af en DTM, hvilket indebærer planlægning af modelområder, paspunktsopmåling og strategi for selve fremstillingen. Dette sker så det sikres at der opnås en optimal modelkonfiguration og paspunktsfordeling i de enkelte modeller.

Indledningsvist beskrives planlægningen af modelområderne og det begrundes hvorfor netop den udvalgte modelkonfiguration er valgt. Efterfølgende planlægges paspunktskonfigurationen i de enkelte modeller og det planlægges ligeledes hvordan paspunkterne skal opmåles. Herefter udvælges og undersøges softwaren til orienteringen af billederne samt til fremstillingen og filtreringen af højdemodellerne. Afslutningsvis udarbejdes der en strategi for orienteringen af billederne, fremstillingen af højdemodellerne og filtreringen.

## 5.2.1 Modelkonfiguration

Kriterierne for modelkonfigurationen tager udgangspunkt i afsnit 2.6 *Opsamling af den initierende problemstilling*, hvor den bedst egnede konfiguration for én enkelt stereomodel blev bestemt, og i kapitel 3 *Problemformulering*, hvor problemformuleringen og dens elementer stiller krav. Kriterierne til modelkonfigurationen er,

- at stereomodellerne skabes gennem sideoverlap,
- at der skabes mindst én stereomodel pr. optagelsesretning og
- at stereomodellerne dækker flere forskellige områdetyper (bebyggelse, skov og åben mark)

På baggrund af ovenstående kriterier vil der for hver optagelsesretning blive dannet fire stereomodeller i en 2x2 konfiguration, se Figur 5.4. De fire stereomodeller fra hver optagelsesretning vurderes tilstrækkelige i forhold til at kontrollere betydningen af stereomodeller fra flere forskellige optagelsesopretninger og samtidig dækkes flere forskellige områdetyper.



Figur 5.4: Stereomodeller fra de fire optagelsesretninger. "Copyright © Kort & Matrikelstyrelsen".

I Figur 5.4 ses stereomodellerne og billedernes dækningspolygoner for de fire optagelsesretninger og i Figur 5.5 ses sammenhængen mellem skråfoto og model. Den resterende del af projektet vil tage udgangspunkt i denne modelkonfiguration.

Skråfoto	Model	Skråfoto	Model	Skråfoto	Model	Skråfoto	Model
01N		015		01E		01W	
02N	M01N	025	M01S	02E	M01E	02W	M01W
03N	M02N	035	M02S	03E	M02E	03W	M02W
04N		045		045		0414/	
041	M03N	043	M03S	04L	M03E	0477	M03W
05N	M04N	055	M04S	05E	M04E	05W	M04W
06N		06S		06E		06W	

Figur 5.5: Sammenhæng mellem skråfotonummer og modelnummer.

## 5.2.2 Paspunktskonfiguration

Paspunktskonfigurationen beskrives indledende med hensyn til fordelingen og udvælgelsen af paspunkter og efterfølgende med hensyn til opmålingen. Det skal bemærkes at der udvælges paspunkter til hver enkel model, så hver enkel model kan orienteres for sig. Dette sker da det ikke vides hvorvidt det er muligt at foretage en aerotriangulation, da der er et begrænset overlap modellerne imellem.

#### Fordeling af paspunkter

Kriterierne for fordelingen af paspunkterne i de enkelte modeller tager udgangspunkt i Appendiks B afsnit B.2.4, hvori den optimale fordeling er beskrevet.

Der skal som minimum være 2 planpaspunkter og 3 højdepaspunkter pr. model for at kunne foretage den absolutte orientering. Det er dog fordelagtigt at der er flere, da dette giver overbestemmelser i udjævningen. Yderligere skal den polygon som de kombinerede højde- og planpaspunkter (XYZ-paspunkter) udspænder, dække det størst mulige areal af modellen. Samtidig anbefales det at der placeres et højdepaspunkt (Z-paspunkt) i midten af modellen for at kunne kontrollere for eventuelle deformationer i højden. På denne baggrund fordeles paspunkterne i de enkelte modeller efter følgende princip:

- Minimum fire XYZ-paspunkter (optimal situation er ét i hvert hjørne)
- Minimum et Z-paspunkt i midten af modellen
- XYZ-paspunkterne skal udspænde det størst mulig areal af modellen

Se Figur 5.6.



Figur 5.6: Principskitser af paspunktsfordeling.

#### Udvælgelse af paspunkter

Velegnede paspunkter er kendetegnet ved at være veldefinerede og centralsymmetriske i form, da dette giver den bedste opmålingsnøjagtighed. Yderligere er det vigtigt at paspunkterne kan ses og opmåles i begge billederne. En fingerregel er, at objekter kan genkendes ned til 3 x GSD. Dette betyder at det vil variere hvilke objekter, der kan anvendes som paspunkter alt efter hvor i billedet objektet ligger. I bunden af billedet vil det være muligt at genkende objekter i størrelsen 19,2 x 22,8 cm og i toppen 31,2 x 59,6 cm.

Den centralsymmetriske form er ikke mulig at opnå i billederne, da objekterne ses fra skråt perspektiv og derfor er fortegnet. Der tages dog stadig udgangspunkt i at objekterne, der anvendes som paspunkter i marken skal være centralsymmetriske, da dette vurderes at give den bedste opmålingsnøjagtighed. Det sidste kriterium er at paspunkterne skal være placeret på jorden, da det letter opmålingsopgaven.

Det vurderes ud fra ovenstående kriterier at følgende objekter vil være velegnede til paspunkter, grundet at de er veldefinerede, centralsystemmetriske og findes i stort antal inden for projektområdet, hvilket betyder at der er større chance for at opnå den optimale paspunktsfordeling.

- Brønddæksler (runde eller firkantet og varierer i størrelse fra cirka 30 cm og opefter)
- Nedløbsriste (firkantet eller rektangulære og standardstørrelse cirka 30 x 30 cm)
Paspunkterne er udvalgt manuelt ved visuelt at gennemgå hver enkelt model (overlappet mellem to billeder). Der er i planlægningen udvalgt 86 brønddæksler og nedløbsriste, der skal anvendes som paspunkter og i Bilag II ses det hvilke punkter, der er planlagt som paspunkter for hvilke modeller. De punkter som ikke anvendes som paspunkter, og ligger indenfor modelområdet som orienteres, anvendes som kontrolpunkter.

#### Opmåling af paspunkter

Til hvert paspunkt opmåles der tredimensionelle objektkoordinater, der er af overlegen nøjagtighed i forhold til den forventede nøjagtighed i produktet, der produceres. Det er en normal antagelse, at en overlegen nøjagtighed er 1/3 af den nøjagtighed, der ønskes i det færdige produkt. Der er ingen umiddelbare forventninger til nøjagtigheden i DTM'en, der skal fremstilles. Der tages derfor udgangspunkt i nøjagtigheden i de DTM'er, der findes på det danske marked, til at fastslå nøjagtigheden i paspunkterne. Ifølge COWI (2006) kan der forventes en spredning på 0,10 m i højden og større i planen. Det vil sige at paspunkterne skal opmåles med en nøjagtighed på cirka 0,03 til 0,04 m i højde og planen.

Paspunkterne opmåles med GNSS Real Time Kinematic (RTK), da denne metode erfaringsmæssigt opfylder kravet om en spredning på 0,03 til 0,04 m eller under. Der findes i Danmark to RTK-tjenester (GPSnet.dk og Spidernet), og begge systemer bygger på RTK netværksløsning, hvor korrektioner fra flere referencestationer anvendes. Begge systemer kan modtage signaler fra GPS og GLONASS satellitter, så længe GNSS modtager ligeledes kan det. Det vil sige at der grundlæggende ikke er væsentlig forskel de to systemer i mellem. (Leica 2009)(GEOTEAM 2009)

GPSnet.dk anvendes sammen en Trimble R8 GNSS modtager, da der er erfaring hermed og da GNSS modtageren kan modtage signal fra både GPS og GLONASS satellitter.

Paspunkterne opmåles i referencesystemet UTM32N med ETRS89 som datum og DVR90 som højdesystem. Paspunkterne opmåles to gange med mindst én times mellemrum for at sikre at der ikke sker grove eller systematiske fejl.

De to opmålingerne blev foretaget henholdsvis den 23. og 24. marts 2009 og i Bilag III er problemer, rettelser osv. beskrevet, samtidig med at der er beregnet middelværdier og spredninger for paspunkterne, samt kontrolleret for grove fejl. Der er i forbindelse med vurderingen af paspunkterne fjernet to paspunkter på grund af grove fejl. Der er i alt opmålt 84 brugbare paspunkter og paspunkterne er opmålt med følgende nøjagtighed, se Tekstboks 5.3. Beregningerne af nøjagtighederne er foretaget i MatLab efter Formel 6 i Appendiks A og de anvendte scripts findes på DVD 01.02 og data på DVD 02.

RMSE <sub>E</sub>	0,004 m	
RMSE <sub>N</sub>	0,005 m	
RMSE <sub>H</sub>	0,009 m	

Tekstboks 5.3: Beregnet RMSE hvor (Δ) er afvigelsen til den beregnede middelværdi.

# 5.2.3 Software

Softwaren, der anvendes, skal dække de behov opgaven kræver, hvilke er orientering (enkeltvis eller aerotriangulation/stråleudjævning), automatisk fremstilling af højdemodeller og filtrering. For at sikre at den udvalgte software dækker behovene foretages der en række indledende undersøgelser.

Z/I ImageStation anvendes til orientering og automatisk fremstilling af højdemodellerne, mens Inpho DTMaster anvendes til filtreringen.

#### Z/I ImageStation

Z/I ImageStation er en samlet programpakke, der består af en række forskellige programelementer. Til orienteringen anvendes ImageStation Digital Mensuration (ISDM) mens der til fremstillingen af højdemodellen anvendes ImageStation DTM Collection (ISDC) og ImageStation Automatic Elevations (ISAE). Manualerne til ISDM og ISAE findes på DVD 10.

# DTMaster

DTMaster er et kontrol-, editerings- og klassifikationsprogram til DTM'er, og findes i to udgave, mono editering eller stereo editering. DTMaster er en del af Inpho's digital fotogrammetriske programpakke ApplicationsMaster. Manual til DTMaster og ApplicationsMaster findes på DVD 10.

#### Indledende undersøgelser

Kun Z/I programmerne undersøges indledende, da det jf. afsnit 2.5 *Fremstilling af DSM/DTM vha. ikke-nadirbilleder* er i fremstillingsprocessen af højdemodellerne, der oftest opstår problemer. De indledende undersøgelser er beskrevet i Bilag VII, hvori det konstateres at det er muligt at orientere skråfotos i en stereomodel gennem sideoverlappet og automatisk fremstille en højdemodel. Den automatiske fremstilling af en højdemodel i Z/I kræver dog at  $\tau$  (nadirvinklen) er nær nul, hvilket betyder at  $\tau$  skal udlignes efter princippet vist i Figur 5.7, hvor terrænet transformeres fra fladt til skråt.



Figur 5.7: Udligning af billedets hældning (τ) gennem transformation.

# 5.2.4 Strategi for fremstilling af DTM

Strategien beskriver på overordnet niveau, hvordan modellerne orienteres, højdemodellen fremstilles og filtreres. Strategien tager udgangspunkt i tidligere diskussioner og vurderinger, som fremhæves i det nedenstående. Yderligere tages der udgangspunkt i projektets problemformulering, hvilket sker for at sikre at de produkter, der produceres kan besvare denne.

Det blev i afsnit 2.6 *Opsamling af den initierende problemstilling* vurderet at korrelation og dermed fremstillingen af en DTM bør sker på baggrund af billeder optaget fra samme optagelsesretning. Der vil derfor blive arbejdet individuelt med modellerne fra de fire optagelsesretninger. Det gælder både i orienteringen, i fremstillingen af højdemodellerne og i filtreringen.

Det blev ligeledes formodet, at det ikke er muligt at foretage en aerotriangulation, grundet begrænset overlap. Dette er stadig den umiddelbare opfattelse, dog vil det blive forsøgt, og hvis det ikke lykkes vil hver enkel model blive orienteret for sig. I og med at hver enkel model måske orienteres for sig vil der blive fremstillet én højdemodel for hvert modelområde. Det vil sige at der bliver fremstillet fire højdemodeller for hver optagelsesretning, som efterfølgende skal forenes til én samlet højdemodel for hver optagelsesretning, hvorefter der foretages filtrering.

En anden vigtig vurdering er at softwaren (Z/I) ikke kan håndtere skråfotos i den automatiske fremstilling af højdemodellerne. Det er derfor nødvendigt at transformere skråfotos af et fladt terræn til nadirbilleder af et skråt terræn, hvilket sker ved at transformere paspunkterne inden billederne orienteres. Paspunkterne transformeres forskelligt alt efter optagelsesretning, hvilket betyder at der bliver dannet fire lokale referencesystemer. Transformationerne bevirker ligeledes af de fremstillede højdemodeller efterfølgende skal transformeres tilbage.

I forhold til projektets problemformulering er det vigtigt at der fremstilles én terrænmodel for hver optagelsesretning, samt at der fremstilles én samlet på baggrund af data fra alle fire optagelsesretninger.

På baggrund af ovenstående vurderinger er følgende strategi udarbejdet, se Figur 5.8 og efterfølgende beskrivelse.



*Trin 1:* Paspunkterne transformeres fra UTM32N til lokale referencesystemer alt efter optagelsesretning, hvilket sker så ISAE kan anvendes til den automatiske fremstilling af en højdemodel. Transformationen foretages i MatLab.

*Trin 2:* Modellerne orienteres samlet for hver optagelsesretning i en aerotriangulation eller enkeltvis gennem en relativ og absolut orientering afhængig af hvad der er muligt. Orienteringen foretages i ISDM.

*Trin 3:* Der fremstilles som udgangspunkt én højdemodel eller én punktsky (afhængig af output fra ISAE) for hvert af modelområderne, og hvis det er muligt fremstilles der en samlet for hver optagelseretning. Fremstillingen af højdemodellerne foretages i ISAE.

*Trin 4:* De fremstillede højdemodeller eller punktskyer transformeres fra de lokale referencesystemer tilbage til UTM32N, hvilket sker i MatLab, og efterfølgende foretages der en filtrering af hver enkel højdemodel eller punktsky for grove fejl og en kontrol af systematiske fejl. Filtreringen af de grove fejl foretages i DTMaster

*Trin 5:* Højdemodellerne eller punktskyerne forenes for hver optagelsesretning i én højdemodel, hvis dette ikke er sket i trin 3 og i én samlet højdemodel (16 til 1). I forbindelse med foreningen generes et nyt grid hvortil højderne interpoleres fra de forenede højdemodeller. Det nye grid generes da der kan forekomme overlap højdemodellerne i mellem. Foreningen og genereringen af det nye grid foretages DTMaster.

*Trin 6:* De forenede og nyinterpolerede højdemodeller (én for hver optagelsesretning og én samlet) filtreres og der fremstilles én filtreret terrænmodel for hver optagelsesretning og én samlet filtreret terrænmodel. Filtreringen foretages i DTMaster.

*Trin 7:* De filtrede terrænmodeller udfyldes gennem en interpolation, og interpolationen foretages i DTMaster.

## Projektdefinition af højdemodeller

I den beskrevne og illustrerede strategi arbejdes der med fire forskellige former for højdemodeller, hvilke i det nedenstående vil blive defineret for dette projekt.

*Punktsky:* En punktsky defineres som uordnede punkter i et tredimensionalt koordinatsystem, se Figur 5.9, og i projektsammenhæng er punktskyen et produkt af korrelerede interessepunkter i ISEA.

Højdemodel: En højdemodel defineres som punkter i et regulært grid i et tredimensionalt koordinatsystem, hvor punkterne både afspejler objekter over terræn (bygninger, træer og lignende) og terrænet, se Figur 5.9. I projektsammenhæng er højdemodellen et produkt af de korrelerede interessepunkter i ISEA eller et produkt af forenede punktskyer.

*Filtreret terrænmodel:* En filtreret terrænmodel defineres som en højdemodel i et tredimensionalt koordinatsystem, hvor objekter over terræn er filtreret væk, se Figur 5.9. I projektsammenhæng er en filtreret terrænmodel et produkt af filtreringen af højdemodellerne i DTMaster.

*Terrænmodel:* En terrænmodel defineres som en filtreret terrænmodel, hvor der vha. interpolation er sket en udfyldning af de huller filtreringen har efterladt, se Figur 5.9. Terrænmodellen er et produkt af interpolationen i DTMaster.



Figur 5.9: Illustration af de fire definerede projekthøjdemodeller.

# 5.3 Orientering af skråfotos og modelområder

Formålet med dette afsnit er at beskrive orienteringen af de enkelte modeller, herunder hvordan parametrene i orienteringen indstilles.

Indledningsvist behandles transformationerne af paspunkterne/terrænet, hvorefter parametrene i ISDM indstilles og afslutningsvis foretages orienteringerne, enkeltvis eller i en aerotriangulation.

# 5.3.1 Transformation UTM32N → Lokal

Transformationen af paspunkterne/terrænet er nødvendig for at højdemodellerne automatisk kan fremstilles i ISAE. Terrænet vil kun blive transformeret omkring én akse, da formålet er at udligne  $\tau$  (nadirvinklen). Hvilken akse terrænet roteres omkring er forskellig alt efter optagelsesretning og det samme gør sig gældende for fortegnet af rotationen.

Paspunkter for nord og syd modeller roteres omkring E-aksen (1-aksen rotation  $\omega$ ), mens paspunkter for vest og øst modeller roteres omkring N-aksen (2-aksen rotation  $\varphi$ ), jf. Formel 2 i Appendiks A. Paspunkter for nord og vest modeller roteres +45 grader, mens paspunkter for syd og øst modeller roteres -45 grader. Rotationerne er illustreret i Figur 5.10.



Figur 5.10: Rotation af paspunkterne/terrænet for henholdsvis nord, syd, øst og vest modeller.

Inden rotationerne foretages, forskydes paspunkternes plantyngdepunkt til (0,0). Forskydningen har ingen betydning og foretages udelukkende af kosmetiske årsager. Herefter foretages rotationerne og alle rotationer foretages hvor plantyngdepunktet ligger i (0,0). Efter at rotationerne er foretaget, forskydes (0,0) tilbage til paspunkternes plantyngdepunkt, se Figur 5.11 for grafisk illustration eller Tekstboks 5.4 for de anvendte formler.



Figur 5	5.11:	Principskitse	for trans	formation	af terræn.
---------	-------	---------------	-----------	-----------	------------

Trin 1: Forskydning af paspunkternes plantyngdepunkt til (0,0)

Plantyngdepunkt (E, N)	$\left(\frac{Maks(E)+Min(E)}{2},\frac{Maks(N)+Min(N)}{2}\right)$
Forskydning af paspunkter	$\begin{bmatrix} Paspunkte1_i \\ Paspunktn1_i \\ Paspunkth1_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} PaspunktE_i \\ PaspunktN_i \\ PaspunktH_i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} PlantyngdepunktE \\ PlantyngdepunktN \\ 0 \end{bmatrix}$
Trin 2: Rotation af terræn	
Rotation ( $\omega$ ) omkring første akse	$R_{\omega} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega) & \sin(\omega) \\ 0 & -\sin(\omega) & \cos(\omega) \end{bmatrix}$
Rotation ( $arphi$ ) omkring anden akse	$R_{\varphi} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & 0 & -\sin(\varphi) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\varphi) & 0 & \cos(\varphi) \end{bmatrix}$
Rotation (κ) omkring tredje akse	$R_{\kappa} = \begin{bmatrix} \cos(\kappa) & \sin(\kappa) & 0\\ -\sin(\kappa) & \cos(\kappa) & 0\\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
Samlet rotationsmatrix	$(R_{\kappa} \times R_{\varphi} \times R_{\omega})$
Rotation af paspunkter	$\begin{bmatrix} Paspunkte2_i \\ Paspunktn2_i \\ Paspunkth2_i \end{bmatrix} = (R_{\kappa} \times R_{\varphi} \times R_{\omega}) \times \begin{bmatrix} Paspunkte1_i \\ Paspunktn1_i \\ Paspunkth1_i \end{bmatrix}$
Trin 3: Forskvdnina af (0.0) tilbaae t	il paspunkternes plantvnadepunkt

	[PaspunktHny <sub>i</sub> ]	[Paspunkth2 <sub>i</sub> ]			
Forskydning af paspunkter	$ PaspunktNny_i  =$	$ Paspunktn2_i  +$	+ PlanmidtpunktN		
	[PaspunktEny <sub>i</sub> ]	[Paspunkte2 <sub>i</sub> ]	[PlanmidtpunktE]		

Tekstboks 5.4: Formler for transformation af terræn. UTM32N  $\rightarrow$  Lokal.

Rotationerne og forskydningerne foretages i MatLab og de anvendte scripts findes på DVD 01.03 og in- og outputfiler samt parametre for transformationerne på DVD 02.04. Der er i forbindelse med transformationen UTM32N  $\rightarrow$  Lokal ligeledes udarbejdet et script, der senere skal anvendes til at transformere højdemodellerne tilbage Lokal  $\rightarrow$  UTM32N, hvilken findes på DVD 01.04.

# 5.3.2 Parameterindstilling

Parametrene, der indstilles er beskrevet i Appendiks C, og i det nedenstående indstilles og begrundes indstillingerne. Indstillingen af parametrene er ikke afhængige af hvordan orienteringen foretages (enkeltvis eller i en aerotriangulation), hvorfor alle parametre i de fem indstillingskategorier Projektet, Kameraerne, Paspunkterne, Billederne og Modellerne beskrives.

#### Projektindstillinger

Parametre	Indstilling
Data type	Luftfotos
Koordinatsystem	Regulær grid – ETRS89
Afstandsenhed	Meter
Vinkelenhed	Grader
A priori $\sigma_0$	2,4 μm
Jordens radius	6.378.388 m
Flyvehøjde	580 m
Middel højde	0 m
Maksimalt antal iteration	10 iterationer
Stopkriterium i udjævning	0,001 meter ( $\Delta$ i projektionscentret koordinater)
	0,0001 gon ( $\Delta$ i billedets rotationer)
Acceptabel RO	5 μm (maks. spredning)
	15 μm (maks. residual)
Acceptabel AO	5 μm (maks. spredning)
	0,027 m i XY og 0,073 m i Z (maks. RMSE)
	0,081 m i XY og 0,219 m i Z (maks. residual)

Tekstboks 5.5: Indstillinger af projekt.

Koordinatsystemet indstilles til et regulært grid med ETRS89 som datum, da plankoordinater stadig efter transformationen ligger i en tilnærmet udgave af ETRS89. Højden indstilles som udefineret efter som højden er stærkt transformeret. Afstandsenheden sættes meter mens vinkelenheden sættes til grader.

A priori spredningen  $\sigma_0$  (spredningen på én måling i billedet) sættes til 2,4 µm, hvilket svarer til 1/3 af pixelstørrelsen, som erfaringsmæssigt er hvor godt der kan opmåles i billeder. Flyvehøjden indstilles til 580 m, hvilket er et estimat for den transformerede flyvehøjde.

Stopkriterierne for udjævningerne, herunder maksimal antal iterationer sættes til default værdierne, men hvis udjævning kører mere end 10 iterationer vil der blive ændret på stopkriterierne, hvis det ikke skyldes andre indstillingsfejl.

Maks. spredningen i den relative orientering sættes til 5 µm mens maks. residual sættes til 3 x maks. spredning. Maks. spredning i den absolutte orientering sættes 5 µm, mens maks. RMSE sættes til 0,027 m for XY og 0,073 m for Z og maks. residual sættes til 3 x maks. RMSE. Maks. RMSE er beregnet ud fra formlerne i Appendiksfigur 5 i Appendiks B, der beregner en forventet nøjagtighed i planet og højden. Følgende værdier er anvendt, m<sub>B</sub> = 11.000, h<sub>transformeret</sub> = 580 m, b<sub>transformeret</sub> = 210 m (4/10 af billedbredde i midten) og  $\sigma_B$  = 2,4 µm. m<sub>B</sub>, h<sub>transformeret</sub> og b<sub>transformeret</sub> er ikke eksakte værdier men estimater.

De indstillede maks. spredninger og residualer i den relative og absolutte orientering har ingen betydning for selve udjævningen og estimeringen af den ydre orientering, da de blot anvendes til at indikere om den relative eller absolutte orientering er acceptable.

#### Kameraindstillinger

Parametre	Indstilling
Kameranavn	KAM+optagelsesretning
Type kamera	Digital
Kamerakonstant	Indstilles jf. kalibreringsrapport, se Tekstboks 5.7 og Bilag I
Midtpunkt	Indstilles jf. kalibreringsrapport, se Tekstboks 5.7 og Bilag I
Hovedpunkt	Indstilles jf. kalibreringsrapport, se Tekstboks 5.7 og Bilag I
Orientering af billedformat	Rækker 1. akse, kolonner 2. akse og pixel (1,1) i øverst venstre hjørne
Antal linier (rækker)	3328 nixels
Antal samples (kolonner) pr. linie	4992 pixels
Pixelbredde	7.2 um
Pixelhøjde	7,2 μm
Linsefortegnelse	Til
Linsefortegnelse format	Tabel
Linsefortegnelse enhed	Afstand
Linsefortegnelse metode	Middel

Tekstboks 5.6: Indstillinger af kameraerne.

Linsefortegnelse sættes til, da der er foretaget kalibrering af kameraerne. Linsefortegnelserne er leveret i tabel og koefficienter, men tabel anvendes da det ikke vides hvorvidt de leverede koefficienter svarer til koefficienterne i ISDM. Linsefortegnelserne indtastes jf. kalibreringsrapporterne, se Bilag I.

KAMNORD	
Kamerakonstant (mm)	51,607
Hovedpunkt (x, y) (mm)	(-0,077, 0,043)
KAMSYD	
Kamerakonstant (mm)	51,714
Hovedpunkt (x, y) (mm)	(-0,312, 0,178)
KAMVEST	
Kamerakonstant (mm)	51,507
Hovedpunkt (x, y) (mm)	(-0,215, 0,140)
KAMOEST	
Kamerakonstant (mm)	51,679
Hovedpunkt (x, y) (mm)	(-0,206, 0,068)
Taliathalia C. Z. Kawawaliawataw	at an have during la fair de fine lieur an an

Tekstboks 5.7: Kamerakonstant og hovedpunkt for de fire kameraer.

## Paspunktsindstillinger

Alle paspunkter på nær punkt 2701 indstilles til kombinerede plan- og højdepaspunkter. Punkt 2701 indstilles til højdepaspunkter og spredningerne indstilles jf. de tidligere beregnede RMSE værdier, se Tekstboks 5.3. RMSE<sub>E</sub> 0,004 m, RMSE<sub>N</sub> 0,005 m og RMSE<sub>H</sub> 0,009 m.

## Billeder

Parametre	Indstillinger
Kamera	Indstilles til det kamera, der har optaget billedet
Kameraorientering	270 grader
Optagelsesforhold	Nadir
Projektionscentre	Default
Rotationer	Default
Taketbake E 8. Indetillingar f	or billodor

Tekstboks 5.8: Indstillinger for billeder.

Optagelsesforhold sættes til nadir, da der tidligere er foretaget en transformation af terrænet, der gør at billederne går fra skråfotos af et fladt terræn til nadirbilleder fra et skråt terræn.

Inden billederne indlæses i Z/I konverteres de først fra jpeg til tiff og der fremstilles efterfølgende billedpyramider med ni niveauer. Billedpyramiderne fremstilles efter Gaussian interpolation.

#### Modeller

Modellerne indstilles jf. modelkonfigurationerne i afsnit 5.2.1.

# 5.3.3 Orientering

Orienteringerne er foretaget i en samlet stråleudjævning (aerotriangulation) for hver optagelsesretning. Det vil sige at de seks skråfotos for hver optagelsesretning er orienteret samtidig og har dermed haft indflydelse på hinanden i estimeringen af de ydre orienteringsparametre.

Billedkoordinaterne er opmålt i ISDM vha. Multiphoto, hvori det er muligt at opmåle billedkoordinater i flere billeder samtidig. Stråleudjævningen er foretaget vha. Photo Triangualtion i ISDM, hvori de modeller, der ønskes orienteret udvælges. Parametrene i Photo Triangulation er indstillet til default, jf. ISDM (2008, s. 244-282).

De fire modelområder for hver optagelsesretning, er efterfølgende dannet på baggrund af de estimerede ydre orienteringsparametre fra stråleudjævningerne.

Der er i stråleudjævningen udelukkende blevet anvendt paspunkter og der er ikke foretaget nogen relativ orientering. Paspunkterne, der er blevet anvendt og opmålt, udspænder inden for hver enkel model det størst mulige polygon og der er som minimum opmålt fem XYZ-paspunkter (ét i hvert hjørne og ét i midten). De punkter, der ikke er opmålt som paspunkter, og ligger inden for modelområderne, er opmålt som kontrolpunkter. Et kontrolpunkt er kun opmålt i sideoverlappet mellem to billeder, hvorved nøjagtigheden af kontrolpunkterne afspejler nøjagtigheden i stereomodellerne, der senere anvendes til fremstillingen af højdemodellerne.

# 5.3.4 Resultat

For hver optagelsesretning findes der på DVD 03.01 en orienteringsrapport og en stråleudjævningsrapport. Orienteringsrapporten beskriver hvordan projektet er opsat og hvordan orienteringen er gået. Herunder beskrives a posteriori spredningen, antal iterationer, antal frihedsgrader, RMSE for paspunkter og kontrolpunkter, de ydre orienteringsparametre og spredningen heraf osv. I stråleudjævningsrapport beskrives stråleudjævningen.

Hovedelementerne for hver stråleudjævning (én for hver optagelsesretning) beskrives i det nedenstående. Det skal pointeres at RMSE værdierne er beregnet i de lokale referencesystemer, hvor terrænet er roteret, hvorfor nøjagtighederne ikke direkte kan overføres til UTM32N.

NORD			
A posteriori $\widehat{\sigma}_0$	3.6 µm		
Antal iterationer	3		
Frihedsgrader	140		
Antal Paspunkter	29		(Fordelingen ses i Bilag IV)
Antal Kontrolpunkter	30		
Antal Billedpunkter	133		(Fordelingen ses i Bilag IV)
	Lokal E	Lokal N	Lokal H
RMSE Paspunkter	0.002	0.003	0.003 meter
RMSE Kontrolpunkter	0.047	0.040	0.188 meter

Tekstboks 5.9: Resultat af stråleudjævning for skråfotos med optagelsesretning nord.

SYD			
A posteriori $\hat{\sigma}_0$	4.3 μm		
Antal iterationer	2		
Frihedsgrader	122		
Antal Paspunkter	31		(Fordelingen ses i Bilag IV)
Antal Kontrolpunkter	10		
Antal Billedpunkter	94		(Fordelingen ses i Bilag IV)
	Lokal E	Lokal N	Lokal H
RMSE Paspunkter	0.002	0.002	0.002 meter
RMSE Kontrolpunkter	0.026	0.050	0.217 meter
Talethales E 10. Desultat of at			

Tekstboks 5.10: Resultat af stråleudjævning for skråfotos med optagelsesretning syd.

5.7 μm		
2		
127		
26		(Fordelingen ses i Bilag IV)
15		
105		(Fordelingen ses i Bilag IV)
Lokal E	Lokal N	Lokal H
0.001	0.004	0.004 meter
0.057	0.046	0.188 meter
	5.7 μm 2 127 26 15 105 Lokal E 0.001 0.057	5.7 μm 2 127 26 15 105 Lokal E Lokal N 0.001 0.004 0.057 0.046

Tekstboks 5.11: Resultat af stråleudjævning for skråfotos med optagelsesretning vest.

ØST			
A posteriori $\hat{\sigma}_0$	3.0 μm		
Antal iterationer	2		
Frihedsgrader	144		
Antal Paspunkter	30		(Fordelingen ses i Bilag IV)
Antal Kontrolpunkter	24		
Antal Billedpunkter	126		(Fordelingen ses i Bilag IV)
	Lokal E	Lokal N	Lokal H
RMSE Paspunkter	0.001	0.002	0.001 meter
RMSE Kontrolpunkter	0.023	0.045	0.195 meter

Tekstboks 5.12: Resultat af stråleudjævning for skråfotos med optagelsesretning øst.

A posteriori spredningerne ligger for tre af de fire optagelsesretninger (nord, syd og øst) inden for 2 gange a priori spredningen, hvilket vurderes at være tilfredsstillende, da der ikke tidligere er erfaringer med opmåling i skråfotos. A posteriori spredningen i den sidste stråleudjævning (vest) ligger over 2 gange a priori spredning, og årsagen hertil kan være at spredningen på billedkoordinaterne ikke er vægtet korrekt eller det at der anvendt et mindre antal paspunkter. Spredningerne på billedkoordinaterne ændres dog ikke, da billederne fra vest er optaget under samme forhold som de øvrige billeder og da billedkoordinaterne er opmålt i samme program. Der ses derfor ingen grund til differentiere mellem optagelsesretningerne og det må derfor accepteres at modellerne for optagelsesretning vest er orienteret dårligere end de tre øvrige. Der opmåles heller ikke flere paspunkter, da paspunktskonfigurationen opfyldes (ét paspunkt i hvert hjørne og én i midten).

Kontrolpunkterne i stereomodeller er opmålt med nøjagtighed fra 0,025 til 0,060 meter i planen (cirka 0,5 gange  $GSD_M$ ) og fra 0,18 til 0,22 meter i højden (cirka 2 gange  $GSD_M$ ), hvor  $GSD_M$  er 0,10 meter (cirka GSD i midten af et skråfoto). Kontrolpunkternes nøjagtighed er cirka faktor 2 større end de forventede nøjagtigheder 0,027 meter i planen og 0,073 meter i højden, jf. Tekstboks 5.5. Dette var forventeligt eftersom formlerne, der er anvendt til at beregne de forventede nøjagtigheder

normalt anvendes ved nadirbilleder af et fladt terræn og ikke ved nadirbilleder af et skråt terræn eller skråfotos.

Udgangspunktet for den senere højdenøjagtighed i terrænmodellerne er cirka 2 gange GSD, cirka 0,20 m. Det forventes dog at nøjagtigheden ligger højere eftersom terrænmodellerne fremstilles automatisk gennem korrelation.

Det skal igen pointeres at nøjagtighederne ikke er beregnet i UTM32N, men i lokale referencesystemer. Det vurderes dog stadig at nøjagtighederne til en hvis grad afspejler en mulig opmålingsnøjagtighed i UTM32N.

#### 5.3.5 Kalibrering og ny-orientering

Der foretages en kalibrering af de fire kameraer og en efterfølgende ny-orientering på baggrund af kalibreringerne. Kalibreringen foretages i et forsøg på at forbedre orientering og den senere nøjagtighed i terrænmodellerne.

#### Kalibrering

Kalibreringen foretages i stråleudjævningsprogrammet Dirks General Analytical Positioning (DGAP), da programmet på et tidligere semester succesfuldt er anvendt i forbindelse med kalibrering af et ikke-fotogrammetrisk kamera. (Johannessen et al. 2008)

Kalibreringen foretages i en stråleudjævning, hvor alle paspunkter, billeder (uanset optagelsesretning) og kameraer indgår. De paspunkter der indgår, er de der er anvendt i den tidligere orientering. Det vil sige at der ikke er opmålt yderligere paspunkter og paspunktsfordeling er lig den tidligere paspunktsfordeling. Parametrene i stråleudjævningen indstilles så vidt muligt jf. de tidligere parameterindstillinger i afsnit 5.3.2, se Tekstboks 5.13.

Parametre	Indstillinger
A priori $\sigma_0$	2,4 μm
Spredning på billedkoordinat	2,5 μm
Spredning på paspunkt	RMSE <sub>ε</sub> 0,004 m, RMSE <sub>N</sub> 0,005 m og RMSE <sub>H</sub> 0,009 m
Maksimalt antal iteration	10 iterationer
Stopkriterium i udiævnina	0.001 meter (Δ i projektionscentret koordinater)

Input i stråleudjævningen er alle opmålte paspunkter, billedkoordinater og foreløbige værdier for de indre og ydre orienteringer.

Observationerne i stråleudjævningen er paspunkterne, de opmålte billedkoordinater og E, N og H koordinaterne af projektionscentrene. De ubekendte er rotationerne af projektionscentrene og de indre orienteringer. De foreløbige værdier for rotationerne indstilles i  $\alpha$ , v,  $\kappa$ -system, da rotationer i et  $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$ -system erfaringsmæssigt giver problemer i DGAP jf. Johannessen et al. (2008).  $\alpha$  definerer orienteringen af billedkoordinatsystemet i forhold til et referencesystem, v definerer nadirdistance og  $\kappa$  definerer drejning af billedet i forhold til billedkoordinatsystemet, se Figur 5.12. (Finsterwalder & Hofmann 1968, s. 29-30). v sættes til -45 grader og  $\kappa$  til 0 grader for alle skråfotos, mens  $\alpha$  sættes til 0 grader for skråfotos optaget mod nord, 180 grader for skråfotos optaget mod syd, 90 grader for skråfotos optaget mod vest og -90 grader for skråfotos optaget mod  $\varphi$ st. De foreløbige værdier for den indre orientering sættes til 51.0 mm (kamerakonstant) 0,0 (hovedpunkt). De ubekendte tildeles en høj spredning (10<sup>31</sup>), hvorved programmet anser dem for ubekendte.



Figur 5.12: *α*, *v*, *κ*-system. Frit tegnet efter Finsterwalder & Hofmann (1968, s. 30).

I Tekstboks 5.14 ses resultatet af stråleudjævningen og i Tekstboks 5.15 ses resultatet af kalibreringen set i forhold til værdierne fra COWI's kalibrering. Inputfiler, manual til DGAP, resultatrapport, kalibreringsrapport for hver optagelsesretning, kovariansmatricen og korrelationskoefficienterne fra stråleudjævningen kan findes på DVD 05.

Stråleudjævning DGAP
----------------------

A posteriori $\hat{\sigma}_0$	10.93μm
Antal iterationer	7
Frihedsgrader	837
Antal Paspunkter	81
Antal Billedpunkter	468
Antal Kameraer	4

Tekstboks 5.14: Resultat af stråleudjævning DGAP - Nord, Syd, Vest og Øst.

A posteriori spredningen ligger væsentlig over a priori og væsentlig over de tidligere stråleudjævninger i ISDM, hvor de lå fra 3,0 til 5,7 µm. Årsagen hertil kan være at der i stråleudjævningen i DGAP indgår billeder fra forskellige optagelsesretninger, hvorved der skabes større spændinger i mellem de opmålte billedkoordinater eller at observationerne er vægtet forkert. Dette kan dog afkræftes af undersøgelser hvor kun billeder optaget mod nord indgår og her er a posteriori stadig faktor 4,5 større end a priori. Der er yderligere foretaget undersøgelser hvor såvel a priori og spredningerne på paspunkterne ændres og her er faktoren mellem a posteriori og a priori stadig den sammen. Den umiddelbare forklaring på forskellen i a posteriori og a priori må derfor tilskrives at billederne er optaget i et skråt perspektiv.

	DGAP	Spredning DGAP	COWI
KAMNORD			
Kamerakonstant (mm)	51,821	0,0002	51,607
Hovedpunkt (x, y) (mm)	(-0,205, 0,257)	(0,0001, 0,0002)	(-0,077, 0,043)
KAMSYD			
Kamerakonstant (mm)	51,769	0,0002	51,714
Hovedpunkt (x, y) (mm)	(-0,395, 0,546)	(0,0001, 0,0002)	(-0,312, 0,178)
KAMVEST			
Kamerakonstant (mm)	51,794	0,0002	51,507
Hovedpunkt (x, y) (mm)	(-0,033, 0,393)	(0,0001, 0,0002)	(-0,215, 0,140)
KAMOEST			
Kamerakonstant (mm)	51,545	0,0002	51,679
Hovedpunkt (x, y) (mm)	(-0,189, 0,199)	(0,0001, 0,0002)	(-0,206, 0,068)

Tekstboks 5.15: Kalibreret kamerakonstant og hovedpunkt samt spredninger.

Der er en tendens til at kamerakonstanterne i DGAP er større end i COWI, og samtidig er der en tendens til at hovedpunkterne forskydes længere væk fra midtpunktet (0,0) i DGAP end i COWI. Den endelige vurdering af kalibreringens betydning foretages først efter at der er sket en ny-orientering af billederne på baggrund af DGAP kalibreringen.

#### Ny-orientering

Orienteringerne foretages efter de samme parameterindstillinger og paspunktsfordeling, der tidligere er blevet anvendt og beskrevet i afsnit 5.3.2 og 5.3.3. Resultatet af ny-orienteringerne ses i det nedenstående, men frihedsgrader, antal paspunkter, kontrolpunkter og billedpunkter beskrives ikke, da de er de samme som i de tidligere orienteringer. For hver optagelsesretning findes der på DVD 03.02 en orienteringsrapport og en stråleudjævningsrapport.

NORD				
A posteriori $\hat{\sigma}_0$	3.3 μm			
Antal iterationer	3			
	Lokal E	Lokal N	Lokal H	
RMSE Paspunkter	0.002	0.002	0.002 meter	
RMSE Kontrolpunkter	0.043	0.041	0.220 meter	
Tekstboks 5.16: Resultat af s DGAP kalibrering.	stråleudjævning for	skråfotos med	l optagelsesretning nord ef	ter
SYD				
A posteriori $\hat{\sigma}_0$	5.8 μm			
Antal iterationer	4			
	Lokal E	Lokal N	Lokal H	
RMSE Pasnunkter	0.002	0.003	0.004 meter	
nivise i uspunkter				
RMSE Fospanice RMSE Kontrolpunkter Tekstboks 5.17: Resultat af st librering.	0.033 råleudjævning for s	0.052 kråfotos med o	0.232 meter ptagelsesretning syd DGAP	ka-
RMSE Fospanicer RMSE Kontrolpunkter Tekstboks 5.17: Resultat af st librering. VEST	0.033 råleudjævning for s	0.052 kråfotos med o	0.232 meter ptagelsesretning syd DGAP	ka-
RMSE Fospanice RMSE Kontrolpunkter Tekstboks 5.17: Resultat af st librering. VEST A posteriori $\hat{\sigma}_0$	0.033 råleudjævning for s 4.2 μm	0.052 kråfotos med o	0.232 meter ptagelsesretning syd DGAP	ka-
RMSE Fospanice RMSE Kontrolpunkter Tekstboks 5.17: Resultat af st librering. VEST A posteriori $\hat{\sigma}_0$ Antal iterationer	0.033 råleudjævning for s 4.2 μm 2	0.052 kråfotos med o	0.232 meter ptagelsesretning syd DGAP	ka-
RMSE Fospanice RMSE Kontrolpunkter Tekstboks 5.17: Resultat af st librering. VEST A posteriori $\hat{\sigma}_0$ Antal iterationer	0.033 råleudjævning for s 4.2 μm 2 Lokal E	0.052 kråfotos med o Lokal N	0.232 meter ptagelsesretning syd DGAP Lokal H	ka-
RMSE Faspanker RMSE Kontrolpunkter Tekstboks 5.17: Resultat af st librering. VEST A posteriori $\hat{\sigma}_0$ Antal iterationer RMSE Paspunkter	0.033 råleudjævning for s 4.2 μm 2 Lokal E 0.001	0.052 kråfotos med o Lokal N 0.003	0.232 meter ptagelsesretning syd DGAP Lokal H 0.002 meter	ka-
RMSE Fospanice RMSE Kontrolpunkter Tekstboks 5.17: Resultat af st librering. VEST A posteriori $\hat{\sigma}_0$ Antal iterationer RMSE Paspunkter RMSE Kontrolpunkter	0.033 <b>råleudjævning for s</b> 4.2 μm 2 Lokal E 0.001 0.032	0.052 kråfotos med o Lokal N 0.003 0.043	0.232 meter ptagelsesretning syd DGAP Lokal H 0.002 meter 0.222 meter	ka-
RMSE Fospanice RMSE Kontrolpunkter Tekstboks 5.17: Resultat af st librering. VEST A posteriori $\hat{\sigma}_0$ Antal iterationer RMSE Paspunkter RMSE Paspunkter Tekstboks 5.18: Resultat af st DGAP kalibrering.	0.033 råleudjævning for si 4.2 μm 2 Lokal E 0.001 0.032 stråleudjævning for	0.052 kråfotos med o Lokal N 0.003 0.043 skråfotos med	0.232 meter ptagelsesretning syd DGAP Lokal H 0.002 meter 0.222 meter d optagelsesretning vest ef	ka-
RMSE Fospanice RMSE Kontrolpunkter Tekstboks 5.17: Resultat af st librering. VEST A posteriori $\hat{\sigma}_0$ Antal iterationer RMSE Paspunkter RMSE Paspunkter RMSE Kontrolpunkter Tekstboks 5.18: Resultat af s DGAP kalibrering.	0.033 råleudjævning for s 4.2 μm 2 Lokal E 0.001 0.032 stråleudjævning for	0.052 kråfotos med o Lokal N 0.003 0.043 skråfotos med	0.232 meter ptagelsesretning syd DGAP Lokal H 0.002 meter 0.222 meter d optagelsesretning vest ef	ka-
RMSE Fospanice         RMSE Kontrolpunkter         Tekstboks 5.17: Resultat af st         librering.         VEST         A posteriori $\hat{\sigma}_0$ Antal iterationer         RMSE Paspunkter         RMSE Kontrolpunkter         Tekstboks 5.18: Resultat af st         DGAP kalibrering.         ØST         A posteriori $\hat{\sigma}_0$	0.033 råleudjævning for s 4.2 μm 2 Lokal E 0.001 0.032 stråleudjævning for 3.7 μm	0.052 kråfotos med o Lokal N 0.003 0.043	0.232 meter ptagelsesretning syd DGAP Lokal H 0.002 meter 0.222 meter d optagelsesretning vest ef	ka-
RMSE Fospanice RMSE Kontrolpunkter Tekstboks 5.17: Resultat af st librering. VEST A posteriori $\hat{\sigma}_0$ Antal iterationer RMSE Paspunkter RMSE Paspunkter RMSE Kontrolpunkter Tekstboks 5.18: Resultat af s DGAP kalibrering. ØST A posteriori $\hat{\sigma}_0$ Antal iterationer	0.033 råleudjævning for s 4.2 μm 2 Lokal E 0.001 0.032 stråleudjævning for 3.7 μm 2	0.052 kråfotos med o Lokal N 0.003 0.043	0.232 meter ptagelsesretning syd DGAP Lokal H 0.002 meter 0.222 meter d optagelsesretning vest ef	ka-
RMSE Fospanice RMSE Kontrolpunkter Tekstboks 5.17: Resultat af st librering. VEST A posteriori $\hat{\sigma}_0$ Antal iterationer RMSE Paspunkter RMSE Paspunkter RMSE Kontrolpunkter Tekstboks 5.18: Resultat af s DGAP kalibrering. ØST A posteriori $\hat{\sigma}_0$ Antal iterationer	0.033 råleudjævning for s 4.2 μm 2 Lokal E 0.001 0.032 stråleudjævning for 3.7 μm 2 Lokal E	0.052 kråfotos med o Lokal N 0.003 0.043 skråfotos med Lokal N	0.232 meter ptagelsesretning syd DGAP Lokal H 0.002 meter 0.222 meter d optagelsesretning vest ef Lokal H	ka-
RMSE Fospunkter RMSE Kontrolpunkter Tekstboks 5.17: Resultat af st librering. VEST A posteriori $\hat{\sigma}_0$ Antal iterationer RMSE Paspunkter RMSE Kontrolpunkter Tekstboks 5.18: Resultat af st DGAP kalibrering. ØST A posteriori $\hat{\sigma}_0$ Antal iterationer RMSE Paspunkter	0.033 råleudjævning for s 4.2 μm 2 Lokal E 0.001 0.032 stråleudjævning for 3.7 μm 2 Lokal E 0.001	0.052 kråfotos med o Lokal N 0.003 0.043 skråfotos med Lokal N 0.003	0.232 meter ptagelsesretning syd DGAP Lokal H 0.002 meter 0.222 meter d optagelsesretning vest ef Lokal H 0.002 meter	ka-

Tekstboks 5.19: Resultat af stråleudjævning for skråfotos med optagelsesretning øst efter DGAP kalibrering.

Kalibreringen og ny-orienteringen har ikke nogen væsentlig indflydelse på nøjagtigheden af orienteringerne og kontrolpunkterne. Der ses dog mindre positive og negative ændringer. Generelt påvirker kalibreringen kontrolpunkternes nøjagtighed i en negativ retning dog positivt for optagelsesretning øst. Med hensyn til a posteriori spredningen bliver den for enkelte orienteringer mindre (nord og vest) og for andre større (syd og øst).

Det er derfor svært at vurdere hvorvidt kalibreringen har nogen indflydelse, da der ikke kan konstateres mærkbare eller ensartede ændringer mellem orienteringerne foretaget efter COWI's og DGAP's kalibrering.

Begge orienteringer vil derfor danne grundlag for en fremstilling af DTM, og nøjagtigheden af de to DTM'er vil blive sammenlignet og det vil blive vurderet hvorvidt kalibreringen i DGAP har haft indflydelse på nøjagtigheden.

# 5.4 Fremstilling af højdemodel

Formålet med dette afsnit er at beskrive fremstillingen af højdemodellerne for de enkelte modeller, herunder hvordan de forskellige parametre i fremstillingen indstilles, hvorvidt der har været problemer og hvordan højdemodellerne fra samme optagelsesretning i sidste ende forenes.

Indledningsvist indstilles parametrene i ISAE og efterfølgende fremstilles der én højdemodel for hvert modelområde og de enkelte højdemodeller transformeres tilbage til UTM32N fra de lokale referencesystemer. Afslutningsvis efterbehandles højdemodellerne, hvilket indebærer at højdemodeller fra samme optagelsesretning forenes.

# 5.4.1 Parameterindstilling

Parametrene, der indstilles er beskrevet i Appendiks D og i det nedenstående indstilles og begrundes indstillingerne af de forskellige parametre. Parametrene indstilles for emnerne Projekt og modeller, Parametre vedr. højdeindsamling og Output.

# Projekt og modeller

De orienterede modeller fra ISDM indlæses og der tilknyttes til hver af modellerne en DGN file. DGN filerne indeholder ingen indsamlingspolygoner, da disse automatisk generes, da overlap højdemodellerne imellem dermed undgås.

Parametre	Indstillinger
Terræntype	Mountainous
Parallakse søgefelt	15 pixels (default ved mountainous)
Epipolarafstand	1 pixel (default ved mountainous)
Selvjusterende parallakse	Fra
Selvjusterende korrelation	Til
Grid X	2 m
Grid Y	2 m
Selvjusterende grid	Fra
Sigma	0,228
Udglatningsfilter	Low
Udglatningsvægt	1 (default ved low)
Indsamlingspolygon	Automatisk genereret indsamlingspolygon
Korrelation søgefelt	5 (default)
Stopkriterium korrelationskoefficient	0,80

#### Parametre vedr. højdeindsamling

Terrænet indstilles til "mountainous", da terrænet er blevet transformeret fra et fladt til et skråt terræn, og de tilknyttede parametre indstilles til defaultværdier. Derudover anvendes selvjusterende

korrelation, hvilket sker i et forsøg på at fjerne svage områder (områder uden tekstur).

Den anbefalede grid er beregnet til 2,38 m (runder ned til 2 m) og Sigma er beregnet til 0,228 og følgende værdier er anvendt pixelstørrelse = 7,2 µm, m<sub>B</sub> ≈ 11.000, b<sub>transformeret</sub> ≈ 210 og h<sub>transformeret</sub> ≈ 580. De anvendte værdier er estimater.

Udglatningen indstilles til "low", da filtreringen jf. afsnit 5.2.3 foretages i DTMaster.

Parametre	Indstillinger
DGN file	Til (én per modelområde)
RAW file	Til (én per modelområde)
QUE file	Til (én per modelområde)
TTN file	Fra
Nøjagtighedsgrænse	0,174 m
Min. redundans	4 (default)
Grid punkter	Til
Grid punkter med lav redundans	Til
Grid punkter der overstiger nøjagtig-	
hedsgrænsen	Fra

Tekstboks 5.21: Indstillinger af parametre vedr. output.

Der vælges tre outputfiler, DGN, RAW og QUE. DGN vælges, da det dermed er muligt at vise den generede højdemodel sammen med stereomodellen. RAW vælges, da dette er de rå data (ASCII format) og da det derigennem er muligt at sige noget omkring fuldstændigheden og de døde områder. Det skal yderligere bemærkes at der ikke er foretaget udglatning af RAW filen og kun af QUE filen. QUE vælges, da det er en ASCII file af DGN.

Det skal bemærkes at det endnu ikke er besluttet, hvorvidt QUE eller RAW data anvendes i den senere filtreringsfase, hvilket ligeledes er årsagen til at begge filer vælges som output. Begge formater er dog kompatible med DTMaster, da de er i ASCII format.

Nøjagtighedsgrænsen beregnes som 3/10.000 af flyvehøjden (580 meter), da terrænet er blevet transformeret fra fladt til skråt.

# 5.4.2 Fremstilling

Hvert modelområde fremstilles to gange, én hvor COWI kalibrering er anvendt i orienteringen og én hvor DGAP kalibreringen er anvendt i orienteringen. Det vil sige at der fremstilles 32 højdemodeller. Der er i forbindelse med fremstillingen opstået problemer, hvilket enten har medført at højdemodeller ikke kunne fremstilles eller at der er foretaget enkelte ændringer i parameterindstillingerne.

Det var ikke muligt at fremstille højdemodeller for MO3W og M04E med COWI kalibreringen se Bilag VIII for fejlmeddelelse. Årsagen er højst sandsynligt en fejl i programmet eller projekterne og det har desværre ikke været muligt at lokalisere eller rette fejlen. Selve fejlen, som programmet beskriver den, er at det ene af de to billeder i stereomodellerne ikke kan indlæse. Det kan dog konstateres at der ikke er problemer med billederne, da de selv samme billeder anvendes i de samme modeller med DGAP kalibreringen. Den eneste forskel mellem modellerne med COWI og DGAP kalibreringen er kameraindstillingerne ellers er de to projekter en tro kopi af hinanden. Der er ligeledes oprette et nyt projekt helt fra bunden i et forsøg på at fjerne fejlen, men fejlen sker stadig. Der er derfor ikke fremstillet højdemodeller for M03W og M04E med COWI kalibreringe.

Et andet mindre problem har været at det ikke er muligt automatisk at genere indsamlingspolygoner. Derfor blev indstillingerne ændret således, at højdemodellerne bliver fremstillet for hele modelområdet, det vil sige at der automatiske genereres en indsamlingspolygon, der dækker hele modelområdet. Den automatiske generering af indsamlingspolygonerne for hele modelområdet giver dog mindre problemer for to af modelområderne, hvilket ses i Figur 5.17. Det ses at størrelsen for henholdsvis model 01 og 02 (stribe 1) i forhold til model 03 og 04 (stribe 2) varierer væsentlig. Årsagen hertil vurderes at være transformationen af terrænet, der bevirker at der er to forskellige flyvehøjder for hver stribe cirka 500 og 650 meter. Forskellen i flyvehøjden bevirker at indsamlingspolygoner generet med en flyvehøjde på 500 meter bliver mindre end dem med en flyvehøjde på 640 meter, da billedformatet for de to striber er ens, se Figur 5.14. Problemet vil være gældende for alle fire optagelsesretninger, da der er væsentlig forskel i flyvehøjden de to striber i hver optagelsesretning i mellem. En løsning på dette problem ville være manuelt at genere indsamlingspolygoner for alle modelområder, hvilket dog ikke foretages da det anses for at være for tidskrævende.



Figur 5.13: Principskitse for automatisk generering af indsamlingspolygoner og forskellig flyvehøjdes indflydelse.

Fremstillingen af højdemodellerne foregik ellers overordnet tilfredsstillende, dog er det ikke tilfredsstillede at der ikke er fremstillet højdemodeller for MO3W og M04E med COWI kalibreringen. Årsagen hertil er højst sandsynligt en fejl i programmet eller projekterne, dog har fejlen ikke været mulig at lokalisere.

# 5.4.3 Resultat

For hvert af de 16 modelområder er der fremstillet én højdemodel og på DVD 04 findes der log-filer, der beskriver hvilke indstillinger højdemodellerne er fremstillet under og hvordan fremstillingen er forløbet. Der findes ligeledes en DGN og en QUE eller RAW fil, alt efter hvilken én der anvendes i den senere filtrering, se DVD 06.01. I Appendiks E er de forskellige filbetegnelse og -ekstension vedr. højdedata nærmere beskrevet.

Fremstillingerne er forløbet tilfredsstillende og der er korreleret fra cirka 300.000 til 500.000 interessepunkter pr. punktsky, afhængig af teksturen i de enkelte modeller. De 16 højdemodeller/punktskyer beskrives ikke yderligere, da de først skal transformeres fra de lokale referencesystemer tilbage til UTM32N.

# 5.4.4 Transformation Lokal → UTM32N

Transformationen af højdemodellerne sker, da der tidligere er foretaget en transformation af paspunkterne/terrænet for at kunne anvende den automatiske fremstilling af højdemodeller i ISAE, jf. afsnit 5.3.1.

Transformationerne, der foretages, er den inverse rotation og modsatrettede translation af højdemodellerne på baggrund af de tidligere parametre for transformationerne UTM32N  $\rightarrow$  Lokal, se Tekstboks 5.22. De inverse rotationer og modsatrettede translationer foretages i MatLab og det anvendte scripts findes på DVD 01.04 og de transformerede højdemodeller på DVD 06.01. Parametrene for transformationerne er ses på DVD 02.04.

#### 4. Trin: Forskydning af projektområdets planmidtpunkt til (0,0)

Forskydning af terrænpunkter	$ \begin{bmatrix} pe1_i\\ pn1_i\\ ph1_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} pe_i\\ pn_i\\ ph_i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} PlantyngdepunktE\\ PlantyngdepunktN\\ 0 \end{bmatrix} $
5. Trin: Invers rotation af terræn	
Rotation af paspunkter	$ \begin{bmatrix} pE_i\\ pN_i\\ pH_i \end{bmatrix} = \left( R_{\kappa} \times R_{\varphi} \times R_{\omega} \right)^{-1} \times \begin{bmatrix} pe1_i\\ pn1_i\\ ph1_i \end{bmatrix} $

6. Trin: Forskydning af (0,0) tilbage til projektområdets planmidtpunkt

Forskydning af terrænpunkter	$\begin{bmatrix} pE1_i\\ pN1_i\\ pH1_i \end{bmatrix}$	=	$\begin{bmatrix} pE_i \\ pN_i \\ pH_i \end{bmatrix}$	+	[PlantyngdepunktE PlantyngdepunktN 0	
		c .				

Tekstboks 5.22: Formler for transformation af terræn. Lokal → UTM32N.

Transformationerne foretages enten for QUE og RAW filerne og leverer output i et XYZ format, der kan indlæses i DTMaster.

#### 5.4.5 Efterbehandling

Efterbehandlingen af højdemodellerne indebærer at højdemodeller fra samme optagelsesretning forenes og at der generes et nyt grid, men inden efterbehandlingen kan foretages skal det besluttes hvilket format, der skal anvendes, RAW eller QUE.

#### RAW eller QUE

QUE data er en filtreret højdemodel i et tilnærmet grid (cirka 2x2 m, forvreden i transformationen Lokal  $\rightarrow$  UTM32N) og der er gennemsnitlig 13.000 punkter pr. højdemodel, cirka 0,20 punkter pr. m<sup>2</sup>, se Figur 5.14, hvor arealet af et gennemsnitligt modelområde er beregnet til 70.000 m<sup>2</sup>. RAW data er en ubehandlet punktsky, der repræsenterer de korrelerede interessepunkter. Der er gennemsnitlig 400.000 punkter pr. højdemodel, cirka 5,71 punkter pr. m<sup>2</sup>, se Figur 5.14. Både RAW og QUE er i ASCII format.

RAW data anvendes, da det ikke er blevet filtreret eller manipuleret på anden vis. Yderligere er det muligt at interpolere et tættere grid i DTMaster på baggrund af RAW data end på baggrund af QUE.



Figur 5.14: (Venstre) Plot af QUE data. (Højre) Plot af RAW data.

#### Problemer med forening og generering af nyt grid

Foreningen af højdemodellerne skaber dog en række mindre problemer, der skal undersøges inden foreningen og genereringen af et nyt grid kan foretages. Problemerne udspringer i, at der er overlap punktskyerne imellem, hvilket bevirker at der inden for det samme område findes punkter fra to eller flere punktskyer. Dette er i sig selv ikke noget problem, så længe der ikke forekommer systematiske eller grove fejl i planet og højden. Hvis der forekommer systematiske eller grove fejl vil det have en væsentlig betydningen for kvaliteten af den samlede højdemodel, når to punktskyer forenes.

Det er derfor vigtig at undersøge hvorvidt der er systematiske fejl mellem de punktskyer, der skal forenes og hvorvidt der er grove fejl i den enkelte punktsky, inden de forenes og det nye grid generes.

#### Grove fejl i højden

Erfaringsmæssigt forekommer der ofte grove fejl i en automatisk generet højdemodel og punktsky i ISAE, specielt i kanterne. Det er derfor vigtigt at de grove fejl fjernes inden punktskyerne forenes, da dette specielt har betydning for nøjagtigheden i overlapsområderne. De grove fejl fjernes i DTMaster vha. et grovfejlsfilter.

Grovfejlsfiltret er bestemt ved tre parametre, en positiv højde, en negativ højde og en intern højdemodel. Den interne højdemodel genereres automatisk i forbindelse med filtreringen og alle punkter, der ligger over eller under de specificerede grænseværdier fjernes, se Figur 5.15. Det anbefales at den positive og negative højde sættes til tre gange den forventede nøjagtighed. (DTMaster 2008, s. 112-114)



Figur 5.15: Principskitse for grovfejlsfilter i DTMaster. Frit tegnet efter DTMaster (2008).

De grove fejl fjernes gennem to grovfejlsfiltre, der køres umiddelbart efter hinanden. I det første filter, sættes den positive og negative højde til -1,5 m, hvilket primært fjerner grove fejl under terræn, mens den positive og negative højde i det andet filter sættes til 1,5 m, hvilket primært fjerner grove fejl over terræn, se Figur 5.16.

Værdierne der anvendes i de to filtre fjerner erfaringsmæssigt de grove fejl over og under terræn. Det skal dog pointeres at det ikke kan forklares hvordan det første filter (-1,5) virker, men erfaringsmæssigt fjerner filteret de grove fejl under terræn.

Efter at grovfejlsfiltret er kørt, foretages der hurtigt en visuel kontrol langs kanterne og eventuelle synlige grove fejl fjernes.



Figur 5.16: Grove fejl fjernet vha. grovfejlsfilter (røde) og tilbageblevne punkter (blå), se afgrænsning af profilsnit i Figur 5.17.

Grovfejlsfiltret fjerner cirka 22 procent af punkterne i punktskyerne, hvilket umiddelbart virker som en del. Men en stor del af de grove fejl ligger i kanten af punktskyerne, hvor der erfaringsmæssigt ligger mange grove fejl. Derudover er de grove fejl spredt over det mest af modellerne og der er ikke nogen overordnet systematik i hvor de ligger, hvilket indikerer at der er tale om grove fejl og ikke systematiske fejl. En forklaring på det store antal grove fejl kan være at punktskyer er fremstillet på baggrund af skråfotos. Det skal dog pointeres, at der efter filtreringen gennemsnitlig er 300.000 punkter pr. punktsky cirka 4,23 pr. m<sup>2</sup>.

#### Systematiske fejl i planet og højden

Der undersøges for systematiske fejl i planet og højden og konstateres der systematiske fejl vil disse blive fjernet.

Undersøgelsen af systematiske fejl i planet foretages gennem en visuel kontrol, hvor de fire punktskyer fra samme optagelsesretning illustreres sammen. I rapporten er kontrollen foretaget for optagelsesretning nord, se Figur 5.17.

Undersøgelsen af systematiske fejl i højden foretages ligeledes gennem en visuel kontrol, hvor punktsky 3 fra hver optagelsesretning illustreres sammen med punktsky 4 (kontrol af sideoverlap) og punktsky 1 (kontrol af længdeoverlappet). I rapporten er kontrollen foretaget for optagelsesretning nord, se Figur 5.18. Det skal pointeres at højdemodellerne illustreret i Figur 5.18 er punktskyer, og at der endnu ikke er fjernet huse, træer eller lignende.



Figur 5.17: (Venstre) Punkter fjernet vha. grovfejlsfilter (røde), tilbageblevne punkter (blå) og afgrænsning for profilsnit (sort). (Højre) Model 01 (rød), model 02 (grøn), model 03 (blå) og model 04 (pink) fra optagelsesretning nord.



Figur 5.18: (Øverst) Kontrolprofilsnit af længdeoverlap mellem punktsky 1 (rød) og punktsky 3 (blå). (Nederst) Kontrolprofilsnit af sideoverlap mellem punktsky 3 (blå) og punktsky 4 (pink).

Det vurderes på baggrund af den visuelle kontrol at der hverken er systematiske fejl i planet eller i højden. Dette vurderes ud fra at hvad der ligner veje i Figur 5.17 er sammenfaldende de fire punktskyer imellem og at overlappene i Figur 5.18 ligeledes er tilnærmelsesvis sammenfaldende. Det skal igen pointeres at de illustrerede punktskyer er rå data, hvorfor huse og lignende ikke endnu er fjernet.

## Forening og generering af nyt grid

Foreningen og genereringen af de nye grid foretages i DTMaster vha. funktionen "interpolate". Funktionen i DTMaster anvendes, da den leverer data i DTMasters standardformat \*.dtm og da det er i DTMaster filtreringen skal foretages.

Funktionen "interpolate" interpolerer en \*.dtm fra data i format \*.xyz til en samlet højdemodel. I forbindelse med interpolationen er det muligt at specificere gridstørrelsen i det nye grid. Dette kan enten ske manuelt eller automatisk, hvor funktionen foretager en grov analyse af input og beregner gridstørrelse ud fra den gennemsnitlige afstand mellem inputpunkterne. Interpolationen kan efterlade huller i højdemodellen, hvis der ikke er tilstrækkelig data. Derfor kan der specificeres en maksimal afstand der specificerer hvor langt ud fra inputpunkterne interpolationen skal foretages (GAP afstand), hvilket gør at der kan interpoleres højder til områder hvor for der reelt ikke er tilstrækkelig data. (ApplicationsMaster 2008, s. 298-305) Funktionen "interpolate" indstilles som det ses i Tekstboks 5.23 i forbindelse foreningen og genereringen af det nye grid.

Parametre	Indstillinger	
Gridstørrelse	Automatisk (1 meter)	
Maksimal gridafstand	1,5 meter	

Tekstboks 5.23: Indstillinger af funktionen "interpolate".

Gridstørrelsen sættes til automatisk, da dette anbefales når data ikke foreligger i et regulært grid. Gridstørrelsen beregnes automatiske til 1 meter for alle tilfælde. Den maksimale afstand mellem gridpunkter sættes til 1,5 meter, da det ikke ønskes, at der interpoleres højder til områder hvor for der ikke er tilstrækkelig data, da dette kan medvirke til en forringet nøjagtighed i højdemodellen.

Den samlede højdemodel, der fremstilles på baggrund af punktskyer fra alle fire optagelsesretninger, fremstilles kun for et afgrænset område, hvor inden for der mindst er tre eller derover overlappende modeller. Afgrænsningen ses i Figur 5.19 og foretages i forbindelse med interpolationen af det nye grid i funktionen "interpolate". For de samlede højdemodeller for hver optagelsesretning, sker der ingen afgrænsning. De forenede og nyinterpolerede højdemodeller findes på DVD 06.02.



Figur 5.19: Overlappende modeller. (Rød) ingen overlap, (Gul) 2 overlappende modeller og (grøn) 3 eller derover overlappende modeller. Den blå firkant er afgrænsningen for den samlede højdemodel. "Copyright © Kort & Matrikelstyrelsen".

# 5.5 Filtrering af højdemodel

Formålet med dette afsnit er at beskrive og foretage filtreringen af højdemodellerne, herunder beskrive hvilke filtre, der er tilgængelige og hvilke der anvendes.

Indledningsvist beskrives de tilgængelig filtre i DTMaster og efterfølgende filtreres højdemodellerne på baggrund af en række indledende undersøgelser af filtrene. Efter filtreringen efterbehandles højdemodellerne, hvilket indebærer at hullerne i de filtrede terrænmodeller udfyldes.

# 5.5.1 Filtrerings- og editeringsværktøjer

DTMaster her tre filtreringsværktøjer, et grovfejlsfilter, et bygningsfilter og en kombineret vegetations- og bygningsfilter, hvor parametrene i de tre filtre kan indstilles forskelligt alt efter hvad og hvor meget, der skal fjernes. De tre filtreringsværktøjer kombineres i én samlet filtreringsstrategi.

DTMaster og ApplicationsMasters DTMtoolkit indeholder yderligere en række editeringsværktøjer, der anvendes til efterbehandlingen af de filtrerede højdemodeller, herunder f.eks. udfyldning af huller.

#### Filtreringsværktøjer

I grovfejlsfiltret skal to parametre specificeres, en positiv højde og en negativ højde, se Figur 5.15. De anbefalede værdier for grovfejlsfiltret er tre gange den forventede nøjagtighed i den filtrerede terrænmodel.

Bygningsfiltret og den kombinerede vegetations- og bygningsfilter filtrerer efter to forskellige principper, hvilket synliggøres i det nedenstående. Men fælles for de to filtre er, at der indledningsvis generes en midlertidig højdemodel i et grid lig en specificeret cellestørrelse. For såvel bygningsfiltret og den kombinerede vegetations- og bygningsfilter anbefales en cellestørrelse lig 2 gange punkttætheden. Den midlertidige højdemodel anvendes til at analysere den originale højdemodel, hvilket som tidligere beskrevet sker efter to principper, hvilket er beskrevet i det nedenstående.

I bygningsfiltret skal ydereligere to parametre specificeres, udover cellestørrelsen, et minimum areal og en minimum stigning, se Figur 5.20. Minimum arealet specificerer hvor store bygninger skal være, inden de bliver fjernet og de anbefalede værdier er 16-30 m<sup>2</sup> for parcelhuse og 40-100 m<sup>2</sup> for industribygninger. Minimum stigningen anvendes til at lokalisere bygningsgrænserne og kun bygninger med en lukket afgrænsning klassificeres som bygninger. For fotogrammetrisk fremstillede højdemodeller anbefales en minimum stigning på 0,3-0,5 radian (cirka 17-29 grader). Det anbefales at der konstrueres tre bygningsfiltre med forskellige cellestørrelser i én strategi.



Figur 5.20: Principskitse for bygningsfilter. Frit tegnet efter Höhle (2008B).

I den kombinerede vegetations- og bygningsfilter specificeres to cellestørrelser og to cellehøjder, se Figur 5.21, hvilket betyder at der interpoleres to midlertidige højdemodeller. Den mindste cellestørrelse sættes til de anbefalede to gange punkttætheden. Cellehøjderne specificerer hvor større afvigelserne skal være mellem den interne og originale højdemodel for at punkterne klassificeres som vegetation eller bygninger. Det anbefales at cellehøjderne er mindre end cellestørrelsen, da dette giver den bedste filtrering.

(DTMaster 2008, s. 114-117)



Figur 5.21: Principskitse for vegetations- og bygningsfilter. Frit tegnet efter Höhle (2008B).

# Editeringsværktøjer

DTMaster indeholder en række editeringsværktøjer, der kan anvendes i efterbehandlingen af højdemodeller, herunder interpolation af huller og udglatning af punkter.

Interpolation af huller udfylder huller i de filtrede terrænmodeller ved at interpolere nye punkter. Interpolationen sker kun for hullerne, det vil sige at der ikke sker nogen re-interpolation af eksisterende punkter, se Figur 5.22. Interpolation af huller kan ikke anvendes på større arealer eller hele projekter.



Figur 5.22: Principskitse for interpolation af huller. Huller i højdemodeller (lyserøde polygoner). Interpolationsareal (blå polygon). Interpolerede punkter i hullerne (højre billede). (DTMaster 2008, s. 101).

Udglatning af punkter, udglatter punkter inden for en specificeret polygon. Graden af udglatningen er specificeret ved en udglatningsgrad, der kan tage værdier fra 0 til  $\infty$ . Udglatningsgraden specificerer hvor meget punkterne kan bevæge sig i z for at skabe en glat overflade. Jo større udglatningsgrad jo glatter overflade. Udglatningen kan maksimalt foretages for 50.000 punkter.

ApplicationsMasters DTMtoolkit indeholder en række editeringsværktøjer, der ligeledes kan anvendes i efterbehandlingen af højdemodellerne, herunder interpolation og forening. I modsætning til editeringsværktøjerne i DTMaster kan DTMtoolkit anvendes på store mængder data og dermed hele projekter.

Interpolation "interpolate" er tidligere beskrevet. Foreningen foretages af højdemodeller i format \*.dtm, hvor højdemodellerne forenes efter vægtede algoritmer. Resultatet er en ny-interpoleret højdemodel.

(DTMaster 2008, s. 101-103)

# 5.5.2 Filtrering

Filtreringsparametrene er indstillet på baggrund af en række indledende undersøgelser, hvor de producerede højdemodeller er visualiseret sammen med kontrolpunkter og en COWI's 2x2 m DTM for at indikere hvor terrænet er. I de indledende undersøgelser er forskellige filterindstillinger afprøvet på baggrund af de anbefalede værdier fra DTMaster (2008) og erfaringerne fra Höhle (2008B).

Strategien for filtreringen anvender et grovfejlsfilter og to kombinerede vegetations- og bygningsfilter. Bygningsfiltret anvendes ikke, da erfaringer har vist at bygningsfilteret ikke fungerer optimalt, og da bygninger, der fjernes med bygningsfiltret ligeledes kan fjernes med den kombinerede vegetations- og bygningsfilter. Den udarbejdede strategi ses i Tekstboks 5.24.

Kombi 1 (K1) - Fjerner små huse og	lav vegetation
Cellestørrelse 1 (cs)	2 meter (2 x punkttæthed)
Cellestørrelse 2	2 meter
Cellehøjde 1 (ch)	1,0 meter
Cellehøjde 2	0,1 meter
Kombi 2 (K2) - Fjerner større bygnin	ger og vegetation, skov osv.
Cellestørrelse 1	12 meter (12 x punkttæthed)
Cellestørrelse 2	12 meter
Cellehøjde 1	1,5 meter
Cellehøjde 2	0,3 meter
Grovfejlsfilter (GF)	
Positiv og negativ højde	0,5 meter
Tekstboks 5.24: Strategi for filtrerin	ıg.

Først køres der én kombineret vegetations- og bygningsfilter, hvis formål er at fjerne små bygninger og lav vegetation. Cellestørrelsen indstilles til 2 meter, hvorved der skabes en intern højdemodel, der registrerer mange små variationer i terrænet, hvorfor f.eks. større skovarealer ikke fjernes, se Figur 5.23. Efterfølgende køres der endnu én kombineret vegetations- og bygningsfilter, hvis formål er at fjerne større bygninger, høj vegetation, skove osv. Cellestørrelse indstilles til 12 meter (erfaringsmæssig bedste værdi), hvorved der skabes en intern højdemodel, der registrerer store variationer i terrænet, hvorfor større bygninger og skovarealer kan fjernes, se Figur 5.23. Afslutningsvis køres et grovfejlsfilter.



Intern højdemodel – cellestørrelse 2 m



Intern højdemodel – cellestørrelse 12 m

Figur 5.23: Principskitse for intern højdemodel ved forskellige cellestørrelser. Interne højdemodeller blå og rød og virkelighed/skov grøn.

Filtreringen fjerner tilfredsstillende de punkter, der skal fjernes, hvilket vil blive begrundet og beskrevet i det nedenstående. Det kan dog diskuteres hvorvidt der fjernes for mange, hvorfor dette ligeledes vil blive diskuteret.

I Figur 5.24 ses den filtrede terrænmodel for optagelsesretning nord sammen bygningsomrids og vejmidte fra et teknisk kort og i Figur 5.25 og Figur 5.26 ses et profilsnit af fire huse efter filtreringen og et mindre skovareal efter filtreringen. Det ses i figurerne at såvel skove og bygninger fjernes og det kun er terrænpunkter, der er tilbage. Terrænpunkterne der er tilbage ligger primært langs vejene og enkelte terrænpunkter ligger mellem husene, hvilket tydeligt ses i Figur 5.24. Placeringen af de tilbageblevne punkter indikerer, at filtreringen har været succesfuld, da vejene og arealerne mellem husene er defineret som terræn.

Det kan dog diskuteres hvorvidt der fjernes for mange punkter. Filtreringen fjerner gennemsnitlig 87 procent (K1 fjerner 57 procent, K2 fjerner 28 procent og GF fjerner 2 procent). Det vurderes at de 87 procent er acceptable, hvilket vurderes ud fra flere aspekter.

Først og fremmest er billederne optaget efter løvspring, hvilket betyder at trækronerne dækker et større areal af terrænet, hvilket tydeligt ses af Figur 5.24, hvor et skråfoto er illustreret. Det ses samtidig af Figur 5.24 at området er tæt bebygget, hvilket igen bevirker at en mindre andel af terrænet kan ses. Det skal dog pointeres at filtreringen, der er foretaget, bevist fjerner meget og måske også lidt ekstra, for at sikre at alle bygninger og skove bliver filtreret væk. Dette sker da blot et enkelt

punkt, erfaringsmæssigt, kan ødelægge terrænmodellen, f.eks. hvis et punkt midt inde i skoven ikke bliver fjernet. Derudover har det aspekt at billederne er optaget i skråt perspektiv uden tvivl en indflydelse.



Figur 5.24: (Venstre) Punkter filtreret væk gennem de kombinerede vegetations- og bygningsfiltre (grøn), grove fejl (rød) og tilbageblevne punkter (blå). (Højre) Udsnit af skråfoto 05N, der illustrer at billederne er optaget efter løvspring og at området fortrinsvis er tæt bebygget. "DDSby © COWI"



Figur 5.25: Profilsnit af skovareal. Punkter filtreret væk gennem de kombinerede vegetationsog bygningsfiltre (grøn) grove fejl (rød), tilbageblevne punkter (blå) og COWI's DTM 2x2 m (gul).



Figur 5.26: Profilsnit af fire huse. Punkter filtreret væk gennem de kombinerede vegetationsog bygningsfiltre (grøn) grove fejl (rød), tilbageblevne punkter (blå) og COWI's DTM 2x2 m (gul).

# 5.5.3 Efterbehandling

Filtreringen fjerner 87 procent af den originale højdemodel og efterlader 13 procent i de filtrede terrænmodeller. På baggrund af de 13 procent interpoleres der nye punkter vha. funktionen "interpolate". Interpolationen foretages to gange, først interpoleres der punkter i et 2x2 meter grid med en GAP afstand på 5 meter, hvorefter alle ekstrapolerede punkter fjernes. Dernæst interpoleres der igen punkter i et 2x2 meter grid med en GAP afstand på 20 meter og de ekstrapolerede fjernes igen. De resterende huller i terrænmodellen udfyldes ikke.

Herefter er de ti terrænmodeller færdige, en for hver optagelsesretning, én samlet og én for hver kalibrering. De otte terrænmodeller for hver optagelsesretning er alle i et 2x2 meter grid og består gennemsnitlig af 75.000 punkter, mens de to samlede terrænmodeller ligeledes er i et 2x2 meter grid og består af cirka 40.000 punkter.

Alt højdedata vedrørende fremstillingen findes på DVD 06.02 sorteret efter orienteringen, der er anvendt (COWI eller DGAP), og i Appendiks E findes en forklaring på de forskellige filbetegnelser og ekstensioner.

# 5.6 Opsamling af fremstilling af DTM

Formålet med dette afsnit er at opsamle de problemer og konstateringer, der er forekommet gennem kapitlet.

Problemerne og konstateringerne beskrives indledningsvist overordnet hvorefter der kronologisk opsamles i forhold til kapitlets afsnit og afslutningsvis foretages der en illustrativ opsamling af den proces, der er gennemgået for at fremstille en terrænmodel vha. skråfotos.

Overordnet har fremstillingen af terrænmodeller vha. skråfotos været domineret af det problem, at det anvendte program ISAE ikke kan håndtere de store nadirvinkler, der forbundet med skråfotos. Dette har bevirket at terrænet individuelt for hver optagelsesretning skal transformeres fra et fladt til et skråt terræn inden den automatiske fremstilling af en højdemodel kan foretages. Efterfølgende skal terrænet igen transformeres, skråt til fladt terræn. Dette har kortfattet betydet,

- at der er arbejdet i fire projekter (én for hver optagelsesretning) i stedet for ét samlet,
- at der i fremstillingsprocessen ikke er draget fordel af at et vilkårligt punkt kan ses i flere skråfotos fra flere forskellige optagelsesretninger og
- at filtreringen er foretaget flere gange end nødvendigt.

Overordnet kan det sammenfattes til at transformationerne og programmets begrænsninger har givet ekstra arbejde og forvoldt mindre problemer.

## Orientering af skråfotos og modelområder

Orienteringerne er foretaget tilfredsstillende, hvilket er vurderet ud fra at a posteriori spredningerne ligger inden for 2 gange a priori spredningen. Dette vurderes tilfredsstillende, da billederne er skråfotos optaget med et ikke-fotogrammetrisk kamera og da der ikke tidligere er erfaringer med stereoopmåling i stråfotos.

Opmålingsnøjagtigheden i stereomodellerne ligger fra 0,025 til 0,060 meter i planen, hvilket cirka svarer til ½ gange  $GSD_M$ , mens den i højden ligger fra 0,18 til 0,22 meter, hvilket cirka svarer til 2 gange  $GSD_M$ , hvor  $GSD_M$  er 10 cm, hvilket svarer GSD'en i midten af billederne. Opmålingsnøjagtigheden ligger faktor 2 over de forventede nøjagtigheder beregnet i Tekstboks 5.5, men da de forventede nøjagtigheder er beregnet efter formler, der normalt anvendes for nadirbilleder, vurderes opmålingsnøjagtigheden at være tilfredsstillende. Det skal dog igen pointeres at nøjagtighederne ikke er beregnet i UTM32N, men i de lokale referencesystemer.

Efter orienteringen, blev der foretaget en kalibrering i DGAP og en ny-orientering i ISDM, men dette bidrog ikke til en forbedret orientering eller nøjagtighed. Det skal dog bemærkes at det heller ikke gjorde den mærkbar dårligere, hvorfor der på baggrund af kalibreringen og ny-orientering ligeledes er fremstillet højdemodeller.

## Fremstilling af højdemodel

Fremstillingen af højdemodellerne foregik overordnet tilfredsstillende, dog er det ikke tilfredsstillede at der ikke er fremstillet højdemodeller for MO3W og M04E med COWI kalibreringen. Årsagen hertil er højst sandsynligt en fejl i programmet eller i filerne. Det har dog ikke været mulig at lokalisere eller rette fejlen.

Et andet problem i fremstillingen af højdemodellerne har været at den automatiske generering af indsamlingspolygonerne ikke fungerede tilfredsstillende. Årsagen hertil er transformationen af terrænet, der bevirker at der er to forskellige flyvehøjder for hver stribe 500 og 650 m. Forskellen i flyvehøjden bevirker at indsamlingspolygoner generet med en flyvehøjde på 500 m bliver mindre end dem med en flyvehøjde på 650 m, da billedformatet for de to striber er ens, se Figur 5.13.

Punktskyerne indeholder cirka 300.000-500.000 korreleret interessepunkter og der er ikke konstateret systematiske fejl mellem punktskyerne for én optagelsesretning. Filtreringen af de grove fejl, foreningen af de fire punktskyer for hver optagelsesretning samt interpolationen af et nyt grid for hver optagelsesretning og én samlet terrænmodel er foretaget planmæssig og uden problemer.

#### Filtrering af højdemodel

Filtreringen af højdemodellerne er foregået planmæssig efter en række indledende undersøgelser, der blev foretaget for at fastsætte filtreringsparametrene. I filtreringen er der gennemsnitlig fjernet 87 procent af punkterne, hvilket umiddelbart vurderes at være for mange, men set i forhold til at projektområdet er tæt bebygget, at billederne er optaget efter løvspring og i et skråt perspektiv accepteres det store antal. Det skal dog pointeres at filtreringen, der er foretaget, bevist fjerner meget, for at sikre at alle bygninger og skovarealer bliver filtreret væk. Dette sker da blot et enkelt punkt, erfaringsmæssigt, kan ødelægge terrænmodellen, f.eks. hvis et punkt midt inde i skoven ikke bliver fjernet.

På denne baggrund er der fremstillet 2 (én der anvender COWI's kalibrering og én der anvender DGAP's kalibrering) gange 5 terrænmodeller (én for hver optagelsesretning og én samlet).

#### Procesopsamling

Procesopsamling foretages illustrativt, se Figur 5.27, og beskriver den proces, der gennemgået for at fremstille en terrænmodel vha. skråfotos. De firkantede kasser beskriver data mens de cirkulære kasser beskriver processer.



# 6 Kontrol og analyse af DTM

Formålet med dette kapitel er at kontrollere og analysere de fremstillede terrænmodeller med hensyn til nøjagtighed, fuldstændighed, indflydelse af måleforhold, indflydelse af højdedata fra flere optagelsesretninger osv. Kontrollen sker med udgangspunkt i den beskrevne metode og procesmodellen for kontrol og analyse af DTM, se Figur 4.3.

I afsnit O *I afsnit 6.4 Kontrol af nøjagtigheden* vil kontrollen blive foretaget jf. planlægningen og resultaterne af kontrollen vil blive beskrevet og vurderet.

Planlægning af kontrol vil kontrollerne og analyserne blive planlagt. Dette indebærer blandt andet identificering af de kontroller og analyser, der skal foretages og efterfølgende planlægning, hvilket sker med udgangspunkt i projektets problemformulering og de problemstillinger, der er fremkommet gennem projektet.

I afsnit 6.2 *Spredningsberegning* vil nøjagtighedsgrundlaget for kontrollerne og analyserne blive dannet, hvilket sker gennem spredningsberegning på baggrund af differenserne mellem terrænmodellerne der skal kontrolleres og kontrolpunkter.

I afsnit 6.3 *Analyse af nøjagtigheden og fuldstændigheden* vil de identificerede analyser blive foretaget jf. planlægningen og resultaterne af de enkelte analyser vil blive beskrevet og vurderet.

I afsnit 6.4 *Kontrol af nøjagtigheden* vil kontrollen blive foretaget jf. planlægningen og resultaterne af kontrollen vil blive beskrevet og vurderet.

# 6.1 Planlægning af kontrol

Formålet med dette afsnit er at identificere og planlægge de kontroller og analyser, der skal foretages, hvilket sker med udgangspunkt i projektets problemformulering og de problemstillinger, der er fremkommet gennem projektet.

Indledningsvist identificeres de elementer, der ønskes kontrolleret eller analyseret. Derefter samles de enkelte elementer i analyser og kontroller som efterfølgende planlægges.

# 6.1.1 Identificering

Der er overordnet to elementer, der skal kontrolleres og analyseres, nøjagtigheden og fuldstændigheden. Kontrollen og analysen af de to elementer indeholder flere forskellige aspekter, da der er flere forskellige faktorer, der spiller ind på nøjagtigheden og fuldstændigheden. Disse faktorer analyseres for at kunne vurdere deres indflydelse. Udover at analysere de forskellige faktorers indflydelse, foretages der ligeledes en kontrol af nøjagtigheden.

De faktorer, der skal analyseres i forhold til nøjagtigheden og fuldstændigheden er listet op i det nedenstående og efterfølgende er det beskrevet hvorfor hver enkel faktor er vurderet relevant at analysere

- Kalibreringerne (COWI og DGAP)
- Filtreringen
- Interpolationen (udfyldning af huller) i den filtrede terrænmodel
- Højdedata fra henholdsvis én og fire optagelsesretninger i samme terrænmodel
- Optagelsesretningen
- Fordelingen af punkter i punktskyerne
- Det varierende måleforhold og basis/højde-forhold

Kalibreringerne analyseres i forhold til nøjagtigheden og analyseres da der er foretaget en ekstra kalibrering i forbindelse med orienteringen af modellerne, se afsnit 5.3.5. Målet er at kunne vurdere hvorvidt den ekstra kalibrering har bidraget til en forbedring i terrænmodellernes nøjagtighed.

Filtreringen analyseres i forhold til nøjagtigheden, da filtreringen har en væsentlig indflydelse på terrænmodellerne, der fremstilles, da filtreringen skal fjerne de punkter, der ikke ligger på terræn. Målet er at kunne vurdere hvorvidt filtreringen er foretaget tilfredsstillende i forhold til nøjagtigheden.

Interpolationen i de filtrede terrænmodeller analyseres i forhold til nøjagtigheden, da der i filtreringen cirka fjerner 87 procent af punkterne i højdemodellerne og da interpolationen derfor skal interpolere de fjernede punkter. Målet er at kunne vurdere hvor stor indflydelse interpolationen har på nøjagtigheden.

Højdedata fra henholdsvis én og fire optagelsesretninger i samme terrænmodel analyseres i forhold til nøjagtigheden, da der er højdedata fra fire optagelsesretninger. Målet er at kunne vurdere hvorvidt nøjagtigheden bliver bedre, når højdedata fra fire optagelsesretninger anvendes i forhold til én optagelsesretning.

Optagelsesretningen analyseres i forhold til nøjagtigheden, da billederne fra de forskellige optagelsesretninger, der danner grundlag for terrænmodellerne er optaget fra forskellige positioner. Målet er at kunne vurdere hvorvidt optagelsesretningen har indflydelse på nøjagtigheden.

Fordelingen af punkterne i punktskyerne analyseres i forhold til fuldstændigheden, da det tidligere er beskrevet at der kan opstå døde områder i punktskyerne, da billederne er optaget i et skråt perspektiv. Yderligere analyseres fuldstændigheden i punktskyerne for at kunne se hvilke punkter der korreleres og deres placering. Målet er at kunne vurdere hvor punkterne i punktskyerne korreleres afhængig af optagelsesretning.

Det varierende måleforhold og basis/højde-forhold analyseres i forhold til nøjagtigheden, da begge forhold grundlæggende har væsentlig indflydelse på nøjagtigheden i højdebestemmelsen. Målet er at kunne vurdere hvorvidt variationen i måleforholdet og basis/højde forholdet har indflydelse på nøjagtigheden.

# 6.1.2 Planlægning

Kontrollen og analysen består af én kontrol af nøjagtigheden og analyse af de syv identificerede faktorer i forhold til nøjagtigheden og fuldstændigheden. Analyserne foretages først, da det forventes at vurderingerne i analyserne kan belyse kontrollen af nøjagtigheden yderligere med hensyn til de forskellige faktorers indflydelse.

Inden analyserne og kontrollen kan foretages, beregnes der spredninger for alle de terrænmodeller, der umiddelbart vurderes at skulle indgå i analyserne og kontrollen, hvorved datagrundlaget for analyserne og kontrollen er dannet. Mere specifikke beregninger af spredninger, f.eks. for mindre dele af terrænmodellerne, foretages først i den enkelte analyse eller i kontrollen.

Den overordnede struktur og dataflow mellem spredningsberegningen, analyserne og kontrollen er illustreret i Figur 6.1.



Figur 6.1: Struktur og dataflow for kontrol og analyse af DTM.

I det nedenstående vil spredningsberegningen, analyserne og kontrollen af nøjagtigheden blive planlagt med hensyn til data og metode.

# 6.1.3 Planlægning af spredningsberegning

Spredningsberegningerne foretages ved beregning af differenser mellem terrænmodellerne, der skal kontrolleres, og kontrolpunkter. Beregningen af differenserne sker gennem en interpolation, hvorefter differenserne danner grundlaget for spredningsberegningerne.

# Data

Spredningsberegningerne foretages for begge kalibreringer, de filtrede terrænmodeller og terrænmodellerne samt for alle optagelsesretninger og alle optagelsesretninger i én model.

Der beregnes spredninger for begge kalibreringer for at kunne analysere kalibreringernes indflydelse på nøjagtigheden og der beregnes spredninger for de filtrede terrænmodeller og terrænmodellerne for at kunne analysere interpolationens indflydelse på nøjagtighed. Der beregnes spredninger for alle optagelsesretninger og alle optagelsesretninger i én model for at kunne analysere betydning af højdedata fra henholdsvis én og fire optagelsesretninger i samme terrænmodel samt for at kunne analysere optagelsesretningens betydning.

Det vil sige at der skal beregnes spredninger for  $2 \times 5$  filtreret terrænmodeller og for  $2 \times 5$  terrænmodeller. Hvilke data der specifikt anvendes i de enkelte analyser vil blive specificeret i planlægning af den enkelte analyse.

## Kontrolpunkter

Kontrolpunkterne som terrænmodellerne skal kontrolleres i forhold til skal være af overlegen nøjagtighed, hvilket er 1/3 eller under af den forventede nøjagtighed i produktet, der skal kontrolleres. Med hensyn til den forventede nøjagtighed tages der udgangspunkt i nøjagtigheden af kontrolpunkterne i orienteringen, der i højden ligger fra 0,19 til 0,22 m, se afsnit 5.3.4. Det skal dog bemærkes at kontrolpunkterne i orienteringen er manuelt opmålt, hvorfor de forventes at have en bedre nøjagtighed end punkter, der automatisk er opmålt gennem korrelation. Den forventede nøjagtighed fastsættes derfor til 0,30 m, hvilket betyder at kontrolpunkterne skal have en nøjagtighed på 0,10 m eller bedre for at kontrolpunkterne kan anses for fejlfrie.

Kontrolpunkterne skal enten fremstilles eller rekvireres. Kontrolpunkterne, der anvendes, er en DTM i et 2x2 m grid produceret vha. LLS og udlånt af COWI. Den specificerede nøjagtighed i højden er på 0,10 m og maks. fejl på 1 m jf. COWI (2006), men for at sikre at den specificerede nøjagtighed holder, foretages der en selvstændig kontrol af DTM'en.

Kontrollen foretages af fire forskellige områdetyper (åbne områder, nær bygninger, skovområder og skråninger), der kontrolleres på baggrund minimum 16 eller derover punkter pr. områdetyper og i alt 184 punkter, se Bilag V. Den beregnede nøjagtighed (RMSE) for alle 184 punkter er 0,08 m og bekræfter derved at DTM'en holder den specificerede nøjagtighed. Nøjagtigheden i skovarealer overstiger dog den specificerede nøjagtighed, da denne er beregnet til 0,13 m, hvilket dog accepteres, eftersom den overordnende nøjagtighed holder specifikationen. Den udlånte DTM fra COWI vurderes at overholde 1/3 kravet, hvorfor den anvendes i kontrollen.

#### Interpolationsmetode

Der findes flere forskellige typer for interpolation, der enten baserer sig på interpolation i et trekantsnet (lineær interpolation) eller i et regulært net (bilineær interpolation), se Figur 6.2. Trekantsnettet anvendes når punkterne ligger uordnet, mens det regulære net anvendes når punkterne ligger i et regulært net. (ASPRS Lidar Committe 2004)



Figur 6.2: Lineær interpolation i trekantsnet og bilineær interpolation i regulært net. Frit tegnet efter Cederholm (2008)

Den lineære interpolation beregner højden til punktet, der skal interpoleres ved at vægte netpunkternes højde efter det nye punkts barycentriske koordinater ( $w_{11}$ ,  $w_{12}$ ,  $w_{13}$ ), se Tekstboks 6.1 og Figur 6.2.

Højde <sub>a</sub>	$z_a = \sum_{i=11,12,13} (w_i z_i)$
Barycentriske koordinater ( $w_i$ )	$\begin{bmatrix} w_{11} \\ w_{12} \\ w_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} \\ y_{11} & y_{12} & y_{13} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ 1 \end{bmatrix}$
hvor $x_i y_i z_i$ er koordinater til ne $x_a y_a$ er plankoordinater til	tpunkterne det interpolerede punkt

Tekstboks 6.1: Formel for lineær interpolation efter vægtning vha. barycentriske koordinater. (Cederholm 2008).

Den bilineære interpolation beregner højden til punktet, der skal interpoleres ved at vægte netpunkternes højde efter arealet af den modsatliggende firkant, hvor det samlede areal er 1, se Tekstboks 6.2 og Figur 6.2

Højde <sub>b</sub>	$z_b = \sum_{i=21,22,23,24} (w_i z_i)$
vægte ( $w_i$ )	$w_{21} = (1 - r)(1 - s)$ $w_{22} = (1 - r)s$ $w_{23} = rs$ $w_{24} = r(1 - s)$
hvor $r = \frac{x_b - x_{21}}{x_{24} - x_{21}} \text{ og } s = \frac{y_b - y_{21}}{y_{22} - y_{21}}$ $x_i y_i z_i  er koordinater til ne$	tpunkterne

Tekstboks 6.2: Formel for bilineær interpolation efter arealet af den modsatliggende firkant. (Cederholm 2008).

Hvilken metode der anvendes er afhængig af hvordan kontrolpunkterne eller punkterne i terrænmodellerne er fordelt. Hvis begge ligger uordnet anvendes trekantsnettet og den lineære interpolation og hvis én af de to ligger i et regulært net anvendes den bilineære interpolation.

Selvom både kontrolpunkterne og terrænmodellerne, der skal kontrolleres, ligger i et regulært net, anvendes den lineære interpolation i et trekantsnet, da denne funktion er tilgængelig i GeoCAD og da GeoCAD tidligere er anvendt i projektsammenhæng, hvorfor der er erfaringer hermed.

Trekantsnettet fremstilles for den terrænmodel med det tættest net. Eftersom både kontrolpunkterne og terrænmodellerne har samme gridstørrelse 2x2 m, fremstilles trekantsnettet for kontrolpunkterne, da de geografisk dækker alle de andre terrænmodeller. Det vil sige at metoden for beregningen af differenserne er lineær interpolation af terrænmodellernes punkter i et trekantsnet fremstillet på baggrund af kontrolpunkterne. Differenserne beregnes som den interpolerede højde minus den sande højde. Den lineære interpolation i trekantsnettet og beregningerne af differenserne foretages i GeoCAD.

#### Spredningsberegning

Der findes forskellige metoder for beregning af spredningen alt efter hvordan observationerne er fordelt. I dette projekt anvendes to metoder for beregning af spredningen, normalfordelt spredningsberegning og robust spredningsberegning.

Kendetegnet ved de to metoder er at den normalfordelte anvendes ved normalfordelte observationer, mens den robuste anvendes ved ikke normalfordelte observationer, da denne er mere robust overfor grove fejl, skævhed osv., se mere herom i Appendiks F.

De anvendte formler for den normalfordelte spredningsberegning ses i Tekstboks 6.3 og de anvendte formler for den robuste spredningsberegning ses i Tekstboks 6.4.

Root Mean Square Error	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta h_i^2}{n}}$	
Standardafvigelse	$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (\Delta h_i - \mu)^2}{n-1}}$	
Middel (μ)	$\mu = \frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta h_i}{n}$	
Grove fejl	$ \Delta h_i  \ge 3 \times RMSE$	
Tekstboks 6.3: Normalfordelt sp	redningsberegning	
68,3 % fraktil	$Q_{ \Delta h }(0,683)$	
95,0 % fraktil	$Q_{ \Delta h }(0,95)$	
NMAD	$NMAD = 1,4826 \times median( \Delta h_i - m_{\Delta h} )$	
Median ( $m_{\Delta h}$ )	$Q_{\Delta h}(0,5)$	
Tekstboks 6.4: Robust spredning	sberegning.	

Hvilken metode for spredningsberegning, der anvendes, afhænger af hvorvidt observationerne er normalfordelte eller ej. Metoden for at analysere hvorvidt observationerne er normalfordelte eller ej er illustreret i Figur 6.3.

Indledningsvis beregnes de normalfordelte (1) og robuste spredninger (2) og der plottes et histogram og QQ plot af observationerne (3). Herefter fjernes og tælles de grove fejl iterativt én ad gangen og hver gang én observation fjernes, beregnes der nye normalfordelte spredninger (4). Dernæst vurderes det hvorvidt observationerne er normalfordelte eller ej jf. betragtningerne i Appendiks F. Først foretages der en visuel kontrol af det plottede histogram og QQ plottet (5) og hvis observationerne i QQ plottet følger normalfordelingen anses observationerne for normalfordelte og hvis ikke, foretages den anden del af vurderingen. Den anden vurdering sammenligner standardafvigelsen med NMAD og middel med median (6), og hvis de tilnærmelsesvis er lig hinanden er observationerne normalfordelte og hvis ikke, er de ikke normalfordelte. Er observationerne normalfordelte anvendes den normalfordelte spredning og hvis ikke anvendes som udgangspunkt de robuste spredninger.



Figur 6.3: Struktur for spredningsberegning og vurdering af hvorvidt observationerne er normalfordelt eller ej. Firkanter er data og cirkler er analyser.

Beregningerne i Figur 6.3 er foretaget i MatLab og efter formlerne i Tekstboks 6.3 og Tekstboks 6.4 og for 2 x 5 filtreret terrænmodeller og for 2 x 5 terrænmodeller. De anvendte scripts findes på DVD 01.05 og in- og output, histogrammer og QQ plots på DVD 06.03. Yderligere findes der i Bilag VI en statistisk opsummering, der beskriver de normalfordelte spredningsberegninger før og efter de grove fejl er fjernet, samt den robuste spredningsberegning.

# 6.1.4 Planlægning af analyse af nøjagtigheden og fuldstændigheden

De syv faktorer, der skal analyseres i forhold til nøjagtigheden og fuldstændigheden, planlægges selvstændig med hensyn til data og metode. Selvom de planlægges selvstændig skal de ses i en sammenhæng, hvor f.eks. resultatet af en analyse hjælper med at belyse resultatet af en anden analyse.

Datagrundlaget for analyserne er grundlæggende de beregnede spredninger, herunder både de normalfordelte og robuste, se Bilag VI.

#### Kalibrering

Analysen af hvilken kalibrering, der leverer den bedste nøjagtighed fortages af de 2 x 5 terrænmodeller, hvorved det er muligt at sammenligne nøjagtigheden mellem terrænmodellerne fremstillet efter COWI og DGAP kalibreringen.

Metoden for analysen er en statistisk sammenligning, hvor de beregnede spredninger fra spredningsberegningen anvendes. Yderligere sammenlignes nøjagtigheden i de enkelte terrænmodeller ligeledes med a posteriori spredningen fra orienteringerne, hvorved sammenhængen her mellem bliver analyseret.

Vurderingerne i denne analyse vil danne udgangspunkt for de resterende analyser med hensyn til hvorvidt COWI eller DGAP terrænmodellerne anvendes.

## Filtrering og interpolation

Analysen af filtreringens og interpolationens indflydelse på nøjagtigheden foretages på baggrund af terrænmodellerne og de filtrede terrænmodeller, da det herved er muligt se hvilke punkter, der ikke filtreres væk og sammenligne nøjagtigheden før og efter interpolationen.

Metoden for analysen af filtreringens indflydelse er en visuel sammenligning af punkterne i de filtrede terrænmodeller i forhold til et ortofoto, hvorved det er muligt at se hvorvidt punkterne ligger på bygninger, træer eller lignende. For at synliggøre hvor der er problemer, plottes differenserne mellem terrænmodellerne og kontrolpunkterne i tolv klasser, hvor fire af klasserne illustrerer de grove fejl. Derudover foretages der en visuel analyse af stigningerne mellem punkterne i de filtrede terrænmodeller. Analysen foretages da store stigninger inden for forholdsvis kort afstand kan indikere, at filtreringen ikke har fungeret optimal, da projektområdet er forholdsvis faldt. Analysen foretages i ArcGIS hvor punkterne i de filtrede terrænmodeller først omdannes til et trekantsnet og efterfølgende beregnes hældningen af hver trekant i forhold det horisontale plan. (ArcGIS 2009A)

Metoden for analysen af interpolationens indflydelse er en statistisk og visuel sammenligning. Den statistiske sammenligning foretages af de beregnede spredninger for de filtrede terrænmodeller og terrænmodellerne, hvorved interpolationens indflydelse direkte kan aflæses i form af differensen mellem de to spredninger. Den visuelle sammenligning foretages på baggrund af de filtrede terrænmodellers plottede punkter og af de plottede differenser mellem terrænmodellerne og kontrolpunkterne. Ved visuelt at sammenligne de to illustrationer er det muligt visuelt at vurdere hvorvidt der er en sammenhæng mellem "store" differenser og interpolationen.



Figur 6.4: Struktur for analyse af filtreringens og interpolationens indflydelse på nøjagtigheden. Firkanter er data og cirkler er analyser.

De visuelle analyser foretages i rapporten kun for den samlede model og for én optagelsesretning.

#### Højdedata fra flere optagelsesretninger

Analysen af nøjagtigheden i en terrænmodel med højdedata fra én optagelsesretning i forhold til nøjagtigheden i en terrænmodel med højdedata fra fire optagelsesretninger foretages på baggrund af terrænmodellerne.

Metoden for analysen er en statistisk og visuel sammenligning af den samlede terrænmodel i forhold terrænmodellerne for hver enkel optagelsesretning. Den statistiske analyse foretages af de beregnede spredninger, ved at sammenligne spredningerne for den samlede med terrænmodellerne for hver enkel optagelsesretning. Den visuelle analyse foretages af grundlaget for henholdsvis den samlede terrænmodel (16 punktskyer) og grundlaget for én terrænmodel for én optagelsesretning (4 punktskyer). Analysen foretages som en tæthedsanalyse i ArcGIS, hvor det beregnes hvor mange punkter i grundlaget, der ligger inden for 1 m<sup>2</sup> og resultatet illustreres i rasterkort med en cellestørrelse på 1x1 m. (ArcGIS 2009B) Den visuelle analyse vil belyse forskellen i datagrundlaget.



Figur 6.5: Struktur for analyse af højdedata fra flere optagelsesretningers indflydelse på nøjagtigheden. Firkanter er data og cirkler er analyser.

De visuelle analyser foretages i rapporten kun for den samlede model og for én optagelsesretning.

#### Optagelsesretning og fordelingen af punkter i punktskyerne

Analysen af optagelsesretningens indflydelse på nøjagtigheden og fordelingen af punkterne i punktskyerne foretages henholdsvis statistisk og visuel. Analysen foretages af terrænmodellerne for hver optagelsesretning og for én af de fire punktskyer for hver optagelsesretning.

Metoden for analysen af optagelsesretningen foretages gennem en statistisk sammenligning af de beregnede spredninger for de fire optagelsesretninger og suppleres med plottene af terrænmodellernes differenser.

Metoden for analysen af punktfordelingen i punktskyerne er, at plotte punkterne i punktskyen for et mindre parcelhusområde og efterfølgende sammenligne placeringen af punkterne med et af de skråfotos, der er anvendt til at fremstillingen af punktskyen. Herigennem vil det være muligt at vurdere hvilke punkter, der korreleres og dermed opmåles og danner grundlaget for de senere terrænmodeller. På baggrund af punkternes art og placering analyseres det hvilken indflydelse dette har på nøjagtigheden.



Figur 6.6: Struktur for analyse af optagelsesretningens indflydelse på nøjagtigheden og punktfordelingen i punktskyerne og deres indflydelse på nøjagtigheden. Firkanter er data og cirkler er analyser.

#### Det varierende måleforhold og basis/højde-forholdet

Analysen af det varierende måleforhold og basis/højde forholdet foretages gennem statistisk analyse for udvalgte områder i en enkel terrænmodel.

Metoden for analysen er beregning af spredninger for fire udvalgte områder i én terrænmodel. De fire områder udvælges, så de varierer i måleforhold og basis/højde forhold, hvilket sker ved at udvælge ét område i bunden af modellen, to i midten og én i toppen. Derudover skal områderne opflyde følgende kriterier for at sikre at grundlaget for de fire områder er ens:

- Området skal ligge på vejarealer.
- Området skal cirka indeholde lige mange punkter.
- Området må kun være dækket af én model.

For hvert område beregnes der normalfordelte og robuste spredninger. Dernæst estimeres måleforholdet samt basis/højde forholdet primitivt og på denne baggrund beregnes de forventede spredninger i højden for hver af de fire områder, jf. formlen i Appendiksfigur 5. Efterfølgende sammenlignes forholdet mellem de beregnede spredninger og de forventede spredninger, hvorved det analyseres hvorvidt terrænmodellerne følger teorien.



Figur 6.7: Struktur for analyse af det varierende måleforholds og basis/højde forholdets indflydelse på nøjagtigheden. Firkanter er data og cirkler er analyser.

Analysen foretages for terrænmodel nord og i Figur 6.8 ses de fire udvalgte områder.



Figur 6.8: De fire udvalgte områder for analysen af måleforholdet og basis/højde forholdet. Blå afgrænsninger er afgrænsningen af de enkelte modeller. Gul er punkterne i terrænmodel nord og rød er de udvalgte områder. "DDO © COWI".

# 6.1.5 Planlægning af kontrol af nøjagtighed

Kontrollen af nøjagtigheden foretages kun for den terrænmodel, der overordnet leverer den bedste nøjagtighed og fuldstændighed gennem analyserne. Datagrundlaget for kontrollen er de beregnede spredninger, herunder både de normalfordelte og robuste.

De beregnede spredninger fra spredningsberegningen suppleres med en ekstra kontrol, der kun foretages for terrænmodellen, der kontrolleres. Den ekstra kontrol foretages på baggrund af punkter opmålt med GNSS RTK. Punkterne er de samme, der tidligere er anvendt til at kontrollere COWI's DTM 2x2 m, se Bilag V. Punkterne er fordelt i fire forskellige områdetyper (åbne områder, nær bygninger, skovområder og skråninger) og der beregnes for hver områdetype, normalfordelte og robuste spredninger efter formlerne i Tekstboks 6.3 og Tekstboks 6.4.

Kontrolpunkterne interpoleres vha. en lineær interpolation i et trekantsnet, hvor terrænmodellen, der kontrolleres er trekantsnettet. Differenser beregnes som den sande højde til kontrolpunkterne minus den interpolerede højde. Den ekstra kontrol anvendes, da opdelingen nuancerer kontrollen ved at belyse nøjagtigheden inden for forskellige områdetyper.
Metoden for kontrollen er en statistisk og visuel vurdering af de beregnede spredninger. Vurderingen foretages i forhold til en forventning til spredningen, der tager udgangspunkt i erfaringer fra andre projekter, der arbejder med fotogrammetrisk terrænmodellering.



Figur 6.9: Struktur for kontrol af nøjagtigheden. Firkanter er data og cirkler er analyser.

Erfaringerne ses i Tekstboks 6.5 sammen med de tilhørende specifikationer. Derudover er specifikationerne for det transformerede terræn, der i dette projekt anvendes når højdemodellerne skal fremstilles i ISAE ligeledes beskrevet. For at kunne sammenholde de tre specifikationer beregnes den forventede spredning i højden efter formlen i Appendiksfigur 5.

	Pedersen & Skouenborg (2008)	Höhle (2008B)	Skråfotos med transformeret terræn
pixelstørrelse	9 µm	12 μm	7,2 μm
måleforhold	1:6.667	1:8.333	1:8.990 (bund)
-			1:11.100 (midt)
			1:14.500 (top)
basis/højde	180/696 (0,27)	307/1000 (0,31)	200/500-650 (0,4-0,3)
RMSE	0,25 m (bar mark)	0,22 m (bar mark)	
		0,17 m (bebyggelse)	
		2,61 (skov)	
Forventet nøjagtighed	0,08 m	0,11 m	0,05-0,11 m
Tekstboks 6.5: Erfaringe	er med hensyn til RMSE o	og tilhørende specifikatio	ner for tidligere pro-

jekter, specifikationer for skråfotos med transformeret terræn og forventet nøjagtighed beregnet efter Appendiksfigur 5.

Erfaringerne og de forventede nøjagtigheder i Tekstboks 6.5 indikerer at der er faktor 2-3 til forskel på den forventede nøjagtigheder og de reelle nøjagtigheder (RMSE), hvis de ses i forhold til bar mark og bebyggede områder. Yderligere indikerer de forventede nøjagtigheder at de tre specifikationer i Tekstboks 6.5 kan opmåle en højde med nogenlunde samme nøjagtighed.

Det antages ud fra ovenstående betragtninger, at det på baggrund af specifikationerne, for skråfotos med transformeret terræn, er muligt at opmåle højder med en nøjagtighed faktor 2 til 3 større end den forventede nøjagtighed.

Et byd på nøjagtigheden i de fremstillede terrænmodeller vil derfor være 0,15-0,33 m (0,05-0,11 x 3), hvor der hældes mest til 0,33 m plus lidt ekstra eftersom der ikke er anvendt nadirbilleder optaget med et fotogrammetrisk, men skråfotos optaget med et ikke-fotogrammetrisk kamera.

# 6.2 Spredningsberegning

Formålet med dette afsnit er at beregne datagrundlag for analyserne og kontrollen, samt at analysere hvorvidt observationerne (differenserne) er normalfordelte eller ej. Spredningsberegningerne og analysen foretages jf. planlægningen i afsnit 6.1.3.

De beregnede spredninger for de 2 x 5 filtrede terrænmodeller og de 2 x 5 terrænmodeller er opsummeret i Bilag VI og på DVD 06.03.

## 6.2.1 Normalfordelt eller ej

Analysen af normalfordelingen foretages i rapporten kun for én terrænmodel, da antages at observationerne, terrænmodellerne i mellem, er fordelt efter samme princip, normalfordelte eller ej. Det skal dog pointeres at der af hver terrænmodel foretages en visuel kontrol gennem et histogramplot og et QQ plot. Plottene findes på DVD 06.03.

# interpoleret punkter	52880		
Grove fejl antal/procent	1716/3,1		
Normalfordelt spredningsbe	regning	Robust spredningsberegning	
RMSE	0,60 m	NMAD	0,40 m
Standardafvigelse	0,58 m	Median	0,12 m
Middel differens	0,12 m	68,3 % fraktil	0,45 m
Maks. differens	5,19 m	95,0 % fraktil	1,26 m
Min. differens	-4,17 m		

Figur 6.10: Normalfordelt og robust spredningsberegning for terrænmodel nord fremstillet efter COWI kalibreringen.



Figur 6.11: Histogram og QQ Plot for terrænmodel nord efter COWI kalibrering. I histogrammet illustrerer den røde kurve, gauss kurven og i QQ plottet illustrerer den røde linje normalfordelingen. De blå søjler og blå krydser er observationerne (differenserne).

Det ses i Figur 6.11 at observationerne i histogrammet ikke følger gauss kurven og det ses ligeledes at observationerne i QQ plottet ikke følger normalfordelingen. Årsagen hertil vurderes at være det forholdsvis store antal grove fejl cirka 3 procent. Dette vurderes ud fra at observationerne omkring medianen (0) i QQ plottene følger normalfordelingen pænt og først senere afviger kraftigt, hvilket er et tegn på grove fejl. Dette indikerer at observationerne ikke er normalfordelte, hvilket yderligere bekræftes da standardafvigelsen ikke er lig NMAD. At middel og median er lig hinanden indikerer blot, at der ikke er tegn på skævhed i fordelingen, hvilket ligeledes ses i QQ plottet, hvor det ses at observationerne tilnærmelsesvis fordeler sig symmetrisk.

Ud fra ovenstående vurderes det at observationerne ikke er normalfordelte, grundet et stort antal grove fejl. Derfor vil de robuste spredninger som udgangspunkt blive anvendt i de fremtidige analyser.

## 6.3 Analyse af nøjagtigheden og fuldstændigheden

Formålet med dette afsnit er at analysere de syv faktorers indflydelse på nøjagtigheden og fuldstændigheden i de fremstillede terrænmodeller. Analysen foretages jf. planlægningen i afsnit 6.1.4.

### 6.3.1 Analyse af kalibrering

Analysen af kalibreringen foretages i rapporten kun for terrænmodeller og vha. de beregnede 68,3 % fraktilerne, da det i Bilag VI tydeligt ses at forholdet mellem RMSE, standardafvigelsen, NMAD og 68,3 % fraktilen de to kalibreringer i mellem følger hinanden. Det vil sige er RMSE mindre i COWI kalibreringen end i DGAP kalibreringen er standardafvigelsen, NMAD og 68,3 fraktilen ligeledes mindre i COWI kalibreringen.



Figur 6.12: (Rød) DGAP, (blå) COWI, (søjler) 68,3 % fraktil aflæses på venstre akse og (punkterne) a posteriori spredning fra orienteringerne aflæses på højre akse.

Analysen af kalibreringen er ikke entydig, da det varierer, alt efter optagelsesretning, hvilken kalibrering, der leverer den bedste nøjagtighed. Der ses dog en mindre sammenhæng mellem resultatet af de tidligere orienteringer og nøjagtigheden, se Figur 6.12. Sammenhængen fremgår tydeligt for optagelsesretning syd og vest, hvor det ses at den orientering, der giver den mindste a posteriori spredning leverer den bedste nøjagtighed. Optagelsesretningerne nord og øst sætter dog tvivl ved denne påstand, da sammenhængen her er modsat. Det skal pointeres at a posteriori spredningerne for nord og øst er forholdsvis små og ligger tæt på hinanden, hvilket kan være årsagen til at sammenhængen er modsat i forhold til syd og vest.

Ud fra ovenstående kan det ikke entydig vurderes hvilken kalibrering, der leverer den bedste nøjagtighed, da det varierer alt efter optagelsesretning. Dernæst vurderes det at der ikke er vundet noget ved at foretage den ekstra kalibrering, da nøjagtighederne de to kalibreringer imellem ikke adskiller sig væsentligt. Det vurderes derfor at en kalibrering i fremtiden ville være unødvendig.

I de fremtidige analyser og i kontrollen af nøjagtigheden vil terrænmodeller fremstillet efter DGAP kalibreringen blive anvendt, da det som tidligere beskrevet ikke var muligt automatisk at fremstille højdemodeller for modellerne M03W og M04E efter COWI kalibrering, se afsnit 5.4.2.

## 6.3.2 Analyse af filtreringen og interpolationen

Analysen af filtreringen og interpolationen foretages i rapporten statistisk for alle terrænmodeller, mens den visuel kun foretages for den samlede terrænmodel og optagelsesretning vest, da det vurderes at de visuelle tendenser i filtreringen og interpolationen mellem de fire optagelsesretninger er ens.



Figur 6.13: (Venstre) Samlet filtreret terrænmodel. (Højre) Filtreret terrænmodel vest. "DDO © COWI".



Figur 6.14: Differenskort (kontrolpunkter minus terrænmodel). (Venstre) Samlet terrænmodel (Højre) Terrænmodel vest. Differenserne er i meter og RMSE er efter at de grove fejl er fjernet og er lig 0,45 m for samlet terrænmodel og 0,59 m for terrænmodel vest, se Bilag VI. "DDO © COWI".



Figur 6.15: Hældningen af trekanterne i et trekantsnet fremstillet på baggrund den samlede filtrerede terrænmodel (venstre) og den filtrede terrænmodel vest (højre). "DDO © COWI".

### Filtreringen

Overordnet er filtreringen foretaget tilfredsstillende, da punkterne i de filtrede terrænmodeller jf. Figur 6.13 hovedsagligt ligger på vejene, i parcelhushaverne og i de åbne områder, hvilke er områder der klassificeres som terræn.

Det ses dog i Figur 6.13, filtreret terrænmodel vest, at der er flere punkter, der efter filtreringen ligger på tagene omkring teknisk skole (nordøstlige hjørne af projektområdet). Dette bevirker at der kommer grove fejl i terrænmodellen, se Figur 6.14 og Figur 6.16. Årsagen til at filtreringen ikke fungerer optimalt i området omkring teknisk skole vurderes at være fordi bygningerne ikke er fuld-stændig dækket af højdemodellen, der filtreringsprogrammet at lokalisere bygningen og dermed filtrere den væk. Filtreringsprogrammet vil derfor højst sandsynlig blot opfatte bygningen som en stigning.

Hvis der dernæst ses på Figur 6.15, ses det tydeligt at der mellem flere af punkterne i de filtrede terrænmodeller er store stigninger inden for forholdsvis kort afstand, set forhold til at området antages at være fladt. De store stigninger forekommer specielt langs vejene, hvilket gør at de i terrænmodellerne kommer til at virke som rug flader og ikke glatte flader som de er i virkeligheden. De store stigninger kan dernæst have en væsentlig betydning på den senere interpolation og dermed den endelige nøjagtighed, hvilket er forsøgt illustreret i Figur 6.16.

Ud fra ovenstående vurderes det at filtreringen overordnet har fungeret efter hensigt, eftersom hovedparten af punkterne i de filtrede terrænmodeller ligger på terrænet. Det vurderes dog at filtreringen ikke fungerer optimalt for bygninger eller andre objekter over terræn, der ligger i kanten af modellen og derfor ikke er fuldstændig dækket af højdemodellen, der filtreres. Derudover forekommer der enkelte steder i de filtrede terrænmodeller store stigninger punkterne i mellem. Dette indikerer at der er enkelte afvigende punkter, der ikke ligger på terræn og burde være fjernet i filtreringen.



○ Punkt i filtreret terrænmodel ⊗ Interpoleret punkter

0,49 m

1,40 m

Figur 6.16: (Venstre) Zoom af differenskort for den filtrerede terrænmodel for optagelsesretning vest. Signaturforklaringen til differenskortet ses i Figur 6.14, hvor RMSE er 0,59 m. "DDO © COWI". (Højre) Illustration af problemet med afvigende punkter.

Interpolationen

68,3 % fraktil

	Samlet	Nord	Syd	Vest	Øst
# interpoleret punkter	18362	28087	25206	22931	26610
Grove fejl antal/procent	403/2,2	1034/3,7	558/2,2	1089/4,7	967/3, 6
NMAD	0,29 m	0,30 m	0,30 m	0,39 m	0,33 m
Median	0,14 m	0,11 m	0,14 m	0,10 m	0,11 m
68,3 % fraktil	0,34 m	0,33 m	0,36 m	0,43 m	0,36 m
95,0 % fraktil	0,85 m	0,91 m	0,89 m	1,25 m	1,02 m
Tekstboks 6.6: Robuste spre	dninger for filt	rede terrænm	odeller (DGAP)	).	
	Samlet	Nord	Syd	Vest	Øst
# interpoleret punkter	38726	55075	49032	57503	55698
Grove fejl antal/procent	1090/2,8	2253/4,1	2196/4,5	5086/8,8	2350/4,1
NMAD	0,36 m	0,42 m	0,42 m	0,56 m	0,43 m
Median	0,21 m	0,12 m	0,15 m	0,09 m	0,15 m

0,49 m

0,48 m

0,62 m

2,84 m

95,0 % fraktil 1,10 m 1,39 m 1,40 m Tekstboks 6.7: Robuste spredninger for terrænmodeller (DGAP).

0,44 m

Sammenlignes spredningerne i Tekstboks 6.6 for de filtrede terrænmodeller med spredningerne i Tekstboks 6.7 for terrænmodellerne ses det tydeligt at nøjagtigheden bliver dårligere efter at interpolationen er foretaget. F.eks. er NMAD og 68,3 % fraktilerne i terrænmodellerne henholdsvis faktor 1,36 og 1,38 større end i de filtrede terrænmodeller. Hvis der dernæst ses på antallet af punkter og grove fejl i de filtrede terrænmodeller og terrænmodellerne, ses det at antallet af punkter gennemsnitlig forsøges med faktor 2,1 mens antallet af de grove fejl forøges med faktor 3,4. Dette indikerer at interpolationen har en negativ indvirkning på terrænmodellernes nøjagtighed.

Sammenlignes de filtrede terrænmodeller i Figur 6.13 dernæst med differenserne i Figur 6.14, ses det at de store differenser hovedsagligt forekommer i de områder, hvor der interpoleres punkter. Dette indikerer blot igen at interpolationen har en negativ indvirkning på terrænmodellernes nøjagtighed. Der er dog forskel på hvor store differenserne er, alt efter hvilke områder der er tale om. I parcelhusområderne er der ikke tendens til de store differenser, mens der i skovområder og ved skrående arealer er tendens til store differenser. En årsag hertil vurderes at være at afstanden mellem punkterne i den filtrede terrænmodel i parcelhusområderne er kortere end i skovområder, se Figur 6.13. En anden årsag er at der i parcelhusområderne ikke er de store højdespring, hvilket bevirker at der kan interpoleres punkter til store huller uden det giver store differenser.

Ud fra ovenstående vurderes det at interpolationen har en negativ indflydelse på terrænmodellernes nøjagtighed, da NMAD og 68,3 % fraktilerne i terrænmodeller henholdsvis er faktor 1,36 og 1,38 større end i de filtrede terrænmodeller. Dette understreges ligeledes ved at antallet af grove fejl stiger med faktor 3,2 når antallet af punkter fordobles gennem interpolation. Årsagen hertil er at interpolationen er forbundet med stor usikkerhed da der ofte interpoleres nye punkter for store områder. Dette skinner tydeligt igennem, da de største differenser ofte forekommer i de områder hvor der foretages interpolation.

### 6.3.3 Analyse af højdedata fra flere optagelsesretninger

Analysen af højdedata fra flere optagelsesretninger foretages i rapporten statistisk for alle terrænmodeller, mens den visuel kun foretages for den samlede terrænmodel og optagelsesretning vest, da det vurderes at de visuelle tendenser mellem de fire optagelsesretninger er ens.







fejl. (Højre) Fire punktskyer uden grove fejl fra optagelsesretning vest. "DDO © COWI".

I Figur 6.17 ses det at den samlede terrænmodel har en bedre nøjagtighed end terrænmodellerne fra de enkelte optagelsesretninger, derudover ses det i Tekstboks 6.7 at den samlede terrænmodel

procentvis har det mindste antal grove fejl. Dernæst ses det at nøjagtigheden i terrænmodel vest afviger væsentlig fra de andre, hvilket dog først vil blive belyst i afsnit 6.3.4.

Den umiddelbare årsag til, at den samlede terrænmodel har en bedre nøjagtighed er, at den er fremstillet på baggrund 4 gange så meget data, hvilket tydeligt fremgår Figur 6.18. Dernæst er et vilkårligt område i den samlede terrænmodel altid dækket af mindst tre optagelsesretninger jf. Figur 5.19 i afsnit 5.4.5. Mens terrænmodel vest i de fleste områder kun er dækket af én model fra én optagelsesretning og i enkelte områder af tre overlappende modeller fra samme optagelsesretning. Dette fremgår ligeledes tydeligt i Figur 6.18, da antallet af punkter i den samlede terrænmodel generelt ligger over 10 punkter pr. m<sup>2</sup>, mens de i terrænmodel vest generelt ligger under 10 punkter pr. m<sup>2</sup> og kun over 10 i de områder, hvor der er overlappende modeller.

Alene det at der er flere punkter betyder nødvendigvis ikke at kvaliteten bliver bedre, hvis ikke også fordelingen af punkterne bliver bedre, da punktskyerne, hvad enten der er 16 eller 4, bliver reduceret til et 1x1 m net inden filtreringen foretages. Fordelingen af punkterne i punktskyerne bliver belyst i afsnit 6.3.4.

Ud fra ovenstående vurderes det, at højdedata fra fire optagelsesretninger frem for én optagelsesretning giver en mærkbar bedre nøjagtighed. Det vurderes umiddelbart at årsagen hertil er det større antal punkter, da der anvendes 16 punktskyer frem for 4. Det formodes dog at en bedre fordeling af punkterne ligeledes har betydning, hvilket belyses i afsnit 6.3.4, hvorfor der følges op denne vurdering.

## 6.3.4 Analyse af optagelsesretning og fordeling af punkter i punktskyerne

Analysen af optagelsesretningen og fordelingen af punkterne i punktskyerne foretages for de fire optagelsesretninger nord, syd, vest og øst.

### Optagelsesretningen



Figur 6.19: Differenskort for optagelsesretningerne (fra venstre mod højre) nord, syd, vest og øst. Signaturforklaringen til differenskortene ses i Figur 6.14, RMSE er 0,50 m for nord, 0,49 m for syd, 0,59 m for vest og 0,51 m for øst. "DDO © COWI"

I Tekstboks 6.7 og Figur 6.17 ses det at nøjagtigheden og antallet af grove fejl for tre af de fire optagelsesretninger (nord, syd og øst) tilnærmelsesvis er ens, med en 68,3 % fraktil på cirka 0,49 m, en NMAD på cirka 0,42 m og cirka 4 procent grove fejl. Optagelsesretning vest ligger væsentlig over, med en 68,3 % fraktil på 0,62 m og en NMAD på 0,56 m, samt 8,8 procent grove fejl.

Hvis de fire optagelsesretninger dernæst sammenlignes visuelt i Figur 6.19, ses det at de grove fejl cirka ligger inden for de samme områder, de fire optagelsesretninger imellem. Ved skranten i den nordlige del af projektområdet og ved skovarealet i den østlige del af projektområdet. Terrænmodel vest indeholder dog yderligere et stort område, der er registreret som grove fejl. Området er lokaliseret omkring teknisk skole i det nordøstlige hjørne af projektområdet. Årsagen til at området er registreret som grove fejl er som tidligere beskrevet i afsnit 0, at filtreringen i dette område ikke har fungeret optimalt. Havde filtreringen fungeret optimalt for området ved teknisk skole eller hvis de fire terrænmodeller havde dækket præcist det samme område, ville det være forventeligt at terrænmodel vest havde en nøjagtighed nær de andre tre andre terrænmodeller.

Ud fra ovenstående vurderes det at der ikke er nogen væsentlig forskel på nøjagtighederne optagelsesretningerne i mellem, eftersom det blev vurderet at årsagen til at terrænmodel vest har en dårligere nøjagtighed er at filtreringen ikke fungerer optimalt i området omkring teknisk skole i det nordøstlige hjørne af projektområdet.

#### Fordeling af punkter i punktskyerne



Figur 6.20: Korrelerede punkter i punktskyerne for nord og syd. "DDO © COWI".



Figur 6.21: Skråfotos 02N og 05S for de illustrerede områder i Figur 6.20. "DDSby © COWI".

I Figur 6.20 og Figur 6.22, og ved at sammenligne med Figur 6.21 og Figur 6.23, ses det at de korrelerede punkter i punktskyerne primært ligger langs fortove, tagkonstruktioner, hække og i skyggekanten af træer og lignende. Dernæst ses det at meget få punkter er korreleret på vejene. Yderligere ses der klare tegn på at der forekommer døde områder i punktskyer, hvilket ses ved at der korreleres flere punkter på de tagflader, der vender modsat af optagelsesretningen.

Placeringen af de korrelerede punkter har uden tvivl indflydelse på nøjagtigheden i terrænmodellerne. De fleste korrelerede punkter ligger som beskrevet langs fortove, hække og på tagkonstruktioner, det vil sige faste objekter med god kontrast. Derudover ligger der flere punkter i skyggekanterne af træer og hække, hvilket fremgår ved at sammenligne punktsky og skråfoto. Dette kan være problematisk, da skygger flytter sig f.eks. hvis de to skråfotos i en stereomodel optages med 1 times mellemrum eller hvis det blæser kraftigt dagen hvor billederne bliver optaget. Dette vil derved betyde at punkterne i skyggekanterne kan være fejlopmålt, da der er en risiko for at skyggen har flyttet, hvorved det ikke er det samme punkt, der opmåles de to billeder i stereomodellen. Det vil dermed medvirke til at der opnås en dårligere nøjagtighed i terrænmodellerne, og i og med at billederne er optaget i skråt perspektiv vil skyggerne uden tvivl være mange, hvilket allerede ses de illustrerede skråfotos.



Figur 6.22: Korrelerede punkter i punktskyerne for nord og syd. "DDO © COWI"



Figur 6.23: Skråfotos 02W og 02E for de illustrerede områder i Figur 6.22. "DDSby © COWI".

Et andet problem med de korrelerede punkter, er at der næsten ingen punkter korreleres på vejene, hvilket ellers ville have været en fordel, da vejene generelt er det mest synlige terræn i billederne. Årsagen hertil er at der ikke er nok kontrast i vejene til at der kan korreleres punkter.

Procentdelen af døde områder har ligeledes en væsentlig indflydelse på nøjagtigheden, da der logisk nok ikke kan opmåles i døde områder. I Figur 6.20 og Figur 6.22 ses der en tydelig tendens til døde områder, specielt på tagkonstruktionerne, hvor der næsten kun korreleres punkter på den tagflade, der vender modsat af optagelsesretningen. Dette betyder at der er en dårlig fordeling af de korrelerede punkter i én punktsky. Men hvis flere punktskyer kombineres fra forskellige optagelsesretninger vil fordelingen blive bedre, da der herved kompenseres for de døde områder se Figur 6.24. Fordelingen kan yderligere have indflydelse på filtreringen og dermed ligeledes nøjagtigheden, hvilket sker ud fra den betragtning, at jo bedre et hus eller en skov defineret i punktskyen eller -skyerne jo bedre vil filtreringen ligeledes blive. Betragtning er illustreret i Figur 6.24.



Figur 6.24: (Venstre) Korrelerede punkter i punktskyerne for nord, syd, vest og øst. "DDO © COWI" (Højre) Illustration af punktfordelingen for henholdsvis én og to optagelsesretninger om et hus.

Ud fra ovenstående vurderes det at fordelingen af punkterne i punktskyerne har en væsentlig indflydelse på nøjagtigheden i terrænmodellerne. Herunder vurderes det at fordelingen er dårligst når punktskyer fra én optagelsesretning anvendes, mens den er bedst når punktskyer fra alle fire optagelsesretninger anvendes. Dette stemmer ligeledes overens med vurderingen i afsnit 6.3.3, hvor det blev vurderet at den samlede terrænmodel havde den bedste nøjagtighed. Årsagen til at fordelingen er bedst, når punktskyer fra alle fire optagelsesretninger anvendes, er at der derved kompenseres for døde områder.

Det vurderes yderligere at det kan have en negativ indflydelse på nøjagtigheden at flere af punkterne i punktskyerne er korreleret på baggrund af skygger, da skyggerne kan flyttes som konsekvens af at skygger ikke er faste objekter, men kan flytte sig over tid på baggrund af sol fra forskellige vinkler eller vind. Derudover er det ikke tilfredsstillende at der ikke korreleres flere punkter på vejene, da vejene er det mest synlig terræn i billeder. Men desværre har vejene ikke nok kontrast.

### 6.3.5 Analyse af det varierende måleforhold og basis/højde forholdet

	Bund	Midt1	Midt2	Тор
# interpoleret punkter	100	105	100	104
Normalfordelt				
RMSE	0,33 m	0,39 m	0,32 m	0,39 m
Standardafvigelse	0,29 m	0,31 m	0,21 m	0,34 m
Middel differens	0,16 m	0,24 m	0,24 m	0,19 m
Maks. differens	1,28 m	1,00 m	0,89 m	0,97 m
Min. differens	-0,51 m	-0,51 m	-0,11 m	-0,65 m
Robust				
NMAD	0,31 m	0,30 m	0,23 m	0,18 m
Median	0,19 m	0,25 m	0,22 m	0,31 m
68,3 % fraktil	0,30 m	0,39 m	0,36 m	0,40 m
95,0 % fraktil	0,57 m	0,73 m	0,65 m	0,65 m

Analysen af det varierende måleforhold og basis/højde forholdet foretages for de fire tidligere udvalgte områder i terrænmodel nord.

Tekstboks 6.8: Normalfordelte og robuste spredninger for de fire udvalgt områder. In- og outputfilerne findes på DVD 08.

	Bund	Midt1	Midt2	Тор
Måleforhold	1:7.939	1:9.803	1:12.745	1:16.658
basis/højde	200/500	200/500	200/650	200/650
	(0,4)	(0,4)	(0,3)	(0,3)

Forventet spredning0,05 m0,06 m0,10 m0,13 mTekstboks 6.9: Teoretisk forventet spredning. Måleforholdet er beregnet efter Formel 4 i Appendiks A, hvor nyh, se Figur 6.25, anvendes som flyvehøjde, τ lig 45 grader og α lig værdierne for COWI/MIDAS i Tekstboks 2.2. Den forventede spredning beregnes efter Appendiksfigur 5.



Figur 6.25: (Venstre) Transformeret terræn og ydre orientering jf. stråleudjævningen i ISDM. (Højre) De fire udvalgte områder. Blå afgrænsninger er afgrænsningen af de enkelte modeller. Gul er punkterne i terrænmodel nord og røde er de udvalgte områder. "DDO © COWI".



Figur 6.26: Normaliseret spredninger for de fire udvalgte områder. Normaliseret i forhold til spredningerne i område "bund".

Teoretisk set skulle spredningen blive gradvist dårligere fra område "bund" til "top", hvilket fremgår af Figur 6.26. Hvis de beregnede spredninger (RMSE og 68,3 % fraktil), sammenlignes med de forventede spredninger ses det at spredningerne i de fire områder ikke følger den forventede sprednings tendens. Derimod ligger spredningerne på cirka det samme niveau. Der ses dog en tendens til at nøjagtigheden er bedst i bunden af billedet, men ellers er det svært at vurdere nogle konkrete tendenser. Årsagen til at der ingen mærkbar forskel er mellem de fire områder, selvom der teoretisk burde være, kan være fordi terrænmodellerne er blevet manipuleret op til flere gange i processen fra punktskyer til terrænmodeller.

Ud fra ovenstående vurderes det at det varierende måleforhold og basis/højde forhold i terrænmodellerne ingen mærkbar indflydelse har. Årsagen hertil er formentlig fordi terrænmodellerne er blevet manipuleret op til flere gange i processen fra punktskyer til terrænmodeller.

## 6.3.6 Opsummering

I gennem analyserne af de syv faktorers indflydelse på nøjagtigheden og fuldstændigheden er følgende blevet vurderet.

Den ekstra kalibrering (DGAP) har ikke medført en væsentlig forbedring af nøjagtigheden i terrænmodellerne, hvorfor en kalibrering i fremtiden vil være unødvendig.

Filtreringen har overordnet fungeret efter hensigten, da hovedparten af punkterne i de filtrede terrænmodeller ligger på terrænet. Filtreringen fungerer dog ikke optimalt for bygninger eller andre objekter over terræn, der ikke er dækket fuldstændig af højdemodellen, der filtreres.

Interpolationen har en negativ indflydelse på nøjagtigheden, da nøjagtigheden cirka stiger med en faktor 1,37 fra de filtrede terrænmodeller til terrænmodellerne. Dernæst stiger antallet af grove fejl med en faktor 3,2 når antallet af punkter fordobles gennem interpolationen. Interpolationen har størst indflydelse på nøjagtigheden, når der interpoleres punkter for større områder, f.eks. i tomme områder, hvor skovarealer er filtreret væk.

Den samlede terrænmodel har en bedre nøjagtighed end terrænmodellerne fra de enkelte optagelsesretninger, hvilket skyldes et større antal punkter og en bedre fordeling af punkterne i punktskyerne, der danner grundlaget for den samlede terrænmodel. Årsagen til at fordelingen er bedre, når punktskyer fra alle fire optagelsesretninger anvendes, er at der kompenseres for døde områder.

Der er ingen væsentlig forskel på nøjagtighederne mellem terrænmodellerne fra de fire optagelsesretninger, og årsagen til at terrænmodel vest har en dårligere nøjagtighed, er at filtreringen for et enkelt område ikke har fungeret optimalt.

Punkterne i punktskyerne korreleres primært langs fortove, på tagkonstruktioner og i skyggekanter. Det kan dog have en negativ indflydelse på nøjagtigheden af punkter korreleres på baggrund af skyggekanter, da skyggekanterne kan flyttes sig over tid. Dernæst er det ikke tilfredsstillende at der ikke korreleres flere punkter langs vejene, da vejene er det mest synlige terræn i billederne.

Det varierende måleforhold og basis/højde forholdet har ingen væsentlig indflydelse på nøjagtigheden i terrænmodellerne, hvilket strider imod teorien. Årsagen hertil er formentlig at terrænmodellerne er blevet manipuleret op til flere gange i processen fra punktskyer til terrænmodeller.

Vurderingerne af de syv faktorers indflydelse på nøjagtigheden indikerer klart at der er områder, hvor der kan ske forbedringer, der i sidste ende kan forbedre nøjagtigheden i terrænmodellerne. Herunder kan blandt andet nævnes, forbedring af filtreringen og interpolationen.

## 6.4 Kontrol af nøjagtigheden

Formålet med dette afsnit er at kontrollere nøjagtigheden i den terrænmodel, der overordnet leverer den bedste nøjagtighed og fuldstændighed, vurderet ud fra analyserne i afsnit 6.3. Kontrollen foretages jf. planlægningen i afsnit 6.1.5. Kontrollen foretages for den samlede terrænmodel fremstillet på baggrund af DGAP kalibreringen.

## 6.4.1 Kontrol i forhold til DTM 2x2 m

Kontrollen af nøjagtigheden vil hovedsagligt tage udgangspunkt i RMSE, da denne repræsentere den reelle nøjagtighed i terrænmodellen. De øvrige spredninger repræsenterer en teoretisk nøjagtighed, der kan opnås, hvis der sker forberedelse. F.eks. hvis der foretages en translation i højden eller hvis der udarbejdes en metode til at fjerne de grove fejl eller en ny interpolationsmetode.

# interpoleret punkter	38726		
Grove fejl antal/procent	1090/2,8		
Normalfordelt		Robust	
RMSE	0,55 m	NMAD	0,36 m
Standardafvigelse	0,48 m	Median	0,21 m
Middel differens	0,26 m	68,3 % fraktil	0,44 m
Maks. differens	2,79 m	95,0 % fraktil	1,10 m
Min. differens	-1,55 m		
Normalfordelt efter de			
grove fejl er fjernet			
RMSE	0,45 m		
Standardafvigelse	0,40 m		
Middel differens	0,22 m		

Tekstboks 6.10: Normalfordelte og robuste spredninger for den samlede terrænmodel fremstillet efter DGAP kalibreringen.



-0,75 - 0,500,25 - 0,50Over 6xRMSEFigur 6.27: Differenskort (referenceflade minus terrænmodel. Differenserne er i meter ogRMSE er efter at de grove fejl er fjernet og er lig 0,45 m. "DDO © COWI".

Kontrolleres terrænmodellen i forhold til COWI's 2x2 m DTM opnås der en nøjagtighed (RMSE) på 0,55 m, og terrænmodellen indeholder 2,8 procent grove fejl efter grovfejlsgræsen på 3 x RMSE. Derudover ses det at der er en systematisk fejl på 0,26 m, og kompenseres der for den systematiske fejl opnås der en nøjagtighed (σ) på 0,48 m.

Den systematiske fejl er forholdsvis stor og indikerer at terrænmodellen ligger under COWI's DTM og denne tendens er generel for alle fremstillede terrænmodeller jf. Bilag VI. Den systematiske fejl skinner ligeledes i gennem i Figur 6.27, hvor der er en klar overvægt af positive værdier. Den systematiske fejl må tilskrives den fremstillede terrænmodel og ikke COWI's DTM, da den systematiske fejl mellem COWI's DTM og kontrolpunkterne i Bilag V kun er beregnet til 0,05 m. Men sammenlignes de systematiske fejl med RMSE for henholdsvis COWI's DTM og den samlede terrænmodel udgør den systematiske fejl 62,5 procent af RMSE for COWI's DTM og 47,3 procent for den samlede terrænmodel. Det vil sige at COWI's DTM set i forhold til nøjagtigheden har en større systematisk fejl.

Hvis nøjagtigheden (RMSE) i terrænmodellen sammenlignes med den forventede nøjagtighed (0,33 m) ligger denne cirka faktor 5/3 over. Sammenlignes nøjagtigheden derimod med erfaringerne ligger den cirka 2,5 over. Ses der dernæst specifikt på differenserne, ses det at der er klare tendenser til at de største forekommer i områder, der skråner (nordlige del af projektområdet) og i skovområder (østlige del af projektområdet). Årsagen hertil er jf. analyserne i afsnit 0, at der for disse områder er foretaget interpolation.

Den hidtidige beskrevne nøjagtighed er en overordnet nøjagtighed for hele terrænmodellen, men som det tydeligt fremgår af Figur 6.27, er der væsentlig forskel på hvor de store differenser opstår. Der er derfor som tidligere beskrevet foretaget en individuel kontrol for fire områdetyper. Desværre har dette ikke været muligt at kontrollere områdetypen skrående terræn, da den samlede terrænmodel ikke dækker de opmålte kontrolpunkter for den områdetype.

	Alle	Åben	Bygning	Skov
# interpoleret punkter	92	46	20	17
Normalfordelt				
RMSE	0,39 m	0,44 m	0,19 m	0,47 m
Standardafvigelse	0,37 m	0,33 m	0,15 m	0,34 m
Middel differens	0,11 m	0,30 m	0,12 m	-0,33 m
Maks. differens	1,47 m	1,47 m	0,48 m	0,23 m
Min. differens	-0,74 m	-0,13 m	-0,07 m	-0,74 m
Robust				
NMAD	0,20 m	0,20 m	0,15 m	0,46 m
Median	0,12 m	0,17 m	0,12 m	-0,33 m
68,3 % fraktil	0,29 m	0,32 m	0,18 m	0,63 m
95,0 % fraktil	0,83 m	0,98 m	0,47 m	0,72 m

### 6.4.2 Kontrol i forhold til GNSS opmålte kontrolpunkter

Tekstboks 6.11: Normalfordelte og robuste spredninger for tre forskellige områdetyper. In- og outputfilerne findes på DVD 09.

Kontrolleres terrænmodellen i forhold til de tre områdetyper opnås, der en nøjagtighed (RMSE) på henholdsvis 0,44 m for åbne områder, 0,19 m for punkter nær bygninger og 0,47 m for skovområder. Det ses stadig, at der stadig er en klar tendens til systematiske fejl, dog er de systematiske fejl, de tre områder imellem, ikke entydige. I åbne områder er den systematiske fejl 0,30 m, nær bygninger 0,11 m og i skovområder -0,33 m. Kompenseres der for de systematiske fejl opnås følgende nøjagtigheder ( $\sigma$ ), 0,37 m, 0,15 m og 0,34 m.

At de systematiske fejl ikke er entydig, de tre områder imellem, var forventelig eftersom det af Figur 6.28 tydelig ses at skovområdet, som kontrolleres har store negativ differenser, mens de åbne områder og nær bygningerne primært har positive differenser.

Hvis nøjagtighederne (RMSE) sammenlignes indbyrdes var det forventet at de åbne områder ville levere den bedste nøjagtighed, mens skovområderne ville levere den dårligste nøjagtighed. Hvilket vurderes ud fra at de åbne områder primære består af punkterne, der er tilbage efter filtreringen, mens skovområderne primært består af interpolerede punkter, der har en større usikkerhed jf. analyserne i afsnit 0. Men faktum er, at nøjagtigheden mellem de to områdetype tilnærmelsesvis er ens, dog med modsatrettede systematiske fejl.



Figur 6.28: Plot af kontrolpunkter og deres afvigelse i forhold til den samlede terrænmodel. Enheden er meter."DDO © COWI".

## 6.4.3 Opsummering

Den overordnede nøjagtighed (RMSE) i terrænmodellen er 0,55 m, mens den for åbne områder er 0,44 m, nær bygninger 0,19 m og i skovområder 0,47 m. Den overordnede nøjagtighed svarer cirka til faktor 2,5 af hvad der jf. tidligere erfaringer er opnået i terrænmodeller fremstillet på baggrund af nadirbilleder optaget med fotogrammetriske kameraer.

Dernæst er der både overordnet og inden for de enkelte områder registret systematiske fejl. De største systematiske fejl er registreret i åbne områder og skovområderne. I de åbne områder er de 0,30 m, mens de i skovområderne er -0,33 m. De systematiske fejl i de åbne områder indikerer, at der er systematiske fejl forbundet med fremstillingsprocessen eftersom punkterne ikke er interpoleret, men er et direkte produkt af de korrelerede punkter i punktskyerne. De systematiske fejl i skovområderne indikerer derimod at der er problemer med interpolationen, eftersom disse punkter er et produkt af interpolationen efter filtreringen.

Kompenseres der for den systematiske fejl opnås der en overordnet nøjagtighed ( $\sigma$ ) på 0,48 m og de på 0,37 m, 0,15 m og 0,34 m inden for de tre områdetyper.

Hvorvidt nøjagtigheden er tilfredsstillende er svært at vurdere eftersom der ikke er erfaringerne med terrænmodellering vha. skråfotos. Det vurderes dog at nøjagtigheden overordnet er tilfredsstillende eftersom der jf. analyserne er mindre problemer med filtreringen og interpolationen. Dernæst skal det ligeledes pointeres at terrænmodellen er fremstillet på baggrund af skråfotos optaget med et ikke-fotogrammetrisk kamera, hvilket uden tvivl har spillet en rolle.

# 7 Konklusion

Projektet er udarbejdet med udgangspunkt i problemformuleringen, Hvilken nøjagtighed og fuldstændighed kan der opnås i en digital terrænmodel fremstillet vha. skråfotos fra et malteserkors konfigureret skråfotosystem?

For at kunne besvare problemformuleringen er der fremstillet terrænmodeller for hver optagelsesretning og én samlet terrænmodel, der baserer sig på højdedata fra alle fire optagelsesretninger. De fremstillede terrænmodeller har efterfølgende dannet grundlag for en række analyser af forskellige faktorers indflydelse på nøjagtigheden og fuldstændig og afslutningsvis er der foretaget en kontrol af nøjagtigheden.

Metoden for fremstillingen har været en individuel orientering af hver enkel optagelsesretnings modeller vha. paspunkter og efterfølgende automatisk fremstilling af punktskyer gennem korrelation. Punktskyerne er dernæst automatisk og manuelt blevet filtreret for grove fejl og efterfølgende forenet i en terrænmodel for hver enkel optagelsesretning og i én samlet terrænmodel. Herefter er der foretaget automatisk filtrering i forhold til bygninger, skovareal og andre objekter over terræn og afslutningsvis er der foretaget en interpolation (udfyldning af huller) i de fremstillede terrænmodeller.

Metoden for analyserne og kontrollen er sket i forhold til en eksisterende 2x2 m DTM med en specificeret nøjagtighed på 0,10 m. Dernæst er der i kontrollen foretaget en kontrol i forhold til GNSS RTK opmålte punkter fordelte indenfor tre forskellige områdetyper, åbne områder, bær bygninger og skovområder.

### Nøjagtighed

Nøjagtigheden (RMSE) i den samlede terrænmodel i forhold til en eksisterende 2x2 m DTM er 0,55 m, mens den i forhold til de GNSS RTK opmålte punkter er 0,44 m i åbne områder, 0,19 m nær bygninger og 0,47 m i skovområder.

Nøjagtigheden i forhold til den eksisterende DTM er betydelig større end nøjagtigheden inden for de enkelte områdetyper, hvilket indikerer at der er områder med store differenser, som ikke har indgået i kontrollen i forhold til de tre områdetyper. Problemområderne med de store differenser er primært lokaliseret i skovområder.

Dernæst er i den samlede terrænmodel konstateret en systematisk fejl på 0,26 m, hvilket betyder at terrænmodellen ligger under det "sande" terræn. Tendensen til en positiv systematisk fejl er gennemgående for alle fremstillede terrænmodeller. Inden for de enkelte områdetyper er den systematiske fejl dog ikke entydig. I de åbne områder er den 0,30 m, nær bygninger 0,12 og i skovområder - 0,33 m.

Kompenseres der for de systematiske fejl opnås der en nøjagtighed ( $\sigma$ ) på 0,48 m i forhold til den eksisterende DTM og på 0,37 m, 0,15 m og 0,34 inden for de tre område typer.

Det konkluderes at nøjagtigheden overordnet er tilfredsstillende set ud fra det aspekt at terrænmodellen er fremstillet på baggrund af skråfotos optaget med et ikke-fotogrammetriske. Sammenlignes den opnåede nøjagtighed (RMSE) med nøjagtigheden i terrænmodeller fremstillet vha. nadirbilleder, optaget med et fotogrammetrisk kamera, er der cirka en faktor 2,5 til forskel.

### Filtrering og interpolation

Filtreringen foretages overordnet tilfredsstillende, da de tilbageblevne punkter primært er lokaliseret på vejene, i åbne områder og i parcelhushaverne. Der er dog observeret problemer med filtreringen i kanterne af højdemodellerne, der filtreres. Årsagen hertil er at objekter, der ligger i kanterne, f.eks. en bygning, ikke er fuldstændig dækket, hvilket betyder at filtreringsprogrammet ikke kan afgrænse bygningen og derfor ikke filtrere den væk. Dernæst er der ligeledes konstateret enkelte afvigende punkter på glatte overflader, som f.eks. veje, hvilket igen indikerer at filtreringen ikke har været optimal. Med hensyn til interpolationen har denne en direkte negativ indflydelse på nøjagtigheden, da nøjagtigheden stiger med en faktor 1,37 når der foretages interpolation i de filtrede terrænmodeller. De største fejl i interpolationen forekommer i de filtrede skovarealer, mens problemet ikke er så stort i parcelhusområder.

#### Flere optagelsesretninger

Den bedste nøjagtighed opnås i terrænmodeller fremstillet på baggrund af højdedata fra alle fire optagelsesretninger, hvilket understreger betydningen af flere overlappende punktskyer i forhold til nøjagtigheden. Årsagen til at der opnås en bedre nøjagtighed i terrænmodeller fremstillet på baggrund af højdedata fra alle fire optagelsesretninger, er først og fremmest den større mængde højdedata, men ligeledes en forbedret fordeling og fuldstændighed. Fordelingen og fuldstændigheden forbedres, da der forekommer mange døde områder i en enkelt punktsky, og ved at anvende højdedata fra alle fire optagelsesretninger kompenseres der for de døde områder.

### Varierende måleforhold og basis/højde forhold

Det varierende måleforhold og basis/højde forhold har teoretisk set en væsentlig indflydelse på nøjagtigheden af en højdebestemmelse, men analyseres dette i forhold til de fremstillede terrænmodeller har det ikke været mulige at bekræftet dette. Årsagen hertil er formentlig at det højdedata, der danner grundlaget for terrænmodellerne er blevet manipuleret flere gange, f.eks. i forbindelse med diverse interpolationer og filtreringen.

#### Fremstillingsproces

Fremstillingen af terrænmodellerne har generelt været præget af, at de anvendte programmer ikke er beregnet til at behandle skråfotos. Det har derfor været nødvendig at transformeres terrænet for hver enkel optagelsesretning, så det ikke længere er skråfotos af et fladt terræn, men nadirbilleder af et skråt terræn. Dette har igennem en del af fremstillingsprocessen givet ekstra arbejde og været en barrikade for at udnytte fordelene ved skråfotos. Overordnet har det betydet at der er arbejdet i fire projekter, en for hver optagelsesretning, i stedet et, hvilket har betydet at der ikke er draget fordel af at et vilkårligt punkt kan ses flere skråfotos fra forskellige optagelsesretninger.

#### Generelt

Det konkluderes ud fra ovenstående, at det er muligt at fremstille en terrænmodel, vha. af skråfotos og gennem stereofotogrammetri, med en tilfredsstillende nøjagtighed, set i forhold til,

- at der er anvendt skråfotos optaget med et ikke-fotogrammetrisk kamera,
- at filtreringen i enkelte områder ikke fungerede optimalt,
- at interpolationen har en negativ indflydelse på nøjagtigheden og
- at der i fremstillingsprocessen ikke er draget fordel af fordelene ved skråfotos, da de anvendte programmer og metoder ikke er beregnet til at behandle skråfotos.

Det konkluderes derfor, at der er plads til forbedringer, specielt i forhold til metode og programmer, men ligeledes i forhold til filtreringen og interpolationen.

# 8 Perspektivering

Formålet med dette kapitel er at reflektere over projektet og hvordan anvendelsen af skråfotos i forhold til terrænmodellering i fremtiden kan videreudvikles, så der i højere grad kan drages fordel af fordelene.

I konklusionen er det konkluderet at der er flere problemområder i forhold til terrænmodellering vha. skråfotos, herunder de anvendte programmer, filtreringen og interpolationen.

### Udvikling af programmer

Det anvendte program i orienteringen og fremstillingen af højdemodeller er ikke beregnet til at håndtere skråfotos, hvilket derfor er en stopklods for den optimale udnyttelse af fordelene ved skråfotos. Fordelen ved skråfotos er at et vilkårligt område kan ses fra flere optagelsesretninger og i flere billeder. I dette projektet er der ikke draget fordel heraf, da der er arbejdet individuelt med hver optagelsesretning i orienteringen og fremstillingen af højdemodellerne.

En mulighed ville derfor være at udvikle programmer, der kan håndtere skråfotos i orienteringen og ikke mindst i fremstillingen af højdemodeller. I udviklingen af et sådan program, bør der lægges vægt på at programmet kan,

- orientere skråfotos i et samlet projekt vha. orienteringsparametrene estimeret på baggrund af GNSS og IMU (direkte georeferering) og
- korrelere interessepunkter mellem flere skråfotos, der er afbildet i forskelligt måleforhold og fra forskellige optagelsesretninger.

Orienteringen af skråfotos i et samlet projekt er et ultimatum for at der senere kan korreleres interessepunkter mellem forskellige optagelsesretninger. Det vurderes ud fra egne erfaringer, at det er muligt, at orientere skråfotos fra forskellige optagelsesretninger i et projekt, dog har erfaringerne ligeledes vist at rotationerne skal være i et  $\alpha$ , v,  $\kappa$ -system og ikke et  $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$ -system jf. Johannessen et al. (2008). Dernæst skal orienteringen foretages gennem en direkte georeferering, da det er en tidskrævende og dyr proces at orientere skråfotos vha. paspunkter. Derudover er overlappende mellem skråfotos er ikke er ensartede, hvorfor det vil kræve et stort planlægningsarbejde at finde egnede paspunkter. Orientering gennem direkte georeferering vil dog uden tvivl have en indflydelse på nøjagtigheden.

Korrelationen af interessepunkter mellem tre eller flere billeder er umiddelbart ikke noget problem, så længe de tilnærmelsesvis er optaget i samme måleforhold og fra samme optagelsesretning jf. Kraus (2007 s. 349) og Mass (1996). Problemet med korrelationen opstår først når billederne er optaget fra flere forskellige optagelsesretninger og i forskellige måleforhold, de dette betyder at objekterne ikke afbildes ens i form og kontrast billederne imellem. En løsning på problemerne kunne være at der i højere grad anvendes strukturbaseret korrelation af linjer, som f.eks. vejstriber, kantsten eller tagkanter.

Det vil sige at der er flere udfordringer, der skal overvindes inden det vil være gunstigt, at anvende skråfotos i en terrænmodellering, og de største udfordringer ses indenfor orienteringen og korrelationen.

### Kombination af nadirbilleder og skråfotos

I dette projekt er der kun arbejdet med skråfotos, men som tidligere beskrevet i projektet optages der med et malteserkorskonfigureret skråfotosystem ligeledes et nadirbillede. At inkludere nadirbilleder i terrænmodelleringen ville uden tvivl bidrage til en forbedret nøjagtighed, og ligger dernæst op til en diskussion af hvorvidt terrænmodelleringen ikke bare bør foretages på baggrund af nadirbillederne.

Kombinationen af nadirbilleder og skråfotos vurderes at være en god kombination, hvorfor det vurderes at være dumt ikke at anvende begge slags billeder, da de hver især har sine fordele. Nadirbillederne har et stabilt måleforhold og vil uden tvivl levere en bedre nøjagtighed, men i skråfotos er det muligt at se facader, hvilket giver en række nye muligheder, der kun kortfattet er diskuteret i dette projekt.

Kombinationen af nadirbilleder og skråfotos ville kunne levere en punktsky, der både afbilder terrænet, facader på bygninger og tagkonstruktionerne. Herved ville det være muligt at kunne fremstille en 3D model og da der allerede findes skråfotos for området kunne der fremstilles en fotorealistisk 3D model.

### Filtrering og interpolation

Filtreringen har i projektet overordnet været tilfredsstillende, dog har der været mindre problemer i kanterne af modellerne og været enkelte afvigende punkter. Med hensyn til de enkelte afvigende punkter, ville en mulighed være at foretage en udglatning af punkterne efter filtreringen, da det må antages at terrænet inden for 2 m ikke stiger 15 grader på en normal dansk villavej. Med hensyn til problemerne i kanterne er det svært at korrigere herfor og det må derfor accepteres at dette kan forekomme.

Filtreringen kan dog uden de helt store problemer forbedres på flere områder. F.eks. burde der være mulighed for at integrere eksisterende tekniske eller topografiske kort i filtreringen, hvorved det blev indikeret hvor bygninger lå. Dette ville danne et udmærket grundlag for en indledende filtrering.

Interpolationen har dernæst uden tvivl en stor indflydelse på nøjagtigheden i de fremstillede terrænmodeller, hvilket tydeligt fremgik i analyserne. Det er derfor nærliggende, at det er inden for dette område at der skal ske de største forbedringer. Det vurderes dog svært at forbedre interpolationen uden der enten foretages markmålinger eller anvendes eksisterende data, eftersom interpolation er en estimering af punkter for et ukendt område ud fra de nærmest liggende punkter.

I projektet er filtreringen og interpolationen foretaget på baggrund af en 1x1 m højdemodel, det vil sige at punktskyerne er blevet reduceret. Dette kunne derfor være interessant at undersøge hvilken indflydelse det ville have på nøjagtigheden at filtreringen og interpolationen blevet foretaget på baggrund af punktskyerne. Dette betyder dog, at der skal foretages filtrering af en betydelig større mængde højdedata. Dette kunne være én løsning på problemerne med filtreringen, da terrænet og objekterne på terrænet derved bliver afbildet mere fuldstændig i punktskyerne end i en 1x1 m højdemodel.

En anden mulighed, der kunne forbedre filtreringen og ikke mindst interpolationen ville være den tidligere beskrevne kombination med nadirbilleder. Fordelen ved at inkluderer nadirbillederne i forhold til interpolationen ville være at det f.eks. i skovområder ville være muligt at se lysningerne, der ellers ligger i døde områder i skråfotos. Hvis lysningerne fremgik af højdemodellerne/punktskyerne ville der i skovområder fremgår terrænpunkter, hvilket uden tvivl ville være en fordel i såvel filtreringen som interpolationen.

### Afslutning

Landsdækkende terrænmodellering vha. skråfotos er uden tvivl ikke en del af kortlægningens fremtid, da dette marked i højere grad anvender laserscanning, der uden tvivl er billigere og levere et bedre produkt. Men der ses mulighed, måske ikke for det brede marked, men måske inden for mere specifikke genre, som f.eks. fotorealistiske 3D model. Dette kræver dog at der udvikles programmer, der først og fremmest kan håndtere skråfotos i orienteringen og korrelation, men ligeledes at processen automatiseres mest muligt, så der f.eks. ikke skal opmåles paspunkter eller lignende.

# Appendiks A Diverse formler

Stråleligninger

 $x' = x'_{0} - c \frac{r_{11(X-X_{0})} + r_{21(Y-Y_{0})} + r_{31(Z-Z_{0})}}{r_{13(X-X_{0})} + r_{23(Y-Y_{0})} + r_{33(Z-Z_{0})}} + \Delta x'$ 

 $y' = y'_{0} - c \frac{r_{12}(X-X_{0}) + r_{22}(Y-Y_{0}) + r_{32}(Z-Z_{0})}{r_{13}(X-X_{0}) + r_{23}(Y-Y_{0}) + r_{33}(Z-Z_{0})} + \Delta y'$ 

hvor x' og y' er billedkoordinater til vilkårligt punkt $x'_0 \text{ og } y'_0 \text{ er billedets hovedpunkt}$ c er kamerakonstantenr12, r12, r13 osv. er elementer i rotationsmatricen, se Formel 2. $\Delta x' \text{ og } \Delta y' \text{ er ekstra parametre f.eks. linsefortegning}$ 

Formel 1: Stråleligninger.

 $Rotation (\omega) \text{ omkring f} \text{$\ensiremath{\sigma}$ste akse} \qquad R_{\omega} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega) & \sin(\omega) \\ 0 & -\sin(\omega) & \cos(\omega) \end{bmatrix}$  $Rotation (\varphi) \text{ omkring anden akse} \qquad R_{\varphi} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & 0 & -\sin(\varphi) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\varphi) & 0 & \cos(\varphi) \end{bmatrix}$  $Rotation (\kappa) \text{ omkring anden akse} \qquad R_{\kappa} = \begin{bmatrix} \cos(\kappa) & \sin(\kappa) & 0 \\ -\sin(\kappa) & \cos(\kappa) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 

Rotations matrix  $(R_{\kappa} \times R_{\varphi} \times R_{\omega})$ 

$$R_{\omega\varphi\kappa} = \begin{bmatrix} r11 & r12 & r13\\ r21 & r22 & r23\\ r31 & r32 & r33 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c(\varphi)c(\kappa) & -c(\varphi)s(\kappa) & s(\varphi)\\ c(\omega)s(\kappa) + s(\omega)s(\varphi)c(\kappa) & c(\omega)c(\kappa) - s(\omega)s(\varphi)c(\kappa) & -s(\omega)c(\varphi)\\ s(\omega)s(\kappa) - c(\omega)s(\varphi)c(\kappa) & s(\omega)c(\kappa) + c(\omega)s(\varphi)s(\kappa) & c(\omega)c(\varphi) \end{bmatrix}$$
Formel 2: Rotationsmatrix

Formel 2: Rotationsmatrix.

 $2 \times \left( t \overline{an^{-1}\left(\frac{a}{b}\right) \times \omega} \right)$ 



Formel 3: Beregning af åbningsvinkel.

Beregning af måleforhold (forrest)	$m_{b-For} = \frac{h \times cos(-\alpha)}{c \times cos(\tau - \alpha)}$	(Höhle 2008A)
Beregning af måleforhold (midt)	$m_{b-Midt} = \frac{h}{c \times \cos(\tau)}$	(Höhle 2008A)
Beregning af måleforhold (bagest)	$m_{b-Bag} = \frac{h \times cos(\alpha)}{c \times cos(\tau + \alpha)}$	(Höhle 2008A)
hvor h er flyvehøjden c er kamerakonstanten $\alpha$ er halvdelen af åbningsvinklen t er hældningen (nadirvinklen)	n hara	
naairpunkt forrest midi	t buy	

Formel 4: Beregning af måleforhold (forrest, midt og bagerst).

GSD på terræn i bredden (forrest)	$GSD_{FL} = pel \times m_{b-For}$
GSD på terræn i bredden (midt)	$GSD_{ML} = pel \times m_{b-Midt}$
GSD på terræn i bredden (bagest)	$GSD_{BL} = pel \times m_{b-Bag}$

GSD'en i længden er 1/cos(β) større end GSD'en i bredden, hvor β er vinklen mellem lodlinjen (projektionscentre til nadirpunkt) og strålen til et vilkårligt punkt (projektionscentre til vilkårligt punkt)

GSD på terræn i længden (forrest)	$GSD_{FB} = \frac{pel \times m_{b-For}}{cos(\tau - \alpha)}$
GSD på terræn i længden (midt)	$GSD_{MB} = \frac{pel \times m_{b-Midt}}{cos(\tau)}$

GSD på terræn i længden (bagest)  $GSD_{BB} = \frac{pel \times m_{b-Bag}}{cos(\tau+\alpha)}$ 

hvor GSD er ground spatial distance pel er pixelstørrelse



Formel 5: Beregning af GSD på terræn (forrest, midt og bagest).

Root Mean Square Error	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta^2}{n}}$	
Standardafvigelse	$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^{n} (\Delta - \mu)^2}{n-1}}$	
Middel (µ)	$\mu = \frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta}{n}$	
hvor Δ er afvigelsen mellem to målinger		
Grovfejlgrænse	$3 \times RMSE$	
Formel 6: Beregning af spredninger.		

# Appendiks B Fremstilling af DTM vha. nadirbilleder

Fremstillingen af en DTM vha. nadirbilleder kan opdeles i fem delprocesser, se Appendiksfigur 1, og hver af de fem delprocesser vil i dette appendiks blive gennemgået med hensyn til principper og metoder.

1	Planlægning	Planlægning af flyvelinjer mv., optagelse af billeder og indsamling af orienteringsdata vha. GNSS, IMU osv.
2	Orientering	Indre orientering af billeder og modeller
3	Fremstilling af højdemodel	Fremstilling af højdemodel rå og i grid, gennem struktur- og arealbaseret korrelation af gråtoneværdier
4	Fremstilling af DTM	Filtrering af højdemodel for grove fejl og punkter, der f.eks. ligger på bygninger, træ osv.
5	Kvalitetskontrol	Kvalitetskontrol af fremstillet DTM gennem markmålte koordinater eller eksisterende DTM

Appendiksfigur 1: Fremstillingsprocessen for en DTM.

# **B.1** Planlægning

Planlægningen indebærer konfiguration af en lang række parametre så det færdige produkt opfylder kundens krav til nøjagtighed og fuldstændighed. F.eks. skal der tages stilling til hvor og hvornår kameraerne skal eksponeres, hvilket har betydning for billedets geometriske placering, måleforhold, længde- og sideoverlap og omvendt. Dette betyder at en lang række af parametrene har indflydelse på hinanden, hvilket synliggøres i det nedenstående.



Appendiksfigur 2: Geometri for flyveplanlægning af et fladt område. Frit tegnet efter Kraus (2007).

Første trin i planlægningen er at der udarbejdes en kravspecifikation af "kunden", der forholder sig til hvilken nøjagtighed og fuldstændighed det færdige produkt skal have. Den udarbejdede kravspecifikation har efterfølgende direkte indflydelse på den konkrete planlægning, hvor der skal tages stilling hvor stort længde- og sideoverlappet skal være, hvilken kameratype der skal anvendes, hvad flyvehøjde skal være osv. I Appendiksfigur 2 og Appendiksfigur 3 beskrives de mest anvendte geometriske formler i forbindelse med flyveplanlægning.

Måleforhold	$m_b = h/c$	
Billedlængde (jord)	$S1 = s1 \times m_b$	
Billedbrede (jord)	$S2 = s2 \times m_b$	
Længdeoverlap (%)	$l = \frac{S1-b}{S1} 100$	
Sideoverlap (%)	$q = \frac{s_{2-a}}{s_2} 100$	
Basis/højde forhold	b/h	
hvor h er flyvehøjden c er kamerakonstanten s1 er billedlængde s2 er billedbrede b er basis (afstanden mellem t	o projektionscentre)	
a er afstanden mellem to flyve	linjer	(Kraus 2007, s. 133)
Anno an diluction of Colombatulation form	alan dan baalminan firmaa laadaa aning	

Appendiksfigur 3: Geometriske formler, der beskriver flyveplanlægning.

De forskellige parametre i flyveplanlægning justeres alt efter hvilken opgave, der skal løses. Dette skyldes at der opnås forskellige nøjagtigheder i planen og højden alt efter hvordan parametrene er indstillet, hvilket beskrives i det nedenstående.

Længde- og sideoverlappet fastholdes normalt til henholdsvis 60-80 og 20-30 procent, hvorved der opnås overlap stereomodellerne imellem.

Basis/højde forholdet har væsentlig betydning på højdenøjagtigheden og mindre betydning på plannøjagtigheden. Hvis forholdet er 1:1 opnås den bedste højdenøjagtighed og jo mindre forholdet bliver, jo dårligere bliver højdenøjagtigheden. Dette skyldes at der opnås en bedre skæring af strålerne når basis/højde forholdet er 1:1. Dette illustreres i Appendiksfigur 4, hvor tre stereomodeller med samme måleforhold og forskellige basis/højde forhold er illustreret. Med et super vid kamera opnås den mest optimale basis/højde forhold til højdebestemmelse, men med et super vid kamera vil terrængenstande såsom bygninger ofte ligge sig ned og dermed skabes der døde områder (områder der er skyldt bag bygninger, træer eller lignende).

(Lavridsen 1993, s. 39-44) (Kraus 2007, 3.7.1)





Der findes flere forskellige fingerregler og formler, når det kommer til bestemmelse af den forventede nøjagtighed i højden og planen. I dette projekt tages der udgangspunkt i to formler, der ses i Appendiksfigur 5, da der her er taget højde for basis/højde forholdet i beregningen af den forventede nøjagtighed i højden.

Forventet spredning i højden	$\sigma_Z = m_B \frac{h}{b} \sigma_B$	(Kraus 2007, 2.1.7)
Forventet spredning i planen	$\sigma_X = \sigma_Y = m_B \sigma_B$	(Kraus 2007, 2.1.7)
hvor m <sub>B</sub> er måleforholdet h er flyvehøjden b er basis σ <sub>B</sub> er spredningen for en mål	ing i billedet (1/3 af pixelstørrelser	n jf. Kraus (2007, s. 240))
Appendiksfigur 5: Beregning af for	ventet spredning i højden og plar	ien.

Det vil sige at planlægningen i sidste ende bestemmer hvilken nøjagtighed, der kan opnås i såvel planen og højden, samt hvilken fuldstændighed produktet har. Eller rettere sagt kundens forventede nøjagtighed og fuldstændighed til produktet bestemmer planlægningen.

# **B.2 Orientering**

Orienteringen af et billedpar kan opdeles i to, den indre og ydre orientering. Den indre orientering sker enkeltvis for hvert kamera, hvor billedkoordinatsystemet orienteres. Den indre orientering er nærmere beskrevet i afsnit 2.1.2.

Den ydre orientering af de optagede billeder indebærer kortfattet, at billederne orienteres i forhold til hinanden, hvorved der dannes en stereomodel (modelområde, se Appendiksfigur 2). Orienteringen indebærer derfor beregning af de seks ydre orienteringsparametre  $O(X_0, Y_0, Z_0)$  og  $D(\omega, \phi, \kappa)$  for hvert enkelt billede i modellen. Det forudsat at kameraerne er kalibreret på forhånd og den indre orientering derfor er kendt.

Beskrivelsen af orienteringen sker i to trin. Først beskrives det hvordan to billeder orienteres så der skabes en stereomodel, hvorefter principperne for orientering af flere billeder på engang (aerotriangulation) beskrives.

Orientering af to billeder i forhold til hinanden indebærer beregning af følgende ubekendte,  $(X_{01}, Y_{01}, Z_{01}, \omega_1, \varphi_1, \kappa_1, X_{02}, Y_{02}, Z_{02}, \omega_2, \varphi_2, \kappa_2)$  og kan beregnes efter to principper, samlet orientering eller to-trinsorinentering (relativ og absolut). Begge principper vil kortfattet blive beskrevet.

## **B.2.1 Samlet orientering**

Den samlede orientering af to billeder sker gennem en udjævning af stråleligningerne, se Formel 1 i Appendiks A. Stråleligningerne beskriver forholdet mellem billedkoordinater og objektkoordinater. Observationerne i udjævningen er målte billedkoordinater til paspunkterne og målte billedkoordinater til sammenknytningspunkterne, mens de ubekendte i en orienteringsproces er de ydre orienteringsparametre og objektkoordinater til sammenknytningspunkterne. Derudover kan en samlet orientering eller stråleudjævning anvendes til at kalibrere kameraer. Dette indebærer blot at f.eks. kamerakonstant, hovedpunkt og radial linsefortegning indgår som ubekendte i udjævningen. Yderligere kan stråleudjævningen anvendes til at orientere flere billeder på én. (Kraus 2007, 4.2.2)

### **B.2.2 To-trinsorientering**

To-trinsorienteringen er opdelt i en relativ og absolut orientering. Den relative orientering orienterer de to billeder i forhold til hinanden i et lokalt datum og skaber derved stereomodellen ved at fjerne y-parallakserne. Den absolutte orientering transformerer den relative orientering over i et objekt datum. I to-trinsorientering er der 12 ubekendte der skal estimeres.

### Relativ orientering

Den relative orientering estimerer 5 af 12 ubekendte, hvilket sker på baggrund af minimum fem sammenknytningspunkter, der opmåles i begge billeder. De fem parametre, der estimeres er ( $\omega_2$ ,  $\varphi_2$ ,  $\kappa_2$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ ), hvilket betyder at ( $x_1$ ,  $y_1$ ,  $z_1$ ,  $\omega_1$ ,  $\varphi_1$ ,  $\kappa_1$ ,  $\Delta x$ ) fastholdes. ( $x_1$ ,  $y_1$ ,  $z_1$ ,  $\omega_1$ ,  $\varphi_1$ ,  $\kappa_1$ ) sættes til nul mens ( $\Delta x$ ) sættes til en tilfældig værdi f.eks. 1. Herefter er nulpunktet, akseretningerne og skalaen i

det lokale datum defineret, se Appendiksfigur 6. De ubekendte estimeres efterfølgende ud fra viden om at strålerne fra de to billeder skal skære hinanden.



Appendiksfigur 6: Relativ orientering af et billedpar, hvor venstre billede fastholdes. Frit tegnet efter Luhmann et al. (2006).

### Absolut orientering

Den absolutte orientering estimerer de sidste 7 af de 12 ubekendte, hvilket sker på baggrund af minimum syv observationer i et defineret datum (f.eks. UTM Euref89) efter én af følgende kombinationer, to XY-paspunkter og tre Z-paspunkter eller to XYZ-paspunkter og ét Z-paspunkt. De observerede paspunkter opmåles i begge billeder, hvorefter parametrene for en 3D-transformation + én skalering ( $\Omega$ ,  $\varphi$ , K, X<sub>m</sub>, Y<sub>m</sub>, Z<sub>m</sub>, m) estimeres, og den relative model transformeres over i en absolut model. Forholdet mellem den relative model og den absolutte model ses i Appendiksfigur 7 og Appendiksfigur 8.

(Kraus 2007, 4.2.3)



Appendiksfigur 7: Absolut orientering. Frit tegnet efter Luhmann et al. (2006) og Kraus (2007).

$xyz \ til \ XYZ \qquad \qquad \begin{bmatrix} Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} + mR_{\Omega\phi K} \begin{bmatrix} y \\ Z \end{bmatrix} \qquad \qquad (Kraus \ 20)$	007, 4.2.3)
---	-------------

hvor X, Y og Z  $(\overline{X})$  er koordinater i den absolutte model

x, y og z  $(\bar{x})$  er koordinater i den relative model

 $X_{m\nu}$   $Y_{m\nu}$  og  $Z_m$   $(\overline{X}_m)$  er en translationsvektor fra xyz til XYZ  $R_{\Omega\Phi K}$  er en rotationsmatrix (se Formel 2 i Appendiks B) fra xyz til XYZ

m er en skalering af xyz til XYZ

Appendiksfigur 8: Forholdet mellem den relative model og den absolutte model.

## **B.2.3** Aerotriangulation

Aerotriangulation betyder at flere billeder orienteres sammen, på baggrund af et færre antal paspunkter end hvis hver stereomodel skulle orienteres for sig. XYZ-paspunkter placeres i kanten af det samlede modelområde og Z-paspunkter inde i modelområdet, mens sammenknytningspunkter placeres så de forskellige billeder sammenknyttes, se Appendiksfigur 9.



Appendiksfigur 9: Aerotriangulation af 3 x 4 billeder. Frit tegnet efter Luhmann et al. (2006).

Det vil sige at aerotriangulationen er tidsbesparende, da der ikke skal anvendes nær så mange paspunkter som hvis hver stereomodel orienteres for sig. (Kraus 2007, 5.1)

## **B.2.4 Fordeling af paspunkter**

Det er dog vigtigt at paspunkterne og sammenknytningspunkterne i en aerotriangulation er velfordelte og tilstrækkelige i antal til at opnå en tilfredsstillende orientering og senere nøjagtighed i det færdige produkt.

For et enkelt billedpar er den optimale situation, at der placeres et XYZ-paspunkt i hvert hjørne af modelområdet, da det er vist at nøjagtigheden falder hvis der foretages fotogrammetriske opmålinger uden for den polygon punkterne udspænder. Yderligere placeres et Z-paspunkt i midten af modellen, som kontrol for eventuelle deformationer i højden. Det er dog ikke altid muligt at placere paspunkterne i den optimale situation, hvorfor det som minimum skal sikres at det størst mulige areal i modellen er udspændt af paspunkterne. (Lavridsen 1993, s. 97-101)

# **B.3 Fremstilling af højdemodel**

Fremstillingen af en højdemodel sker på baggrund af opmåling af billedkoordinater (parallakser) i den orienterede stereomodel, hvorefter XYZ-koordinater beregnes på baggrund af udjævning af stråleligningerne, se Formel 1 i Appendiks A. Opmålingen af billedkoordinaterne og dermed fremstillingen af højdemodellen kan ske manuel, semi-automatisk eller automatisk, og i dette projekt vil fokus være den automatiske fremstilling. Den automatiske fremstilling af en højdemodel eller rettere sagt den automatiske opmåling af billedkoordinater (parallakser) sker vha. korrelation, hvis formål er at lokalisere det samme punkt i to billeder. Indledningsvist beskrives de grundlæggende principper for korrelation og efterfølgende beskrives det hvordan disse anvendes til fremstilling af en højdemodel.

## **B.3.1** Korrelation

Korrelation kan ske efter to forskellige principper, arealbaseret korrelation (ABK) og strukturbaseret korrelation (SBK). ABK sker i forhold til gråtoneværdier og er rasterbaseret, mens SBK sker i forhold til strukturer (punkter, linjer eller flader med tilknyttede attributter) og er vektorbaseret. I det nedenstående vil metoderne for henholdsvis ABK og SBK blive beskrevet og afslutningsvis hvordan de anvendes.

### Arealbaseret korrelation

ABK foretages på baggrund af korrelationsalgoritmerne, der beregner ligheden i gråtoneværdierne i de enkelte pixels og subpixels, og hvor ligheden er størst, opmåles billedkoordinaterne. Princippet illustreres i nedenstående eksempel, hvor der søges langs en linje.

Korrelationen i pixels sker på baggrund af en skabelon og et søgefelt, se Appendiksfigur 10, og korrelationskoefficienterne, der beskriver hvor ligheden er størst, beregnes efter formlen i Appendiksfigur 11. De beregnede korrelationskoefficienter ses ligeledes i Appendiksfigur 11, hvor det ses at den største lighed er ved x' lig 80  $\mu$ m.



Appendiksfigur 10: (Venstre) Skabelon og (Højre) søgefelt i et én dimensionalt mønster. Frit tegnet efter Kraus (2007, 6.8.1.1).

Korrelationskoefficient	$r = \frac{\sigma_{rs}}{\sigma_r \sigma_s} = \frac{\sum (g_r - \overline{g_r})(g_s - \overline{g_s})}{\sqrt{\sum (g_r - \overline{g_r})^2 \sum (g_s - \overline{g_s})^2}}$	(Kraus 2007, 6.8.1.1)
	$\sqrt{2}(9r \ 9r) \ 2(9s \ 9s)$	

hvor  $\overline{g_r}$  og  $\overline{g_s}$  middelværdien af de berørte gråtoneværdier

Beregnede korrelationskoefficienter

k	4-10	5-11	6-12
r	0,73	0,92	0,24
x′ (μm)	70	80	90

Appendiksfigur 11: Formel for og beregning af korrelationskoefficienter.

Billedkoordinatens placering er nu bestemt med én pixels nøjagtighed, men det ses at den rette placering er tættere på 70  $\mu$ m end 90  $\mu$ m, da forskellen i korrelationskoefficienterne mellem 70 og 80  $\mu$ m er mindre end mellem 80 og 90  $\mu$ m. Derfor foretages der en korrelation i subpixel.

Der findes forskellige former for subpixel-korrelationer og flere af dem bygger på udjævning efter mindste kvadraters metode, dog efter forskellige principper. I Appendiksfigur 12 er én af disse metoder beskrevet nærmere. Metoden tager udgangspunkt i at en andengradsligning estimeres ud fra x' og de beregnede korrelationskoefficienter r centreret omkring den pixel, hvor ligheden var størst efter første korrelation.

```
(Kraus 2007, 6.8)
```



### Strukturbaseret korrelation

SBK er baseret på kendte strukturer og kan foretages på vektorkort, billeder og andre elementer, der indeholder struktur. Første trin i SBK er at lokalisere disse strukturer. Lokaliseringen foretages enkeltvis for hvert billede. Strukturerne der vælges skal være lokalt individuelle (kontrast i forhold til baggrund) og globalt sjældne. Der vil i dette afsnit kun blive fokuseret på udvælges af punkter og ikke linjer og flader. Punkterne der udtrækkes benævnes interessepunkter

Udvælgelsen af interessepunkter sker efter forskellige opratorer, herunder f.eks. Moravec og Förstner. I dette afsnit vil principperne for Förstner operatoren kortfattet blive beskrevet.

Förstner metoden beregner kovariansmatricen for hældningen (af gråtoneværdierne) inden for et søgefelt (f.eks. 5 x 5 pixels), og på denne baggrund beregnes der konfidensellipser. Interessepunkterne udvælges efterfølgende på baggrund af formen og størrelsen af konfidensellipserne. Små cirkulære ellipser kendetegner veldefinerede punkter, aflange ellipser kendetegner punkter placeret på en kant, f.eks. tagryg, kantsten, vejstribe eller lignende, og store ellipser kendetegner utydelige og udefinerbare punkter. I udvælgelsen af interessepunkter fastsættes der grænser for hvor runde og små ellipserne skal være for at det enkelte punkt egner sig som interessepunkt. (Kraus 2007, 6.8.1.3) (Luhmann 2006, 5.5.2) (Pedersen & Wind 1999)

Udvælgelsen resulterer i en liste med interessepunkter. Attributter tilknyttet interessepunkterne kan være billedkoordinater, afstande til nabopunkter, gråtonegradienten til punktet osv.

Opgaven er nu at sammenknytte interessepunkterne i det venstre billede med de tilsvarende interessepunkter i højre billede, hvilket sker gennem korrelation. Der beregnes ikke korrelationskoefficienter mellem alle interessepunkter i venstre og højre billede, da dette ville være yderst tidskrævende. I stedet for søges der typisk efter det tilsvarende punkt langs en epipolarlinje eller gradvist gennem en billedpyramide.

#### Epipolarlinjer

Epipolarlinjerne i et billede dannes ud fra et punkt ( $P_1$ ) og billedets forsvindingspunkt ( $F_1$ ), hvor forsvindingspunktet er skæringen mellem basislinjen og billedets plan, se Appendiksfigur 13. For at epipolarlinjerne kan lokaliseres er det nødvendigt at den relative orientering som minimum er kendt. Herefter er det muligt at søge efter  $P_1$  (et vilkårligt punkt opmålt i det venstre billede) i det højre billede, ved at søge langs den tilsvarende epipolarlinje. Da der tidligere er udvalgt interessepunkter vil der nu blive foretaget en korrelation mellem  $P_1$  og de interessepunkter, der ligger på den tilsvarende epipolarlinje i højre billede. På baggrund af de beregnede korrelationskoefficienter og en fastsat grænse for minimum korrelationskoefficient, opmåles billedkoordinaten i det højre billede. Normalt vil der ikke kun blive søgt langs selve epipolarlinjen, men på begge side af denne. Hvor stort søgeområdet er på begge sider af epipolarlinjen afhænger af orienteringens nøjagtighed og nøjagtigheden af opmålingen i billedet.

(Kraus 2007, 6.8.5.1) (Luhmann 2006, 5.5.3)



Appendiksfigur 13: Sammenknytning af interessepunkter på baggrund af epipolarlinjer. Frit tegnet efter Kraus (2007, 6.8.5.1).

### Billedpyramide

En billedpyramide er en "grov til fin" resampling af et billede. En billedpyramide kan f.eks. består af fem lag, hvor opløsningen for hvert lag reduceres, se Appendiksfigur 14. Fordelen ved billedpyramiden er at interessepunkter f.eks. først lokaliseres og korreleres i det først lag, hvor datamængden her er lille på grund af resamplingen. Herefter kendes der en foreløbig placering af interessepunkterne og der er foretaget en foreløbig korrelation. Ved trinvis at foretage korrelation i de forskellige lag forfines billedet og dermed også korrelationen og placering af interessepunkterne. Fordelen ved billedpyramider er at beregningstiden reduceres, da der beregnes foreløbige placeringer og korrelationer i de resamplede lag, inden korrelationen til sidst foretages i subpixlen (Pedersen & Wind 1999).



Appendiksfigur 14: Billedpyramide.

## **B.3.2 Fremstilling af højdemodeller**

ABK og SBK kan begge anvendes til fremstilling af en højdemodel, men oftest anvendes der en blanding af de to metoder. F.eks. kan SBK anvendes til at lokalisere de områder i billederne der er bedst egnet til ABK.

Højdemodellen der generes er oftest en punktsky. Det vil sige at punkterne ligger tilfældigt i forhold til hinanden alt efter hvilke punkter der er blevet sammenknyttet og dermed opmålt, se Appendiksfigur 15. Punktskyen kan efterfølgende reduceres til et forudbestemt regulært grid (f.eks. 5 x 5 m), hvor højden på baggrund af punktskyen interpoleres. Derudover er der ligeledes mulighed for at genere terrænprofiler, højdekurver, TIN-modeller osv. alt efter hvad højdemodellen skal anvendes til.



Appendiksfigur 15: (Sort) Punktsky - (Rød) Regulær grid højdemodel.

## **B.4 Fremstilling af DTM**

Den fremstillede højdemodel fremstår nu i et regulært grid eller en punktsky, men i de to modeller findes der fejlmålinger (grove fejl), samtidig med at punkterne både er opmålt på terræn, bygninger, træer og lignende. Der skal derfor som sidste led i fremstillingen af en DTM, filtreres for grove fejl og punkter der ikke ligger på terræn.

De grove fejl kan fjernes visuelt eller automatisk. Visuelt kan de fjernes på baggrund af et forudgående kendskab til området eller hvis det tydeligt ses i højdemodellen at der er fejl, se Appendiksfigur 16. Automatisk kan de grove fejl fjernes ved at der generes en foreløbige flade og defineres en maksimal negativ og positiv afvigelse fra fladen, se Appendiksfigur 16.



Appendiksfigur 16: (Venstre) Profil af højdemodel, hvor det visuelt ses at der er tendenser til grove fejl (rød cirkel). (Højre) Illustration af princippet for automatisk fjernelse af grove fejl. Frit tegnet efter DTMaster (2008).

Punkter placeret på bygninger, træer eller lignende kan ligeledes fjernes visuelt eller automatisk. Visuelt fjernes punkterne ved at den generede højdemodel lægges ovenpå stereomodellen/billederne, hvorefter det er muligt at se hvilke punkter der f.eks. ligger på bygninger og hvilke der ligger på terrænet. Automatisk fjernes punkterne gennem filtreringsligninger, hvor forskellige parametre indsættes alt efter hvad der ønskes fjernet. Der findes flere forskellige filtreringsligninger alt efter hvilke objekter, der skal fjernes. Princippet for en filtrering kunne være, kontrol af hældningen mellem to punkter. Hvis hældning overstiger en fastsat grænse (f.eks. 30 grader) fjernes punktet og hældning til næste punkt kontrolleres. I Appendiksfigur 17 er princippet for illustreret.



gen overskrider den fastsatte maksimalgrænse.

Efter at uønskede punkter er fjernet fra højdemodellen, er der kun terrænpunkter tilbage og højdemodellen er nu en DTM. Men eftersom der er fjernet punkter, vil der være tomme områder. Disse områder kan efterfølgende udfyldes gennem interpolation af højden på baggrund af de tilbageblivende terrænpunkter, se Appendiksfigur 17.

# **B.5 Kvalitetskontrol**

Kvalitetskontrollen af den færdige DTM er et vigtigt element, da denne beskriver nøjagtigheden og dermed troværdigheden i det færdige produkt. Der kan overordnet foretages to forskellige kvalitetskontroller af en DTM, en kontrol af højde og en kontrol af planen.

## B.5.1 Kvalitetskontrol af højden

Kvalitetskontrollen af højden foretages i forhold til kendt kontrolmateriale, f.eks. eksisterende DTM med kendt nøjagtighed eller markmålte kontrolpunkter i et net eller som terrænprofil. Kontrollen foretages efterfølgende ved at der interpoleres en højde til kontrolpunkterne, hvorefter der beregnes differenser, spredninger og frasorteres eventuelle grove fejl, se Appendiksfigur 18.



hvor Δh<sub>i</sub> er differensen mellem kontrolpunktets højde og den interpolerede højde Appendiksfigur 18: Formler for beregning af Root Mean Square Error og Standardafvigelse.

RMS beskriver den absolutte nøjagtighed mellem den fremstillede DTM og kontrolpunkter, mens standardafvigelsen beskriver den relative nøjagtighed efter som der er foretaget en translation ( $\mu$ ) af DTM'en.  $\mu$  er udover at være en translation og et udtryk for eventuelle systematiske fejl i DTM'en.

Der vil fremstræde grove fejl og det er vigtigt at de fjernes. Definitionen på en grov fejl vil i den generelle landmålingsteori være alt over og under ±3 gange RMSE. Dette betyder, at statistisk set er 99,7 procent af alle målinger korrekte, hvis afvigelserne følger normalfordelingen, se Appendiksfigur 19. Hvis der lokaliseres en differens mellem den interpolerede højde og kontrolhøjden, der overstiger grovfejlsgrænsen fjernes denne og spredningen beregnes igen og der kontrolleres for grove fejl.



Appendiksfigur 19: Normalfordeling.

Differenserne er ofte ikke-normalfordelte, hvilket er yderligere beskrevet i Appendiks F.

### **B.5.2 Kvalitetskontrol af planen**

Kvalitetskontrollen af planen kan foretages ved at der på baggrund af punktskyen modelleres to tagrygge (på baggrund af fire modellerede tagflade), der efterfølgende skæres så der beregnes et skæringspunkt, se Appendiksfigur 20. Tilsvarende skæringspunkt er opmålt i marken og på denne baggrund beregnes der differenser og spredninger, se Appendiksfigur 21.



Appendiksfigur 20: Modellering af kontrolpunkter til kvalitetskontrol af planen.



*hvor*  $\Delta_i$  *er differensen mellem kontrolpunktet og det beregnede skæringspunkt* Appendiksfigur 21: Formler for beregning af Root Mean Square Error, Standardafvigelse og Middel.

De grove fejl i planen fjernes efter samme princip som ved højden, se afsnit B.5.2.

# **Appendiks C Parametre i ISDM**

Parametrene, der beskrives, opdeles i følgende kategorier, Projekt, Kamera, Paspunkter, Billeder og Modeller. Ikke alle parametre vil blive beskrevet og for yderligere information vedr. programmet henvises der til manualen ISDM (2008)

# C.1 Projekt

I projekt indstilles projektparametrene, hvilket er parametre der er generelle for projektet. Parametrene der skal indstilles ses i det nedenstående.

Parametre	Indstillingsmuligheder eller forklarende tekst (default eller anbefalet værdi)
Data type	Luftfotos, terrestrisk billeder og satellitbilleder
Koordinatsystem	Geografisk, projektion og geodætisk
Afstandsenhed	Meter, centimeter osv.
Vinkelenhed	Grader, gon og radian
Α priori σ <sub>0</sub>	Beskriver nøjagtigheden af en måling i billedet i μm (1/4 til 1/2 af pixelstørrelsen)
Flyvehøjde	Beskrives flyvehøjde over middel højde i afstandsenheden
Middel højde	Middel højde for model området i afstandsenheden
Maksimalt antal iteration	Beskriver det maksimal antal iterationer i udjævningen af den ydre orientering
	(default 10 iterationer)
Stopkriterium i udjævning	Beskriver stopkriteriet i udjævning af den ydre orientering for henholdsvis ændringer i projektionscentre og rotationer
	(default 0.001 i afstandsenhed og 0.0001 i vinkelenhed)
Acceptabel RO	Beskriver maks. spredning og Y-parallakse for en acceptabel RO i um
	(default 10 um for heage)
Acceptabel AO	Beskriver maks. spredning i μm og maks. RMS og residual i
	XYZ for den absolutte orientering
	(default maks. spredning 10 μm)
	(Maks. RMS sættes til en specificeret spredning og maks. resi-
	dual sættes til 3 x maks. RMS)

# C.2 Kamera

I kamera indstilles kameraparametrene, hvilket kortfattet indebærer den indre orientering. Parametrene der skal indstilles ses i det nedenstående og skal indstilles individuelt for hvert kamera i projektet.

Indstillingsmuligheder eller forklarende tekst (default eller anbefalet værdi)
Individuelt navn for hvert kamera
Analog eller digital
Indstilles jf. kalibreringsrapport i μm
Indstilles jf. kalibreringsrapport i mm
Indstilles jf. kalibreringsrapport i mm
Beskriver orienteringen af billedet pixelkoordinatsystem ift. Billedkoordinatsystemet
Indstilles jf. billedets specifikation
Linsefortegnelse
-------------------------
Linsefortegnelse format
Linsefortegnelse enhed
Linsefortegnelse metode

Alt efter hvilket format, enhed eller metode, der anvendes indtastes linsefortegnelsen jf. kameraets kalibreringsrapport

### **C.3** Paspunkter

I paspunkter indlæses paspunkterne og spredninger. Derudover kan det indstilles hvorvidt punktet skal være et kombineret plan og højdepaspunkt eller blot en af delene.

## C.4 Billeder

I billeder indlæses billederne og parametre vedrørende det enkelte billede. Parametre vedr. de enkelte billeder ses i det nedenstående.

Parametre	Indstillingsmuligheder eller forklarende tekst (default eller anbefalet værdi)								
Kamera	Indstilles til det kamera der har optaget billedet								
Kamera orientering	0, 90, 180 eller 270 grader rotation af kameraet								
Optagelsesforhold	Nadir eller skråfoto								
Projektionscentre	Koordinater og spredninger herfor								
	(default 0)								
Rotationer	Billedrotationer og spredninger								
	(default 0)								

## **C.5 Modeller**

I modeller sammenknyttes modellerne jf. en specificeret modelkonfiguration.

# **Appendiks D Parametre i ISAE**

Parametrene, der beskrives, opdeles i følgende kategorier, Projekt og modeller, Parametre vedr. højdeindsamling og Output. Ikke alle parametre vil blive beskrevet og for yderligere information vedr. programmet henvises der til manualen ISAE (2008).

## D.1 Projekt og modeller

I projekt og modeller indstilles i overordnede parametre vedr. højdefremstillingen, det vil sige input og output. Parametre der kan indstilles ses i det nedenstående.

Parametre	Indstillingsmuligheder eller forklarende tekst (default eller anbefalet værdi)	_
Automatisk generering af		
indsamlingspolygon	Til/fra	
Blokgenerering	Til/fra	

Indsamlingspolygonen er den polygon, der inden for hver enkel model definerer for hvilket område højdemodellen skal indsamles. Den automatiske generering heraf, har den fordel at der ikke skabes overlap to højdemodeller imellem fra to forskellige modeller, se Appendiksfigur 22.



Appendiksfigur 22: Automatisk generering af indsamlingspolygoner. (ISAE 2008, s. 20)

Blokgenerering kræver at der defineres en polygon (f.eks. på tværs af flere modeller), hvor inden for der skal fremstilles en højdemodel. Efter generes der automatiske indsamlingspolygoner for hver model, se Appendiksfigur 23.



Appendiksfigur 23: Blokgenerering og automatisk generering af indsamlingspolygoner. (ISAE 2008, s. 21)

## D.2 Parametre vedr. højdeindsamling

I parametre vedr. højdeindsamlingen, indstilles parametre, der har direkte betydning for selve højdeindsamlingen og dermed slutproduktet. I det nedenstående beskrives de forskellige parametre og indstillingsmulighederne.

Parametre	Indstillingsmuligheder eller forklarende tekst (default eller anbefalet værdi)
Terræntype og Matching	
Terræntype	Flat, Hily, Mountainous og User-defined. (Der er tilknyttet defaultværdier til terræntyperne flat, hily og mountainous for parallakse søgefelt og epipolar afstand.)
Parallakse søgefelt	Afhængig af terræntype og indstilles i antal pixels.
Epipolarafstand	Afhængig af terræntype og indstilles i antal pixels.
Selvjusterende parallakse	Til/fra
Selvjusterende matching	Til/fra
Overfladegenerering	
Grid X	Indstilles I meter
Grid Y	Indstilles I meter
Selvjusterende grid	Til/fra
Sigma	Teoretisk 3D nøjagtighed og beregnes på baggrund af pel, $m_B$ og base og flyvehøjde
Udqlatningsfilter	Low, Medium, High og User-defined.
	(Der er tilknyttet defaultværdier til udglatningsfilterne low, medium og high for udglatningsvægten.)
Udglatningsvægt	Afhængig af hvor udglattet terrænet ønskes
Indsamlingspolygon	
Polygon	Hele modellen eller indsamlingspolygon
Højdeindsamling	
Korrelation søgefelt	Indstilles i antal pixels (default 5)
Stopkriterium korrelationskoefficient	Indstilles efter behov (default 0,75)

#### Terræntype og Matching

Parallakse søgefeltet definerer bredden af det søgefelt, der søger efter matchende interessepunkter langs epipolarlinjerne og epipolarafstanden definerer hvor ofte der skal søges efter interessepunkter. F.eks. hvis epipolarafstanden indstilles til 3 pixels, søges der i hver 3. række.

Selvjusterende parallakse betyder at der automatisk beregnes værdier til parallkase søgefeltet. Værdien beregnes på baggrund af en estimation af den maksimale højdeforskel i den højdemodel, der er blevet generet på baggrund det tidligere billede i billedpyramiden.

Selvjusterende matching betyder at der foretages ekstra korrelation i dårlig matchede områder, hvilket sker på baggrund af en filtrering af billedet.

#### Overfladegenerering

Anbefalede værdier for Grid X og Y beregnes efter følgende formel,  $grid = 30 \times pel \times m_B$ .

Sigma beskriver den teoretiske nøjagtighed af en 3D opmåling, og anvendes som stopkriterium i genereringen af højdemodellen. Det vil sige at sættes Sigma højt vil dette betyde at der fremstilles en højdemodel med dårlig nøjagtighed. Sigma beregnes efter følgende formel,  $Sigma = pel \times m_B \times \frac{1}{b/h}$ .

#### Højdeindsamling

Korrelation søgefeltet definerer søgefeltet hvor inden for korrelationskoefficienten skal beregnes. Stopkriteriet for korrelationskoefficienten definerer hvilke korrelationer der accepteres som matchende.

## D.3 Output

I output, indstilles parametre vedr. outputtet. I det nedenstående beskrives de forskellige parametre og indstillingsmulighederne.

Parametre	Indstillingsmuligheder eller forklarende tekst (default eller anbefalet værdi)
Output filer	
DGN file	MicroStation file med Grid punkter
RAW file	ASCII file (X, Y, Z) med interessepunkter
QUE file	ASCII file (X, Y, Z, Flag, Profile, PktNr) med Grid punkter
TTN file	?
Kvalitetscheck	
Nøjagtighedsgrænse	Beskriver den interne nøjagtighed og markere de Grid punkter, der overstiger grænsen.
Min. redundans	Beskriver det minimum antal interessepunkter, der skal til for at interpolere et Grid punkt (default 4)
Output punkter	
Grid punkter	Til/fra
Grid punkter med lav redundans	Til/fra
Grid punkter der overstiger nøjagtig-	
hedsgrænsen	Til/fra

### Kvalitetscheck

Nøjagtighedsgrænsen beregnes efter som 1/10.000, 2/10.000 eller 3/10.000 af flyvehøjden afhængig af terræntype. 1/10.000 (falt), 2/10.000 (hily) og 3/10.000 (mountainous).

# **Appendiks E Filbetegnelser og -ekstension**

Der foretages igennem projektet diverse transformationer og interpolationer af de fremstillede højdemodeller. For at anskueliggøre hvilke højdedata de enkelte filer indeholder, er filbetegnelserne og -ekstensionerne i det nedenstående beskrevet.

Filbetegnelse	Beskrivelse
Rådata forbundet med ISAE og indledena	le filtrering af grove fejl
*.dgn	microStation Design fil
*.raw	ASCII fil med interessepunkter
* raw.xyz	ASCII fil roteret LOKAL $\rightarrow$ UTM32N
*_nongross_raw.xyz	ASCII fil filtreret for grove fejl
Data forbundet med DTMaster, herunder	r filtreringen og udfyldningen
*_1x1.xyz	binær DTM SCOOP MODEL fil konverteret til xyz. Punkter-
	ne i filen interpoleret i et <b>nyt (1x1 m)</b> grid på baggrund
	af én eller flere *_nongross_raw.xyz
*_1x1_FIL.xyz	filtreret terrænmodel
*_1x1_FIL_2x2_GAP5.xyz	Punkterne i filen interpoleret i et <b>nyt (2x2 m)</b> grid på bag-
	grund af én *_1x1_FIL.dtm og en GAP afstand 5 m
*_1x1_FIL_2x2_GAP5_2x2_GAP20.xyz	Punkterne i filen interpoleret i et <b>nyt (2x2 m)</b> grid på bag-
	grund af én *_1x1_FIL_2x2_GAP5.dtm og en GAP afstand
	5 m. DET FÆRDIGE PRODUKT
Data forbundet med den statistiske kontr	rol
*.xyzdz	Punkter fra terrænmodel eller kontrolpunkter interpoleret
	med en referenceflade (interpoleret højde minus eksiste-
	rende højde).
*.stat	Statistisk opsummering (RMSE, standardafvigelse, frakt-
	iler, NMAD osv.)
* henviser til betegnelserne eller en fork	ortelse af betegnelserne i Figur 5.8: Strategi for fremstilling

af DTM.

# Appendiks F Spredningsberegning

Beregningen af spredninger kan foretages efter forskellige principper og i dette appendiks vil to af principperne blive beskrevet. De to principper for spredningsberegninger er normalfordelt spredningsberegning og robust spredningsberegning. Kendetegnet ved de to metoder er at den normalfordelte anvendes ved normalfordelt observationer, mens den robuste anvendes ved ikke er normalfordelte observationer, da denne er mere robust overfor grove fejl, skævhed osv. I det nedenstående vil hvert af de to principper blive uddybet nærmere.

## F.1 Normalfordelt spredningsberegning

Den normalfordelte spredningsberegning anvendes hvis det antages at observationerne er normalfordelte og at der ikke er nogen grove fejl blandt observationerne. En metode til at sandsynliggøre at observationerne er normalfordelte er ved at plotte et histogram (plot af antal observationer ved en given observation) sammen med en gauss kurve, se Appendiksfigur 24. Hvis det histogrammet tilnærmelsesvis ligger inden for gauss kurven kan det med to sandsynlighed antages at observationerne er normalfordelte. Hvis det antages at observationerne er normalfordelte beregnes spredningerne efter formlerne i Appendiksfigur 25 og de grove fejl lokaliseres "normalt" vha. en grænseværdi der fastsættes til 3 x RMSE.

(Höhle & Höhle 2009)



Appendiksfigur 24: Normalfordeling (Blå) Histogram (Rød) Gauss kurve for normaltilfældet µ =  $0 \text{ og } \sigma^2 = 1.$ 

Annondiksfigur 25. Normalfordalt sprodningsborogning									
Middel (µ)	$\mu = \frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta h_i}{n}$								
Standardafvigelse	$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (\Delta h_i - \mu)^2}{n-1}}$								
Root Mean Square Error	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta h_i^2}{n}}$								

Appendiksfigur 25: Normalfordelt spredningsberegning.

## F.2 Robust spredningsberegning

Den robuste spredningsberegning anvendes hvis det f.eks. tydeligt fremgår af histogrammet at der er en skævhed eller markeret stigning i observationerne eller et stort antal grove fejl. En anden visuel metode til at afgøre hvorvidt observationerne er normalfordelte eller ej er gennem et QQ Plot. Et QQ Plot er en visuel metode til at sammenligne to sæt data, i dette tilfælde vores observationer med normalfordelte observationer, for derigennem at kunne afgøre hvorvidt vores observationer er



normalfordelte. Hvis observationerne er normalfordelte bør de følge en ret linje. I Appendiksfigur 26 ses et eksempel på ikke normalfordelte observationer, hvilket tydeligt ses i QQ Plottet.

Appendiksfigur 26: Histogram og QQ Plot af observationer.

Hvis det ud fra de to ovenstående visuelle metoder konstateres at observationerne ikke er normalfordelte beregnes spredningerne efter formlerne i Appendiksfigur 27.

$\begin{array}{c} \text{Median}\left(m_{\Delta h}\right) & Q_{\Delta h}(0,5) \end{array}$							
NMAD	$NMAD = 1,4826 \times median( \Delta h_i - m_{\Delta h} )$						
95,0 % fraktil	$Q_{ \Delta h }(0,95)$						
68,3 % fraktil	$Q_{ \Delta h }(0,683)$						

Den robuste spredningsberegning er, som det fremgår af Appendiksfigur 27, baseret på fraktiler af observationer og de absolutte observationer.

En fraktil af de absolutte observationer beskriver den maksimale absolutte observation for f.eks. 95 % af observationerne hvis der er tale om et 95 % fraktil, se Appendiksfigur 28. Det vil sige at et 95 % fraktil er robust over for optil 5 % grove fejl. Et 95 % fraktil er lig 1,96 x RMSE og et 68,3 % fraktil er lig RMSE hvis observationerne er normalfordelte og ikke indeholder nogen grove fejl.

Normalized Median Absolute Deviation (NMAD) er en anden robust spredningsberegning, hvor alle observationer først reduceres med 50 % fraktilen af observationer (median), hvilken kan anses for en forskydning af eventuelle systematiske fejl som det f.eks. er tilfældet med standardafvigelsen. Herefter beregnes medianen af de absolutte reducerede observationer og til sidst ganges medianen med et skaler der varierer alt efter fordeling. For normalfordelte observationer anvendes skaler lig 1,4826.

(Höhle & Höhle 2009)



## **Kildeliste**

Kilderne i kildelisten beskrives som følger, første linje – kildehenvisning, anden linje – forfatter (årstal) titel, tredje linje – ISBN, titel på fagblad eller internetadresse.

#### (Andersen 2008)

Andersen, Ib (2008) Den skinbarlige virkelighed – vidensproduktion inden for samfundsvidenskaberne ISBN: 978-87-593-1380-0

#### (ApplicationsMaster 2008)

Inpho (2008) ApplicationsMaster Reference Manual

#### (ArcGIS 2009A)

ArcGIS (2009) ArcGIS 9.2 Help – How TIN Slope (3D analyst) works Internet: <u>http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=How%20TIN%20Slope%20(3D%20Analyst)%</u> 20works

#### (ArcGIS 2009B)

ArcGIS (2009B) ArcGIS 9.2 Help – Density calculations Internet: http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?id=4743&pid=4742&topicname=Density\_calculations\_

#### (ASPRS Lidar Committee 2004)

ASPRS Lidar Committee (2004) ASPRS Guidelines – Vertical Accuracy Reporting for Lidar Data Internet: <u>http://www.asprs.org/society/committees/lidar/downloads/vertical\_accuracy\_reporting\_for\_lidar\_data.pdf</u>

#### (Cederholm 2008)

Cederholm, Peter (2008) Slides fra kursusgang 5 og 6 i Modellering på baggrund af koordinater Universitet: Aalborg Universitet – Undervisningsmateriale Landinspektøruddannelsens 8. Semester

#### (COWI 2006)

COWI (2006) COWI når nye højder... - DDH – Danmarks Digitale Højdemodel dokumenterer højderne i Danmark Internet: <u>www.cowi.dk/kort</u>

#### (COWI 2007)

COWI (2007) Danmarks byer fra nye vinkler – DDSby – Danmarks Digitale Skråfoto Internet: <u>www.cowi.dk/skraafoto</u>

#### (COWI 2009)

COWI (2009) Skråfoto – vejledning om datakvalitet Internet: <u>www.cowi.dk/skraafoto</u>

#### (Christensen, Hansen & Knudsen 2008)

Christensen, Kenneth Skouborg – Hansen, Lars Jacob Stentebjerg – Knudsen, Jens Ravn (2008) Airborne Laser Scanning – Kontrol af terrænmodeller

Universitet: Aalborg Universitet Landinspektøruddannelsens 10. Semester

#### (DTMaster 2008)

Inpho (2008) DTMaster Reference Manual

#### (Finsterwalder & Hofmann 1968)

Finsterwalder, Richard – Hofmann, Walther (1968) Photogrammetrie

#### (Garcia-Leon, Felicisimo & Martinez 2003)

Garcia-Leon, J. – Felicisimo, A.M. – Martinez, J.J. (2003) First experiments with convergent multi-images photogrammetry with automatic correlation applied to differentuak rectification of architectural facades

#### (GEOTEAM 2009)

GEOTEAM A/S (2009) GPSnet.dk Internet: <u>www.gpsnet.dk</u>

#### (Höhle 2008A)

Höhle, Joachim (2008) Photogrammetric Measurements in Oblique Aerial Images Fagblad: Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation

#### (Höhle 2008B)

Höhle, Joachim (2008) Updating of the Digital Elevation Model "DK-DEM/Terrain by means of photogrammetric methods.

Universitet: Aalborg Universitet, Danmark

#### (Höhle & Höhle 2009)

Höhle, Joachim - Höhle, Michael (2009) Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods.

Fagblad: ISPES Journal of Photogrammetry and Remote Sensing

### (ISDC 2008)

Intergraph (2008) ImageStation DTM Collection (ISDC) User's Guide

#### (ISDM 2008)

Intergraph (2008) ImageStation Digital Mensuration (ISDM) User's Guide

#### (ISAE 2008)

Intergraph (2008) ImageStation Automatic Elevations (ISAE) User's Guide

#### (Jacobsen 2008)

Jacobsen, K. (2008) Geometry of vertical and oblique image combinations Universitet: Leibniz University Hannover, Germany

#### (Johannessen et al. 2008)

Johannessen, Søren – Pedersen, Christian Øster – Poulsen, Lars Vestergaard – Riisager, Rasmus Rødgaard (2008) Stråleudjævning – kalibrering af skråfotos Universitet: Aalborg Universitet Landinspektøruddannelsens 8. Semester

#### (Karbo & Simmons 2007)

Karbo, Nils – Simmons, Greg (2007) Aerial Imagery from Different Angles Fagblad: Professional Surveyor Magazine - May 2007

#### (Knudsen 2008)

Knudsen, Peter (2008) Skråfotosystemer – kvalitet og forskelle Fagblad: Teknik og Miljø – Oktobernummer – side 38-39

#### (Krak 2009)

Krak (2009) Krak - Kort - Skråfoto Internet: www.krak.dk/kort

#### (Kraus 2007)

Kraus, Karl (2007) Photogrammetry – Geometry from Images and Laser Scans – 2<sup>nd</sup> edition ISBN: 978-3-11-019007-6

#### (Lavridsen 1993)

Lavridsen, Ole Brande (1993) Fotogrammetri ISBN: 87-89088-53-0

#### (Leica 2009)

Leica (2009) SmartNet – SpiderWEB Internet: http://smartnet.leica-geosystems.dk/Spiderweb/

#### (Li, Zhu & Gold 2004)

Li, Zhilin – Zhu, Qing – Gold, Christopher (2004) Digital Terrain Modeling – Principles and Methodology ISBN: 0-415-32462-9

#### (Luhmann et al. 2006)

Luhmann, Thomas – Robson, Stuart – Kyle, Stephen – Harley, Ian (2006) Close Range Photogrammetry – Principles, Methods and Applications ISBN: 0-470-10633-6

#### (Mass 1996)

Mass, Hans-Gerd (1996) Automatic DEM generation by multi-image feature based matching Fagblad: IAPRS Vol. 1, Part B3, pp. 484-489 (18<sup>th</sup> ISPRS Congress, Vienna, July 9-19, 1996)

#### (Overbye 2007)

Overbye, Pernille (2007) Måling i skråbilleder Universitet: Aalborg Universitet Landinspektøruddannelsens 8. Semester

#### (Patias & Tsioukas 1999)

Patias, Petros – Tsioukas, Vassilios (1999) Multi-image matching for architectural and archaeological othoimage production

#### (Pedersen & Skouenborg 2006)

Pedersen, Christian Øster – Skouenborg, Thomas (2006) Kortlægning og teknisk opmåling Universitet: Aalborg Universitet Landinspektøruddannelsens 5. Semester

#### (Pedersen & Wind 1999)

Pedersen, Bjarke Møller – Wind, Marianne (1999) Automatisk måling i digitale fotogrammetriske billeder Fagblad: Landinspektøren 2/1999

#### (Petrie 2008)

Petrie, Gordon (2008) Systematic Oblique Aerial Photography Using Multiple Digital Cameras Slideshow: VIII International Scientific & Technical Conference *"From Imagery to Map: Digital Photogrammetric Technologies"* September 15-18, 2008 – Porec, Croatia

#### (Petrie 2009)

Petrie, Gordon (2009) Systematic Oblique Aerial Photography Using Multiple Digital Frame Cameras Fagblad: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing – February 2009 – side 102-107

#### (Pictometry 2006)

Pictometry Int. (2006) European patent application - EP1696204A2

#### (Warner, Graham & Read 1996)

Warner, W.S. – Graham, R.W. – Read R.E. (1996) Small Format Aerial Photography ISBN: 1-870325-56-7

# Bilagsliste

Bilag I Kalibreringsrapport	. 119
Bilag II Planlagt paspunktsfordeling	. 122
Bilag III Kontrol af paspunktsopmåling	. 125
Bilag IV Paspunktsfordeling	126
Bilag V Kontrol af COWI-DTM	138
Bilag VI Spredningsberegninger	. 141
Bilag VII Indledende undersøgelser	. 147
Bilag VIII Fejlmeddelelse i ISAE	. 149

### DVD Mappestruktur

🖃 🚞 01 SCRIPTS	🖃 🚞 05 DGAP
🛅 00 DIVERSE KONVERTERINGSFILER	표 🛅 Input filer
🛅 01 BESKRIVELSE AF TERRÆN	🛅 Kalibreringsrapport
02 PASPUNKTSBEREGNINGER	🖃 🛅 06 HØJDEDATA
03 UTM2LOKAL	🖂 🚞 01 RAADATA
04 LOKAL2UTM	🛅 01 COWI
🛅 05 KONTROL AF TERRÆNMODELLER	🛅 02 DGAP
🛅 06 KONTROL AF COWI-DTM	🖃 🚞 02 DTMDATA
🖃 🚞 02 PASPUNKTER	🛅 01 COWI
🛅 01 RAA	🛅 02 DGAP
🛅 02 GROVE FEJL, SPREDNINGER OSV	🖃 🚞 03 STATDATA
03 PASPUNKTER	🛅 01 COWI
04 ROTEREDE PASPUNKTER	🛅 02 DGAP
C NORD	07 KONTROL AF COWI-DTM
🚞 SYD	🛅 08 KONTROL AF MÅLEFORHOLD OG BASISHØJDEFORHOLD
C VEST	🛅 09 KONTROL AF SAMLET TERRÆNMODEL (DGAP)
🛅 ØST	10 MANUALER
🖃 🚞 03 ISDM (ZI)	-
🛅 01 COWI	
🛅 02 DGAP	
🖃 🚞 04 ISEA (ZI)	
🛅 01 COWI	
🛅 02 DGAP	

Bilagsfigur 1: DVD Mappestruktur

## **Bilag I Kalibreringsrapport**

#### KAMNORD

#Focal Length (mm) FOCAL 51.606600

#Principal Point Offset xpoff ypoff in mm XPOFF 7.740000e-002 YPOFF -4.270000e-002

#Principal Point symmetry xsoff ysoff in mm XSOFF 7.740000e-002 YSOFF -4.270000e-002

#How many fiducial pairs (max 8): NUM\_FIDS 0

#Fiducials position
DATA\_STRIP\_SIDE left

#Fiducial x,y pairs in mm:
FID\_PAIRS

#Symmetrical Lens Distortion Odd-order Poly Coeffs:K0,K1,K2,K3 SYM DIST -2.053135e-007 -5.309663e-005 3.278813e-008 -2.538854e-011

#Decentering Lens Coeffs p1,p2,p3
DEC DIST 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000

#How many distortion pairs (max 20): NUM\_DIST\_PAIRS 15

#Distortion Data Units (m=radial dist im mm, d=field angle in deg): DIST\_UNITS m

#Distortion Data Pairs, if any (Radius in mm or deg, Distortion in Microns)
DIST\_PAIRS
 0.000000 0.000000
 1.500000 -0.180000

3.000000 -1.430000 4.500000 -4.780000 6.000000 -11.220000 7.500000 -21.660000 9.000000 -36.890000 10.500000 -57.640000 12.000000 -84.510000 13.500000 -118.010000 15.000000 -158.640000 16.500000 -206.880000 -263.250000 18.000000 19.500000 -328.480000 21.000000 -403.550000

#### KAMSYD

#Focal Length (mm)
FOCAL 51.713800

#Principal Point Offset xpoff ypoff in mm XPOFF 3.119000e-001 YPOFF -1.781000e-001

#Principal Point symmetry xsoff ysoff in mm XSOFF 3.119000e-001 YSOFF -1.781000e-001

#How many fiducial pairs (max 8): NUM\_FIDS 0

#Fiducials position
DATA\_STRIP\_SIDE left

#Fiducial x,y pairs in mm:
FID\_PAIRS

#Symmetrical Lens Distortion Odd-order Poly Coeffs:K0,K1,K2,K3 SYM DIST -8.334796e-007 -5.358652e-005 3.714332e-008 -2.952955e-011 #Decentering Lens Coeffs p1,p2,p3 DEC DIST 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 #How many distortion pairs (max 20): NUM DIST PAIRS 15 #Distortion Data Units (m=radial dist im mm, d=field angle in deg): DIST UNITS m #Distortion Data Pairs, if any (Radius in mm or deg, Distortion in Microns) DIST PAIRS 0.000000 0.000000 1.500000 -0.180000 3.000000 -1.440000 4.500000 -4.820000 6.000000 -11.300000 7.500000 -21.770000 9.000000 -37.020000 10.500000 -57.720000 -84.420000 12.000000 13.500000 -117.610000 15.000000 -157.710000 -205.140000 16.500000 18.000000 -260.420000 19.500000 -324.290000 21.000000 -397.770000 KAMVEST #Focal Length (mm) FOCAL 51.506900 #Principal Point Offset xpoff ypoff in mm XPOFF 2.147000e-001 YPOFF -1.395000e-001 #Principal Point symmetry xsoff ysoff in mm XSOFF 2.147000e-001 YSOFF -1.395000e-001 #How many fiducial pairs (max 8): NUM FIDS 0 #Fiducials position DATA STRIP SIDE left #Fiducial x, y pairs in mm: FID PAIRS #Symmetrical Lens Distortion Odd-order Poly Coeffs:K0,K1,K2,K3 SYM DIST -6.392014e-007 -5.109032e-005 1.096081e-008 1.344537e-011 #Decentering Lens Coeffs p1,p2,p3 DEC DIST 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 #How many distortion pairs (max 20): NUM DIST PAIRS 15 #Distortion Data Units (m=radial dist im mm, d=field angle in deg): DIST\_UNITS m #Distortion Data Pairs, if any (Radius in mm or deg, Distortion in Microns) DIST PAIRS 0.000000 0.000000 1.500000 -0.170000 3.000000 -1.380000 4.500000 -4.640000 6.000000 -10.950000 7.500000 -21.280000 9.000000 -36.540000 10.500000 -57.560000 12.000000 -85.080000 13.500000 -119.700000

15.000000 -161.820000 16.500000 -211.630000 18.000000 -269.030000 19.500000 -333.520000 21.000000 -404.180000

#### KAMOEST

```
#Focal Length (mm)
FOCAL 51.678600
```

#Principal Point Offset xpoff ypoff in mm XPOFF 2.055000e-001 YPOFF -6.810000e-002

#Principal Point symmetry xsoff ysoff in mm XSOFF 2.055000e-001 YSOFF -6.810000e-002

#How many fiducial pairs (max 8): NUM FIDS 0

#Fiducials position
DATA\_STRIP\_SIDE left

#Fiducial x,y pairs in mm: FID\_PAIRS

#Symmetrical Lens Distortion Odd-order Poly Coeffs:K0,K1,K2,K3 SYM\_DIST 4.950141e-007 -5.649989e-005 5.348775e-008 -5.727888e-011

#Decentering Lens Coeffs p1,p2,p3
DEC\_DIST 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000

#How many distortion pairs (max 20): NUM\_DIST\_PAIRS 15

#Distortion Data Units (m=radial dist im mm, d=field angle in deg): DIST\_UNITS m

#Distortion Data Pairs, if any (Radius in mm or deg, Distortion in Microns)
DIST\_PAIRS
0.000000 0.000000

-0.190000 1.500000 3.000000 -1.510000 4.500000 -5.050000 -11.800000 6.000000 7.500000 -22.640000 9.000000 -38.300000 10.500000 -59.380000 12.000000 -86.370000 13,500000 -119.700000 15.000000 -159.850000 16.500000 -207.450000 -263.500000 18.000000 19.500000 -329.530000 21.000000 -407.950000

# Bilag II Planlagt paspunktsfordeling

I nedenstående tabel ses den planlagte sammenhæng mellem paspunkt og model (1) indikerer at det er et paspunkt, og i Bilagsfigur 2 ses de planlagte paspunkters placering inden for projektområdet.

	M01N	M02N	MO3N	M04N	MN	M01S	MO2S	MO3S	M04S	SW	MO1E	MO2E	MO3E	M04E	ME	M01W	M02W	MO3W	M04W	MW
1001			1		1					0				0	0					0
1002					0		1			1					0					0
1003			1		1					0					0					0
1101					0					0			1	1	1					0
1102					0					0			1		1					0
1104					0					0					0					0
1105	1				0		1			0			1		1					0
1201	1		1		1		1			1		1			0					0
1203	1		-		1					0		1		1	2					0
1204					0		1			1					0					0
1301					0				1	1	1				1					0
1302					0	1			1	1	1				0					0
1501			1		1	-				0					0	1	1			2
1502					0					0					0					0
1503	1				0					0			1		0		4			0
1504	1		1	1	1					0		1	1		1		1			1
1506			1	-	0					0		-	1	1	2					0
1601					0					0					0	1				1
1602		1			1					0					0	1				1
1603		1		1	1			1		0					0					0
1605		-		-	0	1		-		1		1			1					0
1701					0					0					0		1			1
1702	1				1					0					0					0
1703	1	1			0				1	0			1		0		1			0
1704	1	1			2				1	0			1		0		1		1	1
1706	1	1			2					0					0				1	1
1707					0					0			1		1					0
1708		1			0					0					0		1			0
1709		1			1					0					0		1			1
1801			1	1	2					0		1			1	1				1
1802					0					0	1				1				1	1
1803					0					0	1				1					0
1901					0					0					0					0
1903			1		1					0					0					0
1904	1				1					0					0		1			1
2001					0		1			1					0					0
2101					0		1			0					0					0
2103					0					0					0					0
2104					0		1			1					0					0
2201					0	1				1					0					0
2202				1	0	1				1					0					0
2301			1	-	1					0					0					0
2302			1		1					0					0					0
2401					0					0				1	1			1		1
2402					0					0		1			0					0
2403					0			1	1	2		1			1					0
2405					0			1	1	2					0			1		1
2406					0					0					0					0
2407					0	1		1		2					0	1				1
2408					0	1		1		2	1				1	1				1
2410					0					0					0					0
2411				1	1					0		1			1			1		1
2412				1	1					0					0			1		1

	M01N	M02N	M03N	M04N	MN	M01S	M02S	M03S	M04S	MS	M01E	M02E	M03E	M04E	ME	M01W	MOZW	MO3W	M04W	MW
2501					0			1		1					0		1			1
2502					0					0					0					0
2503		1			1					0	1				1					0
2504					0					0					0				1	1
2505					0					0	1				1		1			1
2506					0			1		1					0					0
2507					0			1		1					0				1	1
2508		1			1					0	1				1					0
2509					0					0	1				1					0
2510					0					0					0				1	1
2601					0					0				1	1					0
2602					0					0					0	1				1
2603					0				1	1					0					0
2604					0				1	1					0					0
2605					0					0				1	1					0
2606				1	1					0					0					0
2607					0	1				1					0					0
2608					0					0					0					0
2609					0					0					0					0
2610					0					0					0			1		1
2701					0					0					0			1		1



Bilagsfigur 2: Paspunkternes placering inden for projektområdet i planlægningen. "Copyright © Kort & Matrikelstyrelsen".

## Bilag III Kontrol af paspunktsopmåling

Paspunktsopmålingen blev foretaget den 23. og 24. marts 2009 og der opstod kun mindre problemer, hvilke er beskrevet i det nedenstående. Rettelser i punktnumre er ikke beskrevet.

2607 – forkert punkt opmålt 2901 – erstatter 2607 (2607's rigtige placering)

2001 – dæksel fandtes ikke, hvorfor et nærliggende brønddæksel og nedløbsrist blev opmålt som 2001 og 2002

Bilagsfigur 3: Rettelser fra marken.

#### Vurdering af paspunktsopmåling

Paspunkterne er dobbeltopmålt og vurderes ud fra formlerne i Formel 6 i Appendiks A, hvor  $\Delta$  er afvigelsen til beregnet middelværdi. Vurderingen er foretaget i MatLab og det anvendte script findes på DVD 01.02, mens input- og outputfiler findes på DVD 02.02.

Der er i forbindelse med vurderingen af paspunktsopmålingen konstateret enkelte afvigelser, der overstiger grovfejlsgrænsen. Gennemløbene ses i det nedenstående

Gennemløb (1)		
Antal paspunkter:	88	
RMSE E N H	0,007 m 0,005 m 0,009 m	
	Pktnr Residualer E N og H	
Grove fejl	2002 0,073 m -0,017 m 0,018 m	
Gennemløb (2)		
Antal paspunkter:	87	
RMSE E N H	0,004 m 0,005 m 0,009 m	
	Pktnr Residualer E N og H	
Grove fejl	2203 0,025 m 0,008 m -0,037 m	
Gennemløb (3)		
Antal paspunkter:	86	
RMSE E N H	0,004 m 0,005 m 0,009 m	
Bilagsfigur 4: Kontrol af pas	punktsopmåling	

Efter tre gennemløb er der stadig konstateret afvigelser der overstiger grovfejlsgrænsen, men det vurderes, at fjernelsen af flere ikke vil forbedre RMSE væsentligt. Samtidig opflydes kravet på 1/3 af nøjagtigheden i det færdige produkt (3 til 4 cm). De to grove fejl er frasorteret og er ikke opmålt en tredje gang, da det vurderes at de ikke har afgørende betydning for den absolutte orientering.

# **Bilag IV Paspunktsfordeling**

I dette bilag illustreres paspunktsfordeling i de anvendte skråfotos. Først illustreres paspunkternes opmålte billedkoordinater og residualer og efterfølgende illustreres paspunkternes fordelingen indenfor de enkelte modelområder.

#### Billedkoordinater

Paspunkterne er vist med et blåt punkt mens residualerne er vist gennem en fejlvektor, der er faktor 1000 større. Fejlvektorerne er fremstillet på baggrund af COWI kalibreringen





127













### Objektkoordinater

Paspunkterne vises med et blåt punkt og det skal pointeres at billedpolygonerne har en begrænset nøjagtighed, hvorfor paspunkterne til tider ligger uden for billedet eller modelområdet.

Nord





≥↓





Øst



# **Bilag V Kontrol af COWI-DTM**

Kontrolterrænmodellen der skal anvendes som kontrol af de fremstillede terrænmodeller er produceret af COWI vha. LLS og leveret i et 2 x 2 m grid. Specifikationerne for DTM'en er at den har en højdenøjagtighed bedre end 10 cm for veldefinerede flader jf. COWI (2006). For at sikre at DTM'en holder den specificerede nøjagtighed foretages der en kontrol heraf.

Kontrollen foretages på baggrund af de opmålte paspunkter og en række yderligere opmålte kontrolpunkter. Kontrolpunkterne opmåles med GNSS Real Time Kinematic (RTK), da denne metode erfaringsmæssigt opfylder kravet om en nøjagtigheder under 1/3 af nøjagtigheden i modellen, der skal kontrolleres. RTK-tjenesten GPSnet.dk anvendes sammen en Trimble R8 GNSS modtager for paspunkter og en Leica GPS System 530 til kontrolpunkterne. Leicaen anvendes til kontrolpunkterne, da det er muligt at forlænge antennen og dermed opmåle i mindre skovområder. Trimble modtageren modtager signal fra både GPS og GLONASS satellitter, mens Leica kun modtager signal fra GPS satellitter..

Kontrollen vil blive foretaget for fire forskellige områdetyper og der vil for hver områdetype blive opmålt cirka 20 kontrolpunkter eller derover, hvilket er anbefalet af American Society of Photogrammetry and Remot Sensing jf. ASPRS Lidar Committee (2004).

- Åbne områder, hvor paspunkterne anvendes som kontrolpunkter.
- Bygninger, hvor der opmåles kontrolpunkter inden for en afstand af cirka 3 m fra bygningerne.
- Skov/træer, hvor der så vidt muligt opmåles kontrolpunkter på begge sider af en række træer og så tæt på træerne som det er muligt med GNSS.
- Skrående terræn, hvor fritliggende kontrolpunkter opmåles langs en skråning.

Kontrollen udføres vha. interpolation i et trekantsnet, hvilke sker i GeoCAD. Afvigelsen er den interpolerede højde – den eksisterende højde. Trekantsnettet anvendes, da denne funktion er tilgængelig i GeoCAD og da GeoCAD tidligere er anvendt på tidligere projekter, hvorfor der er erfaringer hermed. Efterfølgende beregnes spredninger efter formlerne i Appendiksfigur 18 afsnit B.5.1 i MatLab og det anvendte script findes på DVD 01.06, mens input- og outputfiler findes på DVD 07.

Resultatet af kontrollen ses i det nedenstående for henholdsvis de fire områdetyper og en samlet kontrol. I Bilagsfigur 11 er de anvendte kontrolpunkter illustreret med hensyn til placering og afvigelse.

# interpoleret punkter	184		
RMSE	0,08 m	NMAD	0,06 m
Standardafvigelse	0,07 m	Median	0,05 m
Middel differens	0,05 m	68,3 % fraktil	0,08 m
Maks. differens	0,27 m	95,0 % fraktil	0,17 m
Min. differens	-0,14 m		
3ilagsfigur 5: Kontrol af alle	kontrolpunkter.		
# interpoleret punkter	81		
RMSE	0,07 m	NMAD	0,05 m
Standardafvigelse	0,05 m	Median	0,05 m
Middel differens	0,05 m	68,3 % fraktil	0,08 m
Maks. differens	0,15 m	95,0 % fraktil	0,12 m

Bilagsfigur 6: Kontrol af åbne områder.

# interpoleret punkter	27		
RMSE	0,06 m	NMAD	0,04 m
Standardafvigelse	0,04 m	Median	0,04 m
Middel differens	0,04 m	68,3 % fraktil	0,05 m
Maks. differens	0,15 m	95,0 % fraktil	0,14 m
Min. differens	-0,02 m		
Bilagsfigur 7: Kontrol nær by	/gninger		
# interpoleret punkter	45		
RMSE	0,13 m	NMAD	0,10 m
Standardafvigelse	0,09 m	Median	0,09 m
Middel differens	0,09 m	68,3 % fraktil	0,15 m
Maks. differens	0,27 m	95,0 % fraktil	0,23 m
Min. differens	-0,07 m		
Bilagsfigur 8: Kontrol af skov	ı/træer.		
# interpoleret punkter	16		
RMSE	0,06 m	NMAD	0,06 m
Standardafvigelse	0,07 m	Median	0,00 m
Middel differens	0,00 m	68,3 % fraktil	0,07 m
Maks. differens	0,13 m	95,0 % fraktil	0,13 m
Min. differens	-0,14 m	-	

Bilagsfigur 9: Kontrol af skrående terræn.

På baggrund af kontrollen kan det konstateres at specifikationerne for kontrolterrænmodellen overordnet holder, eftersom RMSE for den samlede kontrol ligger indenfor de specificerede 10 cm, jf. Bilagsfigur 5. Det skal dog bemærkes at nøjagtigheden i mindre skov områder overstiger den specificerede nøjagtighed.



Bilagsfigur 10: Signaturforklaring til Bilagsfigur 11.



Bilagsfigur 11: Plot af kontrolpunkter og deres afvigelse fra COWI DTM. "DDO © COWI".

# Bilag VI Spredningsberegninger

### COWI kalibrering

	Samlet	Nord	Syd	Vest	Øst
# interpoleret punkter	18970	27060	26194	18538	22112
Grove fejl antal/procent	497/2,	1005/3,7	791/3,0	926/5,0	676/3,1
Normalfordelt					
RMSE	0,42 m	0,45 m	0,38 m	0,99 m	0,50 m
Standardafvigelse	0,37 m	0,43 m	0,36 m	0,99 m	0,46 m
Middel differens	0,20 m	0,13 m	0,12 m	0,08 m	0,20 m
Maks. differens	5,70 m	3,20 m	3,41 m	3,59 m	7,43 m
Min. differens	-3,67 m	-4,25 m	-2,45 m	-9,51 m	-8,71 m
Normalfordelt efter de grove fejl er fjernet					
RMSE	0,35 m	0,34 m	0,31 m	0,47 m	0,37 m
Standardafvigelse	0,31 m	0,32 m	0,29 m	0,43 m	0,32 m
Middel differens	0,17 m	0,12 m	0,10 m	0,19 m	0,18 m
Robust					
NMAD	0,29 m	0,29 m	0,25 m	0,39 m	0,29 m
Median	0,15 m	0,11 m	0,10 m	0,19 m	0,16 m
68,3 % fraktil	0,34 m	0,33 m	0,29 m	0,48 m	0,34 m
95,0 % fraktil	0,87 m	0,90 m	0,78 m	1,41 m	0,93 m

Bilagsfigur 12: Normalfordelte og robuste spredninger for filtrede terrænmodeller (COWI).

	Samlet	Nord	Svd	Vest	Øst
# interpoleret punkter	38737	52880	46922	41415	43962
Grove fejl antal/procent	1353/3,5	1716/3,1	2075/4,2	4874/10,5	2097/4,8
Normalfordelt					
RMSE	0,58 m	0,60 m	0,62 m	1,54 m	0,79 m
Standardafvigelse	0,52 m	0,58 m	0,60 m	1,54 m	0,77 m
Middel differens	0,25 m	0,12 m	0,15 m	0,02 m	0,19 m
Maks. differens	3,78 m	5,19 m	7,71 m	12,66 m	7,43 m
Min. differens	-3,51 m	-4,17 m	-2,45 m	-9,50 m	-8,60 m
Normalfordelt efter de					
grove fejl er fjernet					
RMSE	0,45 m	0,48 m	0,45 m	0,62 m	0,51 m
Standardafvigelse	0,40 m	0,47 m	0,44 m	0,61 m	0,48 m
Middel differens	0,21 m	0, 12 m	0,09 m	0,10 m	0,17 m
Robust					
NMAD	0,36 m	0,40 m	0,37 m	0,60 m	0,41 m
Median	0,21 m	0,12 m	0,11 m	0,13 m	0,17 m
68,3 % fraktil	0,44 m	0,45 m	0,42 m	0,69 m	0,49 m
95,0 % fraktil	1,17 m	1,26 m	1,28 m	3,50 m	1,50 m

Bilagsfigur 13: Normalfordelte og robuste spredninger for terrænmodeller (COWI).



Bilagsfigur 14: (Venstre) Plot af filtreret terrænmodel samlet. (Højre) Differenskort for terrænmodel samlet. Differenser er i meter og RMSE er efter de grove fejl er fjernet, se Bilagsfigur 13. "DDO © COWI".



Bilagsfigur 15: (Venstre) Plot af filtreret terrænmodel nord. (Højre) Differenskort for terrænmodel nord. Signaturforklaring se Bilagsfigur 14. "DDO © COWI".


Bilagsfigur 16: (Venstre) Plot af filtreret terrænmodel syd. (Højre) Differenskort for terrænmodel syd. Signaturforklaring se Bilagsfigur 14. "DDO © COWI".



Bilagsfigur 17: (Venstre) Plot af filtreret terrænmodel vest. (Højre) Differenskort for terrænmodel vest. Signaturforklaring se Bilagsfigur 14. "DDO © COWI".



Bilagsfigur 18: (Venstre) Plot af filtreret terrænmodel øst. (Højre) Differenskort for terrænmodel øst. Signaturforklaring se Bilagsfigur 14. "DDO © COWI".

### DGAP kalibrering

	Samlet	Nord	Syd	Vest	Øst
# interpoleret punkter	18362	28087	25206	22931	26610
Grove fejl antal/procent	403/2,2	1034/3,7	558/2,2	1089/4,7	967/3, 6
Normalfordelt					
RMSE	0,41 m	0,47 m	0,45 m	0,83 m	0,51 m
Standardafvigelse	0,37 m	0,45 m	0,42 m	0,83 m	0,48 m
Middel differens	0,18 m	0,13 m	0,14 m	0,03 m	0,18 m
Maks. differens	3,90 m	7,04 m	3,98 m	9,24 m	10,05 m
Min. differens	-1,10 m	4,34 m	3,84 m	6,98 m	-3,63 m
Normalfordelt efter de					
grove fejl er fjernet					
RMSE	0,35 m	0,34 m	0,37 m	0,43 m	0,38 m
Standardafvigelse	0,32 m	0,32 m	0,35 m	0,42 m	0,35 m
Middel differens	0,15 m	0,11 m	0,12 m	0,11 m	0,14 m
Robust					
NMAD	0,29 m	0,30 m	0,30 m	0,39 m	0,33 m
Median	0,14 m	0,11 m	0,14 m	0,10 m	0,11 m
68,3 % fraktil	0,34 m	0,33 m	0,36 m	0,43 m	0,36 m
95,0 % fraktil	0,85 m	0,91 m	0,89 m	1,25 m	1,02 m

Bilagsfigur 19: Normalfordelte og robuste spredninger for filtrede terrænmodeller (DGAP).

	Samlet	Nord	Syd	Vest	Øst
# interpoleret punkter	38726	55075	49032	57503	55698
Grove fejl antal/procent	1090/2,8	2253/4,1	2196/4,5	5086/8,8	2350/4,1
Normalfordelt					
RMSE	0,55 m	0,70 m	0,68 m	1,23 m	0,72 m
Standardafvigelse	0,48 m	0,69 m	0,66 m	1,22 m	0,69 m
Middel differens	0,26 m	0,14 m	0,19 m	0,11 m	0,20 m
Maks. differens	3,79 m	6,65 m	7,36 m	8,92 m	9,09 m
Min. differens	-1,55 m	-4,79 m	-3,73 m	-6,91 m	-3,63 m
Normalfordelt efter de					
grove fejl er fjernet					
RMSE	0,45 m	0,50 m	0,49 m	0,59 m	0,51 m
Standardafvigelse	0,40 m	0,49 m	0,47 m	0,59 m	0,49 m
Middel differens	0,22 m	0,12 m	0,13 m	0,05 m	0,14 m
Robust					
NMAD	0,36 m	0,42 m	0,42 m	0,56 m	0,43 m
Median	0,21 m	0,12 m	0,15 m	0,09 m	0, 15 m
68,3 % fraktil	0,44 m	0,49 m	0,48 m	0,62 m	0,49 m
95,0 % fraktil	1,10 m	1,39 m	1,40 m	2,84 m	1,40 m

Bilagsfigur 20: Normalfordelte og robuste spredninger for terrænmodeller efter (DGAP).



Bilagsfigur 21: (Venstre) Plot af filtreret terrænmodel samlet. (Højre) Differenskort for terrænmodel samlet. Differenser er i meter og RMSE er efter de grove fejl er fjernet, se Bilagsfigur 20. "DDO © COWI".



Bilagsfigur 22: (Venstre) Plot af filtreret terrænmodel nord. (Højre) Differenskort for terrænmodel nord. Signaturforklaring se Bilagsfigur 21. "DDO © COWI".



Bilagsfigur 23: (Venstre) Plot af filtreret terrænmodel syd. (Højre) Differenskort for terrænmodel syd. Signaturforklaring se Bilagsfigur 21. "DDO © COWI".



Bilagsfigur 24: (Venstre) Plot af filtreret terrænmodel vest. (Højre) Differenskort for terrænmodel vest. Signaturforklaring se Bilagsfigur 21. "DDO © COWI".



Bilagsfigur 25: (Venstre) Plot af filtreret terrænmodel øst. (Højre) Differenskort for terrænmodel øst. Signaturforklaring se Bilagsfigur 21. "DDO © COWI".

## Bilag VII Indledende undersøgelser

I den indledende del af projektet blev der foretaget en række undersøgelser, der skulle sikre at eventuelle problemer med softwaren eller lignede blev opdaget tidligt. I det nedenstående beskrives de indledende undersøgelser kortfattet sammen resultatet af de problemer, der opstod.

Tidligt i forløbet blev det besluttet at eksisterende software skulle anvendes i forbindelse med projektet. Det vil sige til orienteringen af skråfotos, stereopar, fremstilling af højdemodeller osv.

Programpakken, der anvendes er ZI ImageStation, herunder ImageStation Digital Mensuration (ISDM), ImageStation DTM Collection (ISDC) og ImageStation Automatic Elevations (ISAE).

De indledende tests bestod i at orientere to skråfotos i forhold til hinanden hvorved en stereomodel blev dannet og efterfølgende automatisk fremstille en højdemodel. Stereomodellen blev dannet gennem sideoverlap jf. vurderingen i afsnit 2.6 *Opsamling af den initierende problemstilling*, se Bilagsfigur 26.



Bilagsfigur 26: Stereomodel mellem to skråfotos

#### Orientering

Orienteringen forløb planmæssig og tilfredsstillende, da det er muligt at se stereo. Den relative orientering var tilfredsstillende, mens den absolutte burde være bedre. Årsagen hertil kan have været at der ingen indre orientering var tilknyttet, samtidig med at paspunkterne ikke var velfordelt.

#### Fremstilling af højdemodel

Det blev tidligt konstateret at der var problemer med den automatiske fremstilling af højdemodellen eftersom programmet ISAE ikke ville vise modellen. Der kom ingen fejlmeddelelse og forskellige indstillinger blev afprøvet og ingen af dem gav et resultat. Problemet blev forsøgt løst sammen med vejleder Joachim Höhle og underviser Marteka Potuckova, hvilket heller ikke gav nogen positive resultater. Derfor blev ZI kontakte via mail, hvori situationen blev forklaret.

#### Mail

"Jeg arbejder med skråfotos i ZI, og ønsker automatisk at generere en digital terrænmodel på denne baggrund. I denne forbindelse har jeg oplevet problemer med softwaren. Nedenstående forklar input og hvor det går gal.

Der er udarbejdet en stereo model i ISDM, relativ (sigma 1.1700 um) – absolut (RMSx 0.690, RMSy 1.285, RMSz 0.095) Den absolutte orientering afspejler at der er tale om skråfotos i rotationerne. (Omega: 2.672 grads, Phi: -54.076 grads, Kappa: -94.958 grads) Efterfølgende fremstiller jeg en collection boundary i ISDC som gemmes i tilknyttet design file. Stereomodellen vises fint i ISDC.

Problemet opstår efterfølgende, når jeg ønsker at foretage genereringen automatisk og derfor går ind ISAE. Problemet er at den stereomodel som jeg ønsker at anvende ikke vises under "Available Models" eller retter sagt, der vises ingenting under "Available Models". Alt op til dette punkt fungerer fint."

#### Svarmail

"ISAE doesn't support oblique models. One might be able to trick it into working if one sets the camera angle from oblique back to nadir, but the results aren't likely to be very good. Also, if the

project is set to Close Range ISSD requires that the images be epipolar resampled. Therefore ISAE might require the same thing, but again, we purposely don't support it. There might be something built into the code that looks at the EO angles and it may simply refuse to even try."

Da problemet formentlig lå i den store hældning af billedet  $\tau$  blev det forsøgt at udligne  $\tau$  ved at transformere terrænet (paspunkterne), se Bilagsfigur 27. Transformationen betyder at vi går fra et skråfoto af et fladt terræn til et nadirbillede af meget skråt terræn (45 grader).



Bilagsfigur 27 Transformation fra skråfoto til nadirbillede

Transformationen betyder at programmet ISAE, nu gerne vil læse modellen, da  $\varphi$  nu er tættere på nul.

Det vil sige at det nu er muligt at orientere skråfotos og på denne baggrund fremstille en højdemodel.

# Bilag VIII Fejlmeddelelse i ISAE

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
c:\>set MATCH_I_BATCH=yes
c:\>start /b /wait /HIGH "ISAE" "C:\Data\COPE05\ZI\SEast_COWI_Hovedpunkt_Onvendt \isdc\isae\M04E\aec_cmds.bat"
c:\>set path=C:\Program Files\Common Files\Intergraph\CoordSystems\Program;C:\Pr ogram Files\ISAE\\bin;C:\Program Files\Common Files\ZI Imaging;C:\Program Files\ Common Files\Intergraph;C:\WINDOWS\system32;C:\WINDOWS;C:\WINDOWS\System32\Wben; C:\Program Files\Common Files\Roxio Shared\DLLShared\;C:\Program Files\Common Fi les\Roxio Shared\10.0\DLLShared\;c:\Program Files\Microsoft SQL Server\90\Tools\ binn\;C:\PROGRA~1\COMMON~1\ZIIMAG~1;C:\PROGRA~1\COMMON~1\INTERG~1;C:\Program Files\Commo es\ZICS0\bin;C:\PROGRA~1\ZIGrid\bin;C:\PROGRA~1\ISAE\bin;C:\Program Files\Commo n Files\Roxio Shared\DLLShared;C:\PROGRA~1\ISAE\bin\
c:\>"C:\PROGRA~1\ISAE\bin\aec.exe" "C:\Data\COPE05\ZI\SEast_COWI_Hovedpunkt_Onve ndt\isdc\aec_cntl\M04E.cnt" -pathwy_nr 1 -prj "C:\Data\COPE05\ZI\SEast_COWI_Hove dpunkt_Onvendt\" -mdl M04E -tmplistfn "C:\DOCUME~1\cope05\LOCALS~1\Temp\s33k.2 c" -show_status -color g Error updating right image buffer Error reading image Unexpected error in Image_ReadThread Error reading image
c:\>"C:\PROGRA~1\ISAE\bin\GetRawDIM.exe" "C:\Data\COPEØ5\ZI\SEast_COWI_Hovedpunk t_Onvendt\isdc\isae\M04E\RAWDIM" "C:\Data\COPEØ5\ZI\SEast_COWI_Hovedpunkt_Omvend t\isdc\isae\M04E\02E0_1.ras" "C:\Data\COPEØ5\ZI\SEast_COWI_Hovedpunkt_Omvendt\is dc\raw\M04E_1.raw" Could not open ras file. Aborting.
c:\>C:\PROGRA~1\Bentley\Program\MICROS~1\ustation.exe -wunt2isdc -i-p C:\Data\CO PE05\ZI\SEASI_~2\isdc\aec_cnt1\M04Ea.par C:\Data\COPE05\ZI\SEASI_~2\M04E.dgn
c:\>del "C:\DOCUME~1\cope05\LOCALS~1\Temp\s33k.2b"
c:\>start /b /wait /HIGH "ISAE" "C:\Data\COPE05\ZI\SEast_COWI_Hovedpunkt_Onvendt \isdc\isae\M03E\aec_cmds.bat"
c:\>set path=C:\Program Files\Common Files\Intergraph\CoordSystems\Program;C:\Pr ogram Files\ISAE\\bin;C:\Program Files\Common Files\ZI Imaging;C:\Program Files\ Common Files\Intergraph;C:\WINDOWS\system32;C:\WINDOWS\System32\Wben; C:\Program Files\Common Files\Roxio Shared\DLLShared\;C:\Program Files\Common Fi les\Roxio Shared\10.0\DLLShared\;c:\Program Files\Microsoft SQL Server\90\Tools\ binn\;C:\PROGRA~1\COMMON~1\ZIIMGC~1;C:\PROGRA~1\COMMON~1\INTERG~1;C:\Program Fil es\ZICSO\bin;C:\PROGRA~1\ZIGrid\bin;C:\PROGRA~1\IRASC\bin;C:\Program Files\Commo n Files\Roxio Shared\DLLShared;C:\PROGRA~1\ISAE\bin\
c:\>"C:\PROGRA~1\ISAE\bin\aec.exe" "C:\Data\COPE05\ZI\SEast_COWI_Hovedpunkt_Omve ndt\isdc\aec_cntl\M93E.cnt" -pathwy_nr 1 -prj "C:\Data\COPE05\ZI\SEast_COWI_Hove dpunkt_Omvendt\\" -mdl M03E -tmplistfn "C:\DOCUME~1\cope05\LOCALS~1\Temp\s33k.2 e" -show_status -color g
c:\>"C:\Program_Files\ISAE\bin\mtstat.exe"_"C:\Data\COPE05\ZI\SEast_COWI_Hovedpu nkt_Omvendt\isdc\isae\M03E" -prj_"C:\Data\COPE05\ZI\SEast_COWI_Hovedpunkt_Omvend t\"
C:\PROGRA~1\ISAE\bin\aec.exe : Elapsed Time = 0 hour 0 min. 41 sec.
Program C:\PROGRA~1\ISAE\bin\aec.exe finished
c:\>"C:\PROGRA~1\ISAE\bin\GetRayDTM.exe" "C:\Data\COPE05\ZI\SEast_COWI_Hovedpunk t_Omvendt\isdc\isae\M03E\RAWDTM" "C:\Data\COPE05\ZI\SEast_COWI_Hovedpunkt_Omvend t\isdc\isae\M03E\02Eo_1.ras" "C:\Data\COPE05\ZI\SEast_COWI_Hovedpunkt_Omvendt\is dc\raw\M03E_1.rav"
c:\>C:\PROGRA~1\Bentley\Program\MICROS~1\ustation.exe -wumt2isdc -i-p C:\Data\CO PE05\ZI\SEASI_~2\isdc\aec_cntl\M03Ea.par C:\Data\COPE05\ZI\SEASI_~2\M03E.dgn
c:\>del "C:\DOCUME~1\cope05\LOCALS~1\Temp\s33k.2d"

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe	. 🗆 🗙
c:\>C:\PROGRA~1\Bentley\Program\MICROS~1\ustation.exe -wumt2isdc -i-p C:\Data PE05\ZI\SWEST_~2\isdc\aec_cntl\M04Wa.par C:\Data\COPE05\ZI\SWEST_~2\M04W.dgn	<u>∖co</u>
c:\>del "C:\DOCUME~1\cope05\LOCALS~1\Temp\s33k.5"	
c:\>start /b /wait /HIGH "ISAE" "C:\Data\COPE05\ZI\SWest_COWI_Hovedpunkt_Omve \isdc\isae\M03W\aec_cmds.bat"	ndt
c:\>set path=C:\Program Files\Common Files\Intergraph\CoordSystems\Program;C: ogram Files\ISAE\\bin;C:\Program Files\Common Files\ZI Imaging;C:\Program Fil Common Files\Intergraph;C:\UINDOWS\system32;C:\UINDOWS;C:\UINDOWS\System32\Wb C:\Program Files\Common Files\Roxio Shared\DLLShared\;C:\Program Files\Common les\Roxio Shared\10.0\DLLShared\;c:\Program Files\Microsoft SQL Server\90\Too binn\;C:\PROGRA~1\COMMON~1\ZIIMAG~1;C:\PROGRA~1\COMMON~1\INTERG~1;C:\Program es\ZICSO\bin;C:\PROGRA~1\ZIGrid\bin;C:\PROGRA~1\ISAE\bin\	\Pr es\ em; Fi ls\ Fil mmo
c:\>"C:\PROGRA~1\ISAE\bin\aec.exe" "C:\Data\COPE05\ZI\SWest_COWI_Hovedpunkt_0 ndt\isdc\aec_cntl\M03W.cnt" -pathwy_nr 1 -prj "C:\Data\COPE05\ZI\SWest_COWI_H dpunkt_Onvendt\\" -mdl M03W -tmplistfn "C:\DOCUME~1\cope05\LOCALS~1\Iemp\s33 " -show_status -color g Error updating left image buffer Error reading image Unexpected error in Image_ReadThread Error reading image	mve ove k.8
c:\>"C:\PROGRA~1\ISAE\bin\GetRawDTM.exe" "C:\Data\COPEØ5\ZI\SWest_COWI_Hovedp t_Omvendt\isdc\isae\M03W\RAWDTM" "C:\Data\COPEØ5\ZI\SWest_COWI_Hovedpunkt_Omv t\isdc\isae\M03W\01Wo_1.ras" "C:\Data\COPEØ5\ZI\SWest_COWI_Hovedpunkt_Omvendt dc\raw\M03W_1.raw" Could not open ras file. Aborting.	unk end \is
c:\>C:\PROGRA~1\Bentley\Program\MICROS~1\ustation.exe -wumt2isdc -i-p C:\Data PEØ5\ZI\SWEST_~2\isdc\aec_cntl\M03Wa.par C:\Data\COPEØ5\ZI\SWEST_~2\M03W.dgn	<b>∖C0</b>
c:\>del "C:\DOCUME~1\cope05\LOCALS~1\Temp\s33k.7"	
c:\>start /b /wait /HIGH "ISAE" "C:\Data\COPE05\ZI\SWest_COWI_Hovedpunkt_Omve \isdc\isae\M02W\aec_cmds.bat"	ndt
c:\>set path=C:\Program Files\Common Files\Intergraph\CoordSystems\Program;C: ogram Files\ISAE\\bin;C:\Program Files\Common Files\ZI Imaging;C:\Program Fil Common Files\Intergraph;C:\WINDOWS\system32;C:\WINDOWS;C:\WINDOWS\System32\Wb C:\Program Files\Common Files\Roxio Shared\DLLShared\;C:\Program Files\Common les\Roxio Shared\10.0\DLLShared\;c:\Program Files\Microsoft SQL Server\90\Too binn\;C:\PROGRA~1\COMMON~1\ZIIMAG~1;C:\PROGRA~1\COMMON~1\INTERG~1;C:\Program es\ZICSO\bin;C:\PROGRA~1\ZIGrid\bin;C:\PROGRA~1\IRASC\bin;C:\Program Files\Co n Files\Roxio Shared\DLLShared\;C:\PROGRA~1\ISAE\bin\	\Pr es\ em; Fi ls\ Fil mmo
c:\>"C:\PROGRA~1\ISAE\bin\aec.exe" "C:\Data\COPE05\ZI\SWest_COWI_Hovedpunkt_O ndt\isdc\aec_cntl\M02W.cnt" -pathwy_nr 1 -prj "C:\Data\COPE05\ZI\SWest_COWI_H dpunkt_Omvendt\\" -mdl M02W -tmplistfn "C:\DOCUME~1\cope05\LOCALS~1\Temp\s33 " -show_status -color g	mve ove k.a
c:\>"C:\Program_Files\ISAE\bin\mtstat.exe"_"C:\Data\COPE05\ZI\SWest_COWI_Hove nkt_Omvendt\isdc\isae\M02W" -prj_"C:\Data\COPE05\ZI\SWest_COWI_Hovedpunkt_Omv t\"	dpu end
C:\PROGRA~1\ISAE\bin\aec.exe : Elapsed Time = 0 hour 0 min. 38 sec.	
Program C:\PROGRA~1\ISAE\bin\aec.exe finished	
c:\>"C:\PROGRA~1\ISAE\bin\GetRawDIM.exe" "C:\Data\COPEØ5\ZI\SWest_COWI_Hovedp t_Omvendt\isdc\isae\M02W\RAWDIM" "C:\Data\COPEØ5\ZI\SWest_COWI_Hovedpunkt_Omv t\isdc\isae\M02W\01Wo_1.ras" "C:\Data\COPEØ5\ZI\SWest_COWI_Hovedpunkt_Omvendt dc\raw\M02W_1.raw"	unk end ∖is

<pre>c:\&gt;set MICH_L_BAICH_yes c:\&gt;set MICH_L_BAICH "ISAR" "C:\Data\COPEB5\ZI\SWest_COWL_Hovedpunkt_Onvendt \isdc\isace\WB3WAsec_ends.hat" c:\&gt;set MIGH_sec_ends.hat" c:\&gt;set MIGH_sec_ends.hat" c:\&gt;set MIGH_sec_ends.hat" c:\&gt;set MIGH_sec_ends.hat" c:\&gt;set MIGH_sec_ends.hat" c:\&gt;set MIGH_sec_ister_Common Files\Intergraph\CoordSystems\Program(C:\Program Files\Common Files\Common Files\IntergraphCownon Files\IntergraphCownon Files\IntergraphCownon Files\IntergraphCownon Files\IntergraphCownon Files\IntergraphCownon Files\IntergraphCownon Files\IntergraphCownon Files\Common Files\IntergraphCownon Files\Common Files\IntergraphCownon Files\Common Files\IntergraphCownon Files\Common Files\IntergraphCownon Files\Common Files\IntergraphCownon Files\Common Files\IntergraphCownon Files\Cownon Files\Cownon Files\Cownon Files\Cownon Files\Cownon Files\Cownon Files\IntergraphCownon Files\Cownon Files\Cown</pre>	🗠 C:\WINDOWS\system32\cmd.exe	×
<pre>c:\&gt;ztart /h /wait /HGH "ISAE" "C:\Data\COPE05\ZI\SWest_COWL_Hovedpunkt_Onvendt \isdc\isac+W03Wasec_ends.hat" c:\&gt;restart /h /wait /HGH "ISAE" "C:\Data\COPE05\ZI\SWest_COWL_Hovedpunkt_Onvendt \isdc\isac+W03WAsec_ends.hat" c:\&gt;restart /h /wait /HGH "ISAE" "C:\Data\COPE05\ZI\SWest_COWL_Hovedpunkt_Onvendt \isdc\isac+W03WAsec_ends.hat" c:\restart /h /wait //HGH "ISAE" (C:\Particle C:\Particle C:\Partis C:\Particle C:\Particle C:\Particle C:\Part</pre>	c:\>set MATCH_T_BATCH=yes	1
<pre>c:\&gt;set path=C:\Program Files\Common Files\Intergraph\CoordSystems\Program(C:\Program Files\Common Files\Can maying(C:\Program) Files\Common Files\Common Files\Can maying(C:\Program) Files\Common Files\C</pre>	c:\/start /b /wait /HIGH "ISAE" "C:\Data\COPE05\ZI\SWest_COWI_Hovedpunkt_Omvendt \isdc\isae\M03W\aec_cmds.bat"	
<pre>c:\&gt;"C:\PROGRA^1\1SAE\bin\acc.exe" "C:\Data\COPEBS\Z1\SWest_COWL_Hovedpunkt_Onvendt\" -ndl M3U.ont" -pathwy_nr 1 ~prj "C:\Data\COPEBS\Z1\SWest_COWL_Hovedpunkt_Onvendt\" -ndl M3U.ont" -pathwy_nr 1 ~prj "C:\Data\COPEBS\Z1\SWest_COWL_Hovedpunkt_Onvendt\" -ndl M3U.ont" -pathwy_s33k.r "-show_status -color g Caution: The pyramid definition is erroneous : Lev. pixelsizeImnl Image Raster Ori. In&gt;Pix.</pre>	c:\>set path=C:\Program Files\Common Files\Intergraph\CoordSystems\Program;C:\Pr ogram Files\ISAE\\bin;C:\Program Files\Common Files\ZI Imaging;C:\Program Files\ Common Files\Intergraph;C:\WINDOWS\system32;C:\WINDOWS\S;C:\WINDOWS\System32\Wbem; C:\Program Files\Common Files\Roxio Shared\DLLShared\;C:\Program Files\Common Fi les\Roxio Shared\10.0\DLLShared\;c:\Program Files\Microsoft SQL Server\90\Tools\ binn\;C:\PROGRA^1\COMMON*1\ZIIMAG*1;C:\PROGRA^1\INASC\bin;C:\Program Files\Common n Files\Roxio Shared\DLLShared;C:\PROGRA^1\IRASC\bin;C:\Program Files\Common n Files\Roxio Shared\DLLShared;C:\PROGRA^1\ISAE\bin\	
Caution: The pyramid definition is erroneous : Lev. pixelsize[mm] Image Raster Ori. In>Pix. 16./ri. 16./ri. 16./ri. 9 (1917) 1.310 (1917) 1.010 (1978) 1.010 (1978) 9 (1917) 1.310 (1917) 1.010 (1978) 1.0100 (1978) 1	c:\>"C:\PROGRA~1\ISAE\bin\aec.exe" "C:\Data\COPE05\ZI\SWest_COWI_Hovedpunkt_Omve ndt\isdc\aec_cntl\M03W.cnt" -pathwy_nr 1 -prj "C:\Data\COPE05\ZI\SWest_COWI_Hove dpunkt_Omvendt\\" -mdl M03W -tmplistfn "C:\DOCUME~1\cope05\LOCALS~1\Temp\s33k.r " -show_status -color g	
Lev. pixelsize[m] Image Raster Ori. In>Pix. 1 ls.(X'y) pi.(X'y) lc.rhi. lc.rhi. 9 1.81(Y) 1.819 1.819 (0.vk -3 Okrok Okrok 8 9.916/ 0.916 0.916 0.916/ 0.916 okrok 6 9.227/ 0.227 0.425 0.455 0.400 okrok 6 9.227/ 0.227 0.027 0.927 0.400 okrok 4 9.627 0.627 0.627 0.627 0.000 okrok 4 9.628 0.628 0.628 0.628 0.628 0.000 okrok 5 0.628 0.628 0.628 0.628 0.6097 0.000 okrok 4 0.628 0.629 0.6097 0.6097 0.000 okrok 5 0.607 0.607 0.6097 0.007 0.000 okrok 6 0.007 0.007 0.007 0.007 0.000 okrok 5 0.007 0.007 0.007 0.007 0.000 okrok 6 0.007 0.007 0.007 0.007 0.000 okrok 5 0.007 0.007 0.007 0.007 0.000 okrok 6 0.007 0.007 0.007 0.007 0.000 okrok 6 0.007 0.007 0.007 0.007 0.000 okrok 6 0.007 0.007 0.007 0.007 0.000 okrok 5 0.007 0.007 0.007 0.007 0.000 okrok 6 0.007 0.007 0.007 0.007 0.007 0.000 okrok 6 0.000 okrok 5 0.000 okrok 5 0.000 okrok 6 0.007 0.007 0.007 0.007 0.007 0.000 okrok 6 0.000 okrok 6 0.007 0.007 0.007 0.007 0.007 0.000 okrok 6 0.000 okrok 6 0.007 0.007 0.007 0.007 0.007 0.000 okrok 6 0.000 okrok 6 0.007 0.007 0.007 0.007 0.007 0.000 okrok 6 0.007 0.007 0.007 0.007 0.007 0.000 okrok 6 0.007 0.007 0.007 0.007 0.007 0.000 okrok 6 0.000 okrok 6 0.007 0.007 0.007 0.007 0.007 0.000 okrok 6 0.000 okrok 6 0.007 0.000 okrok 6 0.007 0.000 okrok 6 0.007 0.007 0.007 0.000 okrok 6 0.000 okrok 6 0.007 0.000 okrok 6 0.000 okr	Caution: The pyramid definition is erroneous :	
-3: Already exists c:\>"C:\PROGRA~1\ISAE\bin\GetRawDTM.exe" "C:\Data\COPE05\ZI\SWest_COWI_Hovedpunkt_Omvend t\isdc\isae\M03W\B1Wo_1.ras" "C:\Data\COPE05\ZI\SWest_COWI_Hovedpunkt_Omvend t\isdc\isae\M03W\B1Wo_1.ras" "C:\Data\COPE05\ZI\SWest_COWI_Hovedpunkt_Omvend t\isdc\isae\M03W\B1Wo_1.ras" "C:\Data\COPE05\ZI\SWest_COWI_Hovedpunkt_Omvend t\isdc\isae\M03W\B1Wo_1.ras" "C:\Data\COPE05\ZI\SWest_COWI_Hovedpunkt_Omvend t\isdc\isae\M03W\B1Wo_1.ras" "C:\Data\COPE05\ZI\SWest_COWI_Hovedpunkt_Omvend t\isdc\isae\M03W\B1Wo_1.ras" Could not open ras file. Aborting. c:\C:\PROGRA~1\Bentley\Program\MICROS~1\ustation.exe -wumt2isdc -i-p C:\Data\CO PE05\ZI\SWESI_~2\isdc\aec_entl\M03Wa.par C:\Data\COPE05\ZI\SWESI_~2\M03W.dgn c:\\del "C:\DOCUME~1\cope05\LOCALS~1\Temp\s33k.7" Could Not Find C:\DOCUME~1\cope05\LOCALS~1\Temp\s33k.7 c:\\	Lev. pixelsize[mm] Image Raster Ori. Im>Pix. le.(x/y) ri.(x/y) le./ri. le./ri. le./ri. le./ri. 9 1.819/1.819 1.819/1.819 ok/ok -3 ok/ok ok/ok 8 0.910/0.910 0.910/0.910 ok/ok ok ok ok/ok ok/ok 7 0.455/0.455 0.455 ok/ob ok ok ok/ok ok/ok 6 0.227/0.227 0.227 0.227 ok/ok ok ok/ok ok/ok 5 0.114/0.114 0.114/0.114 ok/ok ok ok/ok ok/ok 4 0.057/0.057 0.057/0.057 ok/ok ok ok/ok ok/ok 3 0.028/0.028 0.028/0.028 ok/ok ok ok/ok ok/ok 2 0.014/0.014 0.014/0.014 ok/ok ok ok/ok ok/ok 1 0.007/0.007 0.007 0.007 ok/ok ok ok/ok ok/ok -1: Does not exist -2: Read error	
Could not open ras file. Aborting. C:\C:\PROGRA~1\Bentley\Program\MICROS~1\ustation.exe -wumt2isdc -i-p C:\Data\CO PE05\ZI\SWEST_~2\isdc\aec_cntl\M03Wa.par C:\Data\COPE05\ZI\SWEST_~2\M03W.dgn c:\>del "C:\DOCUME~1\cope05\LOCALS~1\Temp\s33k.7" Could Not Find C:\DOCUME~1\cope05\LOCALS~1\Temp\s33k.7 c:\>	-3: Already exists c:\>"C:\PROGRA~1\ISAE\bin\GetRawDTM.exe" "C:\Data\COPE05\ZI\SWest_COWI_Hovedpunk t_Omvendt\isdc\isae\M03W\RAWDIM" "C:\Data\COPE05\ZI\SWest_COWI_Hovedpunkt_Omvend t\isdc\isae\M03W\01Wo_1.ras" "C:\Data\COPE05\ZI\SWest_COWI_Hovedpunkt_Omvendt\is do\msuyM02W 1 maw"	
c:\>C:\PROGRA~1\Bentley\Program\MICROS~1\ustation.exe -wumt2isdc -i-p C:\Data\CO PE05\ZI\SWEST_~2\isdc\aec_cntl\M03Wa.par C:\Data\COPE05\ZI\SWEST_~2\M03W.dgn c:\>del "C:\DOCUME~1\cope05\LOCALS~1\Temp\s33k.7" Could Not Find C:\DOCUME~1\cope05\LOCALS~1\Temp\s33k.7 c:\>	Could not open ras file. Aborting.	
	c:\>C:\PROGRA~1\Bentley\Program\MICROS~1\ustation.exe -wumt2isdc -i-p C:\Data\CO PE05\ZI\SWEST_~2\isdc\aec_cntl\M03Wa.par C:\Data\COPE05\ZI\SWEST_~2\M03W.dgn c:\>del "C:\DOCUME~1\cope05\LOCALS~1\Temp\s33k.7" Could Not Find C:\DOCUME~1\cope05\LOCALS~1\Temp\s33k.7 c:\>	