Terrænmodeller har mange anvendelsesmuligheder, som fx ortofotofremstilling; visualisering af landskaber og oversvømmelsesanalyse. Gennem tiden er terrænmodeller blevet produceret på forskellig vis.

Denne rapport omhandler airborne laser scanning og nøjagtigheden af terrænmodeller produceret ud fra laserscanningsdata. Kontrollen af de digitale terrænmodeller udføres i seks områder ved hjælp af terrestrisk indmålte kontrolpunkter. Ud fra disse kontrolpunkter vurderes terrænmodellernes højde- og plannøjagtighed.

AIRBORNE LASER SCANNING

rborne

Laser Scanning -

Kontrol af terrænmodelle

Kontrol af terrænmodeller



Aalborg Universitet Landinspektørstudiet Afgangsprojekt 2008



Kenneth Skouborg Christensen Lars Jacob Stentebjerg Hansen Jens Ravn Knudsen



Det Teknisk-Naturvidenskabelige Fakultet Aalborg Universitet - Institut 20 - L-studienævnet

Landinspektøruddannelsens 10. semester

TITEL:

Airborne Laser Scanning -Kontrol af terrænmodeller

PROJEKTPERIODE:

4. februar 2008 - 11. juni 2008

PROJEKTGRUPPE: MS10-02

GRUPPEMEDLEMMER:

Kenneth S. Christensen Lars J. S. Hansen Jens R. Knudsen

HOVEDVEJLEDER: Jens Juhl

BIVEJLEDER: Joachim Höhle

OPLAG: 9

RAPPORT SIDEANTAL: 86

APPENDIX SIDEANTAL: 16

BILAG SIDEANTAL: 25

TOTAL SIDEANTAL: 127

 \bigodot 2008 Kenneth S. Christensen, Lars J. S. Hansen & Jens R. Knudsen

Layout og typografi lavet af forfatterne ved hjælp af $I\!\!^A\!T_E\!X$ Forsiden er udarbejdet af projektgruppen og illustrationen er KMS's DTM med hillshade effekt. Trykkeri: AK Print, Rantzausgade, 9000 Aalborg

SYNOPSIS:

Dette afgangsprojekt omhandler nøjagtighedskontrol af digitale terrænmodeller (DTM). Gennem foranalysen belyses faktorer, der har indflydelse på nøjagtigheden af højdemodeller. I hovedanalysen undersøges nøjagtigheden af DTM´er fra hhv. KMS og COWI. Analysen er opdelt i tre, hvor den første del er en relativ analyse,

der ud fra en rasteranalyse beskriver højdeforskelle mellem de to DTM ´er. Anden del omhandler en kontrol af højdenøjagtigheden for de to DTM ´er. Analysen foretages på baggrund af 629 terrestrisk indmålte kontrolpunkter i 6 områder. Det første område er referenceområdet, hvor RMS'en beregnes til 7 cm for KMS's DTM og 6,8 cm for COWI's DTM. De øvrige områder er valgt på baggrund af foranalysen, og er områder hvor der kan forventes en ringere nøjagtighed. Der beregnes en samlet RMS for alle områderne på 33,5 cm for KMS 's DTM og 39,5 cm for COWI 's DTM. Den tredje del omhandler plannøjagtigheden for punktskyer indsamlet med airborne laser scanning. I denne analyse sammenlignes 8 kontrolpunkter, der kan defineres i marken og i KMS's og COWI's punktskyer. Ud fra de 8 punkter beregnes en spredning på 59 cm for KMS 's punktsky og 60 cm for COWI 's.

ABSTRACT:

This thesis involves quality control of digital terrain models (DTM). The initial analysis elucidates the elements which affects the quality of elevation models. The projects main analysis examines the accuracy of both KMS and COWIS DTM. The main analysis is divided into three parts, where the first part is a relative comparison, which involves a raster analysis that describes the differences between the DTMs. The second part concerns a analysis of height accuracy of the two DTMs. The analysis involves 629 surveyed controlpoints in six locations. The first location is used as reference, and the RMS for KMS's DTM in this location is 7 cm, whereas the RMS for COWIs DTM is 6,8 cm. The additional locations are chosen on the basis of the initial analysis, and are areas where an inferior accuracy is expected. An overall RMS of 33,5 cm for KMS's DTM and 39,5 cm for COWI's DTM is calculated for all locations. The third part concerns planimetric accuracy of pointclouds collected by airborne laser scanning. This analysis compares eight controlpoints, which can be defined in the two pointclouds and surveyed. The overall planimetric accuracy is 59 cm for KMS's pointcloud and 60 cm for COWI's pointcloud.

Forord

Denne rapport er udarbejdet på landinspektøruddannelsens 10. semester af projektgruppe MS10.02. Semestret er en del af landinspektøruddannelsens specialisering med henblik på at opnå titlen landinspektør, candidatus(a) geometriae (cand. geom), på engelsk betegnet M. Sc. in Surveying, Planning and Land Management.

Formålet med afgangsprojektet er bl.a: "At dokumentere, at den studerende selvstændigt er i stand til at planlægge og gennemføre et projektforløb på et højt fagligt niveau. Afgangsprojektet skal dokumentere den studerendes evne til at anvende videnskabelige teorier og metoder på et tilstrækkeligt højt niveau. Afgangsprojektet skal således udformes med henblik på at dokumentere, at studiets formålsparagraf er opfyldt." [L-studienævnet 2008]

Nærværende rapport henvender sig hovedsageligt til vejledere og censor, men kan læses af landinspektører eller lignende faggrupper med interesse for Airborne Laser Scanning og nøjagtigheden af de landsdækkende højdemodeller.

Projektgruppen vil gerne takke følgende firmaer og personer for Deres bidrag til projektet:

- COWI, Johnny Koust Rasmussen
- Kort & Matrikelstyrelsen, Poul Frederiksen & Niels Henrik Broge
- Scankort, Andrew C. Flatman

Aalborg Universitet d. 11. juni 2008.

Kenneth S. Christensen

Lars J. S. Hansen

v

Jens R. Knudsen

Læsevejledning

Igennem rapporten henvises der til figurer, tabeller og formler, som alle nummeres fortløbende med udgangspunkt i kapitelnummeret. Fodnoter er placeret nederst på de sider, hvor der henvises til dem. Nummereringen af fodnoter nulstilles ved starten af hvert kapitel. Kildehenvisning i forbindelse med anvendelse af figurer er indsat sidst i figurtekster, hvis dette ikke er tilfældet er figuren udarbejdet af projektgruppen.

Litteraturhenvisninger er i teksten angivet med forfatters efternavn, udgivelsesår og evt. sidetal. Ved henvisning til litteratur med to forfattere nævnes begge, og i tilfælde af flere forfattere end to, nævnes første forfatter efterfulgt af "et al". Oplysninger om de enkelte kilder forefindes bagerst i rapporten i litteraturlisten, side 74. Litteraturhenvisningens placering er afhængig af, om kilden har været anvendt til et helt afsnit eller blot en enkelt sætning. Hvis kilden har været anvendt til et helt afsnit, placeres henvisningen efter sidste punktum. Henviser kilden til en enkelt sætning, placeres henvisningen før punktum i den pågældende sætning.

Der henvises igennem rapporten til Appendiks og Bilag, som forefindes efter rapporten i denne tryksag. Appendiks angives med bogstaver og bilag med romertal.

I forbindelse med fremstilling af kort og figurer til rapporten er der anvendt forskellige kortværker. Kortværket DTK gengives med tilladelse fra Kort & Matrikelstyrelsen, jf. aftale G24-98. Ortofotos, der er anvendt i rapporten, er fra DDO, hvis ophavsrettigheder tilhører COWI. Ortofotos gengives ud fra bestemmelserne i universitetsaftalen indgået med COWI.

I rapporten anvendes følgende definitioner: Spredning i planen efter [Borre 1993]:

$$\sigma_{EN} = \sqrt{\frac{\sigma_E^2 + \sigma_N^2}{2}} \tag{1}$$

 $\begin{array}{ccc} \text{hvor} & \sigma_{EN} & \text{er spredningen i planen} \\ \sigma_E & \text{er spredningen i E} \\ \sigma_N & \text{er spredningen i N} \end{array}$

Til beregning af RMS anvendes:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (\Delta)^2}{n}}$$
(2)

hvor	RMS	er Root Mean Square
	Δ	er differencen mellem observationen og middelværdien
	n	er antallet af observationer

Læsevejledning

Til beregning af spredning anvendes:

 σ Δ

n

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (\Delta)^2}{n-1}}$$
(3)

 hvor

er spredningen er differencen mellem observationen og middelværdien

er antallet af observationer

Indholdsfortegnelse

Forord	v			
Læsevejledning vi				
Indholdsfortegnelse	ix			
Kapitel 1 Indledning	1			
Kapitel 2 Initierende problem	5			
Kapitel 3 Metode 3.1 Projektopbygning	7 7			
Foranalyse	9			
Kapitel4Faktorer med indflydelse på nøjagtigheden af ALS4.1Afstandsmåling	11 12 15 16 16 17			
Kapitel 5 Højdemodeller i Danmark 5.1 Kort & Matrikelstyrelsen 5.2 COWI	21 21 23			
Kapitel 6 Problemformulering	25			
Hovedanalyse	27			
Kapitel 7 Metode 7.1 Hovedanalysens struktur 7.2 Arbejdsflow i hovedanalysen	29 29 30			
Kapitel 8 Præsentation af områder til kontrol af højdenøjagtighed og til indmåling	krav 33			
Kapitel 9 Databeskrivelse	39			

ix

Indholdsfortegnelse

$9.1 \\ 9.2 \\ 9.3 \\ 9.4$	Arbejdsflow	$39 \\ 40 \\ 41 \\ 42$	
Kapitel	10 Belativ sammenligning af DTM ´er - en rasteranalyse	43	
10.1	Blok A - afvigelser mellem DTM'erne	43	
10.2	Blok A - numeriske differencer mellem DTM'erne	44	
10.3	Blok B - afvigelser mellem DTM'erne	45	
10.4	Blok B - numeriske differencer mellem DTM'erne	45	
10.1	Onsamling	46	
10.0	opsamming	10	
Kapitel	11 Kontrol af høidenøiagtighed	47	
11 1	Fremgangsmåde for kontrol af højdenøjagtighed	47	
11.1	Teori for kontrol af høidenøjagtighed	48	
11.2	Område 1 - Referenceområde	50	
11.0	Område 2. Steilt terræn	51	
11.4	Område 2 - Stejlt terræri :	51	
11.0	Område 3 - Lodrette spring i terrænet	23	
11.6	Område 4 - Varierende vegetationshøjde	54	
11.7	Område 5 - Niveauforskel på terræn i forbindelse med byggeri	55	
11.8	Område 6 - ALS i forbindelse med vand	57	
11.9	Generelle tendenser	58	
Kapitel	12 Kontrol af plannøjagtighed	61	
12.1	Beregning af skøn for spredningen på skæringskoordinaten	63	
12.2	Vurdering af plannøjagtighed	64	
Kapitel	13 Konklusion	69	
Kapitel	14 Perspektivering	71	
Litteratur 73			
LIUUCIAU			
Append	iks	75	
Append A Kor	iks trolmåling	75 77	
Append A Kor A.1	iks trolmåling Instrumenter til kontrolmålingen	75 77 77	
Append A Kor A.1 A.2	iks trolmåling Instrumenter til kontrolmålingen	75 77 77 78	
Append A Kor A.1 A.2	iks trolmåling Instrumenter til kontrolmålingen	75 77 77 78	
Append A Kor A.1 A.2 B Ter B.1	iks trolmåling Instrumenter til kontrolmålingen	 75 77 77 78 85 86 	
Append A Kor A.1 A.2 B Ter: B.1	iks trolmåling Instrumenter til kontrolmålingen	 75 77 78 85 86 	
Append A Kor A.1 A.2 B Ter B.1 C Bes C.1	iks trolmåling Instrumenter til kontrolmålingen Markarbejde markar	 75 77 78 85 86 89 89 	
Append A Kor A.1 A.2 B Ter: B.1 C Bes C.1 C.2	iks trolmåling Instrumenter til kontrolmålingen	 75 77 77 85 86 89 89 90 	
Append A Kor A.1 A.2 B Ter: B.1 C Bes C.1 C.2 Bilag	iks trolmåling Instrumenter til kontrolmålingen	 75 77 77 85 86 89 89 90 91 	
Append A Kor A.1 A.2 B Ter: B.1 C Bes C.1 C.2 Bilag I Tab	iks trolmåling Instrumenter til kontrolmålingen	 75 77 78 85 86 89 89 90 91 93 	

х

III Måleudstyr	97
IV Diagram over arbejdsflow	99
V Fikspunktskort	101
VI Rasteranalyse	105
VIIKonfidensellipser - Plannøjagtighed	111
VIIBilagscd	115

Kapitel 1

Indledning

En højdemodel¹ består af en række punkter med koordinater i rummet i et kendt referencesystem. Højdemodeller inddeles i to kategorier: DTM² og DSM³. Forskellen på disse to er, at DTM'en kun beskriver terrænet og dermed den "bare" jordoverflade. Dette betyder, at bygninger og træer mv. ikke kan ses af en DTM, i modsætning til en DSM, der beskriver overfladen, se figur 1.1. Interessen for højdemodeller udsprang fra teleselskabernes ønske om en sådan, da der skulle placeres mobilmaster [Flatman 2008]. En nøjagtig højdemodel kan være med til, at optimere placeringen af mobilmaster og dermed være medvirkende til, at der spares penge. Selvom det var for at optimere placeringen af mobilmaster højdemodellerne blev lavet har de mange andre anvendelsesmuligheder. Inden for de seneste år er anvendelsen af højdemodeller øget inden for miljøhensyn, herunder spørgsmålet om global opvarmning og 3D-analyser af vandstandstigninger, der kan forekomme i forbindelse med dette [Rasmussen 2007]. Det at DTM'er og DSM'er



Figur 1.1: Her ses et eksempel på forskellen mellem en DSM (til venstre) og en DTM (til højre) af samme område.

beskriver jordoverfladen på forskellig måde gør, at modellerne har forskellige anvendelsesmuligheder. Fx egner DSM'er sig til at beskrive områder med højspændingsmaster, hvor der er risiko for, at vegetationen vokser op og berører højspændingsledningerne, da DSM'er har træer og bygninger med. Det er af afgørende betydning for sikkerheden, at alle objekter er registrerede for at undgå, at træerne rammer højspændingsledningerne. Derudover anvendes DSM'er til planlægning af placering af mobilmaster for at sikre, at der er optimal dækning for hver enkelt mast. DTM'er anvendes fx når der skal fremstilles ortofotos og inden for kortlægning. Dette var blot nogle enkelte eksempler for at illustrere, at højdemodeller har flere anvendelsesmuligheder.

¹Højdemodeller er i denne rapport en fællesbetegnelse for DTM og DSM

²Digital Terrain Model

³Digital Surface Model

Kapitel 1. Indledning

Afhængig af anvendelsen vil kravene til nøjagtighed og fuldstændighed variere. Nøjagtigheden vil fx være mere afgørende for en højdemodel, der skal anvendes til en oversvømmelsesrisikoanalyse end til en højdemodel, der skal anvendes til at placere mobilmaster efter. Højdemodeller kan genereres på forskellige måder. Herunder er listet de muligheder, der er for at indsamle data til en højdemodel.

- INSAR⁴
- Fotogrammetri
- ALS⁵
- TLS⁶
- Polær måling
- GPS^7

De øverste tre metoder foregår med luftbårne instrumenter, hvorimod de nederste tre metoder er terrestriske metoder. Normalt indsamles data til højdemodeller ved en af de luftbårne metoder. De luftbårne metoder har generelt en ringere nøjagtighed end de terrestriske metoder, men indsamlingstiden gør, at disse bliver foretrukket når der skal indsamles data til en landsdækkende højdemodel. Herunder beskrives de seks indsamlingsmetoder.

Dataindsamlingen med INSAR foregår fra flyvemaskine, space shuttle eller satellit, der positionsbestemmes ud fra GPS-systemet. På det sensorbærende fartøj er der monteret en basislægte, hvor der på hver ende er monteret sensorer, der måler afstanden til overfladen vha. radar. Ud fra afstandsmålingerne, basislægtens længde og fartøjets orientering bestemmes højdeforskelle på overfladen. De udsendte radarsignaler kan have forskellig frekvens og bølgelængde. Disse har indflydelse på signalets gennemtrængelighed på fx vegetation på overfladen. En af fordelene ved kortlægning vha. INSAR er, at metoden er uafhængig af vejrforhold, da radar ikke er følsom overfor de atmosfæriske forhold. En radar er en aktiv sensor, der sender impulser ud. Derfor er denne metode ikke afhængig af dagslys. Nøjagtigheden ved afstandsmålinger med INSAR afhænger fx af hvilken hardware, der anvendes til dataindsamlingen, herunder basislægtens længde, samt af afstanden mellem overfladen og det sensorbærende fartøj, men generelt kan der opnås nøjagtigheder på 1-2 m. [Li et al. 2006]

Fotogrammetri har gennem tiden været anvendt til kortlægning, og kan bruges til, at producere højdemodeller. Fotogrammetri er måling i billeder, og kan foretages i analoge, såvel som digitale billeder.

For at skabe en højdemodel fotogrammetrisk kræves et billedoverlap på ca. 60 % mellem to billeder. Billederne optages fra flyvemaskine eller helikopter med en kendt position og orientering. Højdemodeller kan fremstilles efter tre forskellige metoder; manuelt, semiautomatisk eller automatisk. Fælles for de tre metoder er, at de samme punkter skal defineres i hvert af de to overlappende billeder. Ved den manuelle fremstilling definerer en operatør hvert enkelt fællespunkt i de to billeder, og højderne imellem disse fællespunkter interpoleres herefter. Ved semiautomatisk fremstilling definerer systemet en række fællespunkter, hvor der er god korrelation, og ud fra disse interpoleres de resterende punkter. Punkterne gennemgås derefter af operatøren, som har mulighed for, at justere højden på punkterne, hvis der findes fejl i disse. Ved automatisk fremstilling laves højdemodellen ud fra parametre, der er defineret ud fra generelle egenskaber, som kendetegner områdets terræn. Et eksempel herpå kan være om området er fladt terræn, bakket terræn eller bjergområde. Efter parametrene er defineret for modellen bestemmes fællespunkter,

⁴Interferometric Synthetic Aperature Rader

⁵Airborne Laser Scanning

 $^{^{6}\}mathrm{Terrestrisk}$ Laser Scanning

⁷Global Positioning System

hvor der er god korrellation, og ud fra disse interpoleres højden til de resterende punkter. Et kamera er en passiv sensor og derfor kan der kun indsamles data ved fotogrammetri i dagslys. Derudover er det vigtigt, at det er skyfrit, dels så det er muligt at se det der fotograferes, og dels for at undgå skyggevirkninger fra skydækket. Nøjagtighed og fuldstændighed af de tre metoder er afhængig af billedernes orientering, målforhold, højde-/basisforhold, samt antallet af fællespunkter i de to billeder, men med et målforhold på 1:6.000 og et højde-/basisforhold på 1/3,8 og en σ_{par}^{8} på 5 μ m (hvilket kan forventes ifig. [Lavridsen 1993]) kan der forventes en spredning i højden på omkring 11 cm [Kraus 2007, Formel 2.1-34]. [Höhle 2005]

ALS er laserscanning fra enten flyvemaskine eller helikopter. Når ALS anvendes er det nødvendigt, at kende laserscannerens position og orientering. Denne bestemmes vha. GPS og IMU⁹ placeret på fartøjet. En laserscanner er en aktiv sensor, og dermed er laserscanneren ikke afhængig af dagslys, så derfor kan laserscanning principielt foregå døgnet rundt. Når laserscannerens position og orientering er bestemt er det muligt, at beregne den absolutte position til de punkter laserscanneren bestemmer. En skitse af hvordan dette foregår, kan ses af figur 1.2. Nøjagtigheden



Figur 1.2: Skitse af hvordan ALS foregår fra en flyvemaskine.

af højdemodeller bestemt ved hjælp af ALS varierer og afhænger af mange forskellige ting, som fx scannertype, flyvehøjde og nøjagtigheden af flyvemaskinens position. Spredningen for ALS data er omkring 10 cm i højden på veldefinerede flader [COWI 2006].

TLS er en anden form for laserscanning. Når TLS anvendes til indsamling af kotepunkter opstilles targets som indmåles med laserscanneren. Disse targets skal indmåles således deres position er kendt, og dermed kan de punkter laserscanneren indsamler bestemmes i et referencesystem. TLS anvendes fx til kontrolmåling af en motorvej eller et vejkryds for at kontrollere om vejen er blevet anlagt som bestilt. Nøjagtigheden af TLS afhænger bl.a. af scannertype og afstanden mellem objekt og scanneren. Anvendes der eksempelvis en Leica HDS 3000 kan der, på en af-

⁸Spredning på parallaxen

⁹Inertial Measuring Unit

Kapitel 1. Indledning

stand af 50 meter, opnås en punktspredning på 6 mm [Leica Geosystems 2005].

Polær måling udføres med en totalstation, hvor der bestemmes 3D-koordinater til detailpunkter. Der oprettes en opstilling enten i et kendt punkt eller en fri opstilling. Derefter bestemmes opstillingspunktet ved at sigte til fikspunkter. Koordinaten til opstillingspunktet kan også bestemmes ved at anvende en SmartStation, som er en kombineret totalstation og GPS-modtager. Når opstillingspunktet er kendt bestemmes enkeltpunkter ved registrering af vinkler og afstand fra den kendte opstilling. Der kan opnås en punktspredning på 9 mm, hvis forholdene er som eksempel 11.1 målesituation C i [Jensen 2003].

GPS er den anden terrestriske indmålingsmetode. GPS dækker over flere indmålingsmetoder, men den mest anvendte til landmåling er RTK¹⁰. RTK er GPS-måling med 2 modtagere, hvoraf den ene er opstillet i et kendt punkt. Dermed kan der måles relativt, og på den måde kan mange fejl elimineres, hvilket gør nøjagtigheden bedre end ved absolut måling. Hvis GPS-Referencen anvendes som referencetjeneste, og der er en afstand på 5 km mellem master og rover, kan der forventes en spredning i planen på 6 mm og en spredning i højden på 15 mm for RTK [Jensen 2003, Eksempel 18.1, s. 173].

Igennem indledningen er der blevet præsenteret en række metoder til dataindsamling til en højdemodel. Disse metoder har forskellige fordele og ulemper, hvad angår nøjagtighed, dataindsamlingstid, økonomi og punkttæthed. Da det ikke er muligt at behandle alle dataindsamlingsmetoder i dette projekt, vil der blive foretaget en afgrænsning af dataindsamlingsmetoden i forbindelse med formuleringen af det initierende problem.

¹⁰Real Time Kinematisk

Kapitel 2

Initierende problem

Højdemodeller har flere anvendelsesmuligheder, og i forbindelse med disse, bør indmålingsmetode og efterbehandling af data tages i betragtning, da disse er afgørende for nøjagtigheden af højdemodellen. Emnet højdemodeller er meget omfattende, og det er derfor nødvendigt, at foretage en afgrænsning af projektemnet. Ud fra de i indledningen nævnte indmålingsmetoder vælges ALS, da indmålingsmetoden er blevet udviklet, således metoden er økonomisk at anvende, og samtidig har en god nøjagtighed i forhold til de øvrige luftbårne indmålingsmetoder. De to nyeste landsdækkende højdemodeller er produceret ud fra ALS-data. På baggrund af ovenstående kunne det være interessant at undersøge nærmere, hvordan data er indsamlet og bearbejdet, samt hvilke faktorer, der har indflydelse på højdemodellens nøjagtighed. Dermed er projektets initierende problem:

"Hvilke faktorer har indflydelse på nøjagtigheden af højdemodeller afledt af ALS-data, og hvad er nøjagtigheden af de landsdækkende højdemodeller?"

Kapitel 3

Metode

Dette kapitel vil redegøre for den overordnede metode, samt gennemgå strukturen for projektet. For at besvare det initierende problem anvendes en metode, som sikrer en struktureret tilgang til besvarelse af problemstillingen. Figur 3.1 giver et overblik over de hovedelementer, der findes i forbindelse med vidensproduktion. Vidensproduktionen starter med et eller flere spørgsmål, som er motiveret igennem en undren og dermed ønskes besvaret [Andersen 2005]. Herefter benyttes teori og empiri til, at klarlægge og analysere problemstillingen og dermed udarbejde en problemformulering. For at nå frem til en konklusion skal alle elementer, som fremgår af figuren, i anvendelse. Dette beskriver i korte træk den problemorienterede arbejdsmetode. Ambitionen



Figur 3.1: Hovedelementerne i vidensproduktion og elementernes sammenhæng [Andersen 2005, s. 24].

igennem denne metode er, at skabe ny viden om problemstillingen. For at skabe viden ses først på teorien, som i dette projekt vil bestå af den tilgængelige litteratur, hvorefter empirien inddrages i hovedanalysen. Arbejdet i projektet er iterativt, som de dobbeltrettede pile på figur 3.1 antyder. Deri ligger forskellen på det skrevne produkt, rapporten, og det arbejde, der ligger bag denne.

3.1 Projektopbygning

Formålet med dette afsnit er, at skabe et overblik over rapportens indhold, dette gøres vha. et strukturdiagram, som kan ses af figur 3.2. Indledningsvis i projektet præsenteres det initierende problem, som er grundlaget for projektarbejdet og rapporten. Herefter præsenteres den overordnede metode for projektarbejdet, hvorimod de mere konkrete metoder præsenteres undervejs i rapporten. I foranalysen analyseres de faktorer, der indvirker på højdemodellens nøjagtighed. I

Kapitel 3. Metode

denne del af projektet anvendes hovedsageligt teori, i form af litteratur, til at beskrive disse faktorer. Udover denne analyse præsenteres de danske landsdækkende højdemodeller, stadig med den begrænsning, at data skal være indsamlet gennem brug af ALS. Metoden for hovedanalysen er på dette tidspunkt ikke fastlagt, da problemformuleringen ikke er udarbejdet. Boksen der symboliserer hovedanalysen er tom, denne vil først blive beskrevet i selve hovedanalysen.



Figur 3.2: Strukturdiagram over projektrapporten.

Foranalyse

Kapitel 4

Faktorer med indflydelse på nøjagtigheden af ALS

I det initierende problem blev ALS udvalgt, som den indmålingsmetode der arbejdes videre med i projektet. Fælles for alle typer opmåling er, at de i et vist omfang påvirkes af fejl, enten pga. instrumenterne der benyttes, eller pga. forhold i forbindelse med opmålingen, såsom vejrlig i forbindelse med ALS. Ved at vælge ALS er faktorerne ikke begrænset til kun at omhandle selve

Afstandsmåling:	Objekters reflektion
	- Glas
	- Vand
	- Absorberende overflader
	- Vejr
	Atmosfærisk fejl (refraktion)
	Urfejl
	Multipath
	Footprint
Scanner:	Måling af spejlets rotation
	Ændring i spejlenes acceleration og hastighed
	Boresight error (Scanner & IMU)
	Indkodnings ventetid
Navigation:	Atmosfæreforstyrrelser (GPS)
	Differentiel GPS (DGPS)
	Inertial Measurement Unit (IMU)
Terræn	Hældning
	Vegetation
Efterbehandling:	Klassifikation
	Interpolation

Tabel 4.1: Faktorer som behandles i kapitlet.

laserscanningen, men også navigationssystemet påvirker den absolutte nøjagtighed. Så for at vide, hvilken absolut nøjagtighed højdemodellen har er det nødvendigt, at kende til specifikationerne på de instrumenter, der anvendes i forbindelse med dataindsamlingen.

I tabel 4.1 er der en oversigt over væsentlige faktorer, der influerer på nøjagtigheden ved indsamling og efterbehandling af ALS-data.

Disse faktorer vil ikke blive behandlet i detaljer i denne rapport, da en detaljeret gennemgang af de enkelte faktorer vil være meget omfattende. Desuden er hensigten med dette projekt ikke, at redegøre detaljeret for faktorerne, men istedet at få kendskab til disse, for at anvende dem til en vurdering af nøjagtigheden af de landsdækkkende højdemodeller. De i tabel 4.1 nævnte faktorer er hovedsageligt fra [Morin 2002, s. 1-40], men også fra vejledermøder. Faktorerne er inddelt efter, hvilken del af ALS-systemet de indvirker på. Denne inddeling er lavet for at holde de enkelte faktorer adskilt fra hinanden, for at overskueliggøre dem. I tabel 4.1's venstre side findes den overordnede inddeling, mens de enkelte faktorer er nævnt i tabellens højre side. I de følgende afsnit behandles disse faktorer overordnet.

4.1 Afstandsmåling

I dette afsnit ses på de faktorer, der har indflydelse på nøjagtigheden af afstandsmålingen. Alt efter scannerfabrikat og model er der forskellige metoder til afstandsmåling med laser. Disse to metoder benævnes "pulse modulation" og "continuous wave modulation". Af figur 4.1 ses ek-



Figur 4.1: Til venstre ses "pulse modulation" og til højre ses "continouos wave modulation". Inspireret af [Morin 2002, fig. 2-1].

sempler på disse to måder, at anvende laser til afstandsmåling. I praksis er "pulse modulation" scannere mest anvendt [Morin 2002, s. 15]. Derfor fokuseres der på denne type afstandsmåling i dette afsnit. En af de store forskelle er, at i forbindelse med "pulse modulation" anvendes et ur til bestemmelse af afstanden og ved "continuous wave modulation" anvendes uret til generering af bølgerne og herefter måles på faseforskellen, for at bestemme afstanden. Forskellene på disse to typer afstandsmåling vil ikke blive yderligere beskrevet i denne rapport. Her fokuseres istedet på de faktorer, der har indflydelse på nøjagtigheden, se tabel 4.1.

En af disse faktorer er refleksionsevnen af de objekter der måles. Ved afstandsmåling udsendes energi, ofte i form af nær-infrarødt lys, fra scanneren, og afhængig af overfladen på det objekt laseren rammer, returneres en del af energien. Mængden af returneret energi kaldes intensiteten, og ud fra intensiteten gives punkterne en farve og dermed kan der skabes et "billede" af det målte. Et eksempel på afstandsmåling fra [Baltsavias 1999]:

En typisk "pulse modulation" laser afgiver 2000 Watt, som maksimal ydelse. Når signalet kommer retur er der $2,4 \cdot 10^{-6}$ Watt. Den målte afstand er i dette eksempel 750 m. Det er altså en brøkdel af den udsendte energi, der returneres til scanneren.

Effekten laserpulsen returneres med, afhænger af overfladen der reflekteres på. I tabel 4.1 er følgende nævnt under Objekters refleksion: Glas, vand, absorberende overflader og vejrlig. Ovenlysvinduer og glasfacader giver ofte fejlregistrerede punkter. Disse punkter skal frasorteres i forbindelse med udarbejdelse af en DSM eller DTM.

Vand er diffust reflekterende og hvis der eksempelvis flyves henover en sø, vil der være punkter direkte under flyvemaskinen, mens der i yderpunkterne af FOV^1 vil være færre eller ingen punkter. Af figur 4.2 ses et eksempel på en punktsky, der er blevet scannet over vand. På det øverste



Figur 4.2: Øverste billede viser et eksempel på scanning af vand, mens det nederste er et udsnit af det venstre billede. De gule punkter er indsamlet fra en flyvelinje, og de røde fra naboflyvelinjen.

billede af figur 4.2, er der vist et eksempel på en scanning af vand. Billedet viser en flyvelinje, hvor punkttætheden er størst under flyvemaskinen. Ude i kanten af FOV er der færre eller slet ingen punkter, da vandet ikke reflekterer punkterne tilbage til scanneren. Udover oversigtsbilledet, ses et udsnit nederst, hvor der er zoomet ind på punkterne. Her ses det, at der opstår huller i data, fordi vand er diffust reflekterende.

Absorberende overflader har også betydning for antallet af registrerede punkter, fx giver blanke sorte overflader dårlig refleksion [Rasmussen 2008]. Vejret har også betydning for kvaliteten af det indsamlede data, da vejr som sne og regn vil give mange fejlregistrerede punkter, som vil "hænge" i luften, da de enten er blevet reflekteret af regndråber eller snefnug. Dug vil også udgøre et problem, da jordoverfladen vil være dækket af vand, og dette er diffust reflekterende. Denne slags vejr bør således undgås igennem flyveplanlægningen.

En fejl som laserscanneren deler med andre instrumenter, der anvender laser til afstandsmåling er refraktion. For at kompensere for denne fejl opstilles en atmosfærisk model. Egenskaber og parametre for modellen er ikke tilgængelige, da modellerne er proprietære og derfor ejes af de enkelte scannerproducenter. Refraktion betyder, at strålen afbøjes når den bevæger sig igennem atmosfæren, den bevæger sig dermed længere end den teoretiske vej. For at bestemme punktet på jorden korrekt, skal strålens teoretiske vej anvendes i beregningen af koordinaterne. Dette

¹Field Of View

Kapitel 4. Faktorer med indflydelse på nøjagtigheden af ALS

betyder, at der skal korrigeres for vinkel og afstand, og dette gøres ud fra kendskab til scanningsvinklen og de atmosfæriske forhold. Ifølge [Suson 1997] er den vinkel der scannes i bestemmende for, hvor meget strålen afviger fra den teoretiske linje ved refraktion. Afvigelsen er mindst når der måles lodret, dermed bliver afvigelsen størst, når der måles i yderpunkterne af FOV. En anden fejl i forbindelse med afstandsmålingen er urfejlen. Afstandsmålingens kvalitet er i høj grad afhængig af et præcist ur, da afstanden bestemmes ud fra den tid, det tager pulsen, at returnere til scanneren. Nedenstående formel benyttes til beregning af afstanden, og her indgår lysets hastighed og tiden pulsen er undervejs, fra den sendes fra scanneren til den returnerer.

$$R = c \cdot \frac{t}{2} \tag{4.1}$$

hvor R er den målte afstand

c er lysets hastighed

t er den tid pulsen er undervejs

Hvis der ses bort fra de øvrige systematiske fejl kan afstandsmåleren i en laserscanner holde en nøjagtighed på 15 - 20 mm [Morin 2002]. En anden fejl, der skyldes en forkert registreret afstand, er multipath. Denne fejl kendes bl.a. fra GPS, hvor signalet tager en "omvej" inden den når frem til antennen. I tilfældet med laserscanning vil strålen blive afbøjet ved kontakt med et objekt, og



Figur 4.3: Principskitse af laserstrålens divergens. Skitsen er stærkt fortegnet.

først returneres efter, at have ramt et andet objekt. Dermed registreres en længere afstand, end der faktisk er, mellem scanner og objekt. Ved afstandsmåling med laser betyder laserstrålens divergens, at jo længere afstand der måles på, jo større diameter har laserstrålen når den rammer et objekt. Størrelsen af footprintet har betydning for nøjagtigheden, jo større footprint, jo mere diffust er det hvad der måles. Figur 4.3 viser en principskitse af dette. Ifølge specifikationerne



Figur 4.4: En afsendt puls kan betyde flere returpulser, hvis pulsen kun delvist rammer et objekt.

på Leica's ALS50-II scanner, har den en stråledivergens på 0,22 mrad. Ved scanning i en højde af 500 m, bliver footprintet 11 cm. Hvis flyvehøjden øges til 1500 m bliver footprintet 33 cm i diameter. Mange nyere laserscannere er i stand til, at registrere flere returpulser for hver udsendt puls. Dette er illustreret af figur 4.4, som viser en udsendt puls, der rammer vegetationen. Den del af laserstrålen, der ikke rammer vegetationen fortsætter, og rammer terrænet, som derved bliver sidste returpuls. Ved generering af en DTM anvendes punkter, som er registreret som last pulse, derved frasorteres en del af de punkter, som rammer vegetation, bygninger og andre objekter, som ikke bør indgå i DTM'en.

4.2 Scanner

Afstandsmåleren er en af komponenterne i scanneren. Inde i selve scanneren sidder komponenter, der sørger for, at laseren til afstandsmåling flyttes vha. spejle og dermed skabes scannerens FOV. Komponenterne der forårsager denne flytning af laserstrålen, og de komponenter der måler denne flytning bidrager ligeledes med fejl. De fleste kommercielle ALS-systemer benytter metoden "oscillating mirror" [Morin 2002, s. 16]. Metoden gør brug af et spejl, der er forbundet til en motor, som "svinger" spejlet frem og tilbage og derved flyttes laserstrålen i et FOV. Fordelen ved denne metode er, at laserstrålen altid er rettet mod jorden, og dette sikrer en kontinuer dataindsamling. Ulempen ved "oscillating mirror"-metoden er, at spejlets hastighed og acceleration ikke er konstant. Spejlets hastighed aftager ved yderpunkterne og dette har indflydelse på punkttætheden. Punkterne har således ikke samme afstand på jorden, men er tættest nær yderpunkterne og længst fra hinanden ved nadir. En anden faktor er accelerationen af spejlet. Spejlet sidder monteret på en stang, som er forbundet til motoren. Når der sker en acceleration vrides stangen og dette giver en uoverensstemmelse mellem spejlets faktiske vinkel, og den vinkel der registreres af scanneren, hvilket giver en positionsfejl. De omtalte komponenter kan ses af figur 4.5. I forbindelse med måling af spejlets vinkel anvendes en glasskive med et kendt antal inddelinger, samt en sensor til aflæsning af glasskiven, se figur 4.5. Hvis sensoren



Figur 4.5: Et eksempel på opbygningen af motor, spejl og vinkelmåler i en scanner, der benytter sig af "oscillating mirror". Inspireret af [Morin 2002, figur 2-10, 2-11].

ikke er monteret vinkelret på glasskiven vil dette forårsage fejl i registreringen af spejlets vinkel. I forbindelse med ALS er både flyvemaskine og spejle i bevægelse, derfor er det nødvendigt at registrere vinkel og afstand synkront. Her forekommer fejlen "encoder latency" eller indkodnings ventetid. Her indvirker spejlets hastighed på størrelsen af fejlen, hermed er fejlen mindst i yderpunkterne, hvor spejlet stopper for at køre tilbage igen. Dette betyder modsat, at fejlen er størst ved nadir, da det er midtpunktet mellem spejlets yderstillinger [Morin 2002, s. 34]. I forbindelse med georefereringen bidrager navigationssystemerne med fejl, men også scannerens montering i forhold til IMU'en har betydning. Denne type fejl kaldes "boresight error" og kan ses i overlappende data, da det giver en systematisk fejl.

I [Krabill and Wright 2000] gives et eksempel på denne fejl. Hvis der er $0,1^{\circ}$ fejl i monteringen mellem scanner og IMU, og scanningen foregår i 15° fra nadir i en flyvehøjde på 750 m betyder det en fejl i højden på 0,320 m og i planen bliver fejlen 1,130 m. Denne fejl kan nedbringes ved kalibrering af scanner og IMU.

4.3 Navigation

For at beregne koordinaterne i et referencesystem anvendes DGPS og IMU til positionsbestemmelse. Ved anvendelse af GPS er der en række fejlkilder, heriblandt de atmosfæriske forstyrrelser, som opstår når GPS-signalet skal igennem ionosfæren, stratosfæren og troposfæren. Herudover har afstanden til referencestationer i forbindelse med differentiel måling også betydning. Bestemmelsen af satellitternes position², præcisionen af satellitternes ure og geometri³ i forhold til modtageren har ligeledes en betydning for GPS-koordinaternes nøjagtighed. En del af fejlene kan nedbringes ved at måle differentielt, hvor antagelsen er, at rover og master påvirkes af de samme fejl. Masteren sender sine observationer til roveren, som beregner korrektioner, der anvendes til forbedring af positionsnøjagtigheden [Cederholm 2005].

Positionering ved hjælp af GPS alene er ikke tilstrækkelig ved ALS. GPS-systemet opererer ved 2-10 Hz⁴, hvorimod en laserscanner kører på en højere frekvens, et eksempel er Leica's ALS50-II, som er i stand til at måle med 150 kHz. Hvis flyvemaskinen i forbindelse med en scanning flyver 300 km/t, flytter flyvemaskinen sig ca. 83 m/s, og hvis DGPS bestemmer positionen 2 gange i sekundet betyder det, at der kræves interpolation af positionen over ca. 40 m. For at forbedre positionsbestemmelsen integreres en IMU i det samlede navigationssystem. En IMU er i stand til, at indsamle data med en frekvens på 200 Hz, hvilket er med til at udglatte GPS-observationerne [Morin 2002, s. 39]. IMU'en bestemmer orienteringen ved hjælp af gyroskoper og ligesom de øvrige komponenter bidrager denne også med fejl. Selvom de systematiske fejl, som akseskævhed og "drift"⁵ (engelsk), er elimineret igennem kalibreringen forårsager gyroskoperne også støj på observationerne, som er være vanskelige at fjerne [Morin 2002, s. 37].

I [Morin 2002, s. 40] gives et bud på fejlbidraget fra DGPS og IMU. Dette tal varierer alt efter udstyr og dets kalibrering, men her skulle IMU'en give en fejl i planen på 0,100 - 1,400 m. DGPS vil i planen og højden kunne give 0,050 - 0,300 m.

4.4 Terræn

I forbindelse med indsamling af data med ALS, kan forskellige terræntyper give problemer. Noget terræn giver problemer i forbindelse med efterbehandlingen af data, mens andet har direkte indvirkning på nøjagtigheden af det indsamlede data. Eksempelvis kan områder med vegetation give problemer i forbindelse med klassifikation af terræn. Ved afstandsmålingen kommer signalet retur som flere returpulser⁶, dermed anvendes sidste returpuls som terræn. Det er dog ikke sikkert sidste puls rammer terræn, men kan istedet ramme lav vegetation. Dette giver således problemer i forbindelse med filtreringen af punkter, som ikke er terræn. Ved scanning af stejlt terræn kan positionsnøjagtigheden på de enkelte punkter have stor indflydelse på nøjagtigheden af koten. Af figur 4.6 ses et eksempel på dette problem. Hældningen er angivet ved α , og fejlen forøges jo større hældning terrænet har, jf. formel 4.2.

Fejl i
$$Z = tan(\alpha) \cdot positionsfejl$$
 (4.2)

²Banefejl

³Satellitternes geometri beskrives vha. DOP (Dilution of Precision)

 $^{^4}$ Frekvensen angives i Hz, som er en forkortelse for hertz, der betyder svingninger pr. sekund 5 Drift betyder en fejl, der bliver større over tid

⁶De fleste scannere er i stand til at registrere flere returpulser fra hver afsendt laserpuls



Figur 4.6: Ved stejlt terræn betyder en positionsfejl en fejl i koten. Med inspiration fra [Hodgson and Bresnahan 2004, s. 332].

Et eksempel kunne være en fejl i planen på 1 m, med 5° terrænhældning. Dette vil give en fejl i Z på 9 cm, mens en terrænhældning på 15° giver en fejl på 27 cm.

4.5 Efterbehandling

Resultatet af dataindsamlingen er en punktsky, hvor alle punkter er georeferenceret og dermed har en X-, Y- og Z-koordinat i et referencesystem. Inden datasættet kan anvendes skal fejlskud⁷ klassificeres og indgår derved ikke ved beregningen af den interpolerede DTM eller DSM.

4.5.1 Klassifikation

I denne rapport skelnes ikke mellem begreberne klassifikation og filtrering, da de i praksis benyttes om den samme proces. Rapporten gør brug af begrebet klassifikation.

Klassifikation er segmentering af den rå punktsky i forskellige klasser, såsom terræn, vegetation og bygninger. For at opnå denne segmentering findes flere metoder, som kort vil blive beskrevet i dette afsnit. En måde at klassificere en punktsky er ved manuelt, at definere punktets klasse, men dette er en yderst tidskrævende fremgangsmåde. Derfor er der udviklet en række automatiske processer, der ved hjælp af regler bestemmer, hvilken klasse et punkt tilhører. For at anvende klassifikation skal der ifølge [Sithole and Vosselman 2003] tages stilling til disse punkter:

- Datastruktur
- Nabopunkter og antallet af punkter, der behandles ad gangen
- Klassifikations koncept
- En beregning vs. iteration
- Brug af flere returpulser og data om reflektion

Disse fem elementer vil i det følgende blive beskrevet kort, da de er essentielle i forhold til klassifikationen af punktskyen. Først og fremmest skal det klarlægges, hvilken datastruktur den

⁷Fejlregistrerede punkter, såsom fugle og punkter registreret under terræn.

Kapitel 4. Faktorer med indflydelse på nøjagtigheden af ALS

enkelte klassifikation kræver. Nogle klassifikationer kan anvendes på den rå punktsky, mens andre kræver, at data forelægger i et rasterbillede. I forbindelse med klassifikation af punktskyen tages der udgangspunkt i et eller flere punkter, hvorefter de omkringliggende punkter undersøges. Overordnet er der tre måder dette gøres på; punkt til punkt, punkt til punkter eller punkter til punkter. Ved punkt til punkt tages udgangspunkt i et enkelt punkt, hvorefter det sammenlignes med ét nabopunkt. Herefter klassificeres nabopunktet og dernæst tages der udgangspunkt i dette nyklassificerede punkt, hvorefter processen gentages. Når der anvendes punkt til punkter, tages lige som før udgangspunkt i et enkelt punkt. Forskellen er, at her undersøges flere nabopunkter fra samme udgangspunkt og de klassificeres herefter enkeltvis. Sidste overordnede fremgangsmåde er punkter til punkter. Her undersøges en gruppe af punkter, og der klassificeres flere punkter ad gangen. Klassifikationen arbejder ud fra nogle antagelser om terrænet og disse antagelser udgør klassifikationskonceptet, se figur 4.7. Den hældnings-baserede klassifikation



Figur 4.7: De fire klassifikations koncepter som forklares i teksten [Sithole and Vosselman 2003, Fig. 2.1]

fungerer ud fra bestemmelse af højdeforskellen og afstanden mellem to punkter. Først vælges et punkt, dette vil være det laveste punkt i et område. Med dette som udgangspunkt undersøges nabopunkter, og det gøres ud fra hældningen. Inden denne klassifikation fastsættes en tærskelværdi for hældningen. Dette er bestemmende for om punktet klassificeres som terræn eller overflade. Blok-Minimum klassifikationen arbejder ud fra et horisontalt plan, hvor der tillægges en buffer. Ud fra planet og bufferen dannes en 3D-blok, som indeholder punkter der tilhører terræn. Den overflade-baserede klassifikation gør brug af en parametrisk fremstilling af overfladen. Klassifikationen fungerer derefter på samme måde, som med Blok-Minimum, hvor der defineres en buffer, og punkter indenfor bufferen angiver terræn. Klassifikationen Klynge/Segmentering fungerer ud fra princippet om, at punkter i klynger i samme højde må tilhøre samme klasse.

Ved klassifikation har det ligeledes betydning, om algoritmen kører én gang, eller der anvendes iteration. Fordelen ved ikke at anvende iteration er, at der kræves mindre computerkraft end ved beregning med flere iterationer. Hertil kommer dog, at iteration er mere præcis, da der skabes mere information om de omkringliggende punkter, end ved én samlet beregning.

Laserscannere er i stand til, at registrere flere returpulser. Dette kan udnyttes i forbindelse klassifikation i skov- eller bevoksede områder. I disse områder vil første puls ofte ramme trætoppene, og de efterfølgende pulser vil gennemtrænge vegetationen. Dette kan være med til, at sikre korrekt klassificering af terrænet og overflade. [Sithole and Vosselman 2003]

Det ovenstående har beskrevet nogle generelle termer i forbindelse med klassifikation. Da der er mange variable og ubekendte i forbindelse med klassifikation af et bestemt område, vil der ikke blive opstillet fejlbidrag som følge af klassifikationen.

4.5.2 Interpolation

Interpolation er en betydningsfuld proces i forbindelse med efterbehandlingen af ALS-data. Rådata er indsamlet med en "bestemt" punkttæthed, derfor er brudlinjer og kanter på objekter ikke indmålt. Dermed kan der være stor variation i data, hvis eksempelvis en bygning scannes og der er 1 m mellem punkterne, kan et punkt på bygningens tag registreres ca. 1 m inde på taget og næste punkt registreres på jorden. Dermed kan det i de registrerede punkter se ud som om, at bygningen er mindre end det er tilfældet i virkeligheden. Et eksempel på dette problem kan ses af figur 4.8, hvor et vilkårligt objekt er scannet. Efter scanningen skal disse punkter udgøre en højdemodel, og derfor interpoleres der mellem de målte punkter. Dette giver en fejlagtig angivelse af objektet, hvilket kan betyde store afvigelser i nøjagtigheden. Dette fejlbidrag er umuligt at



Figur 4.8: Alt efter punkttætheden i modellen kan der opstå store uoverensstemmelser i forhold til det sande terræn eller overflade, som følge af interpolation.

undgå, når denne type dataindsamling anvendes. Ligesom med klassifikationen er størrelsen af dette fejlbidrag afhængig af den konkrete situation og det kan derfor ikke forudsiges, i hvilken grad dette vil påvirke nøjagtigheden af højdemodellen.

Kapitel 5

Højdemodeller i Danmark

Formålet med dette kapitel er, at præsentere de landsdækkende danske højdemodeller produceret ud fra ALS-data. Der findes to af disse højdemodeller, som er produceret af forskellige kortlægningsfirmaer. I kapitlet tages udgangspunkt i udbydernes specifikationer med særlig fokus på nøjagtighed af punktsky, DSM og DTM.

5.1 Kort & Matrikelstyrelsen

KMS´s højdemodel er produceret af underleverandører. KMS har haft produktionen i udbud, og har valgt et samarbejde mellem Scankort A/S og BlomInfo A/S til at foretage dataindsamling og produktion af deres landsdækkende højdemodel [Kort & Matrikelstyrelsen 2007a]. Derfor har KMS udarbejdet en række udbudsbetingelser, der skal overholdes af underproducenterne. Disse var offentliggjort på KMS´s hjemmeside og indeholder blandt andet; udkast til kontrakt, kravspecifikation, leverandørens løsningsbeskrivelse og kvalitetssikring m.fl., som kan opdeles i juridiske, tekniske og administrative krav. Da dette projekt omhandler nøjagtigheden af højdemodeller afledt af ALS-data jf. kapitel 2, vil den efterfølgende beskrivelse af KMS´s landsdækkende højdemodel udelukkende omhandle de tekniske krav, da disse må antages at have indflydelse på nøjagtigheden af den færdige højdemodel. I KMS´s udbudsmateriale bilag 1 [Kort & Matrikelstyrelsen 2007b] er de tekniske specifikationer for indkøbet af den digitale højdemodel beskrevet. De tekniske specifikationer omhandler bl.a. punktskyen, DTM og DSM. Specifikationerne for punktskyen, DTM og DSM vil blive behandlet i de efterfølgende afsnit.

5.1.1 Dataindsamlingen

Specifikationerne for dataindsamlingen er beskrevet i [Kort & Matrikelstyrelsen 2007b, s. 7]. Disse omhandler bl.a. størrelsen på overlappet mellem scanningslinjerne, som gennemsnitlig mindst skal være på 5 % af scanningsbredden. I praksis må det formodes, at firmaet som foretager dataindsamlingerne vælger, at lave et større overlap, for at undgå gaps¹ mellem scanningsstriberne, da flyvemaskinens stabilitet påvirkes af eksempelvis vindstød. Derudover ønsker KMS, at producenten af højdemodellen indsamler digitale flyfotos under scanningen til visualiserings- og kontrolformål. Dataindsamlingen skal foregå i den løvfri sæson, som KMS definerer mellem 15. oktober - 1. maj, men kan dog ændres af KMS afhængig af vækstsæsonens udvikling. Ligeledes må området, der scannes, ikke være dækket af midlertidige oversvømmelser, sne eller hagl. Ved at foretage dataindsamlingen udenfor vækstsæsonen må det formodes, at der indsamles flere punkter på terræn, end hvis der havde været løv på træerne, da dette vil reflektere den udsend-

¹Huller i punktskyen mellem flyvelinjerne

Kapitel 5. Højdemodeller i Danmark

te puls fra scanneren. Der vil derfor være færre punkter til brug for generering af DSM, som derfor kan blive mangelfuld, hvis denne skal anvendes til fx kortlægning af højde på bevoksning mm. Mht. til kravet om at området ikke må være dækket af midlertidige oversvømmelser, sne eller hagl, er der fra KMS ikke nævnt noget om andre nedbørsformer, som kan give en fejlagtig afstandsmåling. Et eksempel herpå kan være dug på terrænet og overfladen, da vandmolekylerne kan reflektere den udsendte puls diffust og resultere i en ukorrekt afstand mellem scanner og det tilsigtede objekt².

5.1.2 Krav til klassifikationen

Punkterne i punktskyen skal klassificeres alt efter om de indgår i DTM 'en eller DSM 'en. Derfor har KMS opsat en række kriterier for, hvilke objekttyper der skal indbefattes i hhv. DTM og DSM. Klassifikationen af objekter fremgår af bilag I. Fælles for klassifikationen af DTM og DSM er, at højst én outlier³ pr. 1000 ha. må klassificeres fejlagtigt. Dette stiller krav til den klassifikationsmetode, som producenten anvender. For at kontrollere at specifikationerne overholdes kræves det, at data bliver kontrolleret mod en model med overlegen nøjagtighed.

I klassifikationen af punkter til DTM og DSM, i områder med høj vegetation⁴ må maksimalt 1 ha. pr. 10.000 ha være fejlagtigt klassificeret. Derudover må den største sammenhængende fejl klassificeret som høj vegetation maksimalt udgøre et areal på 1 ha. Kortlægning af høj vegetation er en del af DSM'en og anvendes bl.a. til analyser indenfor telebranchen til, at vurdere telemasters mest hensigtsmæssige placering. Tilmed anvendes kortlægning af høj vegetation til, at kontrollere afstanden mellem højspændingsledninger og vegetationen under disse for at undgå kontakt.

5.1.3 Specifikationer for punktskyen

Punkttætheden i den scannede punktsky skal have en gridstørrelse på 2 m x 2 m eller mindre, og der skal minimum være ét punkt i 95 % af alle gridceller. Dette gælder alle områder i landet bortset fra vanddækkede områder, som fx søer og åer. Med et krav om minimum ét punkt pr. 2 m x 2 m er der gennem definitionen en grænse for, hvor små objekter, der kan defineres i scanningerne. Specielt kan det være problematisk, at definere menneskeskabte byggerier, såsom støjafskærmninger og dæmninger, hvis disse, grundet deres størrelse, ikke er blevet registeret under scanningen. Plannøjagtigheden i punktskyen skal være mindre end én meter fra den sande værdi, og der skal kunne bestemmes objekter større end 30 m² i både punktskyen og højdemodellen, som ikke er i niveau med omgivelserne. Disse objekter skal bestemmes med en plannøjagtighed på bedre end 2 m. Dog fritages linjesegmenter, der er mindre end gridstørrelsen, hvilket er pga. samme problemstillinger, som beskrevet mht. støjafskærmninger og dæmninger. Højdenøjagtigheden for punkter, der refererer til målt terræn, må i punktskyen maksimalt have en gennemsnitlig afvigelse på 10 cm fra sandt terræn, hvor den gennemsnitlige systematiske afvigelse er beregnet ud fra formel 5.1. Tilmed må disse punkter maksimalt have en spredning på 10 cm beregnet ud fra formel 5.2.

$$\mu = \frac{\sum \Delta h}{n} \tag{5.1}$$

 μ er den gennemsnitlige afvigelse fra sandt terræn Δ h er afvigelsen i koten

hvor

²Dette betegnes som multipath

³Målepunkter med en fejlagtig kote, dvs. punkter der ligger udenfor de gældende fejltolerancer for hhv. DTM og DSM. Outliers kan ofte detekteres visuelt [Kort & Matrikelstyrelsen 2007b, s. 5]

 $^{^4}$ Sammenhængende bevokset overflade med areal større end 16 m², med en gennemsnitshøjde > 50 cm over terræn. [Kort & Matrikelstyrelsen 2007b, s. 5]

n er antallet af testpunkter

$$\tau = \sqrt{\frac{\sum \left(\Delta h - \mu\right)^2}{n - 1}} \tag{5.2}$$

hvor

 σ er spredningen på afvigelserne

 μ er den gennemsnitlige afvigelse fra sandt terræn

 Δh er afvigelsen i koten

n er antallet af testpunkter

Højdenøjagtigheden for målt terræn må for punkter i punktskyen maksimalt afvige 40 cm fra den sande værdi, dvs. $|\Delta h_{max}| \leq 40$ cm, hvor Δh er afvigelsen i koten. Hvilket vil sige, at ingen af punkterne i punktskyen, der repræsenterer terræn må have en fejl på over 40 cm. Eftersom KMS har haft dataindsamlingen og produktionen i udbud er producenterne, som varetager opgaveløsningen nødsaget til, at overholde specifikationerne i udbudsmaterialet. Hvis punktskyen skal kontrolleres for grove fejl, dvs. en fejl i højden på over 40 cm kræver dette, at punktskyen kan blive kontrolleret mod kontrolpunkter, der er bestemt med overlegen nøjagtighed. Tilmed gælder dette krav for alle punkter i punktskyen, hvilket virker urealistisk, at overholde for en landsdækkende højdemodel.

Kravene til nøjagtigheden for punkter i punktskyen, som repræsenterer målt overflade er ringere end det er tilfældet for punkter, som repræsenterer terrænet. For punkterne, der repræsenterer overfladen, må den gennemsnitlige afvigelse fra den sande overflade maksimalt være 20 cm, jf. formel 5.1. Dette er 10 cm mere end for punkter, der repræsenterer sandt terræn. Den maksimale spredning, jf. formel 5.2, for punkter i punktskyen, som repræsenterer sandt terræn er 10 cm og den maksimale afvigelse skal være mindre end 1 meter jf. $|\Delta h_{max}|$, hvor Δh er den maksimale afvigelse til den overflade der refereres til.

Generelt er der mindre restriktive krav til nøjagtigheden for punkter i DSM'en end for punkter i DTM'en. Dette kan bl.a. skyldes, at KMS prioriterer DTM 'en højere end DSM 'en og derfor ønsker denne med en højere nøjagtighed, da terrænmodellen er specielt vigtig hvis der ses på oversvømmelsesscenarier i kystområderne. En anden grund til den ringere nøjagtighed for punkterne, der repræsenterer overfladen kan være, at der på overfladen måles på mange forskellige objekttyper. Derved kan der opstå målinger behæftet med fejl. Tilmed kan de ringere krav til DSM'en skyldes, en vurdering fra KMS om, at objekter på overfladen forandres med tiden fx pga. ændring i vegetationshøjden.

5.2 COWI

COWI har siden 2001 produceret højdemodeller på baggrund af ALS-data, hvor dataindsamlingerne er blevet udført af underleverandører i hhv. 2001 og 2006. COWI var på daværende tidspunkt ikke indehaver af en airborne laserscanner og derfor har de haft underleverandører til, at foretage dataindsamlingen på baggrund af nogle opstillede specifikationer. TopoSys var ansvarlig for dataindsamlingen i 2001, mens Optech leverede data til COWI's højdemodel i 2006. Det følgende vil tage udgangspunkt i specifikationerne for Optech datasættet.

5.2.1 Specifikationer

COWI 's målsætninger for kvaliteten er, at data skal fremtræde homogent, dog skal der minimum være en gennemsnitlig punktæthed på 0,5 pkt/m² jf. nedenstående. Derudover må der ikke
Kapitel 5. Højdemodeller i Danmark

forekomme gaps imellem flyvelinjerne. Mht. tilfældige fejl skal disse være fordelt i scanningen, mens grove fejl som fx skal fugle, ovenlysvinduer og fejlagtige refleksioner fjernes fra datasættet. Den geometriske nøjagtighed for punkterne fremgår af nedenstående, hvor der for planen og højden forventes hhv. 80 cm og 10 cm.

Nøjagtighed XY:	80 cm for veldefinerede punkter (1σ)
Nøjagtighed Z	10 cm for veldefinerede punkter (1σ)
Gennemsnitlig punkttæthed:	Min. 0.5 $\rm pkt/m^2$

Den geometriske nøjagtighed kontrolleres ved, at sammenholde de laserscannede data med kontrolpunkter og kontrolbygninger. Forekommer der grove fejl skal disse undersøges, og som udgangspunkt er sådanne fejl ikke acceptable.

Klassifikationen af punkterne i punktskyen til DTM foregår delvist automatisk ud fra parametre opsat på baggrund af terrænets kompleksitet, og tilmed er det i visse tilfælde et skøn fra operatøren, hvilke punkter der skal klassificeres som terræn. Dette kan give uoverensstemmelser i terrænmodellen, da det må formodes, at forskellige operatører har forskellige vurderinger af, hvilke punkter der tilhører terræn.

I klassifikationen til DSM accepteres det, at enkelte punkter er fejlagtig klassificeret, da COWI ikke mener dette har nævneværdig betydning for den samlede model. Eftersom COWI accepterer fejl i DSM klassifikationen, må det derfor formodes, at de punkter der ikke klassificeres til DTM automatisk indgår i DSM. Herved fås en model hvor både permanente og temporære⁵ objekter indgår i overflademodellen.

5.2.2 Dataindsamlingen

Dataindsamlingen er for COWI's højdemodeller foretaget af TopoSys og Optech, hvor dataindsamlingen for sidstnævnte er foretaget i for- og efterår 2006, samt forår 2007. Ved at foretage dataindsamlingen på disse tidspunkter, er der ingen løv på træerne. Derved er der større sandsynlighed for, at den udsendte puls fra laserscanneren kan gennemtrænge bevoksningen, og der bliver registreret et punkt på terræn. Dataindsamlingen er foretaget som følger:

Laserscanner:	Optech ALTM 3100
Scanningsfrekvens:	70.000 Hz
Flyvehøjde:	$1.600 \mathrm{meter}$
Åbningsvinkel:	$\pm 24^{\circ}$

5.2.3 Levering

Data kan leveres som punkter, grid og højdekurver i dataformater efter rekvirentens ønske. Data leveres enten som rå punktsky, hvor punkttætheden kan variere eller som interpoleret grid. Gridstørrelsen defineres efter aftale med rekvirenten, hvor det interpolerede grid enten er klassificeret som DTM eller DSM.

⁵Eksempelvis biler, høstakke og roekuler

Kapitel 6

Problemformulering

Som tidligere beskrevet har højdemodeller flere anvendelsesmuligheder både som DTM og DSM. Anvendelsesmulighederne afhænger af modellens nøjagtighed i forhold til den del af virkeligheden den repræsenterer. Derfor skal der, inden en højdemodel anvendes til en konkret opgave, laves en vurdering af specifikationerne, som udbyderne har til modellen, og om disse opfylder nøjagtighedskravene for opgaven. Specifikationerne for de to kommercielle landsdækkende højdemodeller er beskrevet i foranalysen og viser, at udbyderne har forskellige nøjagtighedsspecifikationer til hhv. DTM 'er og DSM 'er, hvor kravene til DTM er størst. Dette kan dels skyldes, at overfladen forandrer sig over tid pga. ændringer i vegetationshøjderne, og dels fordi nøjagtigheden for terrænmodellerne bliver prioriteret højere af producenterne. DTM 'er anvendes til forskellige kortlægningsopgaver, og derfor stilles der forskellige krav til DTM 'ens nøjagtighed. Foranalysen beskriver, udover udbydernes nøjagtighedsspecifikationer for højdemodellen, de faktorer i produktionen, som projektgruppen mener har indflydelse på nøjagtigheden af den færdige højdemodel. Disse faktorer kan overordnet tilskrives; afstandsmålingen, scanneren, navigationsudstyret i flyvemaskinen, efterbehandlingen samt det målte terræn.

Resultatet af dataindsamlingen er en punktsky, der er datagrundlaget for produktionen af DTM og DSM. Forskellen mellem punkterne, der anvendes til at danne DTM og DSM er, at punkterne til DSM-fremstillingen ofte er det første retursignal scanneren modtager pr. udsendt puls - first pulse. Det vil sige, at objekterne der måles til, er de højest liggende, som fx trækroner, bygningstage, broer mm., der klassificeres som overflade og anvendes i DSM'en. Til produktionen af DTM 'en anvendes den sidste returpuls - last pulse, da det må forventes at den puls der returneres sidst, reflekteres på terrænet. Imellem first og last pulse kan der, afhængig af scannertypen og objektet der scannes, returneres en eller flere pulser fra den udsendte puls. Det kan dog ikke altid forventes, at last pulse bliver reflekteret på terrænet. Dette kan skyldes, at signalet reflekteres på et objekt over terræn, som fx bygninger og tæt vegetation. Ligeledes kan den udsendte puls være udsat for multipath, hvorved den målte afstand forøges, og der bliver således registeret en måling, der ligger under det sande terræn. Derfor kan det, afhængig af området, variere hvor mange punkter der registreres på terrænet.

Derudover skal punkterne klassificeres korrekt så punkterne, der repræsenterer terrænet, identificeres i punktskyen for, at DTM'en kan fremstilles.

Det kunne være interessant, at undersøge højdemodellens nøjagtighed af forskellige terræntyper og overflader. Terræn kan have forskellig udformning og kompleksitet eller det kan være blevet ændret som følge af menneskeskabte byggerier, diger mm.. Men er der en sammenhæng mellem nøjagtigheden og terrænet?

I bebyggede områder varierer punktætheden for punkterne, der repræsenterer terrænet ligeledes, da bygninger mm. betragtes som overflade og derfor er indeholdt i DSM. Derved opstår der "huller" i data i de områder, hvor bygningerne er placeret. Disse observationer skal klassificeres som overflade og benyttes i fremstillingen af DSM'en, hvilket sker, hvis klassifikationen af punkterne

Kapitel 6. Problemformulering

i punktskyen forløber fejlfrit. Ud fra projektets foranalyse opstilles følgende problemformulering:

> "Overholder de landsdækkende højdemodeller producenternes nøjagtighedsspecifikationer og har områdetypen indflydelse på nøjagtigheden af højdemodellen?"

For at udspecificere problemformuleringen yderligere laves en problemafgrænsning for projektet. Da problemformuleringen ligger op til en række problemstillinger i forbindelse med nøjagtigheden af højdemodeller afgrænses, hvilken type højdemodel der vil blive behandlet yderligere i projektets hovedanalyse. Derfor vælger projektgruppen, at undersøge nøjagtigheden af DTM 'er fra forskellige producenter, dette gøres for at give projektgruppen mulighed for, at gennemføre en mere grundig analyse. Dermed behandles DSM ´er ikke yderligere i projektet af flere årsager. Bl.a. fordi DSM ´er ændrer sig over tid og derfor er det problematisk, at lave en vurdering, på baggrund af en kontrolmåling, der ikke er foretaget på samme tidspunkt som dataindsamlingen til højdemodellen. Tilmed har producenterne forskellige definitioner til deres DSM, hvilket forårsager forskelle mellem de to DSM er. Fx vælger Scankort og BlomInfo, at fjerne temporære objekter, såsom biler, høstakke og rockuler fra DSM en, modsat COWI, der bibeholder disse i DSM en. I modsætning til definitionerne for DSM erne er producenternes definitioner for DTM'erne ens. Derudover må det formodes, at dataindsamlingstidspunktets indflydelse på DTM'en er minimal, da det er begrænset hvor meget terrænet ændrer sig over tid. Det er dermed muligt, at måle kontrolpunkter på terrænet, i marken, med en overlegen nøjagtighed i forhold til de kommercielle DTM ´er.

Hovedanalyse

Kapitel 7

Metode

I kapitel 3 blev den generelle metode for projektet præsenteret. Dette kapitel vil omhandle den konkrete metode, hvorved projektets emne behandles. I foranalysen blev der beskrevet en række af de fejlkilder, der kan have indflydelse på nøjagtigheden af ALS-data. Herudover blev udbudsmaterialet fra KMS og specifikationerne for de to landsdækkende højdemodeller beskrevet. Projektets tema er afgrænset til at omhandle DTM'er. Derfor vil der nu blive redegjort for den metode som ønskes anvendt i hovedanalysen.

7.1 Hovedanalysens struktur



Figur 7.1: Strukturdiagram for hovedanalysen

Kapitel 7. Metode

Figur 7.1 viser hvordan hovedanalysen er struktureret. Først i hovedanalysen præsenteres metoden for, hvordan hovedanalysen opbygges og arbejdet, der vil lede frem til projektets konklusion. Hovedanalysen opdeles i to hovedbestanddele, en kontrol af højdenøjagtigheden og en kontrol af plannøjagtigheden.

I forbindelse med kontrol af højdenøjagtighed beskrives først de udvalgte kontrolområder. Områderne er udvalgt på baggrund af kapitel 4 i foranalysen, der omhandler faktorer med indflydelse på nøjagtigheden. I denne forbindelse vil det blive begrundet, hvorfor de enkelte områder er blevet udvalgt. Herudover opstilles krav til antallet af kontrolpunkterne, og ligeledes hvordan kontrolpunkterne skal indmåles. Herefter præsenteres de data, projektgruppen har modtaget fra producenterne af højdemodellerne. Databeskrivelsen er gældende både for data, der anvendes til kontrol af højdenøjagtighed og kontrol af plannøjagtighed. I samme kapitel gives en generel beskrivelse af, hvordan producenten behandler data fra indsamlingen, til processering og kontrol af data inden højdemodellen leveres til rekvirenten. Når datasættene er præsenteret laves en analyse, hvor COWI's og KMS's DTM'er sammenlignes relativt. Denne sammenligning sker på de to DTM'er. Efter den relative sammenligning af COWI's og KMS's DTM'er er udført, undersøges først hvilken højdenøjagtighed, der kan opnås i område 1 - Referenceområdet, som er en plan asfalteret flade. Analysen vil blive gennemført på baggrund af terrestrisk indmålte kontrolpunkter med en overlegen nøjagtighed. Denne analyse vil blive vurderet i fht. producenternes kravspecifikation for højdenøjagtigheden for veldefinerede flader. Når analysen af referenceområdet er gennemført, vil de resterende områder blive analyseret med henblik på hvilken højdenøjagtighed, der kan opnås i de enkelte områder. For at undgå at forskelsbehandle de to udbydere af DTM'er ved at kontrollere DTM'erne ud fra forskellige kravspecifikationer vil der ikke blive opstillet krav, der skal overholdes for kontrolområderne. Dermed vil det blot blive konstateret hvilken nøjagtighed, der opnås på baggrund af projektgruppens terrestrisk indmålte kontrolpunkter. Den primære grund til, at der ikke vil blive opstillet krav er, at der i KMS's udbudsmateriale er et krav om, at ingen interpolerede punkter må have en fejl større end 40 cm. COWI's DTM er ikke underlagt samme kravspecifikation og er udarbejdet ud fra krav om, at DTM'en har en spredning på 10 cm i højden på veldefinerede flader.

Anden del af projektets hovedanalyse er kontrol af plannøjagtigheden i ALS-data. Her udvælges kontrolpunkter der kan defineres i ALS-data og i marken. Hvorefter der beregnes differencer imellem disse. Slutteligt foretages en vurdering af den plane nøjagtighed i forhold til de specifikationer producenterne har opstillet.

Når analysen af samtlige kontrolpunkter er gennemført vil der blive konkluderet på de resultater, der er opnået igennem hovedanalysen, og problemformuleringen vil blive besvaret i konklusionen.

7.2 Arbejdsflow i hovedanalysen

Der er udarbejdet et arbejdsflowdiagram for hovedanalysen, hvilket kan ses af figur 7.2. Inden analyserne påbegyndes udvælges de områder, der anvendes som kontrolområder. Indledningsvis udvælges de typer terræn, kontrollen skal baseres på. Dette sker i henhold til de faktorer, der har indflydelse på nøjagtigheden, som er nævnt i projektets foranalyse. For at identificere kontrolområderne anvendes projektgruppens kendskab til Aalborg, samt luftfotos. Efter første udvælgelse af områder rekognoceres disse i marken, hvorefter kontrolområderne udvælges endeligt. Når områderne er valgt rekvireres data fra producenterne, og der måles kontrolpunkter i de udvalgte områder. Kontrolpunkterne indmåles terrestrisk og med en overlegen nøjagtighed ift. de kommercielle DTM'er. Når der er indsamlet kontrolpunkter og projektgruppen har modtaget data fra KMS og COWI kan selve analysen påbegyndes. Hovedanalysen er delt op i flere analyser, som er:

• Relativ sammenligning af de kommercielle DTM'er



Figur 7.2: Flowdiagram for hovedanalysen

- Kontrol af højdenøjagtighed
- Kontrol af plannøjagtighed

Første analyse er en rasteranalyse af de leverede DTM-data fra KMS og COWI. Der udarbejdes rasterkort, som viser højdeforskelle mellem de to DTM'er. Denne relative sammenligning er interessant, da den afslører om der evt. er en systematik i forskellene mellem modellerne. Ligeledes ses på størrelsen af højdeforskellene.

I kontrol af højdenøjagtighed sammenlignes de leverede DTM'er med projektgruppens kontrolpunkter. Dette sker vha. interpolation i DTM'en, hvor der regnes en difference mellem kontrolpunktets indmålte kote og den kote, der interpoleres ud fra DTM'en. Herefter præsenteres en række nøgletal for kontrollen, som projektgruppen herefter vurderer på. Da analysen undersøger højdenøjagtigheden af de kommercielle DTM'er, identificeres og fjernes evt. grove fejl ikke. Desuden er der ikke fra begge producenter opstillet nøjagtighedskrav til DTM'erne til de forskellige terræntyper, hvilket besværliggør en vurdering af, hvorvidt der er grove fejl.

Den sidste af de tre analyser omhandler plannøjagtighed. Denne analyse baseres på skæring af tagflader. Da terræn sjældent har disse skarpe kanter har projektgruppen valgt, at anvende punktskyerne til denne analyse. En måde at opnå et i marken "veldefineret" punkt er ved skæring af planer, som i dette tilfælde vil være bygningstage. Der foretages efterfølgende en terrestrisk indmåling af skæringspunkterne. Herefter foretages en vurdering af den plane nøjagtighed. Punkterne på tagfladerne udvælges visuelt i punktskyen.

Efter analyserne er færdiggjort udarbejdes en samlet konklusion på projektet.

Kapitel 8

Præsentation af områder til kontrol af højdenøjagtighed og krav til indmåling

I dette kapitel præsenteres de områder, hvor projektgruppen vil udføre højdenøjagtighedskontrol af to kommercielle DTM'er indsamlet med ALS. Kontrolområderne er udvalgt med henblik på, hvad der jf. kapitel 4 i foranalysen kan skabe problemer i forbindelse med dataindsamling med ALS. Eksempler herpå kan være stejlt terræn, bygninger mm. Kontrolområderne er udvalgt inden projektgruppen har rekvireret data fra producenterne af de kommercielle DTM'er og derfor er områderne blevet valgt, uden nogen form for forfordeling af producenterne med hensyn til scanningstidspunkt og flyvelinjernes placering i forhold til kontrolområderne.

Inden markarbejdet påbegyndes, stilles krav til nøjagtigheden af kontrolpunkterne. Dette skal sikre, at projektgruppens terrestriske opmåling har en overlegen nøjagtighed i fht. de kommercielle DTM'er, der kontrolleres. Da terrænet vil have forskellig kompleksitet er det individuelt fra område til område, hvor mange kontrolpunkter, der er påkrævet. Et eksempel herpå er, at der ved store plane arealer, som fx boldbaner og p-pladser, kræves et mindre antal punkter, end det er tilfældet for et mere komplekst område. Dette er fx klitområder ved kysten, diger og områder med bebyggelse, hvor der ofte er stor variation i terræn. Det kan derfor være interessant at vurdere, hvor mange kontrolpunkter der minimum skal indmåles. Formel 8.1 kan anvendes til at bestemme en spredning på spredningen. Ved kontrol af de kommercielle DTM'er anvendes en spredning på 10 cm for veldefinerede flader [COWI 2006] [Scankort 2007] [BlomInfo 2008]. En tommelfingerregel er, at kontrollen skal bestemmes 3 x bedre end det der ønskes kontrolleret. I vores tilfælde vil det sige ca. 3 cm.

$$\sigma_{\sigma} = \frac{\sigma}{\sqrt{2 \cdot n}} \tag{8.1}$$

hvor σ_{σ} er spredningens spredning σ er 1 x spredningen på det der ønskes kontrolleret (10 cm) n antallet af kontrolpunkter [Klenum 1965]

Hvis σ_{σ} udregnes med 20 kontrolpunkter giver dette 15 mm. Dette er dog kun 1 x spredningen, hvis dette ganges med tre giver det 45 mm. Udføres beregningen med 50 kontrolpunkter giver dette en σ_{σ} på 1 cm og 3 cm ved 3 x denne spredning. Projektgruppen vælger ud fra denne beregning, at der i hvert kontrolområde bør indmåles mindst 50 punkter. Grundet forskellig kompleksitet for terrænet og størrelse af området er det nødvendigt, at stille forskellige krav til Kapitel 8. Præsentation af områder til kontrol af højdenøjagtighed og krav til indmåling

hvor mange kontrolpunkter, der skal indmåles. Antallet af kontrolpunkter der er nødvendigt i det enkelte område, vurderes i marken. I det følgende vil hvert af projektgruppens kontrolområder blive præsenteret med kort og billeder af området. Ligeledes beskrives projektgruppens metode til indmåling af fiks- og kontrolpunkter.

Område 1 - Referenceområde

Projektgruppens område 1 anvendes som referenceområde. Til dette vælges en plan asfalteret overflade, der er fri for obstruktioner, såsom træer, bygninger mm.. Dette kan ifølge [Rasmussen 2008] og [Flatman 2008] betegnes, som en veldefineret flade. Det valgte referenceområde er en asfalteret basketballbane, på ca. 45 m x 30 m, ved Vester Mariendal Skole. Producenterne af de



Figur 8.1: Oversigtskort og billeder af område 1, 2 og 3. DDO ©COWI

landsdækkende højdemodeller, angiver højdenøjagtigheden på veldefinerede flader, som værende 10 - 15 cm [COWI 2006] [Scankort 2007] [BlomInfo 2008]. Dermed er formålet med indmålingen af referenceområdet, at undersøge om de kommercielle højdemodeller holder den højdenøjagtighed de angiver. Referenceområdet kan ses af figur 8.1. Til indmåling af kontrolpunkterne i referenceområdet etableres fikspunkter, der omslutter området. Fikspunkterne er veldefinerede punkter, såsom fx kloakdæksler, jernrør, søm mm., der indmåles to gange med RTK-måling med mindst én time mellem de to målinger. Indmålingen af kontrolpunkterne sker ved polær måling og der indmåles ca. 50 kontrolpunkter i referenceområdet.

Område 2 - Stejlt terræn

Område 2 er vist af figur 8.1, og ligger mellem vejen Over Kæret og Aalborg Changs fodboldbaner. Området består af stejlt terræn i form af en skrænt. I dette område undersøges nøjagtigheden ved store højdeforskelle indenfor et mindre areal. Jf. foranalysen kapitel 4 er det i sådanne områder, hvor horisontal displacement kan opstå. Skrænten har en hældning på ca. 35° og er bevokset med højt græs og enkelte træer. For at indmåle dette område oprettes fikspunkter på den tilstødende vej Over Kæret, og på Changs baneanlæg. Fikspunkterne indmåles to gange med minimum en times mellemrum med RTK-måling, hvorefter kontrolpunkterne bestemmes vha. polær måling med totalstation. Udover skræntens top og bund måles punkter fordelt på skrænten.

Område 3 - Lodrette spring i terrænet

Område 3 er vist af figur 8.1, og indeholder en viadukt i forbindelse med en stipassage, der går under Over Kæret mellem Vester Mariendal Skole og fodboldklubben Aalborg Changs baneanlæg. Til måling af kontrolpunkter anvendes de samme fikspunkter som ved indmålingen af skrænten og referenceområdet. Kontrolpunkterne måles ved polær måling. Områder der grænser op til begge sider af viadukten indmåles, og på begge sider måles der punkter på terrænet ovenpå viadukten. Derudover måles kanten af viaduktens betonkonstruktion.

Område 4 - Varierende vegetationshøjde

Dette område, som kan ses af figur 8.2, indeholder vegetation i forskellig højde og tæthed. Eksempler herpå kan være træer, buske og græs. Både højde og tæthed af vegetationen kan under dataindsamlingen have indflydelse på antallet af punkter på terræn, da vegetationen hindrer den udsendte puls i at nå terræn. Området, der vælges, er nord for Revlingbakken,



Figur 8.2: Oversigtskort og billeder af område 4. DDO ©COWI

hvor der er en lysning på ca. 80 m x 50 m, der er omgivet af et bælte med buske og træer. Selve lysningen er dækket af tæt græs i forskellig højde. For at indmåle kontrolpunkterne i dette område indmåles fikspunkter vha. RTK-måling, der anvendes i forbindelse med polær måling af

Kapitel 8. Præsentation af områder til kontrol af højdenøjagtighed og krav til indmåling

kontrolpunkterne. Der måles punkter på terrænet i lysningen, under trækronerne i træbælterne, samt en række punkter på den modsatte side af træbæltet.

Område 5 - Niveauforskel på terræn i forbindelse med byggeri

Dette område indeholder en bygning, hvor der på hver side af bygningen er et spring i terrænet. Eksempelvis kunne det være i forbindelse med en bygning, der er bygget ind i en skrænt, hvor der fra den ene side er indgang på 1. sal og på den anden side i stueetagen. Her kunne det være interessant, at undersøge hvordan interpolationen af terrænpunkter forløber igennem bygningen, og hvilken indflydelse denne har på nøjagtigheden, når der ikke er foretaget målinger på det fysiske terræn. Området, der vælges, er et lejlighedskompleks på Revlingbakken i Aalborg, der



Figur 8.3: Oversigtskort og billeder af område 5. DDO ©COWI

fremgår af figur 8.3, da det her er muligt at måle både for- og bagside af lejlighedskomplekset. For at indmåle kontrolpunkterne i dette område indmåles der fikspunkter vha. RTK-måling, der omkranser kontrolområdet på ca. 80 m x 40 m. Kontrolpunkter måles i området, der grænser op til hver side af bygningen.

Område 6 - ALS i forbindelse med vand

Området indeholder en sø, og her undersøges nøjagtigheden, hvor der er overgange fra terræn til vand og den interpolationen, der må formodes at forløbe henover vandet. Et sådan område findes i forbindelse med AAU, se figur 8.4, hvor en kanal går igennem AAU-området og løber ud i en sø. Kontrolpunkterne indsamles i et område på ca. 50 m x 70 m. Foruden bassinkanten i overgangen mellem terræn og vandspejl indmåles kontrolpunkter på terrænet, der grænser op

til søen. Kontrolpunkterne indmåles med polær måling, hvor fikspunkter er indmålt to gange med RTK-måling med minimum en times mellemrum.



Figur 8.4: Oversigtskort og billeder af område 6. DDO \bigcirc COWI

Indmåling af fiks- og kontrolpunkter

Indmålingen af fiks- og kontrolpunkter behandles ikke i hovedrapporten, men læseren henvises til appendiks A. Instrumenterne, der anvendes i forbindelse med indmålingen, er præsenteret i afsnit A.1, og efterbehandlingen af observationerne kan ses af afsnit A.2. Af samme appendiks kan det ses, at projektgruppen forventer at holde en spredning i højden på 14 mm ved indmåling af kontrolpunkter. Derfor må det forventes, at 99,7% af målingerne ligger indenfor 3 x spredningen, såfremt disse udelukkende er påvirket af tilfældige fejl. Dermed er højdenøjagtigheden for projektgruppens terrestriske kontrolpunkter, de kommercielle højdemodeller overlegen.

Kapitel 9

Databeskrivelse

I forbindelse med dette projekt er der rekvireret data fra KMS og COWI, og dette kapitel vil omhandle disse to datasæt. Indledningsvist gives et eksempel på dataflowet, med udgangspunkt i et diagram udarbejdet af Leica, som kan ses af bilag IV. Herefter beskrives de konkrete data og metadata, der er modtaget fra henholdsvis KMS og COWI. Der er rekvireret data for to større områder, som kan ses af oversigtskort vedlagt som bilag II. Polygonerne¹, som er vist af bilaget, er sendt med i forbindelse med datarekvireringen både i form af pdf-fil med angivelse af hjørnekoordinater, samt ArcGIS shape-filer. Yderligere er der blevet rekvireret punktsky for området fra Scankort, som er grundlaget for KMS's højdemodeller. Projektgruppens terrestrisk indmålte punkter, der anvendes til kontrol af DTM, fremgår sidst i dette kapitel.

9.1 Arbejdsflow

I forbindelse med projektgruppens besøg hos COWI Silkeborg blev der præsenteret et diagram jf. bilag IV, der ud fra dataindsamling med Leica ALS 50 beskriver arbejdsflowet fra planlægning til de endelige produkter, såsom højdemodeller og ortofotos.

Diagrammet er grundlæggende opdelt i tre faser: Planlægning, Indsamling og Processering. I diagrammet er programmerne der anvendes skrevet med blåt, disse vil dog ikke blive nærmere kommenteret eller beskrevet i denne rapport. Istedet fokuseres på selve processen, hvorved de færdige produkter fremkommer.

Når der er taget beslutning om, at et område skal laserscannes begynder planlægningen af flyvningen. Her vælges parametre, så det sikres, at den påkrævede nøjagtighed overholdes. I forbindelse med scanningen vælges flyvehøjde, scanningsfrekvens, FOV, flyvehastighed og hvordan flyvelinjerne placeres. Disse valg har indflydelse på nøjagtighed og pris. Hvis der vælges en lavere flyvehøjde skal der flyves i længere tid for at dække samme område, og derved vil omkostningerne i forbindelse med dataindsamlingen øges. Denne planlægning foretages ved, at der i et planlægningsprogram indlægges flyvelinjer og herudfra vurderes effektiviteten af de valgte flyvelinjer. Planlægningen indbefatter ligeledes oprettelsen af DGPS-referencestationer, hvis disse ikke findes i tilstrækkelig grad.

Når planlægningen er foretaget, kan dataindsamlingen begynde. Af diagrammet fremgår det, at der indsamles GPS-, IMU- og scannerdata, sidstnævnte omfatter afstand, scanningsvinkel og intensitet, samt et tidsstempel.

Efter dataindsamlingen skal data processeres, således der kan dannes en punktsky og alle punkter har koordinater i det valgte referencesystem. I den sidste fase af diagrammet foregår meget af dataprocesseringen automatisk og i "real time", hvor GPS-data fra flyvemaskinens GPS og re-

¹Data leveret indenfor polygonerne betegnes henholdsvis blok A og blok B, jf. figur II.1 og II.2

Kapitel 9. Databeskrivelse

ferencestationen bearbejdes. Der indgår ligeledes data fra IMU'en, så de faktiske flyvelinjer kan beregnes. Næste skridt er laserscannerens efterprocessering. Her skabes punktskyen ved hjælp af de beregnede flyvelinjer, samt de registrerede afstande og vinkler. I denne efterprocessering håndteres, hvilket dataformat punktskyen skal gemmes i, samt hvilket referencesystem den ligger i. Hvert punkt i punktskyen har en X-, Y- og Z-koordinat, samt en tilhørende intensitet. Dernæst anvendes et program til opdeling af data i blokke og klassifikation af punkterne, i COWI's tilfælde Microstation Terrascan. Dette udfører klassifikationen af punktskyen ud fra brugerbestemte parametre. I klassifikationen opdeles punkterne i klasser som fx; fejlskud, terræn, bygninger og vegetation. Efter denne klassifikation udfører COWI en kvalitetskontrol af klassifikationen. Herefter kan der, ud fra den klassificerede punktsky, bl.a. beregnes DTM'er, som interpoleres, så punkterne ligger i et bestemt grid.

9.2 Data fra KMS

KMS har som tidligere nævnt, købt en landsdækkende højdemodel af Scankort og Blominfo. KMS vil i den forbindelse kvalitetskontrollere højdemodellen inden den kan videresælges. De



Figur 9.1: Oversigtskort over de områder KMS har leveret DTM og flyvelinjer for.

datasæt, der anvendes i dette projekt, er endnu ikke kvalitetskontrolleret af KMS. Dette vil ikke direkte have indflydelse på projektets hovedanalyse, men i forbindelse med vurdering af resultaterne kan denne viden være. Fra KMS har projektgruppen modtaget en DTM for hvert område, samt flyvelinjer for Aalborg. Derudover har Scankort leveret punktskyen for områderne. De to datablokke indeholder henholdsvis 353.440 og 452.170 celler. Af yderligere metadata kan nævnes:

- $\bullet\,$ DTM'en er leveret i et interpoleret grid på 1,6 m x 1,6 m
- Referencesystemet er UTM Zone 32, ETRS89

• Højdesystem er DVR90

DTM'en er leveret i ESRI grid format, og punktskyen er leveret i formatet LASEdit Lidar file². Flyvelinjer er leveret i ArcGIS format, som shape-fil.

9.3 Data fra COWI

COWI har ligeledes indvilget i, at levere data til dette projekt. Udover en DTM, har COWI leveret punktskyen for samme område, samt flyvelinjer. Data er bestilt for samme områder, som bestillingen fra KMS. Omfanget af det leverede data kan ses af figur 9.2, hvor flyvelinjerne ligeledes fremgår. De to datablokke indeholder henholdsvis 639.816 og 452.170 celler. Af yderligere



Figur 9.2: Oversigtskort over de områder COWI har leveret DTM og flyvelinjer for.

metadata kan nævnes:

- $\bullet\,$ DTM'en er leveret i et interpoleret grid på 1,6 m x 1,6 m
- Referencesystemet er UTM Zone 32, ETRS89
- $\bullet~$ Højdesystem er DVR90

Højdedata leveres i ASCII-filer opbygget på samme måde som et grid med en højde for hver celle. Herudover er der angivet en koordinat i E, N for nederste venstre hjørne, samt en cellestørrelse og antallet af celler i E og N. Ud fra disse informationer kan koordinaterne i E og N bestemmes for hver celle. Punktskyen er leveret i en kommasepareret tekstfil, hvor der til hvert punkt er angivet koordinat i E, N og H, samt klassen og intensiteten. Flyvelinjer er leveret som en ArcGIS shape-fil.

²Kan åbnes i programmet "LASEdit Utility" af Cloud Peak Software

Kapitel 9. Databeskrivelse

9.4 Kontrolpunkter

I kapitel 8 er projektgruppens kontrolområder præsenteret. I disse områder indmåles kontrolpunkter i henhold til de krav, der blev stillet i samme kapitel. Af metadata omkring dette datasæt kan nævnes:

- Terrestrisk indmålte kontrolpunkter for 6 kontrolområder
- $\bullet~629$ kontrolpunkter til kontrol af højdenøjag
tighed
- 8 kontrolpunkter til kontrol af plannøjagtighed
- Referencesystemet er UTM Zone 32, ETRS89
- Højdesystem er DVR90

Oversigt over områder kan ses af kapitel 8, mens projektgruppens beregning af koordinater er behandlet i appendiks A.2, og instrumenter og fejlbidrag behandles i appendiks A.1.

Kapitel 10

Relativ sammenligning af DTM ´er en rasteranalyse

For at kontrollere de modtagne datasæt for systematiske afvigelser og få en indikation af, hvor der er uoverensstemmelse mellem de to modeller laves en relativ sammenligning af disse. Her er det muligt at se, om der er forskel på DTM'erne i de områder, hvor projektgruppen jf. områdeudvælgelsen kapitel 8 har valgt at foretage en kontrolmåling.

Den relative sammenligning foretages i ArcGIS ved, at subtrahere det ene interpolerede 1,6 m x 1,6 m raster fra det andet. Herved er det muligt, at få en visuel identifikation af, om der er uoverensstemmelser mellem de to DTM'er. Derudover visualiseres de nummeriske differencer, for at vise forskellene på de to DTM 'er uafhængig af om afvigelsen er positiv eller negativ. Det er vigtigt, at have for øje at sammenligningen af modellerne i dette kapitel er relativ, og det er derfor ikke muligt, at udlede hvilken DTM, der er mest korrekt i tilfælde af afvigelser mellem DTM'erne. De til undersøgelsen producerede rasterkort, kan ses af bilag VI og er ligeledes vedlagt på CD'en bilag VIII.

10.1 Blok A - afvigelser mellem DTM'erne

Rasteranalysen viser, hvor der er direkte afvigelser mellem de to DTM er fra hhv. KMS og COWI. Afvigelserne er inddelt i to intervaller, en mellem -2,97 m - 0 m, der er visualiseret med hvid og en fra 0 m - 5,87 m, visualiseret med sort, se figur VI.1 i bilag VI. Ses der generelt for blok A er der i den venstre tredjedel en tendens til, at den hvide farve er den mest markante, hvilket giver en indikation af, at der kan være systematiske afvigelser mellem de to DTM'er for dette område. Den hvide farve er delvist brudt af sort og formen på de sorte grupperinger antyder, at grupperingen skyldes bygninger. Den midterste tredjedel af visualiseringen er primært dækket af sort. I dette område er der primært byggeri, hvilket kan forårsage en systematisk afvigelse i den ene eller begge DTM'er. Afvigelsen er muligvis opstået under klassifikationen af punktskyen, hvor klassifikationen er forløbet på forskellig vis hos producenterne. Området i tredjedelen længst til højre, hvor Aalborg Changs baneanlæg er placeret, har en jævn fordeling af hvid og sort, hvilket tyder på, at der ikke forekommer systematiske afvigelser mellem de to modeller for dette område. Dog er der en markant sort stribe i nord-/sydgående retning. Striben dækker en østvendt skråning, der går langs Aalborg Changs baneanlæg, og jf. foranalysens kapitel 4 kan der forekomme horisontal displacement i områder med stejlt terræn. Flyvelinjerne fra KMS går i nord-/sydgående retning jf. figur 9.1, hvilket sandsynliggør at der kan forekomme horisontal displacement. COWI har mange flyvelinjer for dette område, derfor er det uvist fra hvilke flyvelinjer data er indsamlet fra, jf. figur 9.2.

Kapitel 10. Relativ sammenligning af DTM ´er - en rasteranalyse

10.2 Blok A - numeriske differencer mellem DTM'erne

Figur VI.2 i bilag VI viser de numeriske differencer mellem de to kommercielle DTM´er, hvor den hvide farve viser uoverensstemmelsen fra 0 - 10 cm, mellem de to modeller. Afvigelser fra 10 - 50 cm, 50 cm - 1 m, 1 - 4,58 m er visualiseret med hhv. grøn, gul og rød. Hovedparten af de numeriske differencer på de to modeller er mellem 0 - 50 cm, da rasterkortet har en klar overvægt af hvide og grønne celler. Det område med de mindste differencer mellem de to modeller er ved Changs baneanlæg, hvor næsten hele området er visualiseret med hvid. Dette er det samme område, som ud fra afsnit 10.1 indikerede, at der ikke var systematiske afvigelser i dette område. De gule og røde celler er fordelt jævnt over hele blokken, og det fremgår, at det specielt er i områder med bebyggelse, der er forskel på de to DTM'er. Den største gruppering af røde celler er i nederste højre hjørne. Dele af dette område indgår i et af projektgruppens kontrolområder og er en skrænt i forbindelse med en bro over jernbanen. Dette fremgår af figur 10.1, hvor det kan ses at de største afvigelser mellem modellerne er i forbindelse med broens overgang fra terræn til bro, hvilket kan være forårsaget af klassifikationsforskelle mellem de to DTM'er. De forhåndsudvalgte områder er visualiseret med lyseblå polygoner med et tal for,



Figur 10.1: Til venstre i figuren ses et udsnit af rasterkortet - afvigelse imellem modellerne. Til højre ses et ortofoto fra samme område. DDO ©COWI

hvilket område polygonen henviser til, jf bilag VI. I område 1, der er referenceområdet, betyder den hvide farve, at forskellen mellem de to DTM er er 0 - 10 cm for hovedparten af området. Dog er der få steder i referenceområdet, hvor differencen mellem de to modeller er 10 - 50 cm. I område 2 - Stejlt terræn, er der større forskelle mellem DTM ´erne end for referenceområdet. De største afvigelser mellem modellerne er for dette område fra 0,5 - 1 m, og kan eksempelvis være forårsaget af en systematisk fejl i den ene eller begge modeller. De lodrette spring i terrænet i område 3 forårsager differencer mellem de to modeller på 1 - 5,67 m, som er visualiseret med rød. De lodrette spring i terrænet i området er en viadukt, der går under vejen Over Kæret, hvor der er store højdeforskelle i terrænet inden for et mindre areal, hvilket fremgår af figur 8.1 side 34. De markante spring i terrænet kombineret med en gridstørrelse på 1,6 m kan give fejl i forbindelse med interpolation i DTM'en. Det fjerde område har varierende vegetationshøjde og som det ses af rasteret, er der i dette område primært hvide og grønne celler, hvilket betyder forskelle mellem DTM'erne på hhv. 0 - 10 cm og 10 - 50 cm. Den hvide og grønne farve er jævnt fordelt i området, med ca. 50% af hver. Polygonen der omkranser område 5 - Niveauforskel på terræn i forbindelse med byggeri, er hovedsageligt dækket af hvide celler, hvilket betyder, at der er forskelle mellem de to DTM er på 0 - 10 cm. Dog er der grupperinger i polygonen, der er visualiseret med grøn, gul og rød. Ud fra projektgruppens kendskab til området er grupperingerne placeret, hvor der i marken er bygninger, stensætninger og halvmure. Dette er steder, hvor der forekommer

niveauforskelle i højden inden for korte afstande i planen, hvilket tyder på at der kan være forskel på interpolationen eller klassifikationen i den ene eller begge DTM ´er.

10.3 Blok B - afvigelser mellem DTM'erne

Ud fra figur VI.3 i bilag VI fremgår det, at der for datablok B fra hhv. KMS og COWI er direkte afvigelser mellem de to modeller fra -3.46 m - 4.58 m, hvor afvigelserne fra -3.46 m - 0 m er visualiseret med hvid og fra 0 m - 4.58 m med sort. I rasterets øverste venstre hjørne er der tendens til, at den hvide farve er dominerende, hvilket betyder, at der er uoverensstemmelser mellem de to datasæt, der kan skyldes systematiske fejl. I området omkring biblioteket på Langagervej, markeret med en rød cirkel på figur VI.3 side 108, er der uoverensstemmelse mellem de to DTM'er i forbindelse med byggeri og volde. Med hensyn til bygningerne skal disse ifølge producenterne ikke være indeholdt i DTM ´erne, men her kan der eventuelt være sket klassifikationsfejl, således at en del af bygningerne er blevet fejlagtigt klassificeret som terræn. Volde skal derimod være indeholdt i begge producenters DTM´er, hvor de i KMS´s model skal være minimum 30 m² førend disse skal være indeholdt i DTM (en. I området markeret med en blåcirkel er der ligeledes uoverensstemmelse mellem de to DTM ´er. Det er i dette område AAU er beliggende, og ud fra de sorte grupperingers placering kunne det tyde på, at det er bygninger i AAU-området, der er blevet klassificeret forskelligt i de to DTM'er. For resten af rasteret er der ikke store sammenhængende grupperinger af hverken hvid eller sort, hvilket indikerer, at der ikke er systematiske afvigelser imellem dem.

10.4 Blok B - numeriske differencer mellem DTM'erne

Ud fra figur VI.4 i bilag VI ses de numeriske forskelle mellem de to DTM ´er, hvor der er afvigelser mellem de to DTM ´er. Overordnet set er rasteret dækket af hvide og grønne celler, hvilket betyder forskelle mellem de to DTM'er på hhv. 0 - 10 cm og 10 - 50 cm. Dog er der områder, hvor afvigelserne mellem DTM'erne er større, og derfor er visualiseret med gul og rød. Disse afvigelser er generelt placeret i områder hvor der er byggeri eller volde. Den røde gruppering markeret med en blå cirkel skyldes uoverensstemmelser mellem de to modeller i forbindelse med byggeri, da det er her AAU´s bibliotek er placeret. Biblioteket har ovenlysvinduer og derfor kan der under dataindsamlingen være blevet målt punkter, gennem ovenlysvinduerne, som derved registreres inde i bygningen. Et udsnit af området fremgår af figur 10.2. Nord for biblioteket



Figur 10.2: Til venstre i figuren ses et udsnit af rasterkort - afvigelse imellem modellerne. Til højre ses et ortofoto fra samme område. DDO ©COWI

Kapitel 10. Relativ sammenligning af DTM'er - en rasteranalyse

er der ligeledes uoverensstemmelse mellem de to DTM'er på over 1 meter, som på rasteret ses som røde buer, hvilket fremgår af figur 10.2. Ifølge ortofotoet er det volde der forårsager uoverensstemmelsen, hvilket kan skyldes, at modellerne ikke er blevet klassificeret korrekt af den ene eller begge producenter. I den nederste halvdel af rasteret ligger AAU-området, og her ses det ligeledes, at der er forskelle på DTM'erne. Forskellene er visualiseret med hhv. gul og rød, som ligger placeret, hvor der er bygninger og volde i området. Dette tyder igen på forskelle i klassifikationen af de to datasæt.

Betragtes projektgruppens kontrolområde 6, der er markeret med en lyseblå polygon, jf. bilag VI, er de største forskelle på 10 - 50 cm. Som det kan ses er der en firkantet gruppering af grønne celler i området, hvilket sandsynligvis skyldes, at vandspejlet er målt i to forskellige niveauer i de to DTM'er.

10.5 Opsamling

Denne del af hovedanalysen er udarbejdet, som en undersøgelse af forskellen på de to kommercielle DTM'er. Igennem rasteranalysen af DTM'erne er der blevet produceret to kort pr. datablok. Ud fra disse rasterkort ses det, at forskellene mellem DTM'erne er udtalte ved bygninger, halvmure, volde, skråninger og broer, som ofte giver markante spring i terrænet. De store forskelle mellem de to DTM'er kunne tyde på, at der er forskel på, hvordan producenterne klassificerer terræn.

Kapitel 11

Kontrol af højdenøjagtighed

Formålet med dette kapitel er, på baggrund af projektgruppens kontrolmåling i marken, at lave en vurdering af højdenøjagtigheden af de kommercielle DTM 'er fra KMS og COWI. Kontrollen foretages jf. metoden til hovedanalysen vha. kontrolpunkter, som projektgruppen har indmålt i forskellige områder. Den konkrete fremgangsmåde for kontrollen vil blive beskrevet nærmere i det følgende. Til kontrollen af højdenøjagtigheden er de tre datasæt fra databeskrivelsen, kapitel 9 blevet anvendt:

- Kontrolpunkter indsamlet af projektgruppen
- COWI's DTM grid for de valgte områder
- KMS's DTM grid for de valgte områder

Kontrollen består i, at finde H-koordinaten til kontrolpunkterne, ved interpolation i de kommercielle DTM'er. Dermed kan der beregnes en difference mellem koten, der er målt i marken, og koten der bestemmes ud fra DTM'en. Der findes mange forskellige interpolationsmetoder, men ifølge [Balstrøm et al. 2006, s. 220] anvendes TIN¹-interpolation ofte til præcise interpolationer. Derfor tager projektgruppen udgangspunkt i en lineær TIN-interpolation til denne analyse. Lineær interpolation i TIN vælges, da det kun er de tre nærmestliggende knudepunkter², der vil få indflydelse på den interpolerede kote. Denne metode er ifølge [Hodgson and Bresnahan 2004, s. 336] almindelig brugt. Til fremstilling af TIN anvendes Delaunay triangulering.

Kontrolpunkterne, der anvendes til denne analyse, skal have en overlegen nøjagtighed i forhold til de kommercielle DTM'er. Projektgruppen har beregnet et skøn for spredningen på 8 mm i planen og 14 mm i højden, hvilket fremgår af appendiks A afsnit A.2.1.1.

11.1 Fremgangsmåde for kontrol af højdenøjagtighed

Indledningsvist udarbejdes et MatLab-script til beregning af en Delaunay triangulering, som anvender en indbygget funktion til konstruktion af TIN. Trianguleringen beregnes ud fra de interpolerede DTM punkter, som er leveret af henholdsvis KMS og COWI. Resultatet af denne triangulering gemmes, og indlæses efterfølgende i GeoCAD.

Den lineære interpolation i trekantsnettet laves i programmet GeoCAD, som indeholder en funktion for dette. Her indlæses trekantsnettet, hvorefter kontrolpunkterne ligeledes indlæses. Geo-CAD beregner differencer mellem kontrolpunktets H-koordinat og den interpolerede H-koordinat i trekantsnettet. Herefter beregnes nøgletal for ud fra differencerne, og disse præsenteres efterfølgende for operatøren. Figur 11.1 viser outputtet fra GeoCAD. Først angives hvor mange punkter,

¹Triangulated Irregular Network

²Punkter i DTM-grid'et, TIN'et er dannet ud fra.

Kapitel 11. Kontrol af højdenøjagtighed

```
Beregning af spredninger mm. på grundlag af MULTI-FIND punkter (kort tekst3):
Antal værdier i beregningen: . . .
                                                    48
Maximum værdi (abs) før udvægtning:
                                             9000.000
Antal værdier udvægtet: . . . .
                                                    0
Minimum værdi: . . . .
                                                 -. 093
                                                  .199
Maximum værdi:
                   . . . . .
                                                 -.055
Middel af værdier:
                                                  .000
Translation (middel tal) af værdier:
Spredning på værdier: . . . . .
                                                  .070
```

Figur 11.1: Output fra GeoCAD i forbindelse med beregning af RMS/spredning efter interpolation af H-koordinater.

der indgår i beregningen, dette er vist med rødt på figuren. Den efterfølgende linje omhandler frasortering af punkter, hvor der kan fastsættes en tærskelværdi for differencen til frasortering af punkter. Dette kan anvendes til at fjerne grove fejl fra beregningen, hvis dette anvendes vises hvor mange værdier der udvægtes. I linjerne med blå og orange præsenteres den mindste og største værdi for differencerne, og i linjen med grøn tekstfarve præsenteres det beregnede middeltal. Formel 11.1 viser de formler GeoCAD anvender til beregning af spredning før og efter en evt. translation.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta_Z^2}{n}} \quad og \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta_Z^2}{n-1}}$$
(11.1)

Tallet skrevet med lilla angiver spredningen, når der ikke er foretaget en translation foregår beregningen efter formlen for RMS. Translationen foretages ud fra middeltallet, hvorefter spredningen beregnes efter formel 11.1 for σ . Da spredningen er beregnet efter der er foretaget en 1D-translation vil eventuelle systematiske fejl være blevet minimeret igennem translationen, hvis middeltallet ikke påvirkes af grove fejl.

Efter interpolationen er foretaget kan differencerne eksporteres til en tekst-fil og differencerne visualiseres herefter i ArcGIS.

11.2 Teori for kontrol af højdenøjagtighed

I indledningen til dette kapitel valgte projektgruppen, at anvende lineær TIN-interpolation til kontrol af højdenøjagtighed. Ved at anvende interpolation har knudepunkternes punktæthed i DTM'en stor betydning for nøjagtigheden af interpolationen. De kommercielle DTM'er leveres i et regulært grid på 1,6 m x 1,6 m. Projektgruppens kontrolpunkter vil derfor være placeret i umiddelbar nærhed af et knudepunkt.

Til generering af trekantsnettet anvendes Delaunay triangulering. Der er fire egenskaber, der kendetegner en Delaunay triangulering, dels er den entydig, hvilket betyder at trekantsnettet kun kan dannes på én måde og dels er den konveks. Derudover kendetegnes den ved, at hvis der laves en cirkel gennem trekantsknudepunkterne vil denne cirkel ikke indeholde andre knudepunkter. Når dette overholdes sikres det, at de trekanter der dannes er så regulære³ som muligt. Dermed interpoleres der over så korte afstande som muligt, ved at anvende denne form for triangulering. [Cederholm 2007] De fire ovenstående kriterier overholdes, hvis Delauney triangulering foretages i et irregulært net, hvilket ikke er tilfældet med de data projektgruppen har modtaget fra KMS og COWI. Ved at triangulere i et regulært net overholdes de fire karakteristika for Delauney triangulering ikke, da trianguleringen kan variere, hver gang denne beregnes, hvilket fremgår af

³Dvs. at siderne i trekanten er så tæt på lige lange som muligt



Figur 11.2: Figuren til venstre viser en Delauney triangulering i et regulært net, mens figuren til højre viser triangulering i et irregulært net.

figur 11.2. Til højre ses en triangulering foretaget i et irregulært net, hvor de fire karakteristika for en Delauney triangulering er overholdt. Til venstre ses en Delauney triangulering i et regulært net, som projektgruppen anvender. Denne triangulering overholder dog kun to af de fire karakteristika for en Delauney tringulering da:

- 1. Trianguleringen ikke er entydig, fordi punkterne ligger i et regulært net, og derfor er det tilfældigt, hvilket knudepunkt trekantens hypotenuse forbindes til. Dette fremgår af figur 11.2.
- 2. Den omskrevne cirkel til hver trekant i trianguleringen indeholder et knudepunkt mere end de tre knudepunkter trekanten er dannet ud fra. Dette er visualiseret af figur 11.2, hvor den blå cirkel i det regulære net viser, at den omskrevne cirkel gennemløber et andet knudepunkt end de tre knudepunkter, som den røde trekant er dannet ud fra. Til højre derimod, i det irregulære net, gennemløber den blå omskrevne cirkel kun de tre knudepunkter, som trekanten er dannet ud fra.

Den manglende entydighed af trekantsnettet har ikke direkte indflydelse på denne kontrol, da trianguleringen kun foretages en gang pr. DTM-datasæt. Til beregning af differencen mellem den målte kote og den tilsvarende kote i DTM'en anvendes lineær interpolation. Der bestemmes en kote til kontrolpunktet, ud fra den trekant hvori punktet er placeret. Dermed anvendes kun trekantens knudepunkter til interpolation, hvorimod andre interpolationsmetoder kan anvende flere eller alle knudepunkter til at bestemme kontrolpunktets kote. Knudepunkternes indflydelse på den interpolerede kote afhænger af afstanden fra kontrolpunktet til de tre knudepunkter. Hvis kontrolpunktet ligger tæt ved et af knudepunkterne vil knudepunktet dermed få stor indflydelse på kontrolpunktets kote og de andre knudepunkter vil få en mindre indflydelse på koten. Princippet for tildeling af vægte til knudepunkterne kan ses af figur 11.3, hvor knudepunkterne 11, 12 og 13 får tildelt vægte efter arealet af trekanterne w11, w12 og w13⁴, og ud fra vægtene og koterne til knudepunkterne bestemmes koten til kontrolpunktet a.

I de efterfølgende afsnit præsenteres og kommenteres de beregnede nøgletal for de seks udvalgte kontrolområder, jf. kapitel 8.

⁴Disse vægte kaldes de barycentriske koordinater til det interpolerede kontrolpunkt

Kapitel 11. Kontrol af højdenøjagtighed



Figur 11.3: Figuren viser knudepunktets indflydelse på kontrolpunktets kote.

11.3 Område 1 - Referenceområde

Ud fra de to lineære interpolationer af de to trekantsnet beregnes en RMS på differencerne, for de 48 kontrolpunkter, på 0,070 m og 0,068 m for hhv. KMS og COWI. Nøgletallene for område 1 kan ses af tabel 11.1.

Før translation											
		KM	[S			COV	VI				
Antal pkt.	RMS	μ	Max	Min	RMS	μ	Max	Min			
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]			
48	$\begin{tabular}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$						-0,109				
			Efter	translati	on						
		KM	IS			COV	VI				
Antal pkt.	σ	Flytning	Max	Min	σ	Flytning	Max	Min			
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]			
48	0,043	-0,055	0,254	-0,038	0,038	-0,056	0,165	-0,053			

Tabel 11.1: Nøgletal for kontrol af højdenøjagtighed for område 1.

Forskellen på RMS ´erne for de to DTM ´er i referenceområdet er 0,002 m, hvilket indikerer, at de to DTM 'er har samme absolutte nøjagtig, når der måles på plane asfalterede flader. Ses der på differencernes placering i referenceområdet jf. figur 11.4 er der en generel tendens til, for både KMS og COWI, at differencerne er med negativt fortegn, hvilket betyder at de to DTM ´er er behæftet med en systematisk fejl og derved er placeret over det sande terræn. Dog har begge modeller to punkter, med positivt fortegn, i nederste venstre hjørne. Dette kan være forårsaget af, at der er en lille bakke syd for referencefladen, som har haft indflydelse under interpolationen af 1,6 m x 1,6 m nettet i modellerne. Tilmed kan det ses af differencerne for COWI, at der er yderligere ét punkt, der har positivt fortegn. Maksimum- og minimumdifferencerne for COWI er symmetrisk omkring nul og ligger indenfor 0,218 m. For KMS er maksimum- og minimum-difference på hhv. 0,199 m og -0,093 m.

Producenternes kravspecifikationer til modellerne er jf. [COWI 2006] [Scankort 2007] [BlomInfo

2008] 10 - 15 cm på veldefinerede flader. Eftersom både [Rasmussen 2008] og [Flatman 2008] har omtalt asfalterede plane overflader som veldefinerede, kan det konkluderes, at begge producenter overholder deres kravspecifikationer for dette område. Ud fra middeltallet μ ses værdien



Figur 11.4: Figuren viser en farvegraduering af differencerne på kontrolpunkterne i referenceområdet. Kortet er ligeledes vedlagt på CD'en bilag VIII. DDO ©COWI.

af 1D-translationen, der for KMS er -0,055 m og -0,056 m for COWI. Middeltallet repræsenterer den systematiske fejl såfremt dette ikke er påvirket af grove fejl, hvilket ikke er tilfældet for dette område. Ved at udføre denne 1D-translation fås en spredning σ for KMS 's DTM på 0,043 m, hvilket er 0,027 m mindre end før translationen. For COWI bliver spredningen 0,038 m efter der er foretaget en flytning på -0,056 m. De maksimale afvigelser efter translationen er for COWI 0,165 m og 0,254 m for KMS. Eftersom producenternes kravspecifikation på 10-15 cm på veldefinerede flader [COWI 2006] [Scankort 2007] [BlomInfo 2008] anses for at være 1 x spredningen, kan det konkluderes, at begge DTM'er overholder producenternes kravspecifikationer for områder med veldefinerede flader.

11.4 Område 2 - Stejlt terræn

I dette område beregnes en RMS på differencerne af de 65 kontrolpunkter på 0,131 m i KMS 's DTM og 0,276 i COWI 's, hvilket er en forskel i den absolutte nøjagtighed på 0,145 m. KMS 's DTM har derfor en bedre absolut nøjagtighed for dette område end COWI 's. Af figur 11.5 fremgår differencerne mellem DTM 'erne og kontrolpunkterne, samt disses placering. Nøgletallene for område 2 kan fremgår af tabel 11.2.

Før translation										
		KM	IS			COV	VI			
Antal pkt.	RMS	μ	Max	Min	RMS	μ	Max	Min		
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]		
65	0,131	-0,104	0,106	-0,254	0,276	-0,158	0,087	-1,147		
			Efter	translati	on					
		KM	IS			COV	VI			
Antal pkt.	σ	Flytning	Max	Min	σ	Flytning	Max	Min		
	[[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]		
65	0,079	-0,104	0,210	-0,150	$0,\!226$	-0,158	0,245	-0,989		

Kapitel 11. Kontr	af højdenøjagtighed
-------------------	---------------------

Generelt er et flertal af differencerne for begge modeller med negativt fortegn, og differencerne er fordelt over hele området, hvilket betyder der er systematiske fejl i de to DTM 'er. Den systematiske fejl er for KMS og COWI på hhv. -0,104 m og -0,158 m, men i COWI's datasæt er der én stor difference i området der har indflydelse på middeltallet. Denne difference skyldes sandsynligvis en forskel i klassifikationen i de to DTM'er, jf. den relative sammenligning af DTM'erne kapitel 10, side 44. Den maksimale og minimale værdi på differencerne mellem KMS 's DTM og kontrolpunkterne er 0,106 m og -0,251 m for dette område.



Figur 11.5: Figuren viser en farvegraduering af differencerne på kontrolpunkterne i område 2 med stejlt terræn. Kortet er ligeledes vedlagt på CD'en bilag VIII. DDO ©COWI.

For COWI's DTM og kontrolpunkterne er den maksimale og minimale difference på 0,087 m og -1,147 m og som det fremgår af figur 11.5 er den største difference med negativt fortegn,

Tabel 11.2: Nøgletal for kontrol af højdenøjagtighed for område 2.

visualiseret med mørkeblå, placeret på fortovet. Ved en 1D-translation af de to datasæt bliver spredningen på 0,078 m for KMS og 0,226 m for COWI. Nøjagtigheden forøges af begge modeller, ved at foretage en 1D-translation, dog påvirkes COWI's DTM stadig af forskellen i klassifikationen på det ene punkt. Inden translationen har KMS en RMS på 0,131 m og efter denne er spredningen på 0,078 m, hvilket tyder på en god relativ nøjagtighed.

11.5 Område 3 - Lodrette spring i terrænet

I området med lodrette spring i terrænet er der indsamlet 240 kontrolpunkter. På baggrund heraf fås en RMS på 0,468 m for KMS 's DTM og 0,571 m for COWI's. Dette er forventeligt, eftersom der er store forskelle i terrænkoten inden for små afstande i planen i dette område. Nøgletallene for område 3 kan ses af tabel 11.3. Da trekantsnettet er dannet ud fra knudepunkter i det interpolerede 1,6 m x 1,6 m grid og kontrolpunkterne er målt, hvor der er forskel på terrænet i marken. Ud fra differencernes størrelse, mellem kontrolpunkterne og DTM 'erne, er den maksimale og minimale for KMS på 1,900 m og -1,867 m, hvilket er en forskel på over 3,5 m.

	Før translation										
	KMS					COWI					
Antal pkt.	RMS	μ	Max	Min	RMS	μ	Max	Min			
	[m]	[m]	[m]	[m]	[[m]	[m]	[m]	[m]			
240	0,468	-0,039	1,861 -1,906 0,571 -0,180 0,99				0,997	-2,611			
			Efter	translati	on						
		KM	IS			COV	VI				
Antal pkt.	σ	Flytning	Max	Min	σ	Flytning	Max	Min			
	[[m]	[m]	[m]	[m]	[[m]	[m]	[[m]	[m]			
240	0,466	-0,039	1,900	-1,867	0,542	-0,180	1,177	-2,431			

Tabel 11.3: Nøgletal for kontrol af højdenøjagtighed for område 3.

På figur 11.6, hvor differencerne er farvegradueret ud fra størrelse, er de største differencer placeret omkring viadukten. Dette skyldes betonkonstruktion omkring viaduktens udmunding, hvor der er stor forskel i terrænkoten indenfor en lille afstand i planen, hvilket vil resultere i store interpolationsfejl. Tilmed er koncentrationen af kontrolpunkterne høj i dette område, netop pga. lodrette spring i terrænet. RMS på differencerne mellem COWI s DTM og de 240 kontrolpunkter er 0,571 m, med en maksimal og minimal difference på hhv. 0,997 m og -2,611 m, hvilket ligeledes er en forskel på over 3,5 m. Ud fra figur 11.6 kan det ses, at de store differencer mellem DTM ´en og kontrolpunkterne generelt er placeret i området omkring viaduktens udmundinger, hvilket også var tilfældet for KMS's DTM. Ud fra middeltallene på -0,039 m og -0,180 for hhv. KMS og COWI foretages en 1D-translation, der efterfølgende giver en spredning for KMS på 0,466 m og 0,542 for COWI. Spredning på differencerne, mellem kontrolpunkterne og KMS's DTM bliver på 0,466 m, hvilket kun er en forbedring på 0,002 m i forhold til før translationen. Dette betyder, at den absolutte nøjagtighed ikke bliver forbedret væsentligt ved at foretage en 1Dtranslation, og at den absolutte nøjagtighed derved er så god, som det er muligt i denne type område. 1D-translationen på -0,180 m mellem kontrolpunkterne og COWI's DTM resulterer i en spredning på 0,542 m.

Kapitel 11. Kontrol af højdenøjagtighed



Figur 11.6: Figuren viser en farvegraduering af differencerne på kontrolpunkterne i området med lodrette spring i terrænet. Kortet er ligeledes vedlagt på CD'en bilag VIII. DDO ©COWI.

11.6 Område 4 - Varierende vegetationshøjde

I området med varierende vegetationshøjde er der indsamlet 81 kontrolpunkter, der benyttes til den lineære interpolation. Punkterne er målt i det åbne område samt i områder med høj vegetation, for at kunne undersøge, hvilken nøjagtighed DTM erne har på baggrund af bl.a. deres klassifikation og interpolation. Nøgletallene for område 4 kan ses af tabel 11.4.

Før translation											
	KMS					COV	VI				
Antal pkt.	RMS	μ	Max	Min	RMS	μ	Max	Min			
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]			
81	0,063	-0,001	0,144	-0,228	0,107	0,089	0,221	-0,132			
			Efter	translati	on						
		KM	IS			COV	VI				
Antal pkt.	σ	Flytning	Max	Min	σ	Flytning	Max	Min			
	[[m]	[m]	[m]	[[m]	[[m]	[m]	[[m]	[m]			
81	0,063	-0,001	0,145	-0,227	0,060	0,089	0,132	-0,221			

Tabel 11.4: Nøgletal for kontrol af højdenøjagtighed for område 4.

RMS'en for de 81 kontrolpunkter på 0,063 m for KMS og 0,107 m for COWI. KMS har altså her den bedste absolutte nøjagtighed for dette område, der endda er bedre end for referenceområdet. Den maksimale og minimale difference for KMS i område 4 er på 0,144 m og -0,228 m. Ud fra differencerne på figur 11.7 ligger disse tilfældigt placeret uanset om de har negativt eller positivt fortegn. Middeltallet viser, at KMS's DTM ikke er behæftet med systematiske fejl, mens COWI's DTM har en systematisk fejl på 0,089 m.



Figur 11.7: Figuren viser en farvegraduering af differencerne på kontrolpunkterne i området 4 med varierende vegetationshøjde. Kortet er ligeledes vedlagt på CD'en bilag VIII. DDO ©COWI.

COWI's DTM har en RMS på 0,107 m med en maksimal og minimal difference er på 0,221 m og -0,132 m. Ud fra figur 11.7 ses det, at de fleste af differencerne har positivt fortegn, hvilket kan være forårsaget af en systematisk fejl, da DTM 'en er placeret under det sande terræn. At DTM 'erne er placeret under det sande terræn, er bemærkelsesværdigt, da laserstrålen ud fra teorien har problemer med at gennemtrænge tæt vegetation. Ud fra differencerne udregnes en 1D-translation for KMS på -0,001 m og 0,089 m for COWI, hvilket medfører en spredning på 0,063 m og 0,060 m for hhv. KMS og COWI. Dette bekræfter, at KMS 's DTM ikke er påvirket af systematiske fejl. For COWI 's DTM beregnes en spredning, der er 0,047 m lavere end inden 1D-translation blev foretaget, hvilket indikerer, at modellen er behæftet med en systematisk fejl, der har indflydelse på den absolutte nøjagtighed. DTM'en har en god relativ nøjagtighed for området med varierende vegetationshøjder.

11.7 Område 5 - Niveauforskel på terræn i forbindelse med byggeri

I dette område er der målt 119 kontrolpunkter, hvilket giver en RMS på 0,299 m og 0,285 m for hhv. KMS og COWI. Nøgletallene for område 5 ses af tabel 11.5.

Før translation										
		KM	[S			COV	VI			
Antal pkt.	RMS	μ	Max	Min	RMS	μ	Max	Min		
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]		
119	0,299	-0,006	1,222	-0,989	0,285	-0,085	0,605	-1,273		
			Efter	translati	on					
		KM	IS			COV	VI			
Antal pkt.	σ	Flytning	Max	Min	σ	Flytning	Max	Min		
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]		
119	0,299	-0,006	1,228	-0,983	0,272	-0,085	0,690	-1,188		

Kapitel 11. Kontr	af højdenøjagtighed
-------------------	---------------------

Udover niveauforskel på terræn i forbindelse med byggeri er der i områdets østlige del en trappeopgang og en stensætning, der begge medfører store forskelle i terrænkoten inden for små afstande i planen. Den maksimale og minimale difference for KMS er 1,228 m og -0,983 m, og som det kan ses af figur 11.8 er de største differencer placeret i den østlige del af området, hvor trappeopgangen og stensætningen er placeret. Der vil i dette område forekomme store differencer, grundet interpolationsfejl.



Figur 11.8: Figuren viser en farvegraduering af differencerne på kontrolpunkterne i området med Niveauforskel på terræn i forbindelse med byggeri. Kortet er ligeledes vedlagt på CD'en bilag VIII. DDO ©COWI.

Den maksimale og minimale difference for COWI er 0,605 m og -1,273 m og ud fra figur 11.8 er disse ligeledes placeret i områdets østlige del. Ud fra differencerne beregnes et middeltal

Tabel 11.5: Nøgletal for kontrol af højdenøjagtighed for område 5.

på -0,006 m for KMS og -0,085 m for COWI. Middeltallene er påvirket af interpolationsfejlene i den østlige del af området, dermed kan det ikke formodes, at middeltallet repræsenterer den systematiske fejl. Foretages der en 1D-translation beregnes en spredning for KMS ´s og COWI ´s DTM på hhv. 0,299 m og 0,272 m. Efter 1D-translantionen forbliver spredningen for KMS ´s differencer uændret, mens spredningen på COWI ´s differencer bliver forbedret med 0,013 m, hvilket er en minimal forbedring.

11.8 Område 6 - ALS i forbindelse med vand

I dette område er der indsamlet 76 kontrolpunkter omkring en sø i AAU-området. Figur 11.9 viser differencerne og af tabel 11.6 ses nøgletallene for dette område. Ud fra de 76 kontrolpunkter beregnes en RMS for KMS 's DTM på 0,275 m, med en maksimal og minimal difference på hhv. 0,460 m og -0.984 m.



Figur 11.9: Figuren viser en farvegraduering af differencerne på kontrolpunkterne i området, hvor der er foretaget ALS i forbindelse med vand. Kortet er ligeledes vedlagt på CD'en bilag VIII. DDO ©COWI.

For COWI beregnes RMS 'en til 0,234 m for de 76 kontrolpunkter, hvor den minimale og maksimale difference er på 0,376 m og -1,045 m. Ud fra differencerne udregnes et middeltal for KMS's DTM på -0,010 m og laves der en 1D-translation, beregnes en spredning på 0,275 m. Derved er spredningen uændret på trods af, at der foretages en 1D-translation, hvilket betyder at den systematiske fejl ikke har indflydelse på nøjagtigheden. For COWI's DTM beregnes 1D-translationen til -0,051 m og efter denne er udført er spredningen på 0,228 m.

Før translation										
	KMS					COV	VI			
Antal pkt.	RMS	μ	Max	Min	RMS	μ	Max	Min		
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]		
76	0,275	0,010	0,460	-0,984	$0,\!234$	-0,051	0,376	-1,045		
			Efter	translati	on					
		KM	IS			COV	VI			
Antal pkt.	σ	Flytning	Max	Min	σ	Flytning	Max	Min		
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]		
76	$0,\!275$	0,010	0,450	-0,994	$0,\!228$	-0,051	0,427	-0,994		

Kapitel 11. Kontrol af højdenøjagtighed

Tabel 11.6: Nøgletal for kontrol af højdenøjagtighed for område 6.

11.9 Generelle tendenser

På baggrund af de seks kontrolområder er der nogle generelle tendenser der viser sig, og som er gennemgående for kontrolområderne. I tabel 11.7 er der en generel tendens til, at middeltallet, i alle områder, for de to DTM ´er med negativt fortegn. Dette indikerer, at der er en systematisk fejl i forbindelse med dataindsamling med ALS, der benyttes i DTM ´er, hvis middeltallene ikke er påvirket af grove fejl. Fejlen kan eventuelt være forårsaget af mangelfuld kalibrering af hardwaren

			KMS				COWI			
	Antal pkt.	RMS	μ	Max	Min	RMS	μ	Max	Min	
		[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	
Område 1	48	0,070	-0,055	0,199	-0,093	0,068	-0,056	0,109	-0,109	
Område 2	65	0,131	-0,104	0,106	-0,254	0,276	-0,158	0,087	-1,147	
Område 3	2 4 0	0,468	-0,039	1,861	-1,906	0,571	-0,180	0,997	-2,611	
Område 4	81	0,063	-0,001	0,144	-0,228	0,107	0,089	0,221	-0,132	
Område 5	119	0,299	-0,006	1,222	-0,989	0,285	-0,085	0,605	-1,273	
Område 6	76	0,275	0,010	0,460	-0,984	$0,\!234$	-0,051	0,376	-1,045	
Samlet	629	0,335	-0,032	1,861	-1,906	0,395	-0.100	0,997	-2,611	

Tabel 11.7: Nøgletal for absolut sammenligning.

i flyvemaskinen. I KMS 's DTM er der en generel tendens til, at en 1D-translation ikke har den store indflydelse på spredningen, hvilket tyder på en lille systematisk fejl i DTM 'en, jf. tabel 11.8. For COWI 's DTM har en 1D-translation i alle områder en positiv indflydelse på spredningen. Dette tyder på en systematisk fejl, der kan nedbringes betydeligt ved translation. Ses der samlet

			KMS				COWI			
	Antal pkt.	σ	Flytning	Max	Min	σ	Flytning	Max	Min	
		[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	
Område 1	48	$0,\!043$	-0,055	0,254	-0,038	0,038	-0,056	$0,\!165$	-0,053	
Område 2	65	$0,\!079$	-0,104	0,210	-0,150	0,226	-0,158	$0,\!245$	-0,989	
Område 3	240	0,466	-0,039	$1,\!900$	-1,867	0,542	-0,180	$1,\!177$	-2,431	
Område 4	81	0,063	-0,001	0,145	-0,227	0,060	0,089	$0,\!132$	-0,221	
Område 5	119	$0,\!299$	-0,006	1,228	-0,983	0,272	-0,085	$0,\!690$	-1,188	
Område 6	76	$0,\!275$	0,010	$0,\!450$	-0,994	0,228	-0,051	$0,\!427$	-0,994	

Tabel 11.8: Nøgletal for absolut sammenligning efter translation.

på de 629 kontrolpunkter for de seks områder fås en RMS herfor på 0,335 m og 0,395 m for hhv. KMS og COWI, jf. tabel 11.7. Middeltallet af differencerne for de 629 kontrolpunkter er -0,032 m for KMS. At middeltallet har negativt fortegn er ikke overraskende, jf. figur 11.10, der er et histogram over differencerne. Her fremgår det, at hovedparten af differencerne har negativt fortegn hvoraf den største part, på ca. 350, er fra -0,2 - 0 m. Dette tyder på, at selvom eventuelle fejlbehæftede punkter udelades, er der stadig tendens til en negativ systematisk fejl. For de



Figur 11.10: Figuren viser et histogram for differencerne af de 629 kontrolpunkter, der er interpoleret i KMS 's DTM.

629 differencer for COWI er middeltallet -0,100 m. Betragtes figur 11.11 er der en tendens til at hovedparten af differencerne er med negativt fortegn med den største part mellem -0,2 - 0 m. Dette tyder på, at selvom eventuelle fejlbehæftede punkter udelades, er der stadig tendens til en negativ systematisk fejl. Ud fra de datasæt, der anvendes i denne analyse undersøger projektgruppen om terrænets hældning har indflydelse på differencens størrelse. Denne analyse fremgår af appendiks B.




Figur 11.11: Figuren viser et histogram for differencerne af de 629 kontrolpunkter, der er interpoleret i COWI's DTM.

Kapitel 12

Kontrol af plannøjagtighed

Formålet med dette kapitel er, at undersøge plannøjagtigheden af ALS-punkterne. Dette kan undersøges på flere måder, hvor to af disse fremgår af figur 12.1. Til venstre på figuren ses to bygninger, som ligger vinkelret på hinanden. For hver bygning beregnes en skæring af tagfladerne, dette giver en linje, der repræsenterer bygningens tagryg. Skæringspunktet for disse linjer beregnes, hvorefter samme punkt defineres i marken og indmåles terrestrisk. Det terrestrisk indmålte punkt og punktet beregnet ved skæring af linjer, kan herefter anvendes til kontrol af plannøjagtigheden. Problemet med denne metode er, at det kan være besværligt, at definere punktet i marken afhængig af afstanden mellem husene. Den anden mulighed, som ses til højre på figur 12.1, er at finde sadeltage med valmede gavle, hvor der kan dannes planer ud fra tre tagflader, og derefter beregnes et skæringspunkt. Denne metode kan give problemer med at definere punktet ved en terrestrisk indmåling af punktet, men projektgruppen vurderer, at denne metode vil give en bedre nøjagtighed end den anden. Derfor vælger projektgruppen at anvende



Figur 12.1: Til venstre ses metoden, hvor kontrolpunktet findes ved at to linjer der repræsenterer tagryggene skæres. Til højre ses metoden, hvor kontrolpunktet befinder sig i skæringen mellem tre tagflader ved et sadeltag med valmet gavl.

metoden med sadeltage med valmet gavl i denne analyse. Dette valg understøttes yderligere af, at et forskningsprojekt fra EuroSDR, anvender samme metode [Höhle and Potuckova 2007, s. 33-34]. Ved at anvende denne metode kræves, at der findes punkter på bygningstagene. Derfor kan DTM'erne ikke anvendes i denne analyse. Ved at anvende punktskyen i stedet for DTM'en

Kapitel 12. Kontrol af plannøjagtighed

fås både punkter på terræn og overflade. Dermed kan punktskyen anvendes til, at kontrollere den plane nøjagtighed. For at kunne udføre denne kontrol kræves, at skæringspunkterne bestemmes med en overlegen nøjagtighed. Den plane nøjagtighed for højdemodellerne er jf. producenternes specifikationer på 80 cm, hvilket er 1 x spredningen for COWI's højdemodel og for KMS's højdemodel gælder det, at objekter skal angives med en plannøjagtighed på maksimalt 2 m. Derfor antages det, at de 2 m KMS definerer som maksimal værdi for den plane nøjagtighed repræsenterer 3 x spredningen og dermed antages 1 x spredningen, at være 67 cm for KMS's højdemodel. Yderligere antages det, at KMS og COWI anvender en anden definition for punktspredningen end der anvendes i dette projekt. Derfor skal denne omregnes for at være sammenlignelig med den projektgruppen anvender. Det antages at KMS og COWI anvender formel 12.1 og i dette projekt anvendes, som nævnt i kapitel læsevejledning, formel 1. Forskellen mellem de to definitioner af spredningen i planen er $\sqrt{2}$, og derfor omregnes KMS's og COWI's spredning i planen ved at dividere disse med $\sqrt{2}$. Dermed er KMS's spredning i planen ca. 47 cm og COWI's spredning i planen beregnes til ca. 57 cm.

$$\sigma_{EN} = \sqrt{\sigma_E^2 + \sigma_N^2} \tag{12.1}$$

Til indmåling af skæringspunkter vælges polær måling, da der ved anvendelse af denne metode kan forventes en spredning i planen på 51 mm jf. appendiks A.2.2. Til denne analyse anvendes følgende data:

- Punktsky fra COWI
- Punktsky fra Scankort
- Kontrolpunkter indsamlet af projektgruppen

For at vurdere om et bygningstag er egnet til kontrol af den plane nøjagtighed af ALS-data vælger projektgruppen, at der skal være mindst 20 ALS-punkter på de tagflader, der dannes et plan ud fra. Dette tal vælges ud fra testberegninger med et forskelligt antal af punkter. Ligeledes er det med i overvejelsen, hvor mange punkter, der er målt på tagfladen. Et udvalgt bygningstag med ALS-punkter kan ses af figur 12.2. Selve udvælgelsen af bygningstage foretages i GeoCAD



Figur 12.2: Her ses et udvalgt bygningstag til kontrol af plannøjagtigheden. Til venstre ses bygningstaget med COWI's punkter og til højre ses bygningstaget med KMS's punkter på.

på baggrund ortofotos, hvor sadeltag med valmet gavl identificeres og her kontrolleres, at der findes ca. 20 punkter på hver tagflade. Derefter indlæses punkterne fra punktskyen i MicroStation, hvor det er muligt at se punkterne i forskellig perspektiv, og dermed kan de punkter, der repræsenterer bygningstaget udvælges og eksporteres. Herefter indlæses punkterne i MatLabscriptet planberegning.m, hvor skæringen beregnes ud fra de givne punkter. En beskrivelse af

scriptet kan ses af appendiks C og selve scriptet er vedlagt på CD'en bilag VIII. I forbindelse med beregningen af skæringspunkterne i MatLab er der blevet beregnet konfidensellipser for skæringen af de tre planer. Beregningerne for disse fremgår ligeledes af scriptet og beregningsmetoden er beskrevet i appendiks C. Et plot af konfidensellipserne på de bygningstage de repræsenterer fremgår af bilag VII. Størrelsen af konfidensellipsen angiver hvor godt skæringen er bestemt, og formen angiver i hvilken retning skæringen er bedst bestemt. Dvs. hvis konfidensellipsen er cirkulær vil skæringspunktet være bestemt lige godt i begge retninger, men hvis konfidensellipsen ikke er cirkulær vil den være bestemt bedre i en retning end den anden retning. Dvs. skæringen er bedst bestemt i lilleaksens retning og dårligst bestemt i storeaksens retning. Typisk vil en skæring hvor planerne går vinkelret på hinanden være bestemt bedre end skæringer hvor vinklen ikke er ret. Figur 12.3 er en principskitse i 2D, hvor der til venstre bestemmes en skæring af to planer, der står vinkelret på hinanden og i midten og til højre er vist eksempler på ellipsens form ved stump og spids vinkel. Når konfidensellipserne betragtes er det vigtigt at huske, at der er 39% sandsynlighed for at skæringspunkter ligger inden for denne ellipse [Cederholm 2000, s. 54]. Konfidensellipserne for skæringspunkterne for KMS's datasæt er



Figur 12.3: Her ses en skite af hvordan konfidensellipser vil se ud ved forskellige hældninger på bygningstage.

generelt cirkulære, hvilket indikerer, at bestemmelsen af skæringen er lige god i begge retninger. Den mindste konfidensellipse er cirkulær og har en halve stor- og lilleakse på ca. 3 cm og den fremkommer ved Skæring 1, jf. bilag VII. Den største konfidensellipse for skæringspunkterne for KMS's datasæt er Skæring 3's konfidensellipse. Denne har en halve storakse på ca. 8,5 cm og en halve lilleakse på ca. 5 cm. Konfidensellipserne for skæringspunkterne for COWI's datasæt varierer mere end KMS's. Den mindste konfidensellipse for COWI's datasæt er for Skæring 8, og har en halve storakse på ca. 7 cm, og en halve lilleakse på ca. 5,5 cm. Den største konfidensellipse for COWI's datasæt er for Skæring 2, og har en halve storakse på ca. 45 cm, og en halve lilleakse på ca. 11 cm. Denne skæring er et eksempel på en skæring der klart er bedre bestemt i en retning end en anden.

12.1 Beregning af skøn for spredningen på skæringskoordinaten

Ved at beregne et skøn for spredningen på skæringskoordinaten kan det vurderes, hvor nøjagtigt denne bestemmes. En måde at beregne et skøn for spredningen på skæringskoordinaten er, at bestemme denne ud fra et stort antal målinger af det samme punkt. Da punktet bliver bestemt ud fra tre tagflader er det disse, der skal indmåles gentagne gange. Bygningstagene er kun indmålt med ALS én gang pr. producent, og derfor er det kun muligt, at beregne skæringskoordinaten én gang. For at kunne beregne et skøn for spredningen tillægges et tilfældigt tal i et bestemt interval til z-værdien for punkterne, der indgår i planet. På denne måde simuleres et antal opmålinger af samme bygningstag, og dermed kan der beregnes et skøn for spredningen i planen. Det interval de tilfældige tal vælges ud fra, er den spredning som ville være opnået, hvis tagfladen var blevet indmålt med ALS gentagne gange. Projektgruppen vælger her, at benytte den relative

Kapitel 12. Kontrol af plannøjagtighed

nøjagtighed, der opnås i referenceområdet fra kontrol af højdenøjagtighed, jf. kapitel 11. Den relative højdenøjagtighed for referenceområdet er hhv. 38 og 41 mm for de to kommercielle højdemodeller. Et bygningstag har ikke samme plane overflade, som en asfalteret boldbane. Projektgruppen vurderer, at spredningen ved indmåling af tagfladen er 20 mm, som følge af den bølgede overflade. På baggrund af den relative højdenøjagtighed for referenceområdet defineres spredningen til 40 mm, hertil tillægges en spredning på 20 mm. Ved at anvende den simple fejlforplantningslov beregnes en samlet spredning på 45 mm, som udgangspunktet for det interval de tilfældige tal udvælges fra i beregningen. For at få et realistisk skøn for spredningen på skæringspunktet tillægges de tilfældige værdier efter en normalfordelingskurve, så 68,3% af de tillagte værdier ligger inden for 1 x spredningen (± 45 mm) og 95,5% inden for 2 x spredningen og 99,7% inden for 3 x spredningen. For at få et skøn for spredningen på skæringspunktet beregnes skæringen 10.000 gange for et bygningstag, der har 20 punkter på det ene plan og 50 punkter på hhv. det andet og tredje plan, se figur 12.4. Resultatet af denne analyse er, at skønnet for spredningen i planen bliver 15,7 cm, hvilket er en overlegen spredning i forhold til de 47 cm, som er det KMS's terrænmodel holder i planen og de 57 cm COWI holder i planen jf. [COWI 2006] [Scankort 2007]. Beskrivelse af beregningerne af skøn for spredningen i planen for skæringspunkterne fremgår af appendiks C.



Figur 12.4: Figuren viser fordelingen af punkter på et sadeltag med valmet gavl, anvendt til beregning af skøn for spredningen i planen for skæringskoordinaten.

12.2 Vurdering af plannøjagtighed

Når skæringspunkterne er beregnet, og kontrolpunkterne er indmålt terrestrisk, kan det vurderes om de to ALS-datasæt overholder den plannøjagtighed som producenterne angiver. For at give et overblik er afvigelsen i hhv. E og N og den plane afvigelse for de to højdemodeller opstillet i tabel 12.1. Koordinater fra skæringsberegningen og kontrolmålingen kan ses på den vedlagte CD'en bilag VIII. Som det ses af tabellen er der ingen afvigelser, der overstiger 3 x spredningen på hhv. 1,41 m for KMS og 1,71 m for COWI. Den største afvigelse for KMS er 1,06 m og den største afvigelse for COWI er 0,97 m. Den mindste afvigelse for KMS er 0,11 m og for COWI 0,21 m. Det er bemærkelsesværdigt, at den samme skæring har den største og mindste afvigelse for de to punktskyer. For KMS ligger 6 af 8 afvigelser inden for ± 1 x spredningen og de sidste 2 af 8 afvigelser ligger mellem $\pm 1 - 2$ x spredningen, så der er ikke noget der antyder, at der er grove fejl. Det samme gør sig gældende for COWI, hvor 6 af 8 afvigelser ligger inden for ± 1 x spredningen og de sidste 2 af 8 afvigelser ligger mellem $\pm 1 - 2$ x spredningen. Ud fra de 8 differencer er der beregnet en spredning. Spredningen må forventes, at være af samme størrelse

	Difference KMS		Diffe	rence	Difference i		
Skæringsnr.			CO	WI	planen		
_	E	N	E	N	KMS	COWI	
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	
Skæring 1	0,54	-0,06	-0,35	-0,14	0,54	0,38	
Skæring 2	0,73	0,07	0,04	0,83	0,73	0,83	
Skæring 3	-0,06	0,09	-0,10	0, 19	0,11	0,21	
Skæring 4	0,33	0,06	0,47	-0,05	0,34	0,47	
Skæring 5	-0,27	0,24	-0,27	0,23	0,36	0,35	
Skæring 6	-0,33	0,09	-0,39	0,25	0,34	0,46	
Skæring 7	-0,34	0,02	-0,33	-0, 19	0,34	0,38	
Skæring 8	-0,72	0,78	-0,74	0,62	1,06	0,97	
				σ	0,59	0,60	

Tabel 12.1: Her ses differencerne mellem ALS-bestemte skæringspunkter og de terrestrisk indmålte kontrolpunkter i hhv. E, N og planen.

som de spredninger producenterne har angivet. I dette tilfælde er spredningen for KMS 59 cm og her forventes en spredning på 47 cm. For COWI er spredningen 60 cm, og der forventes en spredning på 57 cm. Resultatet af denne analyse er, at ingen af de to datasæt overholder producenternes specifikationer. KMS er 12 cm ringere end forventet og COWI er 3 cm ringere end forventet. Da denne analyse kun bygger på 8 kontrolpunkter kan der ikke konkluderes noget endeligt.

Hvis de plane differencer for de to ALS-datasæt betragtes i forhold til kontrolpunkterne fremgår det, at de følger hinanden og den største difference på skæringspunkterne mellem de to punktskyer er 0,16 m ved skæring 1. Dette kunne tyde på, at dataindsamlingen er påvirket af samme type fejl af samme størrelsesorden. Dette understøttes af, at der, for både KMS og COWI, er nord-/sydgående flyvelinjer, og hvis det er disse, der er anvendt til dataindsamlingen kan dette være årsagen til, en form for systematik i afvigelserne. Det kan dog ikke konkluderes med sikkerhed, at COWI har anvendt disse flyvelinjer til dataindsamling i projektgruppens områder, da der er flyvelinjer i forskellige retninger. For at undersøge systematikken yderligere er afvigelsen i hhv. E, N og planen mellem de to ALS-datasæt opstillet i tabel 12.2. Som det fremgår af tabellen

Skæringsnr.	Differe	ence mellem	Plan difference				
	KMS	og COWI					
	E	N					
	[m]	[m]	[m]				
Skæring 1	$0,\!89$	0,08	0,89				
Skæring 2	$0,\!69$	-0,76	1,03				
Skæring 3	0,04	-0,10	0,11				
Skæring 4	-0,14	0,11	0,18				
Skæring 5	0,00	0,01	0,01				
Skæring 6	0,06	-0,16	0,18				
Skæring 7	-0,01	0,21	0,21				
Skæring 8	0,02	0,16	0,16				

Tabel 12.2: Her ses differencerne i hhv. E, N og planen mellem de to kommercielle højdemodeller.

er der især systematik ved Skæring 5, hvor skæringspunktetets E-koordinater er identiske og kun varierer med 1 cm i N. For at visualisere om der er systematik i differencerne, er fejlvektorer for de 8 skæringer indtegnet på et ortofoto, hvilket fremgår af figur 12.5 side 66 og figur 12.6 side 67. Ud fra figur 12.5 er der ikke umiddelbart nogen form for systematik. Hvis KMS's fejlvektorer betragtes fremgår det, at disse ikke er af samme størrelse og ikke har samme retning. Det samme gør sig gældende, hvis COWI's fejlvektorer betragtes. Hvis de to fejlvektorer for den samme

Kapitel 12. Kontrol af plannøjagtighed

skæring betragtes fremgår det, at de er af ca. samme størrelse, men ikke har samme retning. Der er dermed ikke grundlag for at konkludere, at der er systematiske fejl for blok A i denne analyse. Hvis blok B betragtes, er der en tendens til, at KMS's fejlvektorer har retning mod nordvest. Bortset fra en enkelt, der peger mod øst. Størrelsen på KMS's fejlvektorer varierer meget, og der er ikke grundlag for at konkludere, at der er systematiske fejl for KMS i blok B. Det samme gør sig gældende for COWI's fejlvektorer i blok B. Dog er der for COWI en større forskel på retningen af vektorerne. Hvis fejlvektorerne for den samme skæring betragtes, ses det, at de alle har tilnærmelsesvis samme retning og størrelse. Dette underbygger formodningen om, at data er indsamlet fra flyvelinjer, der går i samme retning, og dermed kan være påvirket af den samme type fejl for blok B. Selvom data er indsamlet fra ens flyvelinjer, er det ikke ensbetydende med, at de vil blive påvirket af de samme fejl, så det kan være tilfældigt, at fejlvektorerne for de enkelte skæringer er af samme størrelse og har samme retning.



Figur 12.5: Her ses skæringernes fejlvektorer for projektgruppens blok A. De gule vektorer er for KMS's skæringer og de røde er for COWI's skæringer. Der er foretaget en skalering af fejlvektorerne med faktor 100. Målestok ukendt. DDO ©COWI



Figur 12.6: Her ses skæringernes fejlvektorer for projektgruppens blok B. De gule vektorer er for KMS's skæringer og de røde er for COWI's skæringer. Der er foretaget en skalering af fejlvektorerne med faktor 100. Målestok ukendt. DDO ©COWI

Kapitel 13

Konklusion

Formålet med konklusionen er, at besvare projektets problemformulering, der er følgende:

"Overholder de landsdækkende højdemodeller producenternes nøjagtighedsspecifikationer og har områdetypen indflydelse på nøjagtigheden af højdemodellen?"

For at besvare problemformuleringen valgte projektgruppen, at foretage en relativ sammenligning af de to landsdækkende DTM'er. Af denne analyse fremkom det, at den maksimale forskel mellem de to DTM'er på er 5,67 m. Afvigelsen skyldes forskelle i klassifikationen for de to producenter i forbindelse med en bro over en jernbane. Generelt er der maksimalt en forskel på 50 cm på områder, hvor der ikke er objekter, der skal klassificeres som overflade fx bygninger. Dermed kan det konkluderes, at der forekommer mindre forskelle i områder med naturligt terræn, end i områder med menneskeskabte terrænændringer som fx bygninger og skrænter.

Dernæst blev der gennemført en analyse af højdenøjagtigheden for DTM'erne. For at undersøge DTM'erne under idéelle forhold blev der først gennemført en analyse af en plan asfalteret boldbane, denne blev i analysen anvendt som referenceområde. For referenceområdet beregnes en RMS på KMS's DTM på 7,0 cm og 6,8 cm for COWI's DTM. Dette er under producenternes specifikationer for veldefinerede områder, der er på 10-15 cm. Der er derudover ingen afvigelser i dette område på mere end 3 x spredningen, og det kan dermed konkluderes, at DTM'erne overholder producenternes specifikationer for veldefinerede områder. Efterfølgende blev der udført samme analyse på fem kontrolområder, hvor det var forventet, at der ville opnås en ringere højdenøjagtighed af DTM'erne. Den største RMS fremkom for kontrolområde 3, der indeholder en viadukt, hvor der er lodrette spring i terrænkoten. RMS'en for dette område er på hhv. 46,8 cm for KMS's DTM og 57,1 cm for COWI's DTM. Dette er ikke overraskende, da DTM'erne består af interpolerede punkter i et 1,6 m x 1,6 m grid. I kontrolområde 5 er der ligeledes en høj RMS, på hhv. 29,9 cm for KMS's DTM og 28,5 cm for COWI's DTM. I dette kontrolområde findes der, som i kontrolområde 3, lodrette spring i terrænkoten, hvilket er årsag til den høje RMS. Generelt er RMS'en for de to DTM'er på samme niveau for samme områdetyper, og det er især i områder med lodrette spring i terrænkoten der fremkommer en høj RMS. Udover en RMS for hvert område blev der beregnet en spredning efter en 1D-translation af målingerne for hvert kontrolområde. Den udregnede spredning er den relative nøjagtighed af DTM'erne. Generelt er den relative nøjatighed for DTM'erne god, når 1D-translationen ikke påvirkes af store enkeltstående fejl, som der findes i fx kontrolområde 3 og 5. I kontrolområde 4, der omfatter et areal med varierende vegetationshøjde er den relative nøjagtighed hhv. 6,3 cm for KMS's DTM og 6,0 cm for COWI'S DTM. Generelt kan det konkluderes, at hvis der ikke findes solide objekter, der skal klassificeres som overflade i området opnås en god nøjagtighed, men især i

Kapitel 13. Konklusion

områder hvor der er lodrette spring i terrænet, er der store fejl i DTM'erne. Den samlede RMS for de 629 kontrolpunkter er 33,5 cm for KMS's DTM og 39,5 cm for COWI's DTM. Efterfølgende blev den plane nøjagtighed analyseret. I denne analyse anvendes punktskyen i modsætning til de tidligere analyser, hvor de interpolerede punkter blev anvendt. Analysen er baseret på 8 kontrolpunkter og resultatet af analysen er, at KMS's højdemodel har en spredning på 59 cm i planen og COWI's højdemodel har en spredning i planen på 60 cm. Den forventede spredning for de to højdemodeller var hhv. 47 cm for KMS's og 57 cm for COWI's. Dermed overholder ingen af højdemodellerne producenternes højdenøjagtighedskrav. Det er dog bemærkelsesværdigt, at 6 af de 8 kontrolpunkter for begge modeller har en difference på mindre end 1 x spredningen, og ingen af kontrolpunkterne har en difference på mere end 3 x spredningen.

Kapitel 14

Perspektivering

Formålet med perspektiveringen er, at belyse idéer og supplerende løsningsforslag til kontrol af højde- og plannøjagtighed af DTM ´er, som projektgruppen har erfaret gennem projektperioden.

Fælles for både analysen for højde- og plannøjagtighed er, at flere kontrolpunkter til analyserne kunne have givet et bedre datagrundlag for disse analyserne. Til højdenøjagtighedsanalysen kunne der dels have været målt flere kontrolpunkter i de seks udvalgte områder og dels kunne der med fordel have været udvalgt flere kontrolområder. De yderligere kontrolområder kunne eventuelt udvælges på baggrund af den relative sammenligning af de to DTM ´er jf. kapitel 10, hvor forskelle mellem de to kommercielle DTM ´er er visualiseret og beskrevet.

I analysen omhandlende den plane nøjagtighed ville det have været en fordel, hvis analysen var blevet udført på et større antal kontrolpunkter. Dette var dog ikke muligt, da der i det rekvirerede data ikke fandtes flere med bygninger med tilstrækkeligt antal ALS-punkter på tagfladerne. Tilmed kunne kontrolmålingerne til skæringspunkterne have været målt med flere overbestemmelser ved at have foretaget opstillingerne forskellige steder rundt om bygningerne. I kapitel 12 nævnes to metoder til kontrol af plannøjagtighed, hvoraf kun den ene anvendes i rapporten. Det kunne være interessant, at undersøge hvilken af de to metoder, der har den bedste absolutte nøjagtighed, og hvilke andre metoder, der kan anvendes til kontrol af den plane nøjagtighed.

Projektgruppen behandler ikke grove fejl i de leverede DTM 'er, da projektgruppen anser de leverede data for at være det produkt som rekvirenterne modtager fra producenten, og derfor har en kontrol af data fundet sted hos producenten. Det er projektgruppens vurdering, at en rekvirent anvender produktet uden at have kontrolleret data. Fokus er dermed på, hvilken nøjagtighed den leverede DTM har.

Ligeledes behandler projektgruppen ikke producenternes klassifikation af punktskyen, da dette vurderes, at være indeholdt i producenternes databehandling inden DTM´en leveres til rekvirenten. Da klassifikationen af punkterne i punktskyen har indflydelse på det færdige produkt kunne det i denne forbindelse have været undersøgt, hvilken indflydelse klassifikationen har. Dette kunne have været undersøgt ved at anvende forskellige klassifikationsmetoder, herunder forskellige programmer og parametre, på samme punktsky. Derved kunne forskelle, styrker og svagheder ved klassifikationsmetoderne, på forskelligt terræn, have været belyst.

Efter klassifikationen af punkterne i punktskyen beregner producenterne et regulært grid ud fra punkterne, der er klassificeret som terræn. Dette kan gøres ved forskellige typer af interpolation, der har indflydelse på nøjagtigheden af det færdige produkt. Hvis projektgruppen havde forsøgt sig med forskellige interpolationsmetoder kunne det have været undersøgt, hvilke interpolationsmetoder, der er mest velegnet på forskellige terræntyper.

I rapporten anvendes lineær interpolation til kontrol af højdenøjagtigheden i DTM´er, men kontrollen kan ligeledes udføres med andre interpolationsmetoder. Eventuelt kunne kontrollen af højdenøjagtigheden have været undersøgt ved at anvende yderligere én eller flere interpola-

Kapitel 14. Perspektivering

tionsmetoder. Ved at have anvendt flere interpolationsmetoder på samme data kunne forskelle, styrker og svagheder ved interpolationsmetoderne efterfølgende have været vurderet. Da DTMdata er leveret i 1,6 m x 1,6 m grid ville bilineær interpolation have været egnet til kontrol af højdenøjagtigheden af DTM´er.

I forbindelse med appendiks B, der omhandler om terrænets hældning har indflydelse på nøjagtigheden, kunne det være interessant at foretage en tilsvarende undersøgelse. I stedet for at undersøge de interpolerede punkter i DTM 'en kan der laves en undersøgelse af punkterne i punktskyen, der er klassificeret som terræn. Dette kan eventuelt give en bedre formodning om terrænhældningens indflydelse på fejlene i ALS-data. Hvis der er en sammenhæng mellem terrænhældingen og fejlens størrelse kan der efterfølgende udarbejdes en generel vejledning til, hvor godt forskellige områder typer er bestemt. Derudover kan det undersøges, hvor tæt DTM 'en kan anvendes på fx bygninger, lodrette spring i terrænet førend nøjagtigheden forringes. Begge dele vil være til gavn for rekvirenten, da denne kan vurdere om DTM 'en overholder nøjagtighedskravene for den specifikke opgave.

Litteratur

Andersen, I. (2005). Den skinbarlige virkelighed. Forlaget Samfundslitteratur.

- Balstrøm, T., L. Bodum, and O. Jacobi (2006). Bogen om GIS og geodata. Forlaget GIS & Geodata.
- Baltsavias, E. P. (1999). Airborne laser scanning: basic relations and formulas. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 54(2-3), 199-214.
- BlomInfo (2008). DTM Danmark. http://www.blominfo.dk/denmark/da/ produkter--services/dtm-danmark.
- Borre, K. (1993). Landmåling. 2. Udgave.
- Cederholm, P. (2000). Udjævning. Aalborg Universitet. 2. Udgave.
- Cederholm, P. (2003). Precision of points computed from intersections of lines or planes.
- Cederholm, P. (2005). GPS. Slides fra kursus på 5. semester, Bachelordel af Landinspektøruddannelsen.
- Cederholm, P. (2007). Modellering på baggrund af koordinater. Slides fra kursus på 8. semester, Masterdelen af Landinspektøruddannelsen.
- COWI (2006). COWI når nye højder... DDH Danmarks Digitale Højdemodel dokumenterer højderne i danmark. www.cowi.dk/NR/rdonlyres/ 4ECA3A8C-02C2-4F7A-B8C6-C8A02CB91379/0/DDH_brochure.pdf.
- Flatman, A. (2008). Gæsteforelæsning om DTM-DK. 9. april på AAU.
- Höhle, J. (2005). Kursus fotogrammetri, 5. semester.
- Höhle, J. and M. Potuckova (2007). The EuroSDR test "Checking and Improving of Digital Terrain Models". EuroSDR Official Publication nr. 51.
- Hodgson, M. E. and P. Bresnahan (2004). Accuracy of airborne lidar-derived elevation: Empirical assessment and error budget. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 70*(3), 331-339.
- Jensen, K. (2003). Landmåling i Teori og Praksis. Aalborg Universitet.
- Klenum, A. (1965). Landmaaling Fejlteori. Statens Trykningskontor.
- Kort & Matrikelstyrelsen (2007a). Forbedret højdemodel til stat og kommuner. Nyhed på www.kms.dk 23. maj.

Litteratur

- Kort & Matrikelstyrelsen (2007b). Indkøb af digital højdemodel bilag 1 kravspecifikation og leverandørens løsningsbeskrivelse. http://www.kms.dk/Referencenetogopmaaling/ hojdemodel/.
- Krabill, W. B. and C. W. Wright (2000). Airborne laser mapping of assateague national seashore beach. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing januar(1), 65-71.

Kraus, K. (2007). Photogrammetry, Geometry from images and Laser Scans. Walter de Gruyter.

L-studienævnet (2008). Studievejledning - Afgangsprojekt. Aalborg Universitet.

Lavridsen, O. B. (1993). Fotogrammetri. Aalborg Universitetscenter. 9. Udgave.

- Leica Geosystems (2005). Leica HDS3000. http://www.leica-geosystems.com/dk/da/ HDS3000_Tech_spec.pdf.
- Li, X., A. B. Baker, and T. Hutt (2006). Accuracy of airborne IFSAR mapping. Intermap Technologies Corp..

Madsen, P. (2002). Teknisk matematik - formelsamling. 87-7881-326-3.

Morin, K. W. (2002). Calibration of Airborne Laser Scanners. Ph. D. thesis, University of Calgary.

Rasmussen, J. K. (2008). Interview hos COWI Silkeborg. 1. april i Silkeborg.

Rasmussen, J. R. (2007). Sådan ligger landet. Teknik & Miljø Stads- og havneingeniøren junijuli(6-7), 66-68.

Scankort (2007). DTM-DK. http://scankort.dk/files/Scankort_produktark_DTM-DK.pdf.

Sithole, G. and G. Vosselman (2003). Comparison of filtering algorithms. ISPRS WGIII/3.

Suson, D. (1997). Fiber optics. http://physics.tamuk.edu/~suson/html/4323/fiber.html.

Appendiks

Appendiks A

Kontrolmåling

Dette appendiks omhandler projektgruppens terrestriske indmåling af kontrolpunkter. Indledningsvist præsenteres de instrumenter, der anvendes i forbindelse med opmålingen. Herefter opstilles en forventet spredning i planen og højden, hvorved det afgøres om projektgruppens kontrolpunkter vil være de kommercielle højdemodeller overlegen. Slutteligt beskrives og vurderes projektgruppens indmåling af kontrolpunkter til både kontrol af plan- og højdenøjagtighed.

A.1 Instrumenter til kontrolmålingen

Nøjagtigheden for kontrolpunkterne skal være bedre end nøjagtigheden for data indsamlet med ALS, som har en spredning i højden på 10 cm for veldefinerede flader [COWI 2006] [BlomInfo 2008] [Scankort 2007]. Dermed har det betydning, hvilke instrumenter projektgruppen vælger til indmåling af kontrolpunkterne for de udvalgte områder. Projektgruppen anvender følgende instrumenter:

- Leica TCRA1105plus
- Leica GPS System 530

Ved valg af instrument har projektgruppen lagt vægt på, at totalstationen har automatisk prismesøgning¹, da dette nedbringer tiden, der bruges på opmåling. Udvalgte specifikationer for totalstationen kan ses af tabel A.1. Når specifikationerne på de anvendte instrumenter kendes,

Distancemåling	Nøjagtighed
Infrarød normal måling	2 mm + 2 ppm
Reflektorløs	3 mm + 2 ppm
Vinkelmåling	
Hz, V	1,5 mgon
	5"
ATR	
Positioneringsnøjagtighed	
indtil 300 m	3 mm
Positioneringsnøjagtighed	
over 300 m	*
Måleafstand	1,5 m - 1000 m

* Svarer til nøjagtigheden for vinkelmålingen

 Tabel A.1: Udvalgte specifikationer for Leica TCRA1105plus.

¹På Leica's modeller kaldes dette ATR

Appendiks A. Kontrolmåling

kan der beregnes et skøn for spredningen i plan og højde. Ved at beregne en forventet spredning kan det konkluderes om projektgruppen kan indmåle kontrolpunkter med en overlegen nøjagtighed i fht. de kommercielle DTM'er.

A.2 Markarbejde

Formålet med dette afsnit er, at beskrive arbejdsgangen for etablering af fikspunkter, dataindsamlingen i marken og efterbehandlingen af indsamlet data. Programmer der anvendes i efterbehandlingen er TMK² og et script udarbejdet af projektgruppen. Fikspunkterne måles med RTK og på baggrund af koordinaterne fra RTK-målingerne bestemmes koordinater til kontrolpunkterne indmålt med polær måling. Disse er målt med totalstation og observationerne efterbehandles i TMK. Tilmed vurderes kvaliteten af opstillingerne, hvor fejlgrænserne udregnes i et script, og derefter vurderes resultaterne fra TMK i forhold til fejlgrænserne.

A.2.1 Kontrolpunkter til kontrol af højdenøjagtighed

I det følgende beskrives, hvorledes projektgruppen har indmålt kontrolpunkter til kontrol af højdenøjagtigheden, som er behandlet i kapitel 11. Fikspunkterne etableres vha. søm, jernrør og veldefinerede punkter i marken i yderkanterne af de valgte områder, således disse så vidt mulig omkranser områderne, hvor kontrolpunkterne efterfølgende skal måles. En oversigt over fikspunkternes placering fremgår af bilag V. Fikspunkterne måles to gange med RTK-måling med minimum en times mellemrum. Første og anden måling til fikspunkterne registereres i to forskellige filer for at midlingen af koordinaterne efterfølgende kan ske manuelt. Derved er det muligt, at se differencerne på de to uafhængige observationer.

Til indmåling af kontrolpunkterne i områderne etableres der frie opstillinger med Leica TCRA1105 plus. Når instrumentet er opstillet indtastes atmosfærisk tryk og temperatur for at instrumentet automatisk laver korrektion af afstandsmålingerne i marken. Derudover nulstilles horisontalkredsen mod et veldefineret punkt, så der løbende under målingerne kan kontrolleres for stativdrejning. Inden den polære måling til kontrolpunkterne påbegyndes indmåles fikspunkterne. Tilmed indmåles fikspunkterne efter målingen af kontrolpunkterne er foretaget, således at denne måling bruges til kontrol af fikspunkterne. En oversigt over opstillingernes placering fremgår af bilag V.

A.2.1.1 Forventet spredning

Dette afsnit har til formål, at afklare hvilken spredning projektgruppen kan forvente at holde ved indmåling af kontrolpunkterne. Beregningerne er lavet i et MatLab-script (forventet_noj.m), som kan findes på CD'en bilag VIII. Til beregningen anvendes specifikationer for de valgte instrumenter, samt enkelte værdier der er erfaringstal. Fx indgår centreringsspredningen i beregningen og her anvendes værdien 5 mm. Der er adskillige andre værdier, som alle kan ses ud fra det vedlagte script. Hvert fikspunkt måles to gange, hvorved det bestemmes $\sqrt{2}$ bedre end hvis fikspunktet kun var blevet målt én gang. Dermed udregnes den forventede spredning i planen efter formel A.1.

$$\sigma_{plan} = \sqrt{(\sigma_{totalstation}^2 + \sigma_{GPS}^2)} \tag{A.1}$$

hvor

 $\begin{array}{ll} \sigma_{plan} & \mbox{er et skøn for kontrolpunkternes spredning i planen} \\ \sigma_{totalstation} & \mbox{er et skøn for spredningen i planen ved måling med totalstation} \\ \sigma_{GPS} & \mbox{er et skøn for spredningen i planen ved RTK-måling (dobbeltmålt)} \end{array}$

²Program udviklet af Karsten Jensen, Lektor ved Institut for samfundsudvikling og planlægning, sektion for GeoInformatik & Arealforvaltning

Formel A.2 anvendes til beregning af totalstationens fejlbidrag i planen. Der tages udgangspunkt i [Jensen 2003, Formel 11.3], hvor der tilføjes et fejlbidrag fra totalstationens automatiske prismesøgning, som kan ses af tabel A.1.

$$\sigma_{totalstation} = \sqrt{\frac{\sigma_{afstand}^2 + \sigma_{\beta}^2 \cdot \frac{S^2}{\omega^2}}{2} + \sigma_{ATR}^2}$$
(A.2)

hvor

$\sigma_{total station}$	er et skøn for spredningen i planen ved måling	
	med total stationen	
$\sigma_{afstand}$	er et skøn for spredningen for en målt afstand,	
	jf. [Jensen 2003, Formel 11.4]	
σ_eta	er et skøn for spredningen for en målt vinkel,	
	jf. [Jensen 2003, Formel 11.5]	
S	er sigtelængden til detailpunkt	
σ_{ATR}	er fejlbidraget fra den automatiske prismesøgning	
ω	$200/\pi$	

 $\sigma_{total station}$ beregnes til 6 mm. Dertil kommer en spredning fra RTK-målingen, som det fremgår af formel A.1. I [Jensen 2003, Eksempel 18.1] angives en spredning i planen fra RTK-målingen på 6 mm, hvis GPS-referencen anvendes som RTK-tjeneste og der er 5 km til nærmeste referencestation. Hvert fikspunkt indmåles to gange, hvilket betyder spredningen på RTK-målingen bliver $\sqrt{2}$ bedre. Indsættes dette i formel A.1 giver dette en samlet forventet spredning i planen på 8 mm. Ud fra scriptet fremgår hvilke værdier, der ligger til grund for den forventede spredning i planen.

I det følgende beregnes en forventet spredning i højden, hvor samme instrumenter anvendes, dette gøres vha. formel A.3. Beregningen og værdier fremgår af CD'en bilag VIII og scriptet "forventet noj.m".

$$\sigma_H = \sqrt{\sigma_{total station_H}^2 + \sigma_{GPS_H}^2} \tag{A.3}$$

hvor

er et skøn for spredningen på højden for kontrolpunkterne σ_H $\sigma_{total station_{H}}\,$ er et skøn for spredningen på højden ved måling med total
station er et skøn for spredningen på højden ved RTK-måling σ_{GPS_H}

Formel A.4 anvendes til beregning af den forventede spredning på højden for totalstationens måling. Dette er dog kun tilfældet, hvis spredningen på opstillingspunktets højde er 0. Dette antager projektgruppen i denne beregning, da det tilstræbes, at anvende frie opstillinger til indmåling af kontrolpunkterne.

$$\sigma_{total station_{H}} = \sqrt{S^{2} \cdot \frac{\sigma_{v}^{2}}{n \cdot \omega^{2}} + \left(\frac{S^{2}}{2 \cdot R}\right)^{2} \cdot \sigma_{kref}^{2} + \sigma_{ih}^{2} + \sigma_{sh}^{2} + \sigma_{ATR}^{2}}$$
(A.4)

hvor

 σ_v

n

R

er et skøn for spredningen på højden ved måling med totalstation $\sigma_{total station_H}$ er spredningen på en zenitdistance målt med en sats er antallet af satser er spredningen på refraktionskoefficienten σ_{kref} er spredningen på instrumenthøjden σ_{ih} er spredningen på prismehøjden σ_{sh} er jordens radius i meter (6386000 m) [Jensen 2003, Formel 6.4]

Appendiks A. Kontrolmåling

Anvendes formel A.4 giver dette en spredning på 8 mm på de målinger, der foretages med totalstation. Ligesom med den forventede spredning i planen er fikspunkterne indmålt to gange med RTK-måling, og skal derfor medregnes jævnfør formel A.3. Bidraget fra RTK-målingen er på 11 mm, og dette giver en samlet forventet spredning på højden på 14 mm.

Med en forventet spredning i planen på 8 mm og en forventet spredning på højden på 14 mm vil projektgruppens terrestrisk indmålte kontrolpunkter blive de kommercielle højdemodeller overlegne i nøjagtighed.

A.2.1.2 Procedure for koordinatberegning

Data fra de to RTK-målinger til fikspunkterne udlæses fra Leica 530 GPS-modtageren, hvorefter observationerne midles og importeres i TMK, hvor der dannes en koordinatfil med GPS-målte fikspunkter i UTM zone 32/ETRS89, DVR90. Herefter konverteres GSI³-filen fra totalstations-målingerne ligeledes til TMK-format. I TMK beregnes koordinater til de frie opstillinger og

Opstilling	Udeladte	Kendte	Største	Skøn for	Største	Skøn for
nr.	punkter	punkter	residual	spredning	residual	spredning
	(nr.)		(E,N)	i planen (E,N)	(H)	(H)
			[m]	[m]	[m]	[m]
99	22	20,21,23,26	0,005	0.005	-0,011	0,007
101	22	$20,21,23,26,\ 570,650$	0,007	0,005	-0,008	0,007
102	22	$20,21,23,24,25,\ 26,650$	0,006	0,006	-0,012	0,007
103	-	$23,\!24,\!25,\!27,\!28$	-0,006	0,005	-0,003	0,007
104	33	30, 31, 34, 35	0,006	0,006	-0,004	0,007
105	-	2, 3, 4, 5, 6, 7	0,008	0,006	0,014	0,007
106	-	1,2,3,4,	0,008	0,006	-0,007	0,007
107	22	20, 21, 26, 650,	0,008	0,006	-0,008	0,008
108	-	40,41,42,43	0,006	0,006	0,011	0,007

Tabel A.2: Residualer og fejlgrænser for frie opstillinger.

kontrolpunkter i UTM zone 32/ETRS89, DVR90. Koordinaterne til de frie opstillinger og kontrolpunkterne beregnes uden målestoksfaktor. Målestoksfaktoren er en størrelse, som den observerede afstand skal skaleres med for at disse stemmer overens med fikspunkterne, og vil under ideelle forhold være 1. Målestoksfaktoren udelades, da fikspunkterne er bestemt vha. RTK-måling og derved dårligere bestemt end ved polær måling med totalstation. Derfor bliver observationerne fra den polære måling transformeret over fikspunkterne uden der foretages en skalering af observationerne. For at vurdere de frie opstillinger med totalstationen anvendes et MatLAB-script kaldet "Spred_pol_tcra_plus1100", som er vedlagt på CD'en bilag VIII. Scriptet udregner bl.a. et skøn for spredningen i planen og højden, der bruges til vurdering af de frie opstillinger på baggrund af de i scriptet opstillede parametre. Scriptet gemmer resultaterne i en tekst-fil "spred pol tcr1100.txt", som ligeledes findes på CD'en bilag VIII. På baggrund af det skøn for spredningen i planen og højden, som udregnes i scriptet, opstilles der en grovfejlsgrænse for fikspunkternes residualværdier. Denne defineres som 3 x skøn for spredningen. For at overholde den opstillede grovfejlgrænse har det for nogle af opstillingerne været nødvendigt, at udelukke fikspunkter fra beregningen i TMK. En tabel over hvilke fikspunkter der udelades, grovfejlsgrænse for de frie opstillinger samt en begrundelse for, hvorfor fikspunktet udelades fremgår af tabel A.3. Som det fremgår af tabel A.2, måles der til fikspunkt 22 fra opstilling 99, 101, 102 og 107, hvor punktet ved alle fire tilfælde bliver udeladt pga. at punktet ikke overholder grovfejlsgrænsen i højden. Dette kan skyldes, at der i forbindelse indmålingerne af fikspunkterne

³Et format Leica anvender på deres totalstationer.

Opstilling	Grovfejlsgrænse		Udeladte	P ogrup dolgo
(nr.)	Planen [m]	Højden [m]	Punktnumre	Degrundelse
99	0,015	0,021	22	Residual i H = $0,035$ m
101	0,015	0,021	22	Residual i H = $0,044$ m
102	0,018	0,021	22	Residual i H = $0,036$ m
103	0,015	0,021	-	-
104	0,018	0,021	33	Forkert dæksel indmålt
105	0,018	0,021	-	-
106	0,018	0,021	-	-
107	0,018	0,024	22	Residual i H = $0,035$ m
108	0,018	0,021	-	-

Tabel A.3: Oversigt over punkter, der er blevet udeladt i forbindelse med koordinatberegning.

med RTK-måling er blevet registeret en forkert koordinat til punktet i minimum én af de to RTK-målinger som der er foretaget til punktet. Udover at punkt 22 udelades i fire opstillinger udelades punkt 33 fra opstilling 107. Dette skyldes, at der er blevet målt til et forkert punkt i marken. På baggrund af dette afsnit er det projektgruppens vurdering, at indmålingen af kontrolpunkter er foretaget med den ønskede nøjagtighed.

A.2.2 Kontrolpunkter til kontrol af plannøjagtighed

I forbindelse med projektgruppens kontrol af plannøjagtigheden, indmåles en række "skæringspunkter" på bygningstage. Der udvælges bygningstage, hvor der kan bestemmes en skæring af tre planer. Skæringspunktet beregnes ud fra ALS-punkter fra de leverede punktskyer, og punktet indmåles ligeledes terrestrisk vha. RTK- og polær måling. Ved RTK-måling bestemmes plankoordinaterne bedre end højden, derfor vælger projektgruppen at indmåle fikspunkterne én gang. Hvert skæringspunkt indmåles to gange fra to forskellige opstillinger. Dermed fås to sæt koordinater til skæringspunktet, disse midles og det er den midlede koordinat, der anvendes til kontrol af plannøjagtigheden.

A.2.2.1 Forventet spredning

I dette afsnit undersøges det, hvor godt projektgruppen forventer at kunne indmåle bygningstagenes skæringspunkter. Formlerne der anvendes er præsenteret i afsnit A.2.1.1 og scriptet forventet_noj.m, som kan findes på CD'en bilag VIII. Til denne kontrolmåling anvendes reflektorløs måling med totalstation til afstandsmålingen. Dette giver en grundfejl på afstanden på 3 mm, i modsætning til afstandsmåling til prisme, hvor grundfejlen er 2 mm. I modsætning til formlerne præsenteret i afsnit A.2.1.1 anvendes ATR ikke til denne måling. Som nævnt ovenfor er fikspunkterne målt én gang med RTK-måling. Skønnet for spredningen i planen er ligeledes påvirket af definitionsproblemer. Skæringspunkterne, der forsøges kontrolmålt, er ikke dannet af skarpe kanter, så definitionen af denne skæring er besværlig. Dette er illustreret på figur A.1, hvor de røde krydser symboliserer den "sande" skæring mellem tagfladerne, og de mørke rektangler symboliserer tagryggen. Projektgruppen vælger, at anvende en spredning på definitionen af skæringen på 5 cm. Dette giver en forventet spredning i planen på 51 mm. Beregningen af denne fremgår af det tidligere omtalte script, forventet noj.m.

A.2.2.2 Procedure for koordinatberegning

Efterbehandlingen af de indsamlede observationer forløber på samme måde, som observationerne indsamlet til kontrol af højdenøjagtighed. Der er dog den forskel, at der ved denne kontrol er blevet benyttet både opstilling i kendte punkter og frie opstillinger. I forbindelse med beregning af koordinater i TMK beregnes der nøgletal, som opstillingerne kan vurderes ud fra. I

Appendiks A. Kontrolmåling



Figur A.1: Eksempel på et bygningstag, hvor tagryggen gør det svært, at definere skæringen mellem tagfladerne i marken.

tabel A.4 er nøgletallene for opstillingerne i kendte punkter præsenteret. For opstilling i kendte punkter beregnes en målestoksfaktor, samt en afvigelse på afstanden mellem opstillingen og fikspunktet, der anvendes til udgangssigtet. Disse fremgår af tabellen, sammen med de tilsvarende fejlgrænser, som er beregnet i scriptet "Spred_pol_tcra_plus1100". Hvis der fokuseres på målestoksfaktoren, fremgår det af tabellen, at disse overholder de opstillede fejlgrænser. For afvigelsen på afstanden mellem de to kendte punkter, der anvendes til beregning af koordinater er den aktuelle afvigelse (dS) angivet, og i kolonnen til højre er der angivet en maksimal afvigelse. Her fremgår det ligeledes, at projektgruppens målinger ligger indenfor de beregnede fejlgrænser. Nøgletal for frie opstillinger kan ses i tabel A.5. Data om de frie opstillinger præsenteres på

Opstilling	Udgangs-	Målestoks-	Maksimal	Afvigelse	Maksimal
	sigte	faktor	målestoksfaktor		afvigelse
(nr.)	(nr.)	(dk)		(dS)	(dS max)
		[ppm]	[ppm]	[m]	[m]
103	104	21	359	0,001	0,015
102	105	-92	702	-0,002	0,015
104	101	83	646	0,002	0,015
106	108	-198	367	-0,009	0,015
111	110	-103	577	-0,003	0,015
113	4	174	646	0,004	0,015
116	114	192	462	0,007	0,015

Tabel A.4: Vurdering af opstillinger i kendte punkter ved indmåling til kontrol af plannøjagtighed.

samme måde, som under kontrol af højdenøjagtighed, hvor der først præsenteres hvilke punkter, der er anvendt til beregning af opstillingen. Herefter præsenteres største residual i planen, og den maksimale størrelse på denne værdi. De to kolonner længst til højre angiver tilsvarende største residual og fejlgrænsen for højden. Ifølge [Jensen 2003, Afsnit 13.4] anvendes 3 x skøn for spredningen i planen ved vurdering af residualerne for beregning af den frie opstilling. I projektgruppens tidligere nævnte script beregnes dette skøn for spredningen i planen, og dette er angivet i tabellen. En enkelt måling overholder ikke fejlgrænsen, der er dog tale om, at residualet overskrider fejlgrænsen med 1 mm. Dette vælger projektgruppen at acceptere og anvender målingen på trods af denne overskridelse af fejlgrænsen.

Hvert skæringspunkt er, som tidligere nævnt, målt to gange fra forskellige opstillinger. Koordinater til punkterne fremgår af tabel A.6, hvor koordinaterne er midlet I tabellen er de to koordinater midlet, og differencen i forhold til middelkoordinaten fremgår ligeledes af tabellen.

Opstilling	Kendte	Største	Skøn for
	punkter	residual	spredning
		(E,N)	i planen (E,N)
		[m]	[m]
200	109, 110, 111	0,003	0,005
201	101, 102, 105	-0,016	0,005
202	101, 103, 104	-0,014	0,006
203	101, 103, 104	-0,014	0,006
204	106, 107, 108	0,010	0,005
205	4, 112, 113	0,010	0,005
206	114, 115, 116	-0,008	0,005

Tabel A.5: Vurdering af frie opstillinger ved indmåling til kontrol af plannøjagtighed.

Punktnr.	E-koordinat	Difference i E	N-koordinat	Difference i N
	[m]	[m]	[m]	[m]
1600	559785,950	-0,002	6320488,773	-0,004
	559785, 945	0,003	6320488,764	0,004
Middel	559785,948		6320488,769	
1601	559771,503	-0,045	6320515, 372	-0,006
	559771,414	0,044	6320515, 360	0,006
Middel	559771,459		6320515, 366	
1602	559773,343	-0,011	6320574,415	-0,029
	559773, 321	0,011	6320574, 358	0,029
Middel	559773,332		6320574,387	
1603	559702,622	-0,006	6320381,686	-0,009
	$559702,\!610$	0,006	6320381, 667	0,009
Middel	559702,616		6320381,677	
1604	559704,394	-0,008	6320344,408	-0,011
	559704,378	0,008	6320344, 386	0,011
Middel	559704,386		6320344,397	
1605	559508, 172	-0,012	6320142,474	0,052
	559508, 147	0,013	6320142,578	-0,052
Middel	559508,160		6320142,526	
1607	554582,427	0,003	6320540,882	0,004
	554582,434	-0,003	6320540,891	-0,004
Middel	554582,431		6320540,887	
1608	555167, 596	0,000	6321130,867	-0,004
	555167, 596	0,000	6321130,859	0,004
Middel	555167,596		6321130,863	

Tabel A.6: Midling af koordinater, målt fra forskellige opstillinger.

Projektgruppen vælger, at vurdere skæringspunkterne som kontrolpunkter, i henhold til [Jensen 2003, Afsnit 13.5]. Dette er dog en tilnærmelse, da kontrolpunkter anses for at være veldefinerede, og dette gælder ikke for de målte punkter. Differencerne vurderes i forhold til den forventede spredning i planen og af tabellen fremgår det, at differencerne stortset alle ligger indenfor 1 x skøn for spredningen. Projektgruppen mener, dette skyldes placeringen af opstillingerne punkterne er indmålt fra. Begge opstillinger ligger på samme side af bygningen, og tagryggens bredde vil derfor ikke betyde lige så meget for målingerne. Havde opstillingerne været placeret på hver side af bygningen må det formodes, at differencerne havde været større. Ud fra dette vurderer projektgruppen, at have opnået den fornødne nøjagtighed til kontrol af plannøjagtighed.

Appendiks B

Terrænhældningens indflydelse på nøjagtigheden

I forbindelse med udarbejdelsen af projektets højdenøjagtighedsanalyse kapitel 11, har projektgruppen valgt, at undersøge om der er sammenhængen mellem terrænets hældning og nøjagtigheden af DTM'en. Projektgruppen vil undersøge om der er en konkret sammenhæng mellem DTM-overfladens hældning og differencen mellem projektgruppens kontrolpunkter og de kommercielle DTM'er. Til denne undersøgelse anvendes resultaterne og TIN'et fra analysen kapitel 11. For hvert af projektgruppens kontrolpunkter findes den tilsvarende trekant, hvorefter der bestemmes en hældning til planet ud fra planets normalvektor. Til denne undersøgelse har gruppen udarbejdet et script, som kan findes på CD'en bilag VIII, sammen med resultaterne fra scriptet.

Beregningen foretages ud fra følgende data:

- Kontrolpunkternes koordinater og afvigelse i fht. kommerciel model
- Koordinater til trekantnettets knudepunkter (det interpolerede DTM-grid)
- Trekantsdata, hvilke knudepunkter danner trekanterne

Følgende proces gennemløbes for hvert kontrolpunkt. Indledningsvist beregnes hvilken trekant, der omslutter kontrolpunktet. Dette gøres ved hjælp af et script udarbejdet af Peter Cederholm¹. Scriptet undersøger hvilket knudepunkt, der ligger tættest på kontrolpunktet. Herefter findes vha. barycentriske koordinater den trekant, som kontrolpunktet ligger indenfor. Hvis kontrolpunktet ligger udenfor trekanten, er de barycentriske koordinater til kontrolpunktet negative, dermed kan det bestemmes, hvilken trekant kontrolpunktet ligger indenfor [Cederholm 2007, Kursusgang 5]. Peter Cederholms script returnerer informationer om trekantens knudepunkter. Hvorefter disse hentes i de indlæste datafiler. Herefter bestemmes to af vektorerne, som udspænder trekanten og derved planet. Som angivelse af planets hældning beregnes planets normalvektor. Denne beregnes som krydsproduktet af de to vektorer, der udspænder planet, jf. formel B.1.

$$\vec{n} = \vec{a} \times \vec{b} = \begin{pmatrix} a_2 \cdot b_3 - a_3 \cdot b_2 \\ a_1 \cdot b_3 - a_3 \cdot b_1 \\ a_1 \cdot b_2 - a_2 \cdot b_1 \end{pmatrix}$$
(B.1)

 $\begin{array}{lll} \text{hvor} & \vec{a} & = (a_1,a_2,a_3) \\ & \vec{b} & = (b_1,b_2,b_3) \end{array}$

 $^{^1\}mathrm{Lektor}$ ved Institut for samfund
sudvikling og planlægning, sektion for GeoInformatik & Arealforvaltning

Appendiks B. Terrænhældningens indflydelse på nøjagtigheden

Når normalvektoren til planet er bestemt, regnes en vinkel mellem normalvektoren og en vektor parallel med koordinatsystemets Z-akse, som giver en lodret vektor. Hermed fås et tal for planets hældning, som sammenholdes med kontrolpunktets difference i forhold til de kommercielle DTM'er. Vinklen mellem de to vektorer beregnes ud fra formel B.2 [Madsen 2002, s. 32].

$$\cos(V) = \frac{x_1 \cdot x_2 + y_1 \cdot y_2 + z_1 \cdot z_2}{|\vec{n}| \cdot |\vec{z}|}$$
(B.2)

hvor

 \vec{n}

er planets normalvektor (x_1, y_1, z_1)

 \vec{z} en vektor parallel med koordinatsystemets Z-akse (x_2, y_2, z_2)

V er vinklen mellem vektorerne

Dette giver således en vinkel, hvor projektgruppen vil undersøge, om der er sammenhæng mellem vinklens størrelse og differencen mellem kontrolpunktet og den interpolerede DTM.

I litteraturen gives et bud på sammenhængen mellem terrænhældning og spredningen i H. Formel B.3 kommer fra [Kraus 2007, Formel 8.1-5] og giver et bud på denne sammenhæng.

$$\sigma_H = \pm \left(\frac{6}{\sqrt{n}} + 120 \cdot \tan\alpha\right) \tag{B.3}$$

hvor

 α

n

er spredningen i højden σ_H er terrænhældningen er punkttætheden pr. m^2

Dette giver en spredning i cm på højdenøjagtigheden. Projektgruppen vil ikke anvende denne formel, i forbindelse med analysen, da kontrolpunkterne er indsamlet til et andet formål. Formel B.3 beskriver en generel sammenhæng mellem terrænhældningen og spredningen i højden. Punkterne som anvendes i denne analyse er indsamlet i områder, hvor der forventes at være problemer, og derfor er kontrolpunkterne ikke egnet i forbindelse med denne formel.

B.1 Analysen

Til analysen anvendes data fra KMS og COWI, og resultaterne er blevet visualiseret og fremgår af figur B.1 og B.2.



Figur B.1: Figuren viser vinkel og difference. Differencerne vises numerisk.

Figurerne er opbygget på samme måde, med størrelse på differencerne henad X-aksen, og størrelsen på den tilsvarende hældning opad Y-aksen. Hermed er der plottet et punkt for hvert af projektgruppens kontrolpunkter i dette koordinatsystem. Undersøgelsen omfatter alle 629 kontrolpunkter. Figur B.1 viser resultaterne fra scriptet anvendt på COWI's DTM. Figuren viser ikke nogen klar sammenhængen mellem fejlens størrelse og planets hældning. Det fremgår dog, at der ved små differencer er en tilsvarende overvægt af små hældninger. Resultatet af analysen er diffust, da der op til en hældning på 40° er mange små differencer. Ved store differencer bliver hældningen større, men stadig med en stor spredning på hældningen i forhold til differencen. Figur B.2 viser de samme kontrolpunkter anvendt på KMS's DTM. Her er tendensen for de små



Figur B.2: Figuren viser vinkel og difference. Differencerne vises numerisk.

differencer, den samme som ved datasættet fra COWI. Ved de store differencer, over 1 m, er terrænhældningen over 40° . Dermed giver denne undersøgelse ingen indikation af sammenhæng mellem terrænets hældning og differencens størrelse i projektgruppens kontrolområder. Dog har alle differencer over 1 m i KMS's datasæt en terrænhældning over 40° .

Appendiks B. Terrænhældningens indflydelse på nøjagtigheden

Undersøgelsen her har dog en række mangler, bl.a. er datasættet for lille til at kunne komme med reelle konklusioner. Desuden bør det undersøges om kontrolpunktets placering indenfor trekanten har betydning. I tilfælde af, at afvigelsen hovedsageligt forårsages af ét gridpunkt ud af de tre, vil differencen mellem kontrolpunktet og modellen blive større jo tættere kontrolpunktet ligger på det fejlbehæftede gridpunkt.

Slutteligt vil projektgruppen konkludere, at det datasæt der foreligger er for spinkelt til, at kunne give en klar indikation af om der er en tendens. Undersøgelsen kunne være foretaget med flere kontrolpunkter, men da dette appendiks er baseret på data indsamlet til projektets hovedanalyse, og der samtidig er en tidsmæssig begrænsning, vil der ikke blive foretaget yderligere dataindsamling til denne analyse.

Appendiks C

Beskrivelse af scripts anvendt i analysen af den plane nøjagtighed

I dette appendiks beskrives scriptet, der anvendes til at beregne skæringspunkter for de tre tagflader. Derudover beskrives scriptet, der simulerer 10.000 målinger af et bygningstag, med det formål at bestemme et skøn for spredningen i planen på skæringskoordinaten.

C.1 Beskrivelse af scriptet planberegning.m

Indledningsvist indlæses koordinaterne for den første tagflade. Antallet af punkter skal minimum være tre, og ud fra disse punkter bestemmes ligningen til den første tagflade vha. funktionen planfit.m udarbejdet af Peter Cederholm. Da der arbejdes i UTM-koordinater er det nødvendigt, at modificere scriptet, ved at ændre på tærsklen for hvornår et plan anses for værende lodret, da funktionen ikke kan beregne lodrette planer. Det modificerede script planfit.m kan findes på CD'en bilag VIII. Udover planens ligning fås bl.a. kofaktormatricen og aposteriori variansen til planen og ved at multiplicere disse kan kovariansmatricen bestemmes. Kovariansmatricen anvendes senere i scriptet når der skal laves konfidensellipser for skæringen af de tre planer. Samme procedure gør sig gældende for tagflade 2 og 3 og når disse er bestemt kan skæringspunktet beregnes.

Skæringspunktet beregnes jf. [Cederholm 2003] vha. formel C.1, C.2 og C.3. Herefter beregnes de partielt afledte for de tre ligninger der bestemmer X-, Y- og Z-koordinaten vha. funktionen numafl.m udarbejdet af Peter Cederholm. Ud fra de partielt afledte kan Jacobimatricen opstilles. Når Jacobimatricen og de enkelte planers kovariansmatricer er kendte kan kovariansmatricen for skæringen opstilles, jf. formel C.4. Herefter beregnes parametrene for konfidensellipsen i planen vha. funktionen konf2.m, og ud fra disse plottes konfidensellipsen for XY-planen vha. konf2plt.m, hvor begge funktioner er udarbejdet af Peter Cederholm.

$$\mathbf{X} = \frac{b_1 \cdot c_2 - b_1 \cdot c_3 + b_2 \cdot c_3 - b_2 \cdot c_1 + b_3 \cdot c_1 - b_3 \cdot c_2}{a_1 \cdot b_2 - a_1 \cdot b_3 + a_2 \cdot b_3 - a_2 \cdot b_1 + a_3 \cdot b_1 - a_3 \cdot b_2} \tag{C.1}$$

$$\mathbf{v} = \frac{a_1 \cdot c_3 - a_1 \cdot c_2 + a_2 \cdot b_3 - a_2 \cdot b_1 + a_3 \cdot b_1 - a_3 \cdot b_2}{(C \ 2)}$$

$$Y = \frac{1}{a_1 \cdot b_2 - a_1 \cdot b_3 + a_2 \cdot b_3 - a_2 \cdot b_1 + a_3 \cdot b_1 - a_3 \cdot b_2}$$
(C.2)

$$Z = \frac{a_1 \cdot b_2 \cdot c_3 - a_1 \cdot b_3 \cdot c_2 + a_2 \cdot b_3 \cdot c_1 - a_2 \cdot b_1 \cdot c_3 + a_3 \cdot b_1 \cdot c_2 - a_3 \cdot b_2 \cdot c_1}{a_1 \cdot b_2 - a_1 \cdot b_3 + a_2 \cdot b_3 - a_2 \cdot b_1 + a_3 \cdot b_1 - a_3 \cdot b_2}$$
(C.3)

hvor

X, Y, Z

 a_{1-3}

er skæringskoordinaten a henviser til planens ligning (aX + bY + c = Z)og tallet henviser til hvilket plan der refereres til

89

Appendiks C. Beskrivelse af scripts anvendt i analysen af den plane nøjagtighed

$$\begin{array}{ll} b_{1-3} & b \text{ henviser til planens ligning } (aX + bY + c = Z) \\ og tallet henviser til hvilket plan der refereres til \\ c_{1-3} & c \text{ henviser til planens ligning } (aX + bY + c = Z) \\ og tallet henviser til hvilket plan der refereres til \\ \end{array}$$

$$\sum_{p} = J \cdot \sum_{\Delta \Delta 1 \Delta \Delta 2 \Delta \Delta 3} \cdot J^{T} = \begin{bmatrix} \sigma_{x}^{2} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{y}^{2} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{z}^{2} \end{bmatrix}$$
(C.4)

hvor

 $\begin{array}{ll} \sum_{p} & \mbox{er kovariansmatricerne for skæringspunktet} \\ & \mbox{i én matrice, så det bliver en 9 x 9 matrice} \\ & \sum_{\Delta\Delta 1\Delta\Delta 2\Delta\Delta 3} & \mbox{er kovariansmatricerne for de tre planer sat sammen} \\ & \mbox{i én matrice så det bliver en 9 x 9 matrice} \\ & \mbox{J} & \mbox{er Jacobimatricen} \end{array}$

C.2 Beskrivelse af script til beregning af skøn for spredningen i planen på skæringskoordinaten

Til denne beregning modificeres scriptet planberegning.m, og der indlæses koordinater til tre planer, hvor alle punkter indgår i planerne, som projektgruppen har konstrueret. For at kunne beregne et skøn for spredningen tillægges Z-koordinaterne en tilfældig normalfordelt værdi svarende til den spredning, der kan forventes på ALS-punkter i højden og derfor påvirkes planerne kun af disse fejl. Dette gøres 10.000 gange og på baggrund af de 10.000 skæringspunkter kan der beregnes et skøn for spredningen i planen. Bilag

Bilag I

Tabel - Håndtering af objekter

Dette er bilag er taget fra [Kort & Matrikelstyrelsen 2007b, Kapitel 7].

Ved klassificering og filtrering af punktsky til DSM og DTM skal punkter fra objekter håndteres, som angivet i tabel I.1.

+angiver, at punkter fra den pågældende objekt
type skal medvirke ved dannelsen af DSM og/eller DTM.

- angiver, at punkter fra den pågældende objekt
type ikke skal medvirke ved dannelsen af DSM og/eller DTM.

Objekt	DSM	DTM	Bemærkning
BYGNING			
Bygning (herunder bunkers)	+	-	Bygninger med glastag
			skal i størst muligt
			omfang medtages i DSM'en.
Drivhus	+	-	Drivhuse skal i størst muligt
			omfang medtages i DSM'en
Åben tank/silo (herunder			
åbne rensningsanlæg og			
gylletanke) og svømme bassiner	-	-	
Lukket tank/silo	+	-	
TRAFIK			
Vej, sti og jernbanespor	+	+	
NATUR			
Dige	+	+	
Støjvold	+	+	
TEKNIK			
Vindmølle	-	-	
Objekt	DSM	DTM	Bemærkning
Højspændingsledning	-	-	
Højspændingsmast	-	-	
Telemast-Tårn	+	-	
Pyloner for broer	+	-	

Bilag I. Tabel - Håndtering af objekter

De bærende konstruktioner			
i bue- og gitterbroer			
(hvis de ligger over vejbanen)	+	-	
Hegn	-	-	
HYDROGRAFI			
Havn	+	+	
Kyst	+	+	
Sø	+	+	
Grøft	+	+	
Vandløbsbred	+	+	
Høfde	+	+	
DIVERSE			
Kran			
(permanente og midlertidige)	-	-	
Store skorstene ved varme-			
forsyning, affaldsforbrænding,			
elværk, industri o.lign.	+	-	
Skorsten, kvist, aircondition,			
udsugning, elevatortårn og			
lignende på bygningstage	+	-	
Container/campingvogn og con-			
tainere i en container-terminal	-	-	
Bro (vej/jernbane)	+	-	
Bro - hvis den er smallere end 3			
meter - evt. i forbindelse med stier	-	-	
Dæmning ved bro	+	+	
Kulbunke, grusbunke, askedepot og			
andre råstof- eller affaldsbunker	+	+	
Biler, lastbiler, tog, fly, skibe,			
cyklister, fodgængere, husdyr og			
øvrige temporære objekter	-	-	
Trafiktavler, master oq lysmaster	-	-	
Kalkbunker på marker, roekuler,			
høballer, halmstakke eller lignende	-	-	

Tabel I.1: Tabellen viser KMS's klassifikation af DTM og DSM [Kort & Matrikelstyrelsen 2007b, Kapitel

 7].

Bilag II

Områder til bestilling af data

Følgende kort viser de områder, hvorfra der er bestilt data. Referencesystemet er UTM zone 32, ETRS89 med koter i DVR90. Baggrundskort er ortofotos fra DDO ©COWI.



Figur II.1: Figuren viser projektgruppens datablok A
Bilag II. Områder til bestilling af data



Figur II.2: Figuren viser projektgruppens datablok B

Bilag III

Måleudstyr

Dette bilag angiver, hvilket udstyr projekt
gruppen har anvendt i forbindelse med indmåling af kontrolpunkter. $\ensuremath{\mathsf{}}$

Totalstation:	Leica TCRA1105 $plus$ (nr. 16305) Stativ (nr. 16305), cirkulært prisme (nr. 16304 + 16302) Termometer, barometer
GPS (RTK):	Leica System 530 (nr. 11)
Diverse:	Stålmålebånd 50 meter Tommestok Søm og rør til fikspunkter Mukkert Spraymaling & kridt til afmærkning Landmålerstokke

Bilag IV

Diagram over arbejdsflow



Figur IV.1: Figuren viser et diagram over processering af ALS-data udarbejdet af Leica [Rasmussen 2008].

Bilag V

Fikspunktskort

Dette bilag indeholder kort over fikspunkter og opstillingspunkter, som projektgruppen har anvendt i forbindelse med indmåling af punkter til kontrol af højdenøjagtighed.

Bilag V. Fikspunktskort



 ${\bf Figur~V.1:}~{\rm Fikpunkter~og~opstillingspunkter~for~kontrolområde~1,~2~og~3.~DDO~{\textcircled{C}COWI}.$



Signaturforklaring

1:3.000



Figur V.2: Fikpunkter og opstillingspunkter for kontrolområde 4 og 5. DDO ©COWI.

Bilag V. Fikspunktskort



Signaturforklaring

1:1.000

Opstillingspunkt Områdepolygoner
Fikspunkter

Figur V.3: Fikpunkter og opstillingspunkter for kontrolområde 6. DDO \bigcirc COWI.

Bilag VI

Rasteranalyse

Kortene i dette bilag er udarbejdet i ArcGIS ud fra de DTM-datasæt, der er leveret af KMS og COWI. Datasættene er enten leveret i eller konverteret til ESRI Grid format. Herefter anvendes rasterværktøjerne i ArcGIS til, at beregne mellem de to datasæt. Det ene kort viser differencerne opdelt i positive og negative differencer, mens det andet viser numeriske differencer opdelt i klasser. Kortene kan ligeledes findes på CD'en bilag VIII.

Bilag VI. Rasteranalyse



 ${\bf Figur} \ {\bf VI.1:} \ {\rm Figuren \ viser \ positive \ og \ negative \ differencer \ for \ blok \ A.$



Figur VI.2: Figuren viser numeriske differencer for blok A.

Bilag VI. Rasteranalyse



Figur VI.3: Figuren viser positive og negative differencer for blok B.



Figur VI.4: Figuren viser numeriske differencer for blok B.

Bilag VII

Konfidensellipser - Plannøjagtighed

Dette bilag indeholder konfidensellipser for skæringerne til kontrol af den plane nøjagtighed.



 $\mathbf{Figur} \ \mathbf{VII.1:} \ \mathrm{Figuren} \ \mathrm{viser} \ \mathrm{konfidensellipsen} \ \mathrm{i} \ \mathrm{planen} \ \mathrm{for} \ \mathrm{skæring} \ 1 \ \mathrm{for} \ \mathrm{COWI's} \ \mathrm{datas} \\ \mathrm{æt.}$



 $Figur \ VII.2: \ Figuren \ viser \ konfidensellipsen \ i \ planen \ for \ skæring \ 2 \ for \ COWI \ `s \ datasæt.$

Bilag VII. Konfidensellipser - Plannøjagtighed



 $\mathbf{Figur} \ \mathbf{VII.3:} \ \mathrm{Figuren} \ \mathrm{viser} \ \mathrm{konfidensellipsen} \ \mathrm{i} \ \mathrm{planen} \ \mathrm{for} \ \mathrm{skæring} \ 3 \ \mathrm{for} \ \mathrm{COWI's} \ \mathrm{datasæt}.$



Figur VII.4: Figuren viser konfidensellipsen i planen for skæring 4 for COWI's datasæt.



Figur VII.5: Figuren viser konfidensellipsen i planen for skæring 5 for COWI's datasæt.



 $Figur \ VII.6: \ Figuren \ viser \ konfidensellipsen \ i \ planen \ for \ skæring \ 6 \ for \ COWI \ `s \ datasæt.$



Figur VII.7: Figuren viser konfidensellipsen i planen for skæring 7 for COWI's datasæt.



Figur VII.8: Figuren viser konfidensellipsen i planen for skæring 8 for COWI's datasæt.

Bilag VIII

Bilagscd

CD'en er fastgjort på indersiden af omslaget.