Landinspektørstudiet 10. semester Kandidatspeciale

Integration af Terrestrisk Lasercanning og Fotogrammetri ved konstruktion af præcise og fotorealistiske 3D-modeller til eftersyn af broer

SURVEYING AND MAPPING

Andreas Kildebo & Simone Starup



AALBORG UNIVERSITET



Titel:

Integration af Terrestrisk Lasercanning og Fotogrammetri ved konstruktion af præcise og fotorealistiske 3D-modeller til eftersyn af broer

Projektperiode: SM4 Kandidatspeciale

Deltagere: Andreas Kildebo

Simone Starup

Vejleder: Peter Cederholm

Sideantal: 108

Afleveret: 3. juni 2021

Abstract

This master thesis investigates the integration of terrestrial laser scanning and close-range photogrammetry to construct a precise and photorealistic hybrid model to inspect bridges. Inspection of bridges is a crucial part of keeping a safe and effective transportation network. Reliable methods to document the state of a given bridge is therefore of great importance. The framework of this project is the inspection of bridges in a Danish context. As a result, the first analysis regards the Danish rules and practices concerning the inspection of bridges. This leads to the following research question: "Will hybrid models be able to meet the rules and criteria of bridge inspection?".

A comprehensive analysis of existing projects regarding the use of both terrestrial laser scanning and close-range photogrammetry combined to inspect bridges has been made to answer the question. Furthermore, an analysis of existing hybrid projects has been made to evaluate the relevance of hybrid models for this purpose. The use of hybrid models as a technique is not yet common practice for bridge inspection. Thereby no clear criteria for precision and level of detail regarding hybrid models are predefined. Some requirements are set up to obtain the right quality of a hybrid model. These criteria are created based on the rules and practices of bridge inspection in Denmark and achievable results in other projects regarding terrestrial laser scanning, photogrammetry, and hybrid models.

The empirical investigation of existing projects is substantiated by data collected from a bridge in suburban Copenhagen. This data consists of scan data, photogrammetric data, and several control measurements. To create a hybrid model integrating both terrestrial laser scanning and photogrammetry into a single model, the software RealityCapture was used. The main issue with the construction of the hybrid model was adjusting photogrammetry to the scan data. Repetitive, see-through, or reflective structures caused issues with the alignment of pictures and the construction of the modelled mesh.

Validation of the hybrid model has been separated into the visual level of detail and the geometric precision. These two parameters have been evaluated against the criteria set by the empirical studies and existing practices, which has led to the following conclusion: The visual aspects of the hybrid model satisfy the criteria for being a viable tool in bridge inspection. However, some care must be made to eliminate artefacts from textures. The geometric precision is adequate with the purpose of adding correct scale to the photogrammetry, thereby enabling hybrid models as a base for planning repairs and further construction of bridges.

Indholdsfortegnelse

1	Indledning					
2	Problemformulering					
3	Metode3.1Anvendte metoder3.1.1Plan for håndtering af data	7 9 10				
4	Empiriske undersøgelser: Eftersyn af broer i teori og praksis 4.1 Krav til eftersyn af broer 4.2 Geometrisk præcision og detaljeringsgrad i hybridmodeller 4.2.1 Laserscanning 4.2.2 Fotogrammetri 4.2.3 Eksisterende hybrid-projekter 4.3 Delkonklusion	12 15 16 20 24 28				
5	Dataindsamling 5.1 Kravspecifikation 5.2 Undersøgelsesdesign 5.2.1 Præsentation af område 5.2.2 Detailplanlægning af dataindsamling 5.3 Evaluering af dataindsamling	31 33 35 37 48				
6	Databehandling6.1Georeferering af targets6.2Registrering af punktskyer6.3Beregning af hybridmodellen6.4Kontrolmåling	54 55 58 63 65				
7	Vurdering af hybridmodel7.1Visuel karakter7.2Geometrisk præcision7.3Delkonklusion	73 74 81 91				
8	Konklusion 9					
9	Perspektivering					
Bibliografi						

Figurer

Bilagsliste		103
Bilag 1	Spørgsmål til interview	103
Bilag 2	Kravspecifikation fra Vejdirektoratet	104
Bilag 3	Formel for beregning af GSD	105
Bilag 4	Residualer på observationer fra ScanObs	106
Bilag 5	Koordinater til targets beregnet i ScanObs	107
Bilag 6	Koordinater til kontrolpunkter beregnet i ScanObs	108

99

1 Indledning

I den danske infrastruktur indgår mere end 2500 broer og tuneller. For at kontrollere sikkerheden og kvaliteten af bygværkerne over tid, må der foretages eftersyn af broernes og tunnelernes elementer. I Danmark er det Vejdirektoratet, der har ansvaret for disse eftersyn, samt vedligeholdelsen af bygværkerne. Ved eftersyn følger Vejdirektoratet retningslinjerne, som er udstedt af Transportministeriet i 2019 (dengang Transport-, Bygnings- og Boligministeriet).

Retningslinjerne er udstedt i form af en håndbog, som har til formål at standardisere eftersyn og vedligehold af bygværker. I håndbogen fremgår det, at der skal foretages såkaldte "generaleftersyn" "...med intervaller på op til 6 år..." (Hoedeman m.fl., 2019a, afsnit 2.3). Ved generaleftersyn skal der foretages "...grundig, visuel og systematisk gennemgang af alle bygværkets dele." (Hoedeman m.fl., 2019a, afsnit 2.3). På baggrund af generaleftersyn foretages skadesvurderinger af elementerne, og der registreres behov for særeftersyn med udbedringer mht. metode, prisoverslag og tidspunkter for reparation af skaden. Eftersynet kan dermed også bruges til foreløbig budgettering, prioritering, samt bedømmelsen af drifttilstanden. Dette stiller derfor også nogle krav til eftersynet, da dette danner grundlaget for fremtidig projektering (Hoedeman m.fl., 2019a, afsnit 2.3).

I Vejdirektoratet udfører man generaleftersyn ved at foretage en fysisk gennemgang af broerne.

Dette betyder at alle elementer gennemgås visuelt, og såfremt der er skader, fotograferes disse, til senere dokumentering. En sådanne fysisk gennemgang kan være udfordrende, særligt på store broer, hvor adgang til delelementer ikke er ligetil. Et relevant spørgsmål at stille er, om ikke disse eftersyn kan løses på lettere måde, som ikke kræver, at man skal inspicere hver kvadratmeter af broens elementer fysisk.

Der er flere eksempler at finde i litteraturen omhandlende eftersyn af broer, og hvordan de foretages over hele verden (eks.: Teza m.fl. (2009), D. Lichti m.fl. (2002), Riveiro m.fl. (2013) og flere). De store gengangere i litteraturen er anvendelsen af hhv. fotogrammetri og laserscanning. Dette er til trods for, at man i sin tid troede, at fotogrammetrien som metode var på vej ud: *"Kort efter at LS-enheder (Laser scanning) var blevet udviklet til et kommercielt niveau, spekulerede mange i, at fotogrammetri helt ville blive erstattet af LS."* (Rönnholm m.fl., 2007, Afsnit 1.)

Ovenstående citat fra Rönnholm m.fl. (2007) viste sig ikke at blive virkelighed. Årsagen til dette må findes i, at fotogrammetrien stadig kan tilbyde noget, som ikke kan findes i andre målemetoder.

Laserscanning og fotogrammetri har både store forskelle og store fællestræk. Fælles for de to metoder er, at der skabes en 3D-model af virkeligheden i form af en punktsky eller andre afledte produkter. Metoderne adskiller sig dog markant i fremgangsmåden ved dataindsamling. Laserscanning er en aktiv dataindsamling, hvor lys udsendes fra og returneres til en sensor. Fotogrammetri derimod er en passiv dataindsamling, da en sensor i et kamera opfanger det tilgængelige lys.

Laserscanning er gennem sin polære natur, bygget på afstands- og vinkelmålinger hvilket betyder, at objekter målt fra samme opstilling er stærkt knyttet sammen geometrisk. Da fotogrammetri bygger på at skabe noget tredimensionelt ud fra en række todimensionelle billeder, har denne metode behov for en række veldefinerede fællespunkter for at kunne skabe en veldefineret geometri.

Via fotogrammetrien er det muligt at opnå en detaljeringsgrad, som ikke vil kunne opnås ved laserscanning. Nedenfor kan der af figur 1.0.1 ses flere eksempler på forskelle og ligheder.

	Photogrammetry	Laser Scanner
	(Image-Based modeling)	(Range-Based modeling)
Characteristics		
Cost of the instruments	Low	High
(HW and SW)		
Manageability / Portability	Excellent	Sufficient
Time of data acquisition	Quite short	High
Time for modeling	Quite short, experience	Often long
	required	
3D information	To be derived	Direct
Distance's dependence	Independent	Dependent
Dimension's dependence	Independent	Dependent
Material's dependence	Almost independent	Dependent
Light's dependence	Dependent	Almost/totally independ-
		ent
Geometry's dependence	Quite dependent	Independent
Texture's dependence	Dependent	Independent
Scale	Absent	Implicit (1:1)
Data volume	Dependent on the images	Dense point cloud
	resolution and on the	
	measurements	
Detail's modeling	Good/excellent	Generally excellent
Texture	Included	Absent/Low resolution
Edges	Excellent	Quite problematic
Statistics	For each calculated point	Global
Open-source software	Some	A few

Figur 1.0.1: Sammenligning mellem laserscanning og fotogrammetri Kilde: Barsanti m.fl. (2012)

Moderne instrumenter og software til databehandling har flyttet grænserne for både dataindsamling og databehandling. Prisforskel og mobilitet er stadig betydelig, hvis de to metoder betragtes isoleret.

Som tidligere nævnt er der flere eksempler, der viser at begge metoder stadig anvendes, både hver for sig, men også sammen.

Rönnholm m.fl. (2007) skriver i deres artikel om brugen af både laserscanning og fotogrammetri til samme projekt, samt forskellige niveauer af integration mellem de to metoder. I denne artikel skelnes der mellem fire niveauer af integration: 1. Objekt-niveau integration, 2. Fotogrammetri assisteret af laserscanning, 3. Laserscanning assisteret af fotogrammetri, 4. Tæt integrerede laserscanning og optiske billeder.

Objekt-niveau integration skal forstås således, at LS-data og fotogrammetri-data processeres separat, men forenes og vurderes i en samlet model. Et eksempel herpå kan være brugen af laserscanning til dannelsen af en terrænmodel, hvortil bygninger eller lignende tilføjes fra billeder. De to datasæt bidrager således med hver deres information i 3D-modellen, men der skelnes hårdt mellem, hvor data kommer fra.

Fotogrammetri assisteret af laserscanning omhandler den type arbejde, hvor informationen fra fotos er i centrum, men hvor information fra laserscanning stadig er nødvendigt for at få det ønskede slutprodukt. Et eksempel herpå kunne være ortofotos. Som bruger ser man ikke informationerne fra laserscanningen, men de har ikke desto mindre været vigtige for at kunne orientere billederne korrekt. Ved Laserscanning assisteret af fotogrammetri er det i modsætning til foregående niveau hovedsageligt laserscanningen, slutproduktet består af, men billeder er stadig nødvendige for at få ekstra information til punktskyen. Et klassisk eksempel herpå er farvelægning af en punktsky ud fra billeders RGB-værdier. Der bliver ikke udvundet anden form for ekstra information fra billederne, blot en farvekode til de enkelte punkter.

Tæt integrerede laserscanning og optiske billeder udskiller sig fra de andre tre niveauer, da det allerede er ved dataindsamlingen integrationen starter. Med dette menes, at fotos og laserscanninger indsamles på samme tid, som f.eks. på fly, hvor der både er installeret en laserscanner og et kamera. På denne måde kan visse fejlbidrag fjerenes, da orienteringen mellem fotos og scanning er kendt. Et nyere eksempel herpå er NavVis-scannere. NavVis bygger på slammer-teknologi, på instrumentet er monteret flere kameraer, således at man kan tage 360° billeder undervejs. Hermed kan man lave farvelagte 3D-modeller, som man kan navigere i ved brug af billederne. (Rönnholm m.fl., 2007).

Integrationen af datasæt og niveauet heraf er et spørgsmål om, hvad de forskellige datasæt skal bidrage med i det endelige slutprodukt. Hvis datasættene hver især skal kunne bidrage med egen information, skal de understøtte hinanden, eller tages særlige hensyn for, at fejlbidrag skal kunne fjernes eller mindskes.

Inden for de seneste år er brugen af *hybridmodeller* blevet mere udbredt. Hybridmodeller skal forståes som en samlet model, der benytter informationer fra både laserscanningens punktsky og fotogrammetriens punktsky. Integrationen af datasættene i dette tilfælde er en kombination af *andet* og *tredje* niveau (niveauerne beskrevet ovenfor). Dette skal forståes således, at en enkelt punktsky fra laserscanning har en stærk geometri (Riveiro m.fl., 2013), men mængden af punkter og dermed detaljeringsgraden, kan forøges ved brug af fotogrammetri (Jiang m.fl., 2008). På samme tid kan laserscanningen dermed også bruges til at fastholde fotogrammetrien, altså anvendes som *skellettet* i punktskyen.

De to dataformater bidrager dermed med hver sin information, men assisteres også af hinanden for at skabe et sammenhængende slutprodukt.

For at kunne lave 3D-modeller, som både kan holde en god geometri og en høj detaljeringsgrad, er det derfor relevant at kigge på både fotogrammetri og laserscanning, da de to metoder komplimenterer hinanden, som de gør.

Hybridmodeller

Som nævnt ovenfor, fungerer hybridmodeller ved, at laserscanning og fotogrammetri supplerer hinanden. Et eksempel på dette er blandt andet, at det er muligt at kunne tætne laserscanningen ved brug af fotogrammetri og tilmed lukke huller eller skygger fra laserscanningen. Et eksempel på en model lavet på hybridskyer kan ses nedenfor (figur 1.0.2).



Figur 1.0.2: 3D-model lavet på både laserscanning og fotogrammetri. Kilde: Capturing Reality s.r.o.

Til modellen vist ovenfor, er der blevet anvendt en drone til at tage billeder af bl.a. taget. Som det kan ses, er detaljeringsgraden meget høj på denne type modeller. Det er muligt at skelne mellem mursten og fuger, selv teglene på taget fremstår pænt. Det ses dog også, at de steder hvor scanneren ikke kan fastholde geometrien, eksempelvis midt på taget eller i krogene på den lyseblå bygning, der bliver detaljerne ikke lige så gode, fordi fotogrammetrien står alene. Dette kan skyldes, at der ikke er nok struktur til, at "hjælpe"fotogrammetrien på vej.

Der er flere eksempler at finde på projekter, hvor hybridmodeller er blevet anvendt til eftersyn og dokumentation af kulturarv eller fredede bygninger, eksempelvis Alshawabkeh og Haala (2006), El-Din Fawzy (2019) og Lerma m.fl. (2010). Bygninger eller objekter i denne type projekter har som regel en god struktur med masser af karakteristika, som gør det muligt at danne gode fællespunkter i fotogrammetrien.

Ved eftersyn af broer er det vigtigt, at detaljeringsgraden kan blive høj nok til at rust eller revner

vil kunne ses. Da broer ofte er sammensat af store ensartede betonelementer, må det forventes at dannelsen af fotogrammetriske fællespunkter, kan blive udfordret af den manglende struktur. Kan en sådan model fremstilles, vil den kunne danne grundlag for videre planlægning og projektering.

Det er derfor relevant at undersøge om hybridmodeller kan anvendes til eftersyn, eller om den opnåelige detaljeringsgrad ikke er tilstrækkelig.

2 Problemformulering

For at kontrollere standen og sikkerheden af broerne i den danske infrastruktur, skal der jf. Hoedeman m.fl., 2019b foretages eftersyn mindst hvert sjette år, såkaldte generaleftersyn. I Vejdirektoratet bliver dette løst ved en fysisk gennemgang af broerne, hvor skader dokumenteres med billeder og skriftlige beskrivelser. På baggrund af eftersynet kan yderligere projektering, vedrørende yderligere eftersyn eller renovering foretages. Den fysiske gennemgang af broerne kan være udfordrende, særligt på større broer, hvor det ikke er nemt at komme til. Det er derfor relevant at undersøge, om det er muligt at gøre processen med eftersyn lettere for de ansvarshavende.

Laserscanning og fotogrammetri er hyppigt anvendt over hele verden netop til denne type opgave, men der er endnu ikke eksempler at finde på anvendelsen af hybridmodeller til eftersyn. Brugen af hybridmodeller kan muliggøre en samlet 3D-model, hvor billederne kan fastholdes af geometrien fra laserscanningen. Hermed kan der laves et mesh, der både kan holde en høj præcision og en høj detaljeringsgrad, hvorfor denne metode er interessant at undersøge til dette formål.

Da vejledningen fra Hoedeman m.fl., 2019b ikke stiller nogle tekniske krav til eftersyn, må det derfor også undersøges, hvad der bør kræves af et slutprodukt, for at disse eftersyn stadig kan foretages tilfredsstillende.

Med udgangspunkt i ovenstående, vil der i projektet blive arbejdet videre med følgende problemformulering og tilhørende underspørgsmål:

Kan hybridmodeller anvendes til eftersyn af broer?

- Hvilke krav skal 3D-modeller leve op til, for at kunne anvendes til eftersyn af broer?
- Kan hybridmodeller honorere kravene til eftersyn?
- Hvordan sikres en tilstrækkelig kvalitet af modellen under dataindsamling?
- Hvilken præcision og detaljeringsgrad kan opnås i et mesh, ved brug af moderne udstyr?

3 Metode

I det ovenstående er udfordringerne ved anvendelse af hybridmodeller blevet introduceret. I det følgende afsnit bliver der redegjort for de metodisk fremgangsmåder, der har til formål at afhjælpe besvarelsen af projektets problemformulering og de dertilhørende underspørgsmål.

Undersøgelsens og rapportens opbygning er illustreret i et diagram på følgende side, som herefter gøres rede for i en uddybende forklaring.



Figur 3.0.1: Rapport flow

Beskrivelse af struktur:

Som det fremgår af diagrammet, fører rapportens indledning til projektets problemformulering. Problemformuleringen kan ses i den lilla stiplede boks til venstre i diagrammet. I de fire nederste lilla bokse er problemformuleringens fire underspørgsmål skrevet. Der er med stiplede pile illustreret hvor disse fire underspørgsmål bliver undersøgt og besvaret.

Problemformuleringen fører direkte til rapportens metodisk kapitel (kap. 3), hvor alle valg af metoder og anvendelsen af disse vil blive beskrevet. De anvendte metoder og deres anvendelsesområde vil blive præsenteret senere i dette kapitel.

Det følgende kapitel (kap. 4) omhandler projektets empiriske undersøgelser. De stiplede pile illustrerer, at de første to underspørgsmål bliver undersøgt i henholdsvis afsnit 4.1 og 4.2. På baggrund af disse empiriske undersøgelser bliver de primære krav til hybridmodellen, samt forventningerne til modellens geometriske præcision og detaljeringsgrad udledt. Disse krav og forventninger fører videre til dataindsamlingen.

Inden den réelle dataindsamling i kapitel 5 foretages, opstilles først en kravsspecifikation i afsnit 5.1. Kravsspecifikationen indeholder både krav til dataindsamlingen for at opnå det rette resultat, men også krav til hybridmodellen. Som vist med den stiplede pil fra den lilla boks, er det også her at undersøgelsen af det tredje underspørgsmål påbegyndes. Det tredje underspørgsmål besvares først endeligt ved kontrolmålingerne i afsnit 6.4.

Med udgangspunkt i kravsspecifikationen opstilles et undersøgelsesdesign for dataindsamlingen i afsnit 5. I undersøgelsesdesignet indgår valg af udstyr til dataindsamling samt en detailplan over, hvordan dataindsamlingen skal foregå.

Herefter udføres dataindsamlingen og kontrolmålingerne, der senere skal sammenholdes med hybridmodellen og kravene opstillet i kravsspecifikationen.

Efter endt dataindsamling, påbegyndes databehandlingen i kapitel 6. For at kunne lave hybridmodellen, skal punktskyerne fra laserscanningen først registreres. Efter punktskyerne er registreret, kan de suppleres med fotos i konstruktionen af hybridmodellen.

Efter modellen er konstrueret, kontrolleres denne ved at sammenholde målte afstande med kontrolmålene foretaget i marken, samt en undersøgelse af detaljeringsgraden, dette sker i kapitel 7 Vurdering af hybridmodel. Som vist med den stiplede pil fra det fjerde underspørgsmål, er det også her at undersøgelsen og besvarelsen af dette finder sted.

På baggrund af alle delundersøgelserne vil der slutteligt blive draget en konklusion på projektets problemformulering, samt en perspektivering af projektet i kapitel 8 og 9.

3.1 Anvendte metoder

Herunder præsenteres metoderne anvendt i forbindelse med undersøgelsen af problemformuleringens to første underspørgsmål.

Empirisk undersøgelsesmetode

Til undersøgelsen og besvarelsen af problemformuleringens første to underspørgsmål anvendes empiriske undersøgelsesmetoder. Med dette skal forstås, at der tages udgangspunkt i eksisterende empiri på området. Det første underspørgsmål omhandler kravene, som modellen skal kunne leve op til. For at dette kan besvares, undersøges først hvad disse krav består i. Empirien i denne undersøgelse består i faglige vejledninger og interviews.

Efterfølgende undersøges der, om der er teoretisk grundlag for, at hybridmodeller kan anvendes til eftersyn. Denne undersøgelse tager alene udgangspunkt i eksisterende litteratur. Litteraturen består af fagbøger, projektrapporter og manualer til instrumenter.

Udgangspunktet for valg af metode, skyldes at regler og krav til eftersyn er nedskrevet. Ligeledes anvendes erfaringer, vedrørende udførelsen af eftersyn i andres projekter, til besvarelse af dette projekts problemformulering. Dette sker ved, at undersøge de anvendte metoder og resultater ved brug af laserscanning, fotogrammetri eller hybridmodeller.

Semistruktureret interview

Der er foretaget tre interviews i dette projekt, to med ansatte fra Vejdirektoratet og et med direktøren fra virksomheden Easylnspect. Alle tre interviews er udført efter Steinar Kvale's metode vedrørende *semistrukturerede interviews*. Det har således været muligt at få besvaret forberedte spørgsmål af den interviewede, samt få yderligere informationer om andre metoder eller projekter, de interviewede har arbejdet med.

De tre interviews har været udført over telefon, og er derfor ikke blevet optaget, de er derfor heller ikke blevet transskriberet.

3.1.1 Plan for håndtering af data

Undersøgelsen af problemformuleringens tredje og fjerde underspørgsmål bygger i høj grad på egne indsamlede data. Til dataindsamlingen er Folehavebroen i Valby valgt som projektområde. Hvorfor valget er landet på denne bro, samt en nærmere beskrivelse af broen, uddybes i afsnit 5.2.1 *Præsentation af område*. For at kunne konstruere en hybridmodel af broen, skal der foretages en dataindsamling, den overordnede fremgangsmåde ved dataindsamlingen vil blive præsenteret herunder.

En hybridmodel forstås i denne projektsammenhæng, som en model bestående af både laserscanningsdata og fotogrammetri-data. Der foretages derfor både en laserscanning af broens og dens elementer, samt en fotografering.

For at kunne vurdere om hybridmodellen kan anvendes til eftersyn, opstilles på baggrund af undersøgelserne i kapitel 4, en kravsspecifikation (afsnit 5.1). Kravene heri består dels i modellens visuelle karakter, men også modellens geometriske præcision. For at kunne kontrollere den geometriske præcision udføres en række kontrolmålinger. Kontrolmålene skal både udføres i marken og senere i modellen. Den nærmere anvendelse af instrumenterne vil blive gennemgået i det følgende.

Laserscanning

Til scanningen af broen anvendes en terrestrisk laserscanner. Broen vil blive scannet over flere opstillinger, således at alle elementer bliver scannet.

Ved scanningen opstilles sfæriske targets. Disse skal anvendes til registreringen af punktskyerne, så alle opstillinger bliver korrekt sammenknyttet. Disse targets kommer ligeledes til at indgå som en del af georefereringen af punktskyen fra laserscanning.

Fotografering

Til fotograferingen af broen vil der blive anvendt et håndholdt kamera. Under hele fotograferingen vil der ikke blive ændret på kameraets indstillinger. Dette gøres, da den fotogrammetriske software på denne måde kun skal bestemme de ubekendte én enkelt gang.

Måling med totalstation

Som tidligere nævnt, skal hybridmodellen kunne holdes op imod kravsspecifikationen, for at vurdere dens brugbarhed. Til dette formål vil der blive foretaget en række kontrolmålinger. Kontrolmålene vil bestå af mærker der opsættes ved dataindsamlingen, som bliver fotograferet, således at de optræder i hybridmodellen. Mærkerne indmåles med totalstation, for at have et sammenligningsgrundlag. Det påtænkes, at der ved kontrolmålingen med totalstation også skal anvendes et prisme til afstandbestemmelsen. Dette gøres da afstandsbestemmelsen er mere præcis ved anvendelse af prisme fremfor at måle reflektorløst.

For at kontrolmålingerne kan udføres i hybridmodellen kræver den anvendte software, at modellen er georefereret. Til dette formål vil der i marken blive oprettet fikspunkter, som indmåles med GNSS, de vil også blive indmålt med totalstationen. For at få modellen georefereret, indmåles også de sfæriske targets med totalstationen, således at der kan beregnes absolutte koordinater til disse.

Konstruktion af hybridmodel

Efter dataindsamlingen foretages en udjævning af det net, som udgøres af GNSS fikspunkterne, de opstillede kontrolpunkter, samt de sfæriske targets. På denne måde kan koordinater beregnes til både kontrolpunkter targets.

Efter udjævningen kan registreringen, af punktskyerne fra laserscanningen, foretages. Herefter kan hybridmodellen beregnes.

Til modelleringen af hybridmodellerne anvendes programmet *RealityCapture*. I programmet importeres de registrerede punktskyer og billederne af broen. På baggrund af fællespunkter i billederne kan de fotogrammetriske parametre beregnes til orientering af billederne. Efterfølgende kan der regnes et samlet mesh for både laserscanning og fotogrammetri.

Efter at meshet er beregnet og farvelagt, kan vurderingen af modellen finde sted. Denne vurdering består dels i en visuel inspektion af modellen, samt en vurdering af modellens geometriske præcision. Den geometriske præcision vurderes på baggrund af målene fra totalstationen og afstandsmålinger foretaget i hybridmodellen.

RealityCapture er gratis at downloade og anvende, men der skal betales hvis modeller skal eksporteres fra programmet.

Da dette er et studieprojekt har CapturingReality, som står bag programmet, indvilliget i at give en prøvelicens, derfor er der ikke nogle begrænsninger eller betaling på eksport af hybridmodeller for en begrænset periode.

Hvordan etablering af fikspunkter, laserscanning, fotografering og kontrolmåling mm. nærmere udføres vil blive beskrevet i kapitel 5.

4 Empiriske undersøgelser: Eftersyn af broer i teori og praksis

I det følgende kapitel vil det blive undersøgt, hvorvidt der er teoretisk grundlag for, at hybridmodeller kan anvendes til eftersyn af broer.

Afsnit 4.1 har til formål, at undersøge hvilke praktiske krav en hybridmodel skal kunne honorere for at kunne anvendes, altså problemformuleringens første underspørgsmål. For at undersøge dette, tages der udgangspunkt i *Eftersyn af bygværker* (Hoedeman m.fl., 2019a), da denne håndbog indeholder nedskrevende regler og retningslinjer for eftersyn. Da det er Vejdirektoratet der i Danmark, har ansvaret for eftersyn og vedligeholdelse, vil der også blive redegjort for, hvordan Vejdirektoratet efterlever og udfører eftersyn i overensstemmelse med disse krav.

Efterfølgende undersøges der i afsnit 4.2, hvad der er teknisk muligt at opnå i forhold til præcision og detaljeringsgrad ved brug af hybridmodeller med en projektorienteret og teoretisk tilgang. Dette skal danne grundlaget for besvarelsen af problemformuleringens andet underspørgsmål. Som tidligere nævnt, bliver hybridmodeller anvendt til eftersyn og dokumentering af historiske bygninger og kulturarv, men endnu ikke til eftersyn af broer. Der tages derfor udgangspunkt i eksisterende eftersynsprojekter, hvor der henholdsvis er anvendt laserscanning eller fotogrammetri, for at undersøge hvilken præcision og detaljeringsgrad andre har opnået ved denne type projekter. Der kigges også nærmere på eksisterende hybrid-projekter, for at undersøge hvad andre har opnået af præcision og detaljeringsgrad ved brug af denne metode.

I forbindelse med undersøgelsen af eksisterende projekter, kigges der også på undersøgelsesdesignet i de enkelte projekter. Denne del af undersøgelsen skal klarlægge hvilke overvejelser der er relevante at tage i betragtning, for at opnå en hybridmodel med bedst mulige præcision og detaljeringsgrad. Disse forbehold vil blive samlet i kapitlets delkonklusion og vil senere indgå i betragtninger ved dannelsen af undersøgelsesdesigent til dataindsamling i kapitel 5.2.

4.1 Krav til eftersyn af broer

For at undersøge om hybridmodeller kan anvendes til eftersyn af broer, må det først undersøges hvilke tekniske krav dette stiller til produktet. I Vejdirektoratet følger man, som tidligere nævnt, retningslinjerne beskrevet i *Eftersyn Af Bygværker* (Hoedeman m.fl., 2019a), det følgende afsnit tager derfor udgangspunkt i den håndbog, for at opsummere kravene der stilles til eftersyn.

Eftersyn af bygværker er en håndbog udarbejdet af vejregelgruppen for Bygværker¹, yderligere har Rambøll være med til udarbejdelsen, som rådgivere. Håndbogen er delt op i krav og vejledning. Principperne i den, følges af både Vejdirektoratet, Banedanmark og kommunerne, når der foretages eftersyn af bygværker. Håndbogen indeholder ikke kun gældende standarder, men afspejler også, hvad der er anerkendt praksis, i forbindelse med eftersyn. Formålet med håndbogen er, som tidligere nævnt, at standardisere eftersyn af bygværker.

¹Vejregelgruppen for bygværker bestod på daværende tidspunkt af diverse medlemmer fra infrastrukturbranchen. Medlemmerne var bl.a. ansat i Vejdirektoratet, Rambøll, COWI, Banedanmark, Per Aarsleff A/S m.fl.(Hoedeman m.fl., 2019a)

Håndbogen *eftersynsaktiviteter* er inddelt i fire dele; Registrering, Rutineeftersyn, Generaleftersyn og Særeftersyn.

Registeringen er en kontinuerlig proces, der foregår ved alle typer af eftersyn. Registreringen omhandler; "...de væsentligste administrative, tekniske og økonomiske oplysninger...", samt "...arkivmateriale i form af tegninger og andre dokumenter". Der skal foretages løbende ajourføring af registreringerne, for at de førnævnte elementer kan indgå i en kronologisk historik over bygværket. Bygværkernes historik indgår i vurdering og planlægning, når der skal foretages renoveringer.

Rutineeftersyn har til formål at opretholde trafiksikkerheden. Der er ingen krav til, hvor ofte denne type eftersyn skal udføres, men det er beskrevet i håndbogen, at de normalt foretages "...én gang årligt i forbindelse med planlægning af årets driftsarbejde".

Det gælder yderligere for særligt udsatte eller ældre konstruktioner, at der skal foretages rutineeftersyn efter eks. storm, kraftige regnskyld mm.

Ved rutineeftersyn registreres skader som²:

- Brud på bærende konstruktioner
- Slaghuller i belægninger, løse fliser og lignende, der kan medføre fare for trafikanter
- Hærværk på skråningsbeklædning, rækværker, trafiksignaler, belysning m.v.
- Nedfaldne dele, f.eks. beton, rækværksdele eller tabt gods
- Utilsigtet bevoksning og begroning
- Sætninger ved broenderne og omkring nedløbsbrønde.

På baggrund af rutineeftersynet laves en kort beskrivelse af skaderne og deres placering, samt en vurdering omhandlende behovet for forebyggende driftsarbejder.

Rutineeftersyn er således en ren visuel gennemgang og skadesvurdering, som danner grundlag for videre projektering.

Generaleftersyn er en mere grundig og systematisk, dog stadig visuel, gennemgang af bygværket. Ved denne type eftersyn gennemgås og kontrolleres hvert enkelt element i bygværket. Generaleftersyn foretages således ikke nær så ofte som rutineeftersyn, men det skal udføres med intervaller på maksimalt 6 år. Ved generaleftersynet registreres:

- Ændringer af passagemæssige forhold
- Tilstand af bygværket som helhed og af de enkelte konstruktionselementer
- Art og omfang af betydende skader på synlige dele
- Driftstilstanden
- Behov for særeftersyn
- Tidspunkt for næste generaleftersyn

Den grundige gennemgang af bygværket ved generaleftersyn skal gøre det muligt at følge skadesudvikling på bygværket, således renovering kan foretages på det mest optimale tidspunkt. På baggrund af eftersynet, fastsættes en tilstandskarakter for hvert element i bygværket. Denne ind-

går i vurdering og planlægning af behov for særeftersyn, samt rammerne for renovering (metoder,

²Listen her er et udsnit, den fulde liste over skader, der registreres ved rutineeftersyn er at finde i "Eftersyn af bygværker"kapitel 4.1 Hoedeman m.fl. (2019b)

prisoverslag, tidspunkt for renovering mm.). Generaleftersynet adskiller sig fra rutineeftersynet ved ikke blot at være en visuel gennemgang, da der her <u>skal</u> gøres status og tages holdning til om der skal foretages særeftersyn med henblik på renovering.

Afhængig af hvilke skader der registreres ved rutine- og generaleftersyn, foretages et særeftersyn. Særeftersynet består i tekniske undersøgelser og økonomiske vurderinger for udbedring af problemerne.

Da målet med dette projekt er, at undersøge muligheden for anvendelse af hybridmodeller til eftersyn, lægges der ikke vægt på vurderingsarbejdet. Fokus vil i stedet være på muligheden for at anvende modellerne til selve skadesregistreringen, som finder sted ved både rutine- og generaleftersyn. Der tages derfor også udgangspunkt i det registreringsgrundlag, der er blevet præsenteret vedrørende rutine- og generaleftersyn. Kravene der kan udledes af dette er, at der i høj grad må fokuseres på detaljeringsgraden i modellen, for at skader som brud på elementer eller utilsigtet bevoksning, kan ses i modellen. Disse krav vil derfor indgå i kravsspecifikationen for hybridmodeller, som vil blive præcenteret i kapitel 5.

Eftersyn af broer i Danmark

For at undersøge hvordan eftersynene udføres i Danmark, er der taget kontakt til Vejdirektoratet. Formålet med dette er, at undersøge hvordan man i Vejdirektoratet tolker retningslinjerne i *Eftersyn af bygværker*. Det ønskes ligeledes belyst, hvordan de forskellige eftersyn bliver udført i praksis, samt hvordan de vægtes i forhold til hinanden. Dette har ført til en samtale med Henrik Nielsen (Ingeniør ved Vejdirektoratet).

I samtalen med Henrik fortæller han, at han primært arbejder på mindre broer i den danske infrastruktur. Eftersyn bliver derfor typisk løst af en eller to personer. Henrik lægger, i samtalen, vægt på eftersynenes visuelle karakter. Ved rutineeftersyn fokuseres der på større problemer, som kan påvirke den daglige drift, der ledes ikke efter mindre skader, såsom små revner. Ved generaleftersyn er det derimod en langt mere struktureret tilgang, der er til eftersynet. Hvert element skal inspiceres, og skader bliver fotograferet. Henrik beskriver, i den sammenhæng, at den typiske metode for fastsættelse af målstok for revner, består i at holde en finger eller tommelstok ved siden af skaden, for at give et omtrentlig målforhold på billeder.

Årsagen til de lave krav til geometrisk præcision og højere krav til detaljeringsgraden, er i følge Henrik Nielsen at finde i, at ved hver enkelt bro, er det en skønssag, om skaden er betydelig nok til en reparation, eller om den bare skal noteres og efterses ved næste eftersyn. Såfremt der er tale om en reparation, er det ikke betydeligt at kende den helt præcise størrelse på skaden.

Under mødet henviser Henrik til et pilotprojekt, som er under opstart i Vejdirektoratet. Pilotprojekter omhandler anvendelsen af droner til eftersyn af broer.

Han henviser til Rasmus Bang, som arbejder med eftersyn af de store broer i det danske vejsystem, han er også projektleder på deres pilotprojekt.

For at få mere information om pilotprojekters tekniske og praktiske karakterer, er der taget kontakt til Rasmus Bang. Rasmus kan fortælle, at pilotprojektet er blevet til, på baggrund af en række fokuspunkter. Disse fokuspunkter dækker blandt andet en bedre dokumentation af det komplette eftersyn, da broen kan visualiseres i en 3D-model. Hertil medfølger en forbedring af økonomien og af sikkerheden forbundet med eftersynene, både for inspektør og trafikanter generelt. Dette skyldes at der ved eftersyn af store broer, skal anvendes specielt udstyr, som gør det muligt at nedsænke en mand, eller hejse ham op, for at hver flade kan inspiceres. Udstyret lejes i udlandet og er i sig selv en stor udgift, men for at der er plads til at udføre eftersynene sikkert, må spor spærres for trafikkanter. Den forbedrede sikkerhed og økonomi går hånd i hånd, da det nuværende behov for at spærre et spor af på broen og sænke en mand ned i en lift til undersiden af broen, vil kunne erstattes af droner, som flyver direkte under broen.

Denne type eftersyn er dog heller ikke uden sine udfordringer. Rasmus fortæller at særligt to udfordringer der skal tages i betragtning, nemlig selve flyvningen og den ønskede detaljeringsgrad. De flyvningsmæssige udfordringer omhandler blandt andet droners forbindelse til GNSS omkring og under broer, da broer er områder, hvor der er store udfordringer med at fastholde signalet til satellitterne. Derudover stiller denne type flyvning også store krav til dronepiloten, da der skal flyves blindt i nogle tilfælde, og andre skal der flyves forholdsvist tæt på trafikanter.

Dernæst kommer udfordringen med den høje detaljeringsgrad. Vejdirektoratet ønsker en detaljeringsgrad, som helst skal kunne muliggøre fund af revner, med en såkaldt revnevidde, helt ned på 0,2 mm. Revner i den tykkelse er ikke nødvendigvis farlige i sig selv, men hvis det er længere revner i bærende elementer, er det vigtigt, at de kan registreres. Dette stiller store krav til de anvendte kameraer og droner, for at en tilstrækkelig GSD kan opnås³.

Vejdirektoratets pilotprojekt vil blive beskrevet yderligere, i rapportens afsnit 4.2.2.

Udledte krav til 3D-model

Med udgangspunkt i det forgående afsnit samles der op på de foreløbige forventninger og krav, der bør stilles til en hybridmodel, for at den er anvendelig til eftersyn af broer.

Rutine- og generaleftersyn er visuelle eftersyn. Måden hvorpå de bliver udført i dag, stiller begrænsede krav til geometrisk præcision, i en 3D-model.

Med udgangspunkt i Vejdirektoratets pilotprojekt stilles der dog meget høje krav til den visuelle karakter af modellen. Det skal være muligt at se skader, helt konkret er der tale om længere revner med revnevidder på 0,2 mm, samt større skader.

For at undersøge hvordan kravene til eftersyn af broer hænger sammen med konstruktion af hybridmodeller, er det vigtigt at undersøge, hvilken præcision og detaljeringsgrad der kan opnås ved hybridmodeller. Dette bliver undersøgt nærmere i det følgende afsnit.

4.2 Geometrisk præcision og detaljeringsgrad i hybridmodeller

Hybridmodeller forstås i denne projektsammenhæng, som integrationen mellem punktskyer fra laserscanning og fotogrammetri, hvorefter et mesh beregnes, således slutproduktet bliver en fuld 3Dmodel. Der er flere eksempler at finde i litteraturen, hvori hybridmodeller er anvendt til eftersyn af bygværker eller bevaring af kulturarv, men der er endnu ingen eksempler at finde på brugen af hybridmodeller til eftersyn af broer. Den type bygværker der er tale om i de eksisterende hybridprojekter, er som oftest er kendetegnet ved at være mere detaljerede og struktureret end broer. I dette afsnit tages der derfor udgangspunkt i eksisterende projekter, vedrørende eftersyn af broer. I disse projekter anvendes opmålingsmetoderne; laserscanning og fotogrammetri hver for sig og ikke som et integreret dataformat. I afsnittet gennemgås derfor en række projekter omhandlende eftersyn af broer ved brug af laserscanning, efterfølgende ved brug af fotogrammetri, for at afklare hvorvidt de enkelte metoder kan leve op til forventninger omkring eftersyn af broer i Danmark.

³GSD- Ground Sampling Distance: Afstanden fra centrum til centrum mellem to på hinanden følgende pixels, målt på jorden (Pix4D, 2021).

Afslutningsvist gennemgås en række hybrid-projekter for at undersøge hvilken detaljeringsgrad og geometrisk præcision der kan forventes, når der arbejdes med dette dataformat.

4.2.1 Laserscanning

Følgende afsnit omhandler laserscanning, og hvad der kan forventes af en 3D-model, konstrueret på punktskyer fra laserscanning alene. Afsnittet tager fat i nogle af de generelle aspekter, der skal tages hensyn til for at opnå gode 3D-modeller. For at undersøge hvad der har kunne lade sig gøre i praksis, tages der udgangspunkt i eksisterende projekter, hvori laserscanning er anvendt til eftersyn af broer.

Laserscanning er en teknologi under stor udvikling, hvor nye funktioner hele tiden kommer til, og hvor instrumenter hele tiden bliver bedre og bedre. For at tale om præcision ved laserscannere, er der en række faktorer, der skal betragtes separat for at kunne give et samlet overblik over en scanners præcision. Da laserscanning er en polær målemetode, er det først og fremmest vigtigt at skelne mellem præcisionen på afstandmålinger og præcisionen på vinkelmålinger, for dermed at kunne angive en spredning for enkeltpunkter. Denne spredning på enkeltpunkter er, som nævnt ovenfor, meget afhængig af hvilken scanner der anvendes, herunder hvilket formål scanneren er designet til. Når der tales laserscanning er det dog sjældent enkeltpunkter der er interessante, men derimod sammenfatningen af alle punkter på en overflade. Opløsningen af en scanning eller punkttætheden på en scannet overflade er som udgangspunkt uafhængigt af punktpræcisionen (D. Lichti m.fl., 2002). Dog bidrager en højere punkttæthed med supplerende punkter, som i en modelleringssammenhæng kan forbedre præcisionen af en laserscanning (Gordon og D. D. Lichti, 2007). Dette betyder, at når der måles en mængde punkter på en matematisk veldefineret overflade, vil bedste fit blive estimeret, på bagrund af punkternes placering og den forventede form.



Dead load

Loaded beam

Figur 4.2.1: Bjælke før og efter deformation Kilde: Gordon og D. D. Lichti (2007)

I artiklen fra Gordon og D. D. Lichti (2007) blev der målt på en bjælke (se figur 4.2.1), hvor overfladen i første omgang kunne betragtes som en ret linje. Efterfølgende blev der lagt vægt på midten af bjælken, hvilket resulterede i en deformation fra en ret linje til en parabel. Her blev det påvist, at et instrument med en punktspredning på 6 mm kunne detektere deformation af bjælken med en spredning på 0,29 mm (Gordon og D. D. Lichti, 2007). Dermed kan der opnås en forbedring på omkring 20 gange punktspredningen for et instrument, hvis det målte objekt er veldefineret og kan modelleres matematisk.

Et område hvor det ovennævnte princip udnyttes i praksis er ved registrering af punktskyer. Ved registrering af punktskyer, om det er på baggrund af targets eller cloud-to-cloud, bruges en større mængde punkter til mønstergenkendelse i overlappet mellem to punktskyer.

Targets og registrering

For at foretage en komplet scanning af et område, vil det typisk være nødvendigt at kombinere scanninger fra flere forskellige opstillinger. Denne sammenkobling af flere punktskyer kaldes registrering. Når punktskyer skal registreres, kan processen foregå på flere måder, blandt andet kan der benyttes targets. Targets kommer i flere forskellige former og typer. To hyppigt anvendte targets er sfæriske targets og "Black and White"targets (se figur 4.2.2). Begge typer fungerer ved at en række punkter modelleres efter en idealoverflade på enten det sfæriske eller plane target. Dermed bliver det, som nævnt ovenfor, muligt at opnå en signifikant højere præcision ved registrering af punktskyer end scannerens spredning på enkeltpunkter.



Figur 4.2.2: To typer af targets

Et alternativ til targets er "Cloud-to-cloud". Cloud-to-cloud er en fællesbetegnelse for registrering af punktskyer direkte på baggrund af de tilgængelige punktskyers geometri. Denne metode kan fungere ved enten at forsøge at matche punkter i overlap mellem to punktskyer (Iterative Closest Point - ICP), eller ved at forsøge at estimere flader i overlappet og matche disse (Rusinkiewicz og Levoy, 2001).

Det er derfor ikke nødvendigt at anvende targets, men det kræver at overlappet mellem to sideliggende punktksyer er stort nok til at fællespunkter eller "fællestræk"kan findes i overlappet.

Præcision ved laserscanning

For at få et indtryk af, hvad der kan lade sig gøre at opnå i henhold til geometrisk præcision, undersøges der i det følgende, hvad laserscannere i dag er i stand til, jævnfør producenterne. Der kigges på forskellige scannere, fra forskellige producenter. Der foretages så vidt det er muligt en sammenligning af de forskellige scannere, men da producenterne hver især præsenterer oplysningerne forskelligt, er det i nogle tilfælde ikke muligt at foretage direkte sammenligninger. Herunder er et skema sat op for at vise eksempler på, hvordan forskellige producenter viser egenskaberne for deres instrumenter.

Instrument	3D-Punkt(1σ)	Afstand(1σ)	Vinkelmåling i buesekunder(1σ)
Leica RTC 360	5.3 mm @ 40 m	1.0 mm + 10 ppm	18"
Trimble X7	6 mm @ 40 m	2 mm	21"
Z+F 5016	Ej oplyst	\leq 1 mm + 10 ppm	14.4"

Figur 4.2.3: Sammenligning af forskellige udbyderes præsentation af præcision Kilde: Datablade for de respektive instrumenter

Herover i figur 4.2.3 ses en moderne scanner fra tre udvalgte producenter; Leica, Trimble og Zoller+Fröhlich(Z+F). Overordnet set, ses de samme parametre angivet, med visse forskelle. Disse forskelle dækker blandt andet, at Z+F ikke angiver en 3D præcision for enkeltpunkter. Derudover bliver præcisionen på afstandsmålingen håndteret forskelligt for hver af de tre producenter. Her angiver Leica og Z+F en grundfejl og et afstandsafhængigt bidrag, mens Trimble kun angiver en enkelt samlet værdi for afstandsfejlen. Vinkelmålingerne bliver dog angivet på samme måde for alle tre producenter.

Leica's RTC 360 og Z+F's 5016 blev begge undersøgt gennem et projekt ved HafenCity Universitet i Hamborg. Her fandt forfatterne frem til, at begge instrumenter overholder specifikationerne angivet af producenterne, efter at have foretaget forskellige undersøgelser på testbaner for både afstandsmålinger og netværk af flere opstillinger. Forfatterne kunne konstatere, at der generelt var lavere afvigelser ved brug af Z+F 5016 fremfor Leica's RTC360 (Kersten m.fl., 2020).

Eksisterende projekter

I dette afsnit vil en række eksisterende projekter blive gennemgået. Fælles for disse projekter er, at de omhandler eftersyn af bygværker ved brug af terrestrisk laserscanning. Formålet med denne gennemgang er, at kunne opstille begrundede forventninger til den geometriske præcision, herunder den opnåelige detaljeringsgrad ved laserscanning. Disse forventninger kommer til at blive inddraget under udformningen af undersøgelsesdesignet i kapitel 5.

Validation of terrestrial laser scanning and photogrammetry techiques for the measurement of vertical underclearence and beam geometry in structural inspection of bridges Riveiro m.fl. (2013) skriver her om, hvordan den vertikale frihøjde under en bro er blevet målt på baggrund af forskellige metoder. Disse dækker over laserscanning fra en enkelt scanner, fotogrammetri ud fra fire forskellige kameraer og polær måling med totalstation for kontrolmål. Den opmålte bro ses illustreret på figur 4.2.4.



Figur 4.2.4: Vertikal frihøjde under bro Kilde: Riveiro m.fl. (2013, Figur 1)

Til projektet blev benyttet en Riegel LMS Z390i scanner med en punktspredning på 6 mm på 50 meters afstand. Scanning af broen blev foretaget på omkring 25 meters afstand, se figur 4.2.4. Broens vertikale frihøjde blev derfra målt med scanneren og reflektorløse målinger med totalstationen som kontrol. Her fandt forfatterne frem til en afvigelse på 9 mm mellem laserscanning (5.163 m) og kontrolmål med totalstation (5.154 m) på mindste vertikale frihøjde (Riveiro m.fl., 2013).

Fotogrammetri afveg op mod 2 cm (5.174 m) (Riveiro m.fl., 2013).

Riveiro m.fl. (2013) finder altså her, at der kan opnås en bedre geometrisk præcision med laserscanneren fremfor fotogrammetri.

Contactless recognition of concrete surface damage from laser scanning and curvature computation

Ved en undersøgelse af Teza m.fl. (2009) blev der vist en sammenhæng mellem en punktskys tæthed og automatisk genkendelse af skader på beton ved brug af software. Her blev det påvist, at skader på omkring 10 gange punkttæheden resulterede i sikre fund gennem den automatiske søgning (Teza

m.fl., 2009). I projektet blev en Riegl LMS Z-420i scanner anvendt på en afstand af 80 m. Her var punkttætheden fastsat til 1,5 cm og det var muligt at opdage skader ned til en størrelse på 15 cm. Metoden bygger dog på, at områder bliver noteret som "beskadiget"eller "ikke-beskadiget". Dette foregår i områder af en fast størrelse, derfor skal en eventuel skade op på en bestemt størrelse, for at den kan registreres i området og dermed markere hele området som "beskadiget"(Teza m.fl., 2009). I forrige afsnit, omhandlende krav til eftersyn, blev det udledt at revner med revnevidder på ned til 0,2 mm gerne skulle kunne ses. For at dette kan lade sig gøre med denne software, vil det betyde at punkttætheden skal ned på hundrededele millimeter, for at skaderne kan detekteres med sikkerhed. Dette vil stille meget høje krav til, dels til dataindsamlingen, men også til kapacitet, da modellen vil meget tæt og datatung.

3D modeling of close-range objects: photogrammetry or laser scanning?

Remondino m.fl. (2005) scannede en kirke i Italien med henblik på at konstruere en 3D-model. Til at indsamle data blev der brugt en Leica HDS 2500, som har en afvigelse på afstandsmåleren på 4 mm ved 50 m og en vinkelafvigelse på 6 mm ved 50 m. Her blev kirken scannet med en punkttæthed på 0,7 mm, hvilket resulterede i en samlet 3D-model på 11 milioner punkter. Registrering af punkt-skyerne blev foretaget på baggrund af otte fikspunkter, målt med totalstation og manuelt udpeget i punktskyen. Grundet placeringen og fordelingen af de anvendte targets, blev der efterfølgende regnet en cloud-to-cloud registrering på baggrund af *ICP* for at forstærke registreringen. Denne registrering blev efterfølgende holdt op mod 50 kontrolpunkter, som alle var opmålt med totalstation. Dette gav en RMSE⁴ på: 4,3 cm (X), 4,7 cm (Y) og 3,3 cm (Z), forfatterne anbefaler derfor brugen af targets, da disse kan måles med en højere detaljeringsgrad end resten af skyen til registreringsformål (Remondino m.fl., 2005).

4.2.2 Fotogrammetri

Følgende afsnit omhandler fotogrammetri og hvad der kan forventes af detaljeringsgrad, i en 3Dmodel ved brug af fotogrammetrien som metode. Afsnittet tager fat i nogle af de generelle aspekter der skal tages hensyn til, for at opnå gode fotogrammetriske modeller. For at undersøge hvad der har kunne lade sig gøre i praksis, tages der udgangspunkt i eksisterende projekter hvori fotogrammetri er anvendt til eftersyn af broer.

Fotogrammetri er som tidligere nævnt, skabelsen af noget 3-dimensionelt ud fra noget 2-dimensionelt. Ved at registrere fotos relativt i forhold til hinanden, kan 3D-punkter dannes og derved 3D-modeller. Tian (2011) beskriver at der i første omgang skal anvendes fotos med høj opløsning, for at opnå gode fotogrammetriske modeller. Herefter er der særligt tre faktorer der spiller ind, hvis god fotogrammetri skal opnås; *Synsfelt, Fokusering* og *Eksponering*.

Synsfelt (Field of View)

Omhandler hvad der kan ses i et foto fra en enkelt opstilling. Det afhænger derfor af kameraets tekniske specifikationer. Synsfeltet bestemmes af to elementer; fokallængde og sensorstørrelse. På figur 4.2.5 er forholdet mellem fokallængde, sensor og Field of View illustreret.

⁴Root Mean Square Error



Figur 4.2.5: Field of View faktorer. Kilde: Tian (2011, Figur 2, s. 5)

Som det kan ses af figuren, vil størrelsen af sensoren og størrelsen på objektet der kan fotograferes følges ad. Jo større en sensor, des større et field of view. Omvendt vil en større fokallængde betyde, at field of view mindskes, da vinklen fra center af lensen til kanterne af censoren mindskes. For at få det største foto, bør derfor vælges et kamera med en stor censor og kort fokallængde, men dette kan have betydning for præcisionen. Tian (2011, s. 5) beskriver at der som oftest sker et "tradeoff"mellem linsens synsfelt og præcisionen i fotos. Det er derfor en fordel at vælge den længst mulige fokallængde og tage flere billeder, frem for at optage hele objektet på et billede med en kortere fokallængde.

Fokusering (Focusing)

For at få gode billeder til fotogrammetri, må der stilles skarpt på det objekt der skal modelleres. Når der skal stilles skarpt i et foto er der flere faktorer der spiller ind, heriblandt brændevidden, afstand til- og størrelse på objekt, fokallængden mm. For at simplificere processen og gøre dataindsamlingen nemmere, kan fokuset fikseres og brændevidden sættes op. Således fokuseres der breddere i billedet, frem for at der kun stilles skarpt i centrum af billedet (Tian, 2011).

Eksponering (Exposure)

Eksponering omhandler bl.a. valget af brændevidde og lukkertid. Hvis ikke disse kombineres korrekt, vil et billede enten kunne fremstå meget mørkt eller lyst, hvilket vil få baggrunden til at træde frem i billedet (hvis lukkertiden er langsom og f-værdien/brændevidden lav, vil et billede blive meget lyst). Valget af lukkertid og f-værdi vil dog også afhænge af omgivelserne, der fotograferes i. Såfremt der er høj solskin, vil der være meget naturligt lys, dermed bør f-værdien sættes op, ligeledes bør lukkertiden nedbringes (Tian, 2011).

De ovenstående tre faktorer omhandler alle selve kameraets specifikationer, og hvordan de tekniske indstillinger bør være, for at opnå gode fotos til fotogrammetriske modeller kan opnås. Der er dog mange flere aspekter, der spiller ind i fotogrammetrien, når der skal opnås god præcision i en fotogrammetrisk model. I modellen herunder, figur 4.2.6, er en præcision-pyramide for fotogrammetri illustreret.



Figur 4.2.6: Faktorer der påvirker præcision ved fotogrammetri Kilde: Geodetic.com

Som det kan ses af figuren, fokuseres der her på fire elementer: Størrelsen på objektet der fotograferes (size), mængden af fotos der tages (photos), opløsning og kvaliltet af det kamera der anvendes (resolution), samt den geometriske sammenhæng mellem billederne relativt til hinanden og objektet (geometry).

I spidsen af pyramiden er den høje præcision, det illustreres herved, hvordan de fire faktorer påvirker hinanden og spiller ind i den endelige fotogrammetri.

Der er således mange aspekter der bør tages i betragtning, inden der indsamles fotos til fotogrammetriske modeller. Med udgangspunkt i dette, undersøges også eksisterende fotogrammetriske projekter.

Eksisterende projekter

Med udgangspunkt i eksisterende projekter vil der i det kommende afsnit blive undersøgt, hvilken detaljeringsgrad der kan opnås ved brugen af fotogrammetri ved eftersyn af broer. Der vil være en kort introduktion til de enkelte projekter, samt en redegørelse for hvilke hensyn der er taget, for at opnå de endelige resultater. Forventningerne til detaljeringsgrad og de hensyn, der er taget for at opnå dem, vil blive inkluderet ved dannelsen af undersøgelsesdesignet i kapitel 5.

Vejdirektoratets pilotprojekt

I 2019 igangsatte Vejdirektoratet et pilotforsøg, der havde til formål at gøre eftersyn af broer lettere og mere sikre for inspektørerne. I dette projekt blev der udelukkende anvendt fotos taget ved brug af drone (Pedersen og Bang, 2020). Vejdirektoratet skriver følgende om projektet:

"De seneste år er udviklingen gået meget stærkt med droners manøvredygtighed, digitale optageteknikker, datakvalitet og databehandling ved hjælp af machine learning." (Pedersen og Bang, 2020, s. 32).

I den offentliggjorte projektrapport er der ingen tal at finde vedrørende præcision eller detaljeringsgrad. På baggrund af samtaler med Vejdirektoratet, er det blevet afklaret, at opgaven blev udført af virksomheden EasyInspect. Vejdirektoratet og EasyInspect har i samarbejde opstillet en kravsspecifikation til projektet (se Bilag 2). Af kravsspecifikationen fremgår det bl.a., at der skulle være mindst 60% overlap mellem billederne, helst 80%. Der skulle yderligere anvendes en fast fokallængde, derfor måtte kameraet ikke være indstillet til at auto-fokusere under flyvningen, da dette kan ændre fokallængden.

Et af ønskerne for dette projekt var, som også tidligere nævnt, at kunne se revner med en revnevidde på 0,2 mm, dog var der ingen krav til GSD. Det oplyses ikke, hvad der er opnået i projektet, men det er gennem samtaler blevet afklaret, at en GSD på 1-2 mm. blev opnået.

Projektet blev udført uden brugen af paspunkter på broens elementer, dog med targets på jorden til georefferering (målt ind med RTK GNSS).

UAV-based acquisition of 3D point cloud - A comparison of low-cost laser scanner and SFM-tools

l artiklen af Mader m.fl. (2015) blev den geometriske præcision ved brug af henholdsvis laserscanner og kamera, monteret på en drone, undersøgt. Til flyvning med laserscanner blev anvendt en 2Dlaserscanner, som bestemmer punktafstande i ét plan af gangen. Til flyvning med kamera blev anvendt et Prosilica GT3300C kamera, som har hvad der på en fuld format sensor svarer til en fokallængde på 38.19 mm. Alle systemer blev kalibreret med indbyggede selv-kalibrerings systemer (Mader m.fl., 2015, s. 336), for at sikre et præcist resultat. Der blev ikke anvendt fikspunkter til georefferering, da der var en on-board GPS på dronen. To flyvninger blev foretaget, én med laserscanneren og én med kameraet. På baggrund af de to flyvninger blev to modeller beregnet, disse sammenlignes i sidste ende med en uafhængig terrestrisk laserscanning (TLS) af broen.

Resultatet af undersøgelsen blev to modeller med henholdsvis 1 million (laserscanning) og 13 millioner (fotogrammetri) punkter. Ved sammenligning mellem de to modeller, og modellen indsamlet med TLS, blev spredningerne på modellerne beregnet til henholdsvis 32 cm for laserscanning med drone og 4,9 cm for den fotogrammetriske model.

En del af forklaringen på den store afvigelse for laserscanningen (med drone), forklares med at GPSsignalet blev tabt flere gange undervejs, hvilket har givet vridninger i den endelige model. Da den fotogrammetriske model er beregnet på baggrund af overlappet mellem billeder, har dette ikke haft samme betydning for denne model.

Low-cost UAS photogrammetry for road infrastructures' inspection

Pinto m.fl. (2020) skriver i deres artikel om manglen på eftersyn af broer verden over. I artiklen beskrives det, at udsatte broer verden over, krydses af millioner af bilister hver dag (Italien, USA, Canada, Tyskland og Frankrig er eksempler fra artiklen). For at broernes sikkerhed ikke forringes over tid, og for at undgå ulykker, skal de inspiceres og kontrolleres løbende. I artiklen undersøges derfor mulige *low-cost* metoder til eftersyn af broer.

I projektet blev to broer inspiceret ved brug af drone, da det blev prioriteret at anvende såkaldte Non-destructive testing (NDT) metoder til eftersyn, da disse bl.a. ikke kræver indgreb i broernes materialer.

Til eftersynene anvendtes RGB-billeder og video, som blev taget med et 20 MP Hasselblad kamera med 10bit radiometrisk opløsning, der optager 60 fps 4K video. Der blev henholdsvis anvendt 24 og 12 fikspunkter i form af 2D-black&white targets, indmålt med en Leica Viva GS 14 GNSS.

Den første bro blev fløjet manuelt⁵, da der skulle flyves under bropiller og tæt ved træer. Der blev derfor optaget video frem for billeder, som senere hen blev opdelt i frames til dannelsen af den endelige 3D-model. Resultatet var en model med 6.042.252 punkter og en punktspredning på 9

⁵At flyve manuelt, i modsætning til brugen af prædefinerede misioner til dronen (flyvemønster).

mm⁶. Modellen sammenlignes med en laserscanning af samme bro og har her en gennemsnitsværdi for afvigelserne på 1 cm og en spredning på 5,1 cm (Pinto m.fl., 2020, s. 1148).

Den anden bro var mindre i størrelse, hvorfor der er taget billeder fremfor video. Den endelige model havde 5.912.527 punkter og en punktspredning på 7 mm. Som ved den første bro, blev der foretaget en laserscanning af broen til sammenligning. Dette resulterede i en gennemsnitværdi for afvigelserne på 0,0 cm og en spredning på 2,3 cm, da den fotogrammetriske 3D-model blev sammenlignet med laserscanningen.

Begge broerne i dette projekt bestod af armeret beton, hvorfor et af de store fokuspunkter var om skader kunne ses i betonen. Skaderne kunne ses i 3D-modellerne for begge broer.

Konklusionen i denne artikel var, at afvigelserne mellem de fotogrammetrisk konstruerede punktskyer og punktskyerne fra laserscanning oversteg de estimerede fejlgrænser for den geometriske præcision. Modellerne blev dog fundet tilfredsstillende, da detaljeringsgraden i begge tilfælde gjorde det muligt, at opdage de nødvendige skader.

4.2.3 Eksisterende hybrid-projekter

I de foregående afsnit er projekter, omhandlende henholdsvis laserscanning og fotogrammetri, blevet gennemgået. Dette skulle gøre klart, hvad der kan opnås i forhold til præcision og detaljeringsgrad kun ved brug af henholdsvis den ene eller anden metode. Det følgende afsnit består af en gennemgang af eksisterende hybridprojekter. Som i de tidligere afsnit er formålet med dette afsnit at klarlægge, hvad andre har opnået ved at kombinere de to metoder, for derefter at kunne opstille begrundede forventninger til hybridmodeller.

De følgende projekter omhandler ikke eftersyn af broer. Dette skyldes at hybridmodeller ikke er en bredt anvendt metode endnu, men den er blevet anvendt i en række bevaringsprojekter og andre tekniske projekter. Et udpluk af disse projekter bliver præsenteret herunder.

Datasets of captured images of three different devices for photogrammetry calculation comparison and integration into a laserscan point cloud of a built environment

Når der arbejdes med kombination af laserscanning og fotogrammetri, er en vigtig faktor detaljeringsgraden af den beregnede model. Hellmuth m.fl. (2020) undersøgte sammenhængen mellem detaljeringsgrad og valg af kamera til fotogrammetriske formål. Hellmuth m.fl. (2020) kunne konstatere en langt højere punkttæthed i de områder, hvor fotogrammetrien bidrog til punktskyen. Derudover blev billederne fra de tre forskellige kameraer (Nikon D810, iPhone 6 og iPhone XS) beregnet fotogrammetrisk uden støtte fra terrestrisk laserscanning og hver for sig. Der blev konstateret betydelig forskel ved anvendelse af en smartphone kontra et digitalt spejlreflekskamera (Hellmuth m.fl., 2020). Dette ses herunder i figur 4.2.7.

⁶Punktspredningen er beregnet ved dannelsen af 3D-modellen, i programmet MetaShape.



Figur 4.2.7: Fotogrammetrisk 3D-model fra et spejreflekskamera og en smartphone Kilde: Hellmuth m.fl. (2020)

Som nævnt ovenfor kunne der konstateres en betydeligt højere punkttæthed, når laserscanning blev kombineret med fotogrammetri. En illustration af dette ses i figur 4.2.8. Her ses en langt højere punkttæthed i midten af modellen, hvor der både er brugt fotogrammetri og laserscanning, end langs yderkanterne, hvor der kun er brugt laserscanning.



Fig. 18. Updated point cloud.

Figur 4.2.8: Kombination af laserscanning og fotogrammetri vist i punktsky

Dertil var der stor forskel, ved beregningen af billedernes ydre orientering i programmet, RealityCapture. Uden kontrolpunkter lykkedes det med Nikons spejlreflekskamera at orientere 200 ud af 237 billeder. Ved billederne taget med en iPhone 6, lykkedes det kun at orientere 161 ud af 330 uden kontrolpunkter.

Hellmuth m.fl. (2020) påviste i sit projekt, at valg af kamera og kvalitet af billederne, har en effekt på beregningerne og den endelige model.

3D Sensor-Fusion for the Documentation of Rural Heritage Buildings

For at registrere og bevare kulturarv, undersøger Castilla m.fl. (2021) i denne artikel hvorledes terrestrisk laserscanning og fotogrammetri i samarbejde kan anvendes. Målet med undersøgelsen var, at digitalisere en del af den kulturarv, der var ved at gå tabt, fordi der ikke længere gøres en aktiv indsats for at bevare den. Fokusområdet i denne artikel er 80 dueslag i Spanien (se figur 4.2.9).









Figur 4.2.9: Dueslag (Castilla m.fl., 2021, s. 10, fig. 8)

Til indsamling af data anvendtes dels et Nikon D200 kamera med en Nikon AF DX Fisheye objektiv på 10.5 mm, samt en FARO Photon 80-scanner, med en præcision på 0.6–17 mm. ved 6 til 76 m. Der blev brugt to til tre scanninger ved hver af de forskellige dueslag. Efter registreringen af punkt-skyerne blev der tyndet ud, derved var der slutteligt en punkttæthed på ca. 1 punkt pr. cm^2 i den samlede punktsky, hvilket svarede til at op mod 55% af punktskyernes punkter er blevet frasorteret. Billederne af bygningerne blev taget med et 60% overlap i længden og et 50% overlap i bredden. Til georefferering blev der anvendt en RTK Topcon GR-5 GPS, der blev fastlagt mindst seks fikspunkter ved hver af de 80 dueslag.

Ved beregningen af modellerne blev også den geometriske præcision beregnet. Den oplyses at være blevet 1,2 mm for laserscanningen og 5,5 for fotogrammetrien ved 10 m afstand.

Efter sammensætningen af de to dataformater blev der foretaget en endelig udtynding til en fastsat punkttæthed på 0,8 punkter pr. cm^3 , hvilket af forfatterne blev vurderet tilstrækkeligt. (Castilla m.fl., 2021). De endelige 3D-modeller bestod af 1,4 til 2,2 millioner punkter.

Med udtyndingen foretaget i dette projekt, vil det ikke kunne garantere at små skader kan ses. Formålet med dette projekt var digital bevaring af dueslagene og ikke eftersyn af skader, hvorfor det ikke er nødvendig at have højst mulige detaljeringsgrad.

Fusion of UAV and Terrestrial Photogrammetry with Laser Scanning for 3D Reconstruction of Historic Churches in Georgia

I 2018 blev en opmålingskampagne af tre historiske kirker i Georgien påbegyndt. Udover bevaringsog turistformål skulle dette projekt yderligere anvendes til at undersøge Leica's, dengang nye scanner, Leica BLK360. I projektet skulle scannerens praktiske kunnen testes, og derudover skulle brugen af både terrestrisk og luftbåren fotogrammetri kombineres med terrestrisk laserscanning. Målsætningen for projektet var, at opnå en geometrisk præcision og detaljeringsgrad på under 1 cm. Der er anvendt black&white targets ved alle tre kirker placeret med mellem 5 og 10 meters afstand fra hinanden. I enkelte tilfælde er også anvendt justerbare targets, der kunne drejes og tippes. Til opmålingen af de tre kirker blev anvendt følgende udstyr:

- Faro Focus 3D X330 (TLS)
- Leica BLK360 (TLS)
- DJI Mavic Pro with FC 220 f = 4.7mm, 12MP (Drone)

- Canon EOS 200D, f = 10-20mm, 24,2 MP (Kamera)
- Canon EOS D6 Mark II, f = 24-50mm, 26,2 MP (Kamera)

(Luhmann m.fl., 2020, s. 753).

Faro Focus 3D X330 har en 3D-punktpræcision på ca. 2 mm ved 10 m afstand og en rækkevidde på op til 330 m. Der blev scannet med en punkttæthed på 6 mm ved 10 m afstand.

Ved den første kirke blev der foretaget ni opstillinger fra jorden og to opstillinger fra taget af nabobygninger med Faro scanneren. Dette resulterede i en punkttæthed på mellem 1 og 30 mm, da der var stor forskel i afstandende til objekterne i scanningen. Den gennemsnitlige punkttæthed blev beregnet til 3 mm tæt ved jorden og 5 mm ved tårnene på kirkens tag. Spredningen på registreringen af punktskyerne var på 4 mm.

Kirken blev også scannet med Leica's BLK360 med samme indstilling for punkttæthed (6 mm ved 10 m). Resultatet af registreringen af punktskyerne herfra blev en standardafvigelse på 4 mm, samt en punkttæthed på 4 mm tæt ved jorden og 8 mm ved tårnene. Der blev dog foretaget 20 scanninger med BLK'en for at opnå disse resultater (til sammenligning med de 11 scanninger med Faro's scanner).

Luhmann m.fl. (2020) undersøgte forskellen på den geometriske præcision i de to punktskyer (fra BLK og Faro). Dette blev gjort ved at sammenligne scanninger af en kirkens vægge i programmet CloudCompare. Resultatet var afstande på mellem 5 og 10 mm, mellem de to punktskyer.

Udover scanningerne blev der taget 368 fotos af kirken med dronen DJI Mavic med FC220 kameraet. GSD'en lå på mellem 5 og 11 mm. Slutteligt var der også taget fotos med begge Canon kameraer. Billederne var taget med afstande på 1-20 m, alle med stort overlap (overlap er ikke beskrevet præcist i artiklen). Den endelige punktsky bestod af 42 millioner punkter med en punkttæthed på 5 mm. På de anvendte fikspunkter beregnes en spredning på 5 mm ved brug af programmet RealityCapture til registrering og sammensætning af punktskyerne. Af figur 4.2.10 kan en af de modellerede kirker ses.



Figur 4.2.10: Andreas Kirken i Lurdji (Luhmann m.fl., 2020, s. 758 fig. 11)

Beregningen af hybridmodellen blev foretaget i både RealityCapture og PhotoScan for at sammenligne de to programmer. Luhmann m.fl. (2020) kunne konstatere, at RealityCapture dels kunne beregne modellen meget hurtigere end PhotoScan (4,5 timer kontra 5 dage), men RealityCapture var også i stand til at *aligne* og inkludere næsten dobbelt så mange billeder i modellen.

Slutteligt blev den endelige hybridmodel fra RealityCapture sammenlignet med den rene punktsky fra Faro scanneren. Sammenligningen blev foretaget mellem en punktsky og en mesh-model⁷. Resultatet af denne sammenligning viser en gennemsnitlig afvigelse på 2 mm mellem de to modeller.

Der er i dag flere softwareløsninger til beregning af fotogrammetri og laserscanning, men det er tydeligt, at det har en betydning for resultatet, hvilken løsning der anvendes til beregningen.

4.3 Delkonklusion

I kapitlets første afsnit (4.1) søgtes problemformuleringens første underspørgsmål; *Hvilke krav skal 3D-modeller leve op til for at kunne anvendes til eftersyn af broer*? afklaret. Med udgangspunkt i den fungerende vejledning blev det afsøgt, hvilke krav der stilles til eftersyn af danske bygværker. Vejledningen, skrevet af Hoedeman m.fl. (2019b), fokuserer i høj grad på den visuelle karakter af eftersynsarbejdet. Da målet med dette projekt er, at undersøge brugbarheden af hybridmodeller til eftersyn af broer, var det også nødvendigt at få fastlagt kravene til detaljeringsgrad og geometrisk præcision for en endelig model. Dette ledte videre til samtaler med Vejdirektoratet, da de er ansvarshavende myndighed for eftersyn af broer i Danmark, samt deres underleverandør på det førnævnte pilotprojekt, Easylnspect. Her blev det klart, at fokus ved eftersyn af broer ligger på det visuelle aspekt. Den nuværende arbejdsgang for Vejdirektoratet omhandler kun i beskedent omfang den geometriske præcision ved eftersyn. Der er til gengæld blevet givet udtryk for, at revner med en revnevidde på kun 0,2 mm gerne skulle kunne ses.

For at undersøge problemformuleringens andet underspørgsmål *Kan hybridmodeller honorere kravene til eftersyn?* er der i afsnit 4.2 blevet redegjort for eksisterende projekter omhandlende laserscanning, fotogrammetri og hybridmodeller. Der er fundet flere succesrige eksempler på projekter, hvortil enten laserscanning eller fotogrammetri er anvendt til eftersyn af bygværker.

Teza m.fl. (2009) undersøgte muligheden for at udføre eftersyn, alene på baggrund af data fra terrestrisk laserscanning. Undersøgelsen viste, at det var muligt at detektere skader i beton, i punktskyen. Hvad undersøgelsen også viste var, at dette stiller høje krav til punkttætheden. Kun skader på 10 gange punktætheden kunne detekteres med sikkerhed. I projektet blev punktætheden fastsat til 1,5 cm, hvilket betød at skader på en størrelse af 15 cm kunne detekteres med sikkerhed.

Remondino m.fl. (2005) opnåede en punkttæthed på 0,7 mm med laserscanning alene på en scanning af en kirke. For at konstruere den samlede punktsky, blev der registreret scanninger hele vejen rundt om kirken. Denne registrering blev først foretaget på baggrund af targets og efterfølgende forstærket ved brug af cloud-to-cloud. Ved en efterfølgende kontrol mod en række kontrolpunkter fandt Remondino m.fl. (2005) frem til, at der på kontrolpunkterne kunne regnes en RMSE på 4,3cm i X, 4,7cm i Y og 3,3 cm i Z.

For at undersøge forskelle i den geometriske præcision ved laserscanning og fotogrammetri, foretog Riveiro m.fl. (2013) en sammenligning af målinger af frihøjden under en bro. Disse målinger blev holdt op mod kontrolmålinger, foretaget med en totalstation. Riveiro m.fl. (2013) opnår her en bedre præcision ved laserscanning, end ved fotogrammetri. Fotogrammetrien afviger med op til 2 cm fra

⁷På side 758 skriver forfatterne, at der ikke kan udlæses en punktsky fra programmet RealityCapture, hvorfor der kontrolleres mod et mesh. Dette stemmer dog ikke overens med oplysninger fra RealityCapures hjemmeside for support.

totalstationen, ved 25 m afstand, til sammenligning afviger laserscanningen med 9 mm.

Mader m.fl. (2015) undersøger den geometriske præcision ved fotogrammetrisk konstruerede 3Dmodeller holdt op imod både luftbåren laserscanning og terrestrisk laserscanning. Her ses en afvigelse på 4,9 cm mellem fotogrammetri og terrestrisk laserscanning, mens der ved luftbåren laserscanning ses en afvigelse på 32 cm fra terrestrisk laserscanning.

Pinto m.fl. (2020) konstruerer i deres projekt to modeller af to forskellige broer. Der bliver beregnet spredninger på henholdsvis 5,1 cm og 2,3 cm, når de to broer sammenlignes med terrestrisk laserscanning. Detaljeringsgraden i de to modeller vurderes god nok til eftersyns formål, heri ligger detektering af revner og fugtskader.

Vejdirektoratet og virksomheden EasyInspect har i forbindelse med deres pilotprojekt i 2019, konstrueret en komplet model af en dansk bro kun ved brug af fotogrammetri. Der blev i projektet opnået en GSD på 1-2 mm og detaljeringsgraden blev fundet tilfredsstillende i forhold til kravet om, at kunne se revner med en revnevidde på 0,2 mm.

Hellmuth m.fl. (2020) undersøger i deres projekt fra 2020, hvilken effekt valg af kamera på detaljeringsgraden i en hybridmodel. Til undersøgelsen suppleres en laserscanning med billeder fra henholdsvis et spejlreflekskamera og smartphones. Hellmuth m.fl. (2020) finder her, at valget af kamera har en betydelig effekt på detaljeringsgraden, og at der med spejlreflekskameraet opnås en model med betydeligt mindre støj. Dertil finder Hellmuth m.fl. (2020), at den anvendte beregningssoftware (RealityCapture) er i stand til automatisk at lokalisere en større andel af billederne ved det bedre kamera end ved brug af smartphones.

Castilla m.fl. (2021) undersøgte i deres projekt brugen af hybridmodeller til dokumentation af historiske dueslag. Ved brug af en terrestrisk laserscanner og et spejlreflekskamera, var det muligt for dem at opnå modeller med en geometrisk præcision på 1,2 mm for laserscanningen og 5,5 mm for fotogrammetrien. Punkttætheden blev ved udtynding fastsat til 0,8 punkter pr. cm³, da det var tilstrækkeligt til projektets formål.

Luhmann m.fl. (2020) undersøger en række aspekter ved hybridmodeller i deres projekt. Herunder hvad man kan opnå med forskellige laserscannere, samt brugbarheden af forskellige software løsninger til beregninger af hybridmodeller. I dette projekt finder forfatterne dels frem til, at der med bedre udstyr (i dette tilfælde Faro TLS), kan opnå en højere punkttæthed på kortere tid og med færre opstillinger (sammenlignet med Leica's BLK360). Yderligere finder forfatterne også frem til, at den rette software kan have en betydelig effekt for kvaliteten og detaljeringsgraden af den endelige model.

Billederne taget med drone har en GSD på 5-11 mm og er tættere for de terrestriske billeder. Luhmann m.fl. (2020) opnår slutteligt en hybridmodel en punkttæthed på ca. 5 mm.

Projekterne, gennemgået i dette kapitel, har haft til formål at klarlægge, hvorvidt hybridmodeller kan anvendes til eftersyn af broer. Der er, som tidligere beskrevet, ikke nogle konkrete krav til den geometriske præcision, men en forventning om at skader og særligt revner, helt ned på 0,2 mm, skal kunne detekteres.

På baggrund af eksisterende projekter omhandlende terrestrisk laserscanning, fotogrammetri og hybridmodeller, må der derfor vurderes, at laserscanning alene ikke vil kunne løse denne opgave, da detaljeringsgraden som udgangspunkt er for lav til at kunne detektere de helt små skader. For at opnå en detaljeringsgrad der kan løse denne opgave, kan i stedet anvendes fotogrammetri. Såfremt der anvendes det rette kameraudstyr, kan der konstrueres 3D-modeller, hvori små detaljer tydeligt fremgår. Som det blev påvist i flere af de nævnte projekter er den geometriske præcision ved fotogrammetri alene, ikke nær så høj som ved terrestrisk laserscanning. Ved at kombinere laserscanning og fotogrammetri er det muligt at få strukturen og den geometriske præcision fra laserscanningen, samt den høje detaljeringsgrad fra fotogrammetrien. Dette fremgik også af de nævnte artikler og projekter omhandlende hybridmodeller. Det blev her præsenteret, at der med det rette udstyr og software kan opnås hybridmodeller, som kan holde en geometrisk præcision på millimeterniveau, samt en detaljeringsgrad som muliggør fundet af små detaljer.

Det er ikke muligt, at konkludere noget definitivt, om hvovidt hybridmodeller er en brugbar metode til eftersyn, men med udgangspunkt i de præsenterede artikler, vurderes det alligevel, at metoden har potentiale og bør undersøges nærmere i praksis. Ved at udnytte de erfaringer andre har gjort sig, kan der dannes en godt grundlag for, at hybridmodellens delelementer, her menes laserscanningens punktsky og fotogrammetrien, bliver så gode som muligt. Herefter vil det være et spørgsmål om, hvor godt dette kan kombineres i en hybridmodel ved senere databehandling.

Der vil i det kommende kapitel blive opstillet en model for indsamling af data, som muliggør en videre undersøgelse heraf.
5 Dataindsamling

Dette kapitel omhandler projektets dataindsamling. Der vil i det følgende blive opstillet en kravsspecifikation på baggrund af undersøgelserne foretaget i kapitel 4. I kravsspecifikationen vil både krav og forventninger til den endelige hybridmodel blive opstillet. Med udgangspunkt i denne kravsspecifikation vil der blive opstillet et undersøgelsesdesign, hvori beslutninger om udstyr og dataindsamlingen træffes. Det er også her, at besvarelsen af problemformuleringens tredje underspørgsmål; *Hvordan sikres en tilstrækkelig kvalitet af modellen under dataindsamling?*, påbegyndes. Spørgsmålet kan først endeligt besvares, når modellen er beregnet, men det er i dette kapitel der tages stilling til hvilke forbehold der bør tages, for at opnå den rette geometriske præcision og detaljeringsgrad. Slutteligt vil der i dette kapitel blive foretaget en evaluering af dataindsamlingen, hvor der vil blive samlet op på de indsamlede data, samt eventuelle problematikker derved.

5.1 Kravspecifikation

I dette afsnit vil der, som beskrevet i kapitlets indledning, blive opstillet en kravsspecifikation for den endelige hybridmodel. Denne vil blive udformet på baggrund af de udledte krav fra afsnit 4.1. I afsnit 4.2 blev andre projekter, omhandlende laserscanning, fotogrammetri og hybridmodeller, undersøgt. Da der ikke kan drages direkte paralleller mellem de projekter og dette, anvendes deres erfaringer derfor som forventninger til, hvad modellens delelementer og den endelige model skal kunne efterleve. I afsnittet vil der blive redegjort for, hvilke krav der stilles og hvorfor. Afsnittet er opdelt i kravene der stilles til henholdsvis; laserscanning, fotogrammetri og den færdige hybridmodel. Endeligt vil disse blive listet op for at give et overblik over kravene til videre brug og evaluering.

Laserscanning

Ved konstruktion af hybridmodeller er laserscanningens hovedformål at fastsætte skala til fotogrammetrien, samt at skabe et geometrisk "skellet", som fotogrammetrien kan støtte sig til på store og ensformige områder. En vigtig forudsætning for laserscanningen er derfor, at der sikres god overensstemmelse de enkelte opstillinger imellem. Det vurderes derfor, at der skal sættes et krav til spredningen på registrering af punktskyer fra laserscanning. Luhmann m.fl. (2020) præsenterer ved et bevaringsprojekt, at det er lykkedes at registrere punktskyerne med en præcision på 4 mm. Da der i dette projekt bliver behandlet broer fremfor bevaring af bygninger, vurderes det, at en fastsættelse på 2 mm til registrering af punktskyer er nødvendig, for at måle korrekt på tværs af opstillinger. Vi fastsætter kravet lavere end Luhmann m.fl. (2020), for at sikre korrekte målinger på tværs af opstillinger.

I samme bevaringsprojekt fra Luhmann m.fl. (2020) blev der opnået god overensstemmelse mellem fotogrammetri og laserscanning, ved at have en gennemsnitlig punkttæthed på 3-5 mm i den endelige punktsky fra terrestrisk laserscanning. Derfor fastsættes et krav om, at den endelige punktsky skal holde en punkttæthed på omkring 3-5 mm.

Fotogrammetri

Ved fotograferingen af broen, skal der sikres et godt overlap mellem billederne. Dette har til formål at sikre gode fællespunkter mellem billederne, når den endelige model skal beregnes. Castilla m.fl. (2021) og Luhmann m.fl. (2020) har opnået gode modeller ved bl.a., at sørge for, at billeder overlapper med mindst 60%. På baggrund af dette vil et af kravene til dataindsamlingen være, at billederne skal overlappe med mindst 60%.

For at sikre den rette detaljeringsgrad i modellen, må der først og fremmest tages udgangspunkt i modellens formål. Formålet med denne er eftersyn og broer, hvilket betyder at detaljer, som revner og andre skader skal kunne ses i modellen. I Vejdirektoratets pilotprojekt blev der arbejdet med en GSD på 1-2 mm, hvilket blev fundet tilfredsstillende til samme formål. Med udgangspunkt i dette, fastsættes et krav om en GSD på 1 mm.

Hybridmodellen

Som beskrevet tidligere, er det primære fokus ved eftersyn, det visuelle aspekt. Ved eftersyn skal skader som revner, rust, fugtskader, hærværk mm. kunne ses. Med udgangspunkt i de udledte krav fra Hoedeman m.fl. (2019b), fastsættes derfor også et krav om, at denne typer skader skal kunne ses tydeligt i den endelige hybridmodel.

Der er som tidligere beskrevet ingen reelle krav til den geometriske præcision ved eftersyn. Måden hvorpå skader bliver målt i dag, stiller heller ikke høje krav til præcisionen. Efter samtaler med Vejdirektoratet, er der dog diskutereret et muligt potentiale for monitorering af skadesudvikling. Såfremt modellen kan opdateres over tid, med nye billeder af en skade og denne kan måles med en fornuftig præcision, vil en skadesudvikling kunne dokumenteres grundigt og nedsætte behovet for større eftersyn.

På baggrund af dette vurderes en spredning på måling af afstande på 5 mm, at være tilfredsstillende til formålet, hvorfor dette fastsættes som et krav til den færdige hybridmodel.

Opsummeret kravspecifikation

Kravene beskrevet ovenfor vil i det følgende blive opsummeret, for at give en samlet liste over krav til indsamlingen af data.

- Præcision ved registrering på 2 mm.
- Punkttæthed ved scanning: 3-5 mm i den samlede punktsky.
- Der skal være stort overlap mellem billeder, mindst 60%.
- Ground Sampling Distance på 1 mm.
- Skader som revner, rust, fugtskader, hærværk mm. skal kunne ses i hybridmodellen.
- Spredning på måling af afstande: 5 mm i hybridmodellen.

Med udgangspunkt i de ovenstående krav, vil der i det kommende afsnit blive udarbejdet et undersøgelsesdesign for dataindsamlingen. Kravsspecifikationen vil således blive anvendt til at fastsætte rammerne for dataindsamlingen (afsnit 5.2), men vil også blive anvendt til kontrol af den endelige hybridmodel (i afsnit 6.4).

For at det senere er muligt at holde modellen op mod kravsspecifikationens krav om geometrisk

præcision, skal der udføres en række kontrolmålinger. Disse skal være inkorporeret i undersøgelsesdesignet, da kontrolmålene skal kunne ses i den endelige hybridmodel. På denne måde vil kontrolmål foretaget i marken, kunne sammenlignes med kontrolmål foretaget i modellen. Hvordan kontrolmålingerne skal foretages, og hvordan dette influerer på undersøgelsesdesignet, vil blive præcenteret i det kommende afsnit.

5.2 Undersøgelsesdesign

I det følgende vil undersøgelsesdesignet til dataindsamlingen blive gennemgået. Dette gøres med henblik på at honorere kravene opstillet i forrige afsnit. I kravsspecifikationen er der fastsat specifikke krav om bl.a. GSD og punkttæthed, hvilket der skal tages hensyn til allerede ved dataindsamlingen. For at dette kan lade sig gøre, må der først træffes et valg om udstyr, for at sikre, at udstyret har de rette tekniske specifikationer. Der bør dog også tages hensyn til, hvilken type bro der skal modelleres, da f.eks. frihøjderne under broen vil have betydning for bl.a. punkttætheden og GSD'en.

Arbejdet med data, fra dataindsamling til endelig konklusion, vil tage følgende form (se figur 5.2.1):



Figur 5.2.1: Flowchart over undersøgelsesdesign

Dette afsnit omhandler dataindsamlingen og designet deraf, markeret med den orange boks. I det følgende vil der derfor være en præsentation af det valgte område til dataindsamlingen. Efterfølgende præsenteres det valgte udstyr, samt en detailplan for dataindsamlingen. Med de seks lilla bokse er de seks krav fra kravsspecifikationen.

Overlap på 60% mellem billederne og en GSD på 1 mm er begge krav, der skal tages hensyn til ved fotograferingen, hvorfor de begge påvirker måden data indsamles på.

Kontrol af registreringen og kontrol af punktætheden er begge krav, der også skal tages hensyn til

ved dataindsamlingen, men kan først kontrolleres, når registreringen finder sted. Hvad der gøres for at imødekomme kravene, vil fremgå af detailplanlægningen senere i dette afsnit.

Den resterende del af diagrammet omhandler databehandling og vurdering af hybridmodellen, hvilket vil blive gennemgået i kapitel 6.

5.2.1 Præsentation af område

Ved valg af område og bro til dette projekt er der blevet lagt vægt på tilgængelighed. Årsagen til dette er bl.a., at det ikke er muligt at flyve med drone, hvorfor billeder må tages håndholdt. Det sætter derfor en begrænsning i forhold til frihøjder, for stadig at kunne lave en model, der kan simulere, hvad der er muligt ved større broer, hvis en drone er til rådighed. På baggrund af disse begrænsninger, er valget af bro landet på Folehavebroen i Valby (se figur 5.2.2).

Folehavebroen er en cykelbro, der forbinder Vigerslevparken henover vejen Folehaven i København.



Figur 5.2.2: Folehavebroen i Google Maps

Planerne for Folehavebroen startede i 2011 med tanken om at skabe en sikker forbindelse, over den tungt trafikeret Folehaven, for de bløde trafikanter. Byggeriet af Folehavebroen blev påbegyndt i 2019, og broen stod færdig i april 2020 (Rich, 2020).

Folehavebroen er 5,5 m bred og 137 m lang, frihøjden under broen spænder mellem ca. 1-5 m (Rich, 2020).

Broens underside og stolper består af stålelementer, og de to ramper ved broens ender består begge i beton, se figur 5.2.3 og 5.2.4.



Figur 5.2.3: Cykelbroen over Folehaven i Valby

Som det kan ses af figur 5.2.3, er der gode adgangsmuligheder til alle broens delelementer, hvilket er af stor betydning, da billeder, som tidligere nævnt, vil blive taget håndholdt. Det er derfor også vigtigt, at broen ikke er højere, da billeder under broen skal kunne tages med den rette afstand for at sikre den rette GSD.



(a) Betonelement ved rampe

(b) Betonelement under broen

Figur 5.2.4: Cykelbro over Folehaven i Valby

Til trods for at denne bro ikke er særlig gammel, vurderes den stadig brugbar til dette projekt. Det kan ses af figur 5.2.4, at der allerede er begyndt at dannes misfarvning på broens betonelementer. Disse vil kunne bruges i vurderingen af den endelige 3D-model, da disse skal fremgå tydeligt, for at modellen er brugbar.

Med informationerne om broens dimensioner kan der træffes valg om rette udstyr til opgaven, samt beslutninger om antallet af opstillinger, billeder og afstande til broen.

5.2.2 Detailplanlægning af dataindsamling

I dette afsnit vil planlægningen af fremgangsmåden for dataindsamlingen blive beskrevet. Dette inkluderer valg af instrumenter til indsamling af de forskellige datatyper. Med udgangspunkt i instrumenter og kendskabet til det valgte område, kan der planlægges i detaljer omkring opstillingers geometri og afstande til broen. For at kunne kontrollere om den endelige model lever op til kravsspecifikationen, skal der under dataindsamlingen også foretages kontrolmålinger, som ligeledes beskrives i følgende afsnit.

Laserscanner

Ved valg af scanner til dette projekt er særligt to aspekter i fokus; afstand og datakvalitet. Ved afstanden skal der forstås afstanden mellem scanner og objekt. I dette tilfælde er det broen, som er objektet, og særligt frihøjderne under broen kommer til at være i fokus. Som beskrevet i afsnit 5.2.1 er disse frihøjder under 10 m, hvilket betyder, at der er behov for en short- til midrange scanner. For at honorere kravene opstillet i afsnit 5.1, skal scanneren kunne levere en punkttæthed på 6 mm på 10 m eller tættere (jf. erfaringer fra Luhmann m.fl. (2020)). Der er mange scannere på markedet, som vil være i stand til at løse denne opgave. Til rådighed ved dette projekt er en Zoller + Fröhlich Imager 5016. Denne scanner har en rækkevidde på 0.3 til 365 m og en afstandbehæftet fejl på 1 mm +10 ppm/m, samt en vertikal og horisontal præcision på 0.004° (14.4 arcsec) rms.

Z+F 5016 er en moderne fasebaseret scanner, den blev kort præsenteret i afsnit 4.2 i forbindelse med præsentationen af Kersten m.fl. (2020)'s projekt. Her blev der påvist lavere afvigelser ved en kontrol af målinger, ved sammenligning med Leica's RTC360. Z+F 5016' scanneren kan indsamle data med en punkttæthed ned på under 1 mm på 10 meters afstand, hvilket langt overstiger den nødvendige punkttæthed i dette projekt.

Z+F 5016'scanneren kan scanne ved syv forskellige opløsninger (angle resolution) og fire kvalitetsindstillinger (quality). Z+F oplyser disse som vist på figur 5.2.5.

Resolution					
		Scan duration			
Angle resolution	pixel/360° horizontal & vertical	"less quality" ⁶	"normal quality" ⁶	"high quality" ⁶	"premium quality" ⁶
"preview" 4	1,375		0:28 min		
"low"	2,750	0:26 min	0:56 min	1:52 min	
"middle"	5,500	0:52 min	1:52 min	3:44 min	7:28 min
"high"	11,000	1:44 min	3:44 min	7:28 min	14:56 min
"super high"	22,000	3:28 min	7:28 min	14:56 min	29:52 min
"ultra high" 5	44,000		14:56 min	29:52 min	59:44 min
"extremely high" ⁵	88,000			59:44 min	119:28 min

Figur 5.2.5: Z+F opløsning ved scanningsinstilliger.

Som det kan ses af ovenstående figur, oplyser Z+F deres opløsning i antal pixels per 360°. For at kunne sammenligne dette med kravet fra kravsspecifikationen (3-5 mm mellem punkterne i den samlede punktsky), må dette omregnes til afstand mellem punkter.

Ved omregning til afstand mellem punkter, beregnes først størrelsen på det enkelte pixel (i grader), som vist herunder i figur 5.2.6:

$$V_P = 360^{\circ}/P_{Total}$$

Figur 5.2.6: Vinkel per pixel i grader, efter antallet af pixels på en omgang

Her er V_P størrelsen i grader på hver enkelt pixel og P_{Total} er det samlede antal pixels på en omgang.

Efterfølgende benyttes trigonometrien til at regne afstanden mellem punkter på 10 meters afstand. Denne omregning til afstand mellem punkter på 10 meters afstand foretages, da dette er en gængs måde at angive punkttæthed på for punktskyer fra terrestrisk laserscanning.

$$P_{Density} = 10m * Tan(V_P)$$

Figur 5.2.7: Punkttæthed på 10 m

Her er $P_{Density}$ afstanden mellem punkterne på 10 meters afstand og V_P er størrelsen på hver enkelt pixel i grader, som regnet ovenfor i figur 5.2.6.

Resolution	Pixel/360°	Punkttæthed @ 10m
"preview"	1.375	45,7 mm
"low"	2.750	22,8 mm
"middle"	5.500	11,4 mm
"high"	11.000	5,7 mm
"super high"	22.000	2,9 mm
"ultra high"	44.000	1,4 mm
"extremely high"	88.000	0,7 mm

Dette fører til følgende punkttætheder ved 10 meters afstand:

Figur	5.2.8:	Beregnede	punkttætheder
-------	--------	-----------	---------------

På baggrund af erfaringerne fra bl.a. Luhmann m.fl. (2020), vurderes det, at der med en punkttæthed på ca. 6 mm ved 10 m afstand, bør kunne opnås den rette punkttæthed i den samlede punktsky. Der vil derfor blive scannet med "high resolution"ved dataindsamlingen.

Som der også kan ses af figur 5.2.5, er der fire kvalitetsindstillinger at vælge mellem. Jo bedre kvaliteten er, des lavere er støjniveauet ved scanningen. Dette sker efter forholdet, når tiden for dataindsamling fordobles, vil støjen teoretisk blive $\sqrt{2}$ gange mindre (Zoller + Frölich GMBH, 2021). For at opnå høj kvalitet ved scanningen, uden tidsforbruget bliver for højt, vil der blive scannet med "high quality" (se figur 5.2.5).



Figur 5.2.9: Planlagt opstilling af scanstationer og targets, på ene side af broen

Ved scanningen af broen vil der, blive opstillet sfæriske targets med en diameter på 145 mm. Disse skal senere bruges til registreringen af punktskyerne for at få så præcis en registrering som mulig. På figur 5.2.9 er planen for den ene halvdel af dataindsamlingen illustreret (på den ene af broens to sider). Med røde cirkler er den tænkte placering af sfæriske targets vist, mens de blå trekanter illustrerer opstillinger med laserscanneren. Targets vil blive placeret, så de omringer broen fra jorden, men placeres også i højden, således at geometrien er stærk i alle tre dimensioner.

For at dække alle kroge af broen påtænkes det at foretage ca. fem opstillinger på hver side af broen, tre af opstillingerne foretages tæt ved broen og to i ca. 10 meters afstand. For at få et godt overlap op mod toppen af broen, foretages også en scanning oppe på hver side af broen (som illustreret med trekanten i nedre venstre hjørne af figur 5.2.9). Disse skal binde de tre scanninger fra broens overside sammen med scanningerne under broen.

Til dette projekt er det besluttet, at ikke hele broen skal modelleres, området der vil blive arbejdet med er afgrænset af cykelstien der går under broen.

Kamera

Til indsamling af billeder vil der blive anvendt et 42,4 MP Sony α 7R II kamera med et 35 mm objektiv. Billederne af broen vil blive taget håndholdt, hvilket kan være ustabilt og skabe rystede billeder, Sony's kamera har en fem-akses billedestabilisator, som skulle mindske dette. Kameraet er udstyret med en ISO på 50-102400. Dette skulle gøre det muligt at optage gode fotos, selv når det naturlige lys er lavt, da ISO er med til at forstærke lyset der optages (Sony Nordic 2021). Billederne tages med et tidsforkortelsesprogram, hvilket betyder, at kameraet tager et billede hvert

andet sekund med samme fokus som indstillet på første foto.

For at undersøge hvilken afstand billederne skal tages med, med dette kamera, for at opnå en GSD på 1 mm, beregnes dette ud fra kameraets specifikationer.

Ved beregningen af GSD indgår fire elementer; pixelstørrelsen i det anvendte kamera, kamerakonstanten, linsen på kameraet og højden over det optagede objekt. På figur 5.2.10 herunder er forholdet mellem disse illustreret.



Figur 5.2.10: GSD beregning Kilde: Egenproduktion

Til beregningen af GSD'en tages udgangspunkt i Flatman (2018), hvilket gennemgås i følgende figur(5.2.11) og nærmere detaljeret i Bilag 3.

$$h = \frac{c * GSD}{pxs}$$

Figur 5.2.11: Forhold mellem GSD og afstand mellem kamera og objekt Kilde: Flatman (2018)

På figur 5.2.11 beregnes højden (h) over et objekt, når der tages udgangspunkt i et kamera med en bestemt pixelstørrelse (pxs) og kamerakonstant (c). Dette gøres på baggrund af en på forhånd

ønsket Ground Sampling Distance (GSD). Når den specifikke pixelstørrelse ikke kendes, kan udtrykket omskrives til det følgende:

$$afs[cm] = \frac{c[cm] * GSD[cm]}{\left(\frac{SH[cm]}{IH[px]}\right)}$$

Figur 5.2.12: Forhold mellem GSD og afstand mellem kamera og objekt

Her ses der i figur 5.2.12, at pixelstørrelsen er blevet erstattet af forholdet mellem billedets højde (IH) og sensorens højde (SH). Derudover er højden (h) erstattet af afstand (afs), da der er tale om afstanden til et objekt fremfor en flyvehøjde (har samme enhed).

$$afs = \frac{3.5cm * 0.1cm}{\left(\frac{2.4cm}{5304px}\right)} = 7.73m$$

Figur 5.2.13: Maksimal afstand til objekt med GSD = 1 mm

Gennem dataindsamlingen med kamera til den fotogrammetriske del af hybridskyen vil kravet om en GSD på 1 mm skulle overholdes, derfor tages alle billeder højst 7,7 m afstand til broen (jf. figur 5.2.13). Dertil skal kravet om 60% overlap mellem billeder til den fotogrammetriske beregning også overholdes. Dette vil dog være en værdi, der forsøges overgået i betydeligt omfang.

For at dokumentere broen fotogrammetrisk, skal der planlægges en rute, som muliggør at efterfølgende billeder overlapper hinanden. Derfor planlægges det, at broen dokumenteres i et loop med flere underloops. Ruten er illustreret på figur 5.2.14.



Figur 5.2.14: Planlagt rute for fotografering Kilde: Ortofoto fra Google Maps - Egen rute

Første del af ruten (gul) dækker oversiden af broen, samt oversiden af fundamentet ved broens ende. Derfra foretages næste del af loopet (rød), der dækker over oversigten af siderne på broen, samt undersiden af fundamentet ved enden af broen. Til sidst foretages der loops (lilla) omkring bropillerne og de nærmere detaljer af undersiden af broen, da denne ikke nødvendigvis tydeligt fremgår af det overordnede loop.

Ved at bygge den fotogrammetriske dataindsamling op på denne måde, sikres et godt antal overbestemmelser. Ved at tage alle billederne i en sammenhængende serie, styrkes den senere databehandling også, da softwaren der bruges til modelleringen, skal bruge overlappet mellem billederne for at kunne danne fællespunkter.

Kontrolmåling

For at kontrollere at kravene om; at der opnås en præcision ved registrering af punktskyer på 2 mm, samt en spredning på måling af afstande på 5 mm i hybridmodellen, foretages der en række kontrolmålinger ved dataindsamlingen.

For at kontrollere registreringen af punktskyerne, anvendes sfæriske targets ved dataindsamlingen. Til kontrolmålingen anvendes targets, hvor kuglen kan skiftes ud med et prisme, hvorefter de kan måles med totalstation. Denne kontrolmåling vil foregå med en Leica TS60 totalstation, som har en præcision på 0,6 mm + 1ppm på afstandsmålinger til prisme og vinkelpræcision på 0,5 buesekunder (0,15mgon). De sfæriske targets ses illustreret herunder i figur 5.2.15, hvor foden af target forbliver på samme sted, mens toppen enten kan være en kugle eller et prisme.



Figur 5.2.15: Sfærisk target med adapter til prisme

Dertil vil der blive markeret en række afstande på selve broen, som både måles polært med totalstation og i hybridmodellen for at undersøge præcisionen af den endelige model. Disse afstande vil bestå af en række korte afstande på omkring 10 cm for at kontrollere den lokale præcision, og en række længere afstande, for at måle præcisionen på tværs af flere registrerede punktskyer. Der vil blive foretaget mindst 20 kontrolmål af hver slags, for at have en fornuftig stikprøve til beregning af spredninger.

For at undersøge hvad der præcisionsmæssigt kan opnås ved kontrolmåling med totalstation, opstilles et testnet, som viser den teoretisk opnåelige præcision. Dette kan gøres på baggrund af de planlagte observationer alene, ud fra antal og fordeling af planlagte målinger, sammen med præcisionen på det anvendte instrument. Dette kaldes beregning af kovariansmatricen og kan stilles op på følgende vis (Cederholm, 2000, s. 59):

$$\sum_{x} = (A^T * C * A)^{-1}$$

Figur 5.2.16: Kovariansmatricen Kilde: Cederholm (2000, s. 59)

Designmatricen (A) fortæller om den geometriske relation mellem målte punkter, mens vægtmatricen (C) omhandler de vægtede usikkerheder på hver enkelt måling.

Processen, som ganske simpelt blev præsenteret ovenfor, kaldes at beregne et testnet. Formålet med at beregne et testnet er, at kunne bestemme, om en nødvendig præcision kan opnås på baggrund af en række forudbestemte observationer (Cederholm, 2000, s. 59). I det følgende vil et testnet stilles op for broen i projektområdet ved at bruge programmet TMK (Et program udviklet til landinspektørstudiet af Karsten Jensen).

Testnettet tager udgangspunkt i en række foreløbige placeringer af fikspunkter i projektområdet. Disse ses illustreret på figur 5.2.17 herunder. Her ses fikspunkterne jævnt fordelt omkring broen for at sikre god geometri ved opmåling med totalstation.



Figur 5.2.17: Foreløbig placering af fikspunkter i projektområdet

Fikspunkterne indlæses herefter i TMK, sammen med den omtrentlige placering af opstillingen med totalstationen og typen heraf. Da TMK er et ældre stykke software, kan nyere instrumenter

ikke vælges, og det bedste tilgængelige instrument blev derfor valgt. Det valgte instrument er af typen Leica TC1201+, hvilket har en spredning på vinkelmålinger på 0,3 mgon og en spredning på afstandsmålinger på 1 mm + 1 ppm. Det anvendte instrument til dataindsamling er af typen Leica TS60 med en spredning på vinkelmålinger på 0,15 mgon og spredning på afstande på 0,6 mm + 1 ppm. Resultater fra det beregnede testnet, må derfor forventes at overstige afvigelserne, der teoretisk kan forventes med det anvendte instrument.



Figur 5.2.18: Konfidensellipser regnet i TMK

Efterfølgende udvælges placeringen og mængden af detailpunkter, som testnettet beregnes på baggrund af. Herover (i figur 5.2.18) ses testnettet illustreret ved fikspunkterne og opstillingen med totalstation, samt 5 detailpunkter placeret i en afstand på omkring 5 til 45 meter med 10 meters afstand imellem. Disse detailpunkter er markeret ved deres konfidensellipser. Konfidensellipserne er generelt små, men for at undersøge størrelsen af disse nærmere, vises herunder et udsnit fra dokumentationsfilen for TMK-beregningen.

Nr		sigma E meter	sigma N meter	a meter	b meter	pfi gon	sigma H meter	sigma K gon
Kend	te punkter							
	10001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	147.86	0.0000	
	10002	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	140.40	0.0000	
	10003	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	54.56	0.0000	
	10004	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	167.39	0.0000	
	10005	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	48.74	0.0000	
	10006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.99	0.0000	
Opst	illingspunl	ct						
	9999	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	62.67	0.0002	0.0004
Deta	ilpunkter							
	1001	0.0006	0.0012	0.0012	0.0006	0.14	0.0006	
	1002	0.0006	0.0012	0.0012	0.0006	199.89	0.0006	
	1003	0.0006	0.0012	0.0012	0.0006	199.64	0.0006	
	1004	0.0006	0.0012	0.0012	0.0006	199.38	0.0006	
	1005	0.0006	0.0012	0.0012	0.0006	199.08	0.0006	
	Min:	0.0006	0.0012	0.0012	0.0006		0.0006	
	Middel	0.0006	0.0012	0.0012	0.0006		0.0006	
	Max:	0.0006	0.0012	0.0012	0.0006		0.0006	

Figur 5.2.19: Dokumentation fra TMK

Når detailpunkterne i dokumentationsfilen betragtes på figur 5.2.19, ses det at størrelsen på ellipserne i afstandsretningen (a) er på 1,2 mm, mens størrelsen fra vinkelbidragene i b og højde er på 0,6 mm. For at imødekomme instrumentets specifikationer og retningen for de enkelte fejlbidrag, vil kontrolmålingerne opstilles på følgende vis:

På de tre første søjler af broens rækværk opsættes punkter, hvor afstanden måles internt på hver søjle. På denne måde bliver afstandsbidraget næsten elimineret og kun de mere præcise vinkelbestemmelser horisontalt og vertikalt vil have stor betydning for afstanden punkterne imellem.

Ligeledes vil der blive sat en række punkter op på søjlerne 20-30 meter tilbage på broen. Fra disse punkter måles den lange afstand tilbage til de første tre søjler. Dette gøres, da det afstandsafhængige afstandsbidrag er, at betragte som identiske på så korte afstande, dermed skal der kun tages højde for grundfejlen på korte afstandsmålinger. Vinkelbidraget stiger derimod på afstanden, hvis der manuelt skal stilles ind på et veldefineret punkt.

For at kunne georeferere hybridmodellen, indmåles en række fikspunkter med GNSS. Den geometriske nøjagtighed på disse er ikke noget der prioriteres, da punkterne blot skal bruges til en grov placering af modellen. Årsagen til, at dette bliver gjort, er at programmet der bruges til at konstruere hybridmodellen ikke tillader målinger i modellen, hvis ikke den er georefereret.

Fikspunkternes præcision og deres indflydelse på konstruktionen af modellen, vil blive sat ned, så det som udgangspunkt er laserscannerens geometri der er bærende. For at kunne georeferere modellen, indmåles disse punkter også med totalstationen.

I dette afsnit er der blevet opstillet et design for dataindsamlingen. For at honorere kravene i kravsspecifikationen, er der blevet foretaget valg vedrørende område, udstyr, rette brug af udstyr, samt regnet på kvaliteten af det planlagte polære net. Hvorvidt dette er nok til at honorere de førnævnte krav, kan ikke besvares før data er behandlet og spredninger/afvigelser kan beregnes. Den endelige konklusion på, om dataene har den rette kvalitet til brug i hybridmodellen, vil derfor først blive besvaret i *Kapitel 6 Databehandling*.

Forud for at databehandlingen kan finde sted, skal data først indsamles. Dataindsamlingen, samt eventuelle udfordringer herved, vil blive præsenteret i det kommende afsnit; *Evaluering af dataind-samling*.

5.3 Evaluering af dataindsamling

Ved dataindsamlingen blev der foretaget 15 opstillinger med laserscanner og opstillet 14 sfæriske targets. Da en stor del af dataindsamlingen med laserscanner er foretaget på asfalteret underlag, blev der anvendt et rullestativ, så instrumentet nemt kunne rykkes fra opstilling til opstilling. Kun de sidste seks opstillinger er foretaget uden stativet, da disse var på græs. På figur 5.3.1 ses en af opstillingerne foretaget under broen, markeret med cirkler ses seks af de opstillede targets.



Figur 5.3.1: Opstilling under broen med laserscanner

Som det fremgår af figur 5.3.2, er der foretaget scanninger både under- på siden af- og på broen, for at sikre, at alle elementer er scannet.

Scanneren blev indstillet til *high resolution* og *high quality*, hvert scan tog dermed ca. 7 min. og 30 sek. Med de 14 scanninger og planlægning, samt flytning af scanneren undervejs, tog det ca. 2,5 time at indsamle scanningsdataene. Alle scanninger er foretaget indenfor ca. 10 meters afstand af broen, pånær en enkelt. Der blev foretaget en enkelt scanning på ca. 20 meters afstand, midt ude på græsplænen, for at have en scanning der dækkede det meste af broen.



Figur 5.3.2: Opstilling under og på broen

Da dataindsamlingen har fundet sted på et befærdet og offentligt tilgængeligt område, over flere timer, er der usikkerhed omkring sikkerheden af enkelte targets. Det mistænkes, at ét target er blevet flyttet på af forbipasserende, men dette kan først bekræftes med sikkerhed, når dataene er behandlet. Det vurderes ikke at være et alvorligt problem, da der stadig er mange targets, der ikke er blevet flyttet på, dermed kan det ene, om nødvendigt, ekskluderes.

Med kameraet er der taget 249 fotos, et udpluk fra billedeserien kan ses herunder (figur 5.3.3).



Figur 5.3.3: Billedeserier fra fotografering

Billederne består af to udpluk fra den samlede serie af billeder. Som det kan ses, er billederne taget med stort overlap, for at kunne skabe gode fællespunkter. Kameraet var indstillet med en F/9, ISO på 1250 og en lukkertid på 1/3200 sek.

Til kontrolmålinger blev der opsat seks striber tape, med ni krydser på, et eksempel kan ses herunder i figur 5.3.4.



Figur 5.3.4: Billede af kontrolpunkter

Kontrolpunkterne der kan ses af figuren ovenfor, er placeret på broens første gelænderstolpe i venstre side. Der er ligeledes placeret en på hver den anden, tredje, tiende, ellevte og tolvte stolpe i samme side, på denne måde kan der både laves korte og lange kontrolmål over punkterne. Kontrolpunkterne er fotograferet, så de kommer til at indgå i hybridmodellen. For at have et kontrolmål at holde det op i mod, eller en uafhængig måling på afstandende mellem punkterne, er alle 54 krydser målt ind med totalstation.

Der er samlet set foretaget tre opstillinger med totalstationen, for at kunne indmåle de 54 kontrolpunkter, 12 ud af de 14 sfæriske targets¹, samt seks georefererede punkter (Netskitsen for dette er vist på figur 6.1.1 i kapitel 6). Kontrolpunkterne er alle indmålt fra samme opstilling med totalstationen, for at undgå usikkerheder fra måling til fikspunkter. Skulle der være nogle systematiske fejlbidrag, som følge af skævt indmålte fikspunkter eller targets, vil de dermed være ens for alle 54 kontrolpunkter, hvorfor disse kan ses bort fra.

Alle opstillinger er lavet som frie opstillinger, da der var god udsigt til flere punkter fra hver opstilling. De seks georefererede punkter var alle placeret i de ydre kanter af området. Der blev anvendt søm i asfalt til etableringen af dem, og alle blev målt ind med RTK GNSS. Ved målingen af de 54

¹Target nr. 5 og 13 blev ikke målt med totalstation, da det ene af dem var placeret direkte på et brønddæksel uden fod. Det var derfor ikke muligt at sætte prismet i centrum med sikkerhed. Det andet target var placeret oppe under broen, hvor der ikke var god udsigt til det. Dette target er derfor kun anvendt i registreringen af punktskyerne.

Dataindsamling

kontrolpunkter, blev der stillet manuelt ind på centrum af hvert kryds, hvorefter et miniprisme blev brugt til afstandsmålingen. Dette blev gjort, for at få så præcis en måling som muligt. Ved måling af targets, blev kuglen forsigtet løftet af den magnetiske fod, hvorefter det tilhørende prisme blev monteret (prismet præsenteret i kapitel 5.2.2, figur 5.2.15).

Ekstra dataindsamling

Ved første beregning af de indsamlede data, blev det vurderet at billederne ikke var tilstrækkelige til modellen. Af billederne fremgik det, at der var områder, hvor overlappet mellem billeder ikke var stort nok, der var ligeledes enkelte steder, hvor der var større spring mellem billederne. De store spring i billedeserien betyder bl.a., at softwaren brugt til beregning, har svært ved at placere billederne, da der ikke er et overlap til forrige billede. Der er derfor foretaget en ny fotografering af broen, en skitse af fremgangsmåden for indsamling af de nye billeder kan ses herunder (figur 5.3.5):



Figur 5.3.5: Ruter ved anden fotografering Kilde: Ortofoto fra Google Maps - Egen rute

Denne gang blev ruten delt op i flere serier. På denne måde kunne der fokuseres på enkelte objekter i hver serie, for på den måde at sikre at alle kroge og skygger er fotograferet.

Oppe på broen blev der gået seks gange frem og tilbage, som illustreret med gult, men alle billederne blev taget i én sammenhængende billedeserie. Der blev fotografere skråt frem, så stolperne blev fotograferet fra begge sider, derefter blev de fotograferet lige på, da det blev erfaret ved de sidste billeder, at stolpernes dimensioner ikke kunne bestemmes tilfredsstillende, netop derfor blev der gået tre ruter oppe på hver side af broen, med særligt fokus på gelænderet. For at fotografere undersiden af broen, blev der gået fire ruter under broen, som illustreret med pink, også i én sammenhængende billedeserie. På denne måde bliver lamellerne under broen fotograferet fra begge sider. Siderne af broen tages i en enkelt serie på god afstand (5-7 meter), som illustreret med grønt. De to bropiller blev taget i hver sin serie, som illustreret med blå pile. Broens betonelementer blev fotograferet i en enkelt serie, som illustreret med rødt. Kameraet blev denne gang indstillet til en F/13, ISO ned på 800 og en lukkertid på 1/250 sek., for at få mere klare billeder. Der er efter anden fotografering blevet indsamlet 1059 billeder.

Efter dataindsamlingen blevet stikprøver udført for at kontrollere, at billedernes overlap er over den fastsatte grænse på 60%. På figur 5.3.6 og 5.3.7 er denne proces illustreret.



Figur 5.3.6: Overlap mellem billeder over broen



Figur 5.3.7: Overlap mellem billeder under broen

Overlappet er beregnet ved at "lægge"billederne over hinanden og måle overlappet mellem dem. Med den stiplede linje på begge billeder, er midten af billede 1 (i begge figurer) markeret, og som det kan ses er overlappende tættere på 75-80% end 50%.

Disse billeder vurderes derfor at opfylde kravet om et overlap på mindst 60%, og vurderes i forlængelse deraf, at kunne bruges til modelleringen af en hybridmodel.

Den videre modellering af disse billeder, samt punktskyer og de andre indsamlede data, vil blive gennemgået i næste kapitel; *Kapitel 6 Databehandling*.

6 Databehandling

For at kunne besvare problemformuleringens tredje og fjerde underspørgsmål; *Hvordan sikres en tilstrækkelig kvalitet af modellen under dataindsamling?* og *Hvilken præcision og detaljeringsgrad kan opnås i et mesh, ved brug af moderne udstyr?*, skal der først foretages en behandling af de indsamlede rådata, en vurdering af hybridmodellen, herefter kan der konkluderes på resultaterne. Af figur 6.0.1 på næste side ses, i den orange boks, databehandling at disse er de sidste tre processer i dette projekt.

I dette kapitel vil databehandlingen blive gennemgået. Databehandlingen består i georeferering af targets, registreringen af punktskyerne fra laserscanning, kontrol af registreringen, beregningen af hybridmodellen, kontrolmåling i hybridmodellen, samt behandlingen af data fra totalstationen.

Som det kan ses af figuren, er det også i denne forbindelse, at de to af kravsspecifikationens krav skal kontrolleres; kan punktskyerne fra laserscanningen registreres med en spredning inden for 2 mm, og er der opnået en samlet punkttæthed med laserscanneren på 3-5 mm.

Den endelige besvarelse af underspørgsmålene vil først findes sted i *Kapitel 7 Vurdering af hybrid-model*, da det er her der vurderes på den endelige hybridmodel.





6.1 Georeferering af targets

Inden registreringen af punktskyerne fra laserscanningen finder sted, er der først foretaget en georeferering af de anvendte targets. Hybridmodellen georefereres, da det ikke er muligt at foretage målinger i hybridmodellen, i RealityCapture, uden.



Figur 6.1.1: Netskitse fra ScanObs Fikspunkter: 10000-10006 Totalstationsopstillinger: 210430.1 - 210430.3

I marken er der oprettet seks fikspunkter (punktnr.: 10001-10006), disse blev som tidligere beskrevet indmålt med RTK GNSS med formålet, at georeferere den kommende model. På figur 5.2.17, i afsnit 5.2.2, blev den omtrentlige postion af fikspunkterne skitseret, som det kan ses af ovenstående figur 6.1.1, er der ikke foretaget væsentlige ændringer i nettet. Fikspunkterne er blevet placeret yderligt i området, alle fordelt rundt om broen og området der skulle scannes og fotograferes.

Fikspunkterne og de 12 targets blev efterfølgende indmålt med totalstation fra tre opstillinger. For at få koordinater til alle targets er der, i programmet ScanObs, foretaget en udjævning over alle punkterne.

ScanObs er et program udviklet til udjævning af landmålingsdata, hvor både fikspunkter og detailpunkter kan regnes sideløbende.

På baggrund af de foretagne observationer i nettet præsenteret herover, kan en udjævning af observationerne foretages, for at få bestemt både fiks- og detailpunkter i samme system. Til dette formål blev kortprojektionen DKTM3 valgt til georeferering.

*****	*****	****	******	******	******	*****
* OP	STILLI	NGSU	DJÆVNING I	PLAN OG HØ	JDE	*
*****	*****	****	*******	******	*********	*******
LIDT STATISTIK						
					Max	v (mm)
			Plan	Højde	Plan	Højde
Antal punkter:			19	19		
Antal opstillinger: .			3	3		
Antal punkter i opstilli:	nger:		30	30		
Antal udvægtede ditto:			1	0	4.3	0.0
Antal fikspunkter (obs):			6	6		
Antal udvægtede fikspunk	ter:.		0	0	0.0	0.0
Sigma grundfejl (Sgp/Sgh): .		0.001	0.001		
Sigma afstand (Sap/Sah): .		1.000	0.200		
Antal overbestemmelser:			23	14		
Spredning på vægtenheden	· .		0.369	0.298		
Antal overbestemmelser	opst.	:.	14	9		
Spredning på vægtenheden	opst.	:.	0.302	0.229	0.4	0.3
Antal overbestemmelser	fiksp	.:	9	5		
Spredning på vægtenheden	fiksp	.:	0.454	0.392	13.6	22.5

Figur 6.1.2: Udjævning i ScanObs Kilde: ScanObs - Egen data

Efter udjævningen foretaget i ScanObs er gennemført, ses figuren herover (6.1.2). Her indgår basale parametre i udjævningen, som antallet af unikke punkter og antallet af målinger foretaget, herunder hvor mange overbestemmelser dette medfører. Dertil præsenteres også spredningen på vægtenheden, som er et mål for hvor godt observationerne stemmer overens med a priori-vægtene. Her ses det blandt andet, at spredningen på vægtenheden for de forskellige værdier ligger omkring intervallet 0,3-0,5, hvilket indikerer, at observationerne er 2-3 gange mere præcist bestemt end a priori værdierne antyder. Til udjævningen er bidraget for grundfejl, og den afstandsafhængige fejl sat til 1 mm + 1 ppm, hvilket er værre end for det anvendte instrument. Skulle udjævningen efterfølgende anvendes til andet end at georeferere en række omtrentlige fikspunkter, skulle der efterfølgende foretages en korrektion af grundfejl, samt afstandafhængig fejl for derved at undersøge om spredningen på vægtenheden kommer tættere på at have værdien 1.

Ovenstående er dog bare en overordnet dokumentation af udjævningen. Derfor undersøges nu de opmålte fikspunkter og til sidst de enkelte observationer.

PktNr	op	#p	#h	obsY (m)	obsX	(m)	obsZ (m)	AsY (mm)	AsX (mm)	AsZ (mm)	vY (mm)	vX (mm) u	u vZ (mm) u
10001	3	3	3	646383.7930	1169954.7	640	3.6600	15.0	15.0	30.0	-6.2	3.8	6.2
10002	3	3	3	646400.3130	1169937.1	540	4.7380	15.0	15.0	30.0	-3.2	-4.0	11.9
10003	3	2	3	646414.2200	1169909.7	680	5.8210	15.0	15.0	30.0	1.7	-1.3	0.7
10004	2	2	2	646434.5910	1169902.0	790	5.6040	15.0	15.0	30.0	-0.4	-13.6	-22.5
10005	3	3	3	646450.5500	1169943.4	050	3.1950	15.0	15.0	30.0	4.0	6.6	1.8
10006	3	3	3	646429.8410	1169974.5	190	3.9780	15.0	15.0	30.0	4.1	8.5	1.8

Figur 6.1.3: GNSS punkter i ScanObs Kilde: ScanObs - Egen data

Når figur 6.1.3 betragtes, ses GNSS-observationerne til de målte fikspunkter. A priori spredninger

for punkterne (AsY/AsZ/AsZ) er sat på hhv. 15 mm for de plane koordinater og 30 mm for højden. Residualerne (vY/vX/vZ) for punkterne målt med GNSS stemmer ganske fint overens med de antagne a priori værdier.

PktNr	op	#p	#h	fp	fh	Y (m)	X (m)	Z (m)	spY (mm)	spX (mm)	spZ (mm)
10001	3	3	3	1	1	646383.7868	1169954.7678	3.6662	2.6	3.3	3.7
10002	3	3	3	1	1	646400.3098	1169937.1500	4.7499	2.3	2.6	3.7
10003	3	2	3	1	1	646414.2217	1169909.7667	5.8217	2.9	2.3	3.7
10004	2	2	2	1	1	646434.5906	1169902.0654	5.5815	3.3	2.5	3.7
10005	3	3	3	1	1	646450.5540	1169943.4116	3.1968	2.3	3.1	3.7
10006	3	3	3	1	1	646429.8451	1169974.5275	3.9798	3.4	2.4	3.7

Figur 6.1.4: Spredninger på fikspunkter i ScanObs Kilde: ScanObs - Egen data

Derudover kan spredninger (spY/spX/spZ) på de enkelte fikspunkter ses herover af figur 6.1.4. Residualerne er mellem 0 og 0,4 mm, for at se residualerne på de enkelte observationer, henvises der til Bilag 4.

På baggrund af udjævningen er der blevet beregnet en fuld koordinatliste til alle targets. Den fulde koordinatliste er at finde i Bilag 5 og Bilag 6.

Punktskyerne fra laserscanningen blev forsøgt registreret i Leica Cyclone, men programmet tog ikke scannerens kompensatordata i betragtning, hvorfor registreringen gav store afvigelser på de sfæriske targets koordinater. Registreringen foretages derfor i Z+F's egen software, Z+F LaserControl. Registreringen vil blive gennemgået i det næste afsnit.

6.2 Registrering af punktskyer

Registreringen af punkskyerne fra laserscanningen er som før nævnt, foretaget i programmet Z+F LaserControl.

I programmet er panoramabillederne fra samtlige opstillinger blevet gennemgået, hvorved hvert target er blevet udpeget. Der foretages et *sfærisk fit* af alle targets, for at centrum af disse kan defineres korrekt. Herefter kan hvert targets identificeres, og tildeles det korrekte label, så det kan kædes sammen gennem flere opstillinger. Efter alle targets er korrekt identificeret, foretages en udjævning over targets. Således bliver punktskyerne "flyttet på plads". En skitse over de registrerede opstillinger kan ses herunder af figur 6.2.1.



Figur 6.2.1: LaserControl - Registrerede opstillinger Kilde: LaserControl - Egen registrering

På figur 6.2.1 ses opstillingerne med scanneren illustreret med de farvede bolde. Opstillingerne er farvelagt efter højden, som scanneren har stået i. De grønne er opstillinger under broen og på plænen, de turkise er halvvejs oppe mod broen, og de blå opstillinger er foretaget oppe på selve broen. De mørkeblå kryds illustrerer de opstillede targets.

Inden registreringen endeligt kan fastlægges, vil der i det følgende blive gennemgået, hvilke kvalitetsbud LaserControl har på udjævningen, der er foretaget.



Figur 6.2.2: LaserControl - Registrerede opstillinger Kilde: LaserControl - Egen registrering

Af figur 6.2.2 ses et overblik over den foretagne registrering i LaserControl. Til højre ses placeringen af de enkelte opstillinger, som er beskrevet ovenfor. I midten ses placeringen af targets, og til venstre ses kvalitetsrapporten fra registreringen. Denne kvalitetsrapport vil blive gennemgået i det følgende.

Sca	in position		[mm]	*
	15	0.5 mm	5.8	
	14	0.9 mm	2.5	Ô
	13	0.9 mm	10.3	
	12	1.4 mm	6.4	
	[] 11	0.6 mm	9.7	
	10	1.4 mm	13.1	
	1 9	0.2 mm	11.9	
	1 8	0.4 mm	10.9	
	1 7	0.3 mm	6.6	
	i 6	0.5 mm	4.0	
	1 5	1.7 mm	6.9	
	1 4	1.0 mm	6.5	
	1 3	2.2 mm	7.9	
\triangleright	2	0.2 mm	6.1	
\triangleright	[] 1		3.2	
	Known targets			



Af figur 6.2.3 ses der, i venstre side, de registrerede scanpositioner(1-15). Med grønt står LaserControls estimerede spredning til hver enkelt opstilling.

Laserscanneren, der er blevet anvendt, har en indbygget GNSS og IMU. På baggrund af disse har softwaren et initierende bud på placeringen af alle punktskyerne. Efter registreringen bliver korrektionerne, i forhold til den initierende placering, beregnet. Korrektionerne beregnes kun i forhold til den scanstation, der kommer før og efter den pågældende scanstation.

I den tredje kolonne, til højre i figur 6.2.3, ses den højeste af de to korrektioner. Det er dermed et udtryk for den højeste korrektion, der er foretaget ved registreringen af den ene station, relativt til de to nærmeste stationer.





For at undersøge residualerne, på de opstillede targets ved hver opstilling, anvendes drop-down

menuen ved hver opstilling. Et eksempel herpå kan ses ovenfor af figur 6.2.4. Ved registreringen af punktskyerne, var residualerne på targets alle på få millimeter.

Af nedenstående figur 6.2.5 ses de beregnede spredninger for targets, hvor alle opstillingerne er samlet. Værdien, nede i venstre hjørne, fokuseres der ikke på, da den i dette tilfælde blot er et udtryk for gennemsnittet af de korrektioner, der har fundet sted fra den initierende placering (GNSS + IMU) af opstillinger til den targetregistrerede placering af opstillinger (som beskrevet tidligere i forbindelse med figur 6.2.3). Interessant for dette projekt er, de to værdier til højre. De beregnede spredninger for targets, kan ses øverst, hvor alle 15 scanstationer fremgår. Ved beregningen af den øverste af de to spredninger, tages der ikke højde for kendte punkter, denne kan derfor betragtes som en "fri udjævning".

Den anden spredning (nederst til højre i figur 6.2.5) er beregnet med tre fastholdte punkter. Som der kan ses, er denne lidt højere, men stadig en del under de 2 mm opstillet i kravsspecifikationen.



Figur 6.2.5: LaserControl - Spredninger på targets med og uden kendte punkter. Kilde: LaserControl - Egen registrering

Til georefering er tre targets blevet udvalgt; target 1, 6 og 8. Af nedenstående figur 6.2.6 ses residualerne på disse targets, efter den registrerede punktsky er transformeret over de tre targets.

💎 Kn	Known targets									
	M TARGET14									
	► TARGET8	5.6mm								
	► TARGET6	2.6mm								
	► TARGET1	4.9mm								

Figur 6.2.6: LaserControl - Residualer på fastholdte targets ved tranformation Kilde: LaserControl - Egen registrering

Af ovenstående figur ses det, at georefereringen tilføjer netspænding. Dette kom også til udtryk i forgående figur, da spredningen stiger med 0,2 mm, ved at fastholde de tre punkter. Georefereringen behøver ikke at være præcis, da den kun skal bruges til at få modellen i system, for at kontrolmålene senere kan foretages i RealityCapture.

Kravet om at registreringen af punktskyerne, skulle foretages med en spredning på under 2 mm, vurderes at være honoreret. Dette vurderes på baggrund af at den relative registrering havde en præcision på 1,1 mm, hvilket blev øget til 1,3 mm efter de tre georefererede punkter blev tilført til udjævningen (som det fremgik af figur 6.2.5). Begge registreringer har dermed en præcision på under 2 mm.

Det ene krav, i kravsspecifikationen, omhandler punkttætheden i den registrerede punktsky. Jævnfør kravsspecifikationen skal punkttætheden være på 3-5 mm i den registrerede sky. For at kontrollere,

at punktskyen lever op til dette krav, er der foretaget stikprøver, hvor afstanden mellem punkter er målt.

På baggrund af stikprøverne er punkttætheden regnet til at være 2-3 mm, hvilket er under den fastsatte grænse. Punktskyen honorerer dermed kravet om punkttæthed.

Da punktskyerne dermed er registreret, og spredningerne herved er fundet tilfredsstillende, i forhold til kravsspecifikationen, kan beregningen af hybridmodellen påbegyndes.

6.3 Beregning af hybridmodellen

Efter punktskyerne fra laserscanning er endeligt registreret, er det tid til at integrere laserscanning og fotogrammetri til en sammenhængende hybridmodel. Dette gøres i RealityCapture, hvor både billeder og punktskyer indlæses. Overordnet set, kan processen i RealityCapture inddeles i tre bearbejdningstrin:

- 1. Alignment
- 2. Reconstruction
- 3. Texturing

Alignment er den første og mest essentielle del af, at få skabt hybridmodellen. I denne fase sikres, at laserscanning og fotogrammetri er bundet godt sammen, hvilket er nødvendigt for at skabe en virkelighedstro digital tvilling.

Efter billeder og laserscanning er blevet justeret på plads på bedste vis, skal der beregnes et mesh ud fra den endelige tilpasning. Dette foregår først under menuen *Reconstruction*, for at danne selve trekantsnettet, og efterfølgende i *Texturing*, for at få farver på modellen.

Til konstruktion af hybridmodellen, er de 15 scanninger blevet importeret. Ved import af laserscanning i fotogrammetri, konverteres hver scanning til 6 "billeder", så scanneren er omgivet af en terning med 6 flader. Dette har givet 86 billeder ekstra i behandlingen. Disse billeder gør, at laserscanning og fotogrammetri kan behandles som én sammenhængende fotogrammetrisk proces, herunder med udpegning af paspunkter mellem billeder og scanninger.

Dertil importeres alle billeder, taget med håndholdt kamera. Her blev der importeret omkring 1000 billeder.

På baggrund af den importerede data, køres den første Alignment. Her forsøger RealityCapture, at knytte alle billeder og laserscanninger sammen til en enkelt komponent. I nogle tilfælde lykkedes det ikke, at samle alle billeder i et komponent. I disse situationer vil grupper af billeder blive alignet i delkomponenter. Disse skal efterfølgende kombineres, enten som en opdatering af alignmenten, eller ved at udpege tiepoints i komponenterne imellem. Her er laserscanningen blevet brugt, som en georefereret grundstruktur, hvorpå alle billedekomponenter er blevet justeret på plads.

Efter Alignment-processen blev gennemført, var omkring 520 billeder blevet inddraget i modellen. Dette skyldes blandt andet, at flere af billederne under broen, blev taget med for få punkter omkring broen, så RealityCapture udelukkende har haft de ensformige billeder af broens lameller til at skabe fællespunkter fra.



Figur 6.3.1: Underside af bro - få fællespunkter

I overensstemmelse med forventningerne til fotogrammetrien, blev det ved alignment erfaret, at broens ensformige struktur skabte problemer i den fotogrammetriske proces. Til trods for, at billederne er taget ved den anden dataindsamling, har stort overlap og er taget i sammenhængende serier, så er billedernes indhold stadig for ensformigt til, at programmet kan placere dem korrekt uden hjælp fra tiepoints.

For at hjælpe programmet med den rette placering af billederne, kan der oprette tiepoints. Når et tiepoint er oprettet, er det blot et spørgsmål om, at udpege det samme punkt i de omkringliggende billeder. Der har dog været eksempler i dette projekt, hvor tiepoints ikke har kunne rette modellen tilstrækkeligt op, til trods for at flere punkter blev oprettet.

Ved den første alignment, i RealityCapture, blev ca. 150 billeder orienteret sammen med laserscanningerne. Derudover blev der samlet ca. 20 delkomponenter, alle bestående af under 30 billeder. Ved brug af tiepoints, blev mange af disse samlet i den store punktsky med laserscanningerne.

Herunder ses broen i projektområdet, fra to forskellige vinkler, som en fortyndet punktsky, hvilket er en del af grundlaget for tilpasningen af billeder og laserscanning.



Figur 6.3.2: Fortyndet punktsky i RealityCapture



Figur 6.3.3: Fortyndet punktsky i RealityCapture

Efter delkomponterne er blevet samlet i en model, foretages en reconstruction og texturing, hermed bliver et farvet mesh beregnet. Det endelige resultat og modellens udseende bliver præsenteret i kapitel 7 Vurdering af hybridmodel, hvori modellen vil blive holdt op mod kravsspecifikationen, for at undersøge hvorvidt modellen lever op til kravene præsenteret heri.

6.4 Kontrolmåling

Efter hybridmodellen er blevet lavet i RealityCapture, kan kontrolmålingerne påbegyndes. Disse er ligeledes blevet foretaget i RealityCapture, da programmet gør det muligt at vise et valgt område med det farvede mesh, mens resten undlades. Undervejs kan område ændres, så alle ønskede områder kan besøges. Dette gør det muligt, at få vist de ønskede elementer af modellen ved brug af minimal computerkraft¹.

Der blev, i marken, opsat seks striber tape med 9 kryds hver. Disse var placeret, som illustreret herunder i figur 6.4.1.

¹Skulle en model, som denne åbnes i fuld størrelse, i anden mesh-software, ville dette kræve store ressourcer fra computeren pga. de store datamængder.



Figur 6.4.1: Placering af kontrolpunkter, vist i punktskyen fra laserscanningen.

Som beskrevet i afsnit 5.2.2 skal der foretages mindst 20 korte og 20 lange kontrolmål. Disse er blevet indmålt med totalstation, og kan nu måles i hybridmodellen. I den fulde hybridmodel har der vist sig at være problemer med detaljeringsgraden visse steder. Dette gør sig særligt gældende ovenpå broen, hvilket påvirker kvaliteten af kontrolpunkterne, da disse er placeret på stolperne ved rækværket (se figur 6.4.2).



Figur 6.4.2: Kontrolmodel med lav detaljeringsgrad på baggrund af både fotogrammetri og laser-scanning.
I den fulde hybridmodel er over 60% af kontrolpunkterne ikke synlige, hvilket ikke giver mulighed for at foretage de planlagte kontrolmål. En separat model er derfor blevet konstrueret til kontrolmålingerne.

Til konstruktionen af den anden model er der fokuseret på kontrolmålene, derfor er kun billederne af kontrolmålene anvendt til denne model. Erfaringen fra beregning af den første model er, at laserscanningen trækker i nogle af billederne. Til denne model anvendes derfor ikke den fulde punktsky fra laserscanningen, men enkelte punkter. På denne måde anvendes geometrien fra laserscanningen stadig til at fastsømme billederne, men fotogrammetrien bliver ikke fastholdt i samme grad. Enkeltpunkterne der bliver anvendt, er de sfæriske targets. Koordinaterne på targets er blevet importeret i RealityCapture, hvorefter de kan udpeges i billederne.

Ved at behandle dataene på denne måde, sikres korrekt geometri og skala for fotogrammetrien i den nye model, da enkeltpunkter fra laserscanningen stadig har god relativ geometrisk præcision. Således får denne model stadig hjælp til geometrien fra laserscanning, men i højere grad detaljeringsgraden fra fotogrammetrien.

Denne model blev heller ikke komplet, men her blev detaljeringsgraden høj nok til, at kontrolpunkterne tydeligt kunne bestemmes i hybridmodellen. Et eksempel på den manglende fuldkommenhed, kan ses herunder af figur 6.4.3.



Figur 6.4.3: Første pæl for kontrolmål i RealityCapture

Billedet ovenfor er af samme stolpe, som er vist i figur 5.3.4 i afsnit 5.3. Som det fremgår af figur 6.4.3, er der områder, hvor meshet ikke kunne beregnes. Nogle af disse områder dækker over de kryds, der var sat til kontrolmålingerne. For at få en tilstrækkelig stikprøve til beregning af spredninger, så der kan opstilles et kvalitetsudtryk for modellen geometriske præcision, må der derfor foretages andre kontrolmål end planlagt.



Figur 6.4.4: Punkter til afstande udpeget i RealityCapture

Steder hvor der er hele kontrolpunkter der ikke har været synlige, er der blevet foretaget lodrette mål til næste synlige kontrolpunkt (som det kan ses af både figur 6.4.3 og 6.4.4). Enkelte kontrolmål er derfor lidt længere end andre, de længste er omkring 30 cm lange.

Ved de vandrette kontrolmål, var planen oprindeligt at måle parvist mellem søjle 1 og 4, søjle 2 og 5, og søjle 3 og 6. Målingerne skulle have været foretaget mellem kontrolpunkterne med samme nummer, på hver søjle. Da nogle af søjlerne ser ud som på figur 6.4.3, var dette ikke en mulighed. Antallet af punkter, der kunne aflæses på hver søjle, passede med at målingerne kunne foretages mellem; søjle 1 og 5, søjle 2 og 4 og søjle 3 og 6. Herunder ses målingerne illustreret, med orange streger, i kontrolmålingsmodellen på figur 6.4.5.



Figur 6.4.5: Overblik over afstande målt i RealityCapture

For at foretage kontrolmålinger i RealityCapture, anvendes værktøjet *"Define Distance"*. Med dette værktøj kan man definere afstanden mellem to valgte punkter, i dette tilfælde blev centrum af krydsene udpeget.

De lodrette afstande kan aflæses af figur 6.4.6 herunder.

⊡ Images	31 images
Control points	51 points
🖻 Constraints	30 constraints
··· distance 0	🔽 tance not defined c: 0.188 m
distance 1	🔽 tance not defined c: 0.258 m
distance 2	🛃 tance not defined c: 0.285 m
distance 3	🛃 tance not defined c: 0.069 m
distance 4	🔽 tance not defined c: 0.134 m
distance 5	🔽 tance not defined c: 0.357 m
distance 6	🔽 tance not defined c: 0.079 m
distance 7	🔽 tance not defined c: 0.094 m
distance 8	🔽 tance not defined c: 0.104 m
distance 9	🔽 tance not defined c: 0.533 m
distance 10	🔽 tance not defined c: 0.082 m
distance 11	🔽 tance not defined c: 0.083 m
distance 12	🔽 tance not defined c: 0.102 m
distance 13	tance not defined c: 0.102 m
distance 14	🔽 tance not defined c: 0.280 m
distance 15	✓ tance not defined c: 0.082 m
distance 16	🔽 :tance not defined c: 0. 100 m
distance 17	✓ tance not defined c: 0.072 m
distance 18	🗸 tance not defined c: 0.083 m
distance 19	✓ tance not defined c: 0.097 m
distance 20	✓ tance not defined c: 0.082 m
distance 21	✓ tance not defined c: 0.061 m
distance 22	✓ tance not defined c: 0.071 m
distance 23	✓ tance not defined c: 0.096 m
distance 24	✓ tance not defined c: 0.315 m
distance 25	✓ tance not defined c: 0.082 m
distance 26	✓ tance not defined c: 0.080 m
distance 27	tance not defined c: 0.079 m
distance 28	✓ tance not defined c: 0.082 m
distance 29	tance not defined c: 0.094 m

Figur 6.4.6: 30 lodrette afstande målt i RealityCapture

Ligeledes ses de lange vandrette afstande herunder i figur 6.4.7.

Figur 6.4.7: 16 vandrette afstande målt i RealityCapture

Der er i alt blevet foretaget 30 korte kontrolmål og 16 lange kontrolmål.

For at kunne sammenholde kontrolmålene, foretaget i RealityCapture, med kontrolmålene fra totalstationen, beregnes afstanden mellem punkterne målt med totalstation.

Da punkterne fra totalstationen hver består af tre koordinater, er afstanden mellem dem regnet som følger:

$$d = \sqrt{(E_2 - E_1)^2 + (N_2 - N_1)^2 + (H_2 - H_1)^2}$$

Hvor 1. punkt = (E_1, N_1, H_1) , og 2. punkt = (E_2, N_2, H_2) , og hvor afstanden beregnes i meter.

Den beregnede afstand mellem punkterne kan ses af nedenstående figure.

Lodrette totalstationsmål		
P	unkt ID	Afstand
Fra	Til	
T1.1	T1.3	0,1870
T1.3	T1.4	0,2560
T1.4	T1.8	0,2792
T1.8	T1.9	0,0701
T2.2	T2.3	0,1369
T2.3	T2.6	0,3488
T2.6	T2.7	0,0747
T2.7	T2.8	0,0923
T2.8	T2.9	0,1022
T3.2	T3.6	0,5275
T3.6	T3.7	0,0811
T3.7	T3.8	0,0822
T3.8	T3.9	0,1001
T4.2	T4.3	0,0992
T4.3	T4.4	0,2799
T4.4	T4.5	0,0805
T4.5	T4.6	0,1016
T4.6	T4.7	0,0731
T4.7	T4.8	0,0834
T4.8	T4.9	0,0970
T5.5	T5.6	0,0817
T5.6	T5.7	0,0599
T5.7	T5.8	0,0704
T5.8	T5.9	0,0975
T6.3	T6.4	0,3178
T6.4	T6.5	0,0819
T6.5	T6.6	0,0800
T6.6	T6.7	0,0792
T6.7	T6.8	0,0819
T6.8	T6.9	0,0935

Figur 6.4.8: Beregnede Lodrette afstande

Vandrette totalstationsmål		
Punkt ID		Afstand
Fra	Til	
T1.1	T5.5	22,7872
T1.3	T5.6	22,7842
T1.4	T5.7	22,7812
T1.8	T5.8	22,7785
T1.9	T5.9	22,7775
T2.2	T4.2	18,6684
T2.3	T4.3	18,6675
T2.6	T4.6	18,6676
T2.7	T4.7	18,6676
T2.8	T4.8	18,6671
T2.9	T4.9	18,6674
T3.2	T6.3	20,7293
T3.6	T6.6	20,7280
T3.7	T6.7	20,7279
T3.8	T6.8	20,7273
T3.9	T6.9	20,7273

Figur 6.4.9: Beregnede vandrette kontrolmål

Som det kan ses af figurene, stemmer afstandende godt overens med de afstandsmål, der blev foretaget i RealityCapture. For at få et sammenligningsgrundlag for afstandmålingerne, vil der i næste kapitel, 7, blive beregnet differens mellem målingerne parvist. For at få et samlet udtryk for kvaliteten af målingerne, vil der yderligere blive beregnet spredninger for afvigelserne.

7 Vurdering af hybridmodel

I dette kapitel foretages en præsentation og vurdering af hybridmodellen. I forbindelse hermed, forsøges problemformuleringens tredje og fjerde underspørgsmål besvaret:

- Hvordan sikres en tilstrækkelig kvalitet af modellen under dataindsamling?
- Hvilken præcision og detaljeringsgrad kan opnås i et mesh ved brug af moderne udstyr?

For at kunne besvare ovenstående, deles vurderingen op i to dele; en vurdering af modellens visuelle karakter, samt en vurdering af modellens geometriske præcision.

For hver del tages kravspecifikationen op for på baggrund af denne, at kunne vurdere, hvorvidt modellen lever op til de opstillede krav. Herunder præsenteres igen den samlede kravsspecifikation fra afsnit 5.1.

- Præcision ved registrering på 2 mm.
- Punkttæthed ved scanning: 3-5 mm i den samlede punktsky.
- Der skal være stort overlap mellem billeder, mindst 60%.
- Ground Sampling Distance på 1 mm.
- Skader som revner, rust, fugtskader, hærværk mm. skal kunne ses i hybridmodellen.
- Spredning på måling af afstande: 5 mm i hybridmodellen.

De første fire krav er allerede blevet kontrolleret. Punkttæthed, ved scanning, overlap på 60% og GSD på 1 mm er alle krav, der knytter sig til selve dataindsamlingen, og måden denne blev udført på. Kravet om præcisionen ved registrering på 2 mm, blev kontrolleret i forrige kapitel (6 Databehandling) hvor registreringen blev gennemgået.

På baggrund af de indsamlede data og registreringen af punktskyerne, vurderes det, at modellen lever op til de første fire krav i kravsspecifikationen.

Kapitlet er, som nævnt ovenfor, delt i to hovedafsnit; *Visuel karakter* og *Geometrisk præcision*. I det første afsnit fokuseres der på de visuelle krav til modellen; *Skader som revner, rust, fugtskader, hærværk mm. skal kunne ses i hybridmodellen.* Derudover vurderes der på den generelle detaljeringsgrad i modellen, og i forlængelse deraf, hvad der er muligt at opnå ved at anvende hybrid-metoden til at konstruere et mesh.

I det andet afsnit undersøges den geometriske præcision i hybridmodellen. Til den geometriske præcision blev følgende krav opstillet: *Spredning på måling af afstande: 5 mm i hybridmodellen.* For at kunne kontrollere dette, vil der blive samlet op og konkluderet på de kontrolmål, der blev præsenteret i forrige kapitel, hvortil der vil blive beregnet spredninger for afstandsmålingerne, for at få et overordnet kvalitetsudtryk for præcisionen.

Kapitlet vil blive afsluttet med et diskussionsafsnit, hvori mulige forbedringer eller andre mulige fremgangsmåder diskuteres.

7.1 Visuel karakter

I dette afsnit foretages en vurdering af hybridmodellens visuelle karakter, bl.a. med henblik på at kontrollere kravsspecifikationen 5. krav: *Skader som revner, rust, fugtskader, hærværk mm. skal kunne ses i hybridmodellen.*

Derudover foretages en vurdering af hele modellen med henblik på at kunne konkludere på, hvad der er muligt at opnå af detaljeringsgrad.

I første omgang undersøges det om hybridmodellen lever op til kravsspecifikationens visuelle krav. På figur 7.1.1 og 7.1.2 ses broens fundament i modellen. Her ses blandt andet, at strukturerne i betonen tydeligt fremgår.



Figur 7.1.1: Beton i RealityCapture



Figur 7.1.2: Beton i RealityCapture

Efterfølgende zoomes der ind på undersiden af broens fundament. Her fremgår det af figur 7.1.3 og 7.1.4, at misfarvninger af betonen, som resultat af fugt, også tydeligt fremgår.



Figur 7.1.3: Beton i RealityCapture



Figur 7.1.4: Misfarve på beton i RealityCapture

Ligeledes ses der gode resultater, når cykelstien oven på broen betragtes af figur 7.1.5 og 7.1.6. Her ses tydelige detaljer i asfalten, samt en skarpt defineret vejstribe (De små hvide firkanter på figur 7.1.3 og 7.1.5 er ikke artefakter, men kamerapositioner).



Figur 7.1.5: Broens start i RealityCapture



Figur 7.1.6: Broens vejstribe i RealityCapture

Som det fremgik af de seks figurer præsenteret ovenfor, er det muligt at få en høj detaljeringsgrad i hybridmodeller. Skader, som misfarvning af beton og selv uregelmæssigheder i betonens struktur, fremgår tydeligt af billederne. Det kan også tydeligt ses, hvor betonelementerne er støbt sammen, som f.eks. under broen (figur 7.1.4).

Ikke alle elementer ved konstruktion af hybridmodellen er gået lige godt. I det følgende vil der derfor blive præsenteret eksempler på faldgrupper og fejl i modellen.

Når figur 7.1.7 betragtes, ses det eksempelvis, at et elskab under broen er behæftet med artefakter. Dette gælder både den fysiske form af skabet, hvor flere områder er skævt justeret på plads, og dermed skaber "plateauer"på overfladen. Dertil ses der også artefakter i selve teksturen af modellen ved elskabet, hvilket formentlig igen skyldes en skæv justering af billeder.



Figur 7.1.7: Et sted modellen ikke er gået godt i RealityCapture Billede t.v. model t.h.

Ligeledes ses der på figur 7.1.8, hvordan rækværket på broen har taget sig ud i hybridmodellen. Her er der tale om et område med mange små detaljer blandet sammen med refleksioner og huller i objektet. Det fremgår blandt andet af modellen, at kontrolmålene ikke fremgår af teksturen.



(a) Billede af rækværk

(b) Rækværk i model

Figur 7.1.8: Rækværk

Som det også kan ses af ovenstående figur, har der generelt været udfordringer med broens rækværk. De to gelændere på rækværket har som udgangspunkt den rette form, men er begge præget af artefakter. Kigger man under det øverste gelænder ses det, at meshet nogle steder går for langt ned, hvilket giver en deformitet. Nettet, der er mellem stolperne, er kun meget få steder, kommet med i modellens mesh.

Samme artefakter og mangler i modellen ses også tydeligt på figur 7.1.9. Her er dele af gitteret blevet modelleret, mens andre dele helt er udeblevet fra modellen. De steder hvor gitteret er blevet modelleret, er det blevet til en ujævn flade, der er farvet efter omgivelserne og ikke et reelt net.



Figur 7.1.9: Gitter på broen i RealityCapture

Et andet tydeligt eksempel, hvor modellen ikke er retvisende, er langs toppen af betonfundamentet på broens østlige side (se figur 7.1.10). Her er der sket en skæv alignment mellem billederne taget over og under fundamentet, hvorfor en grøn linje med græs fremgår langs betonkanten.



Figur 7.1.10: Skæv alignment i RealityCapture

På baggrund af den visuelle inspektion af hybridmodellen vurderes det, at hybridmodeller har potentiale til brug ved eftersyn af broer. Detaljer kan tydeligt ses på især områder med beton og jævne overflader.

Der opleves udfordringer med, at konstruere en sammenhængende model for de områder, hvor der fremgår en blanding af små detaljer, refleksioner og huller i objektet, som modelleres. Derfor er metalgitre, som på Folehavebroen, ikke oplagte at dokumentere i hybridmodeller.

En separat model for kontrolmålene vil derfor blive anvendt i afsnit 7.2. Da kontrolmålene ikke kunne aflæses på den oprindelige model.

7.2 Geometrisk præcision

I dette afsnit foretages den anden halvdel af vurderingen af hybridmodellen. I denne del fokuseres der på modellens geometriske præcision. Det er dermed også her, at kravsspecifikationens sidste krav kontrolleres, altså om hvorvidt der kan måles afstande i modellen med en maksimal spredning på 5 mm.

Afstandsmålene, som er blevet foretaget i modellen, til kontrol fremgår af de herpåfølgende figurer; 7.2.1, 7.2.2 og 7.2.3.



Figur 7.2.1: Kontrolmål i RealityCapture set fra siden



Figur 7.2.2: Kontrolmål i RealityCapture set på langs

Af de to første figurer (ovenfor) ses afstandsmålinger som orange linjer. Det kan være svært at se af modellen, men målingerne er, som før nævnt, foretaget mellem de første tre stolper og tre stolper ca. 20 meter længere ude på broen.



Figur 7.2.3: Første pæl for kontrolmål i RealityCapture

På ovenstående figur er der zoomet ind på de korte lodrette kontrolmål. Her fremgår også det problem, der har været med kontrolmålene, som i nogle tilfælde ikke indgår i modellen. Af samme årsag er enkelte kontrolmålinger lidt længere end andre, men betragtes stadig som korte mål.

For at kunne bestemme hybridmodellens geometriske præcision, og om denne lever op til kravene i kravspecifikationen, skal målene foretaget i modellen holdes op mod en kontrolværdi. Kontrolværdierne består i dette tilfælde af mål foretaget med totalstation (som beskrevet i afsnit 5.2.2). Da et estimat for usikkerheden ved måling med totalstation tidligere er foretaget (ligeledes i afsnit 5.2.2), benyttes denne, som grundlag for kontrolmålingen. Først beregnes punktspredningen for punkter målt med totalstation. Dette gøres efter følgende formel.

$$\sigma_P = \sqrt{\frac{\sigma_E^2 + \sigma_N^2 + \sigma_H^2}{3}}$$

Figur 7.2.4: Punktspredning i 3D

Da usikkerheden for hver af de tre akser blev estimeret gennem TMK, kan værdierne sættes ind i ovenstående formel, hvilket ses herunder. Derved opnås den teoretiske punktspredning med totalstation.

$$\sigma_P = \sqrt{\frac{0,0006m^2 + 0,0012m^2 + 0,0006m^2}{3}} = 0,85mm$$

Figur 7.2.5: Punktspredning fra totalstation

Dette giver en punktspredning på 0,85 mm. Efterfølgende omregnes punktspredningen til spredningen på en afstand mellem to punkter, hvilket foretages med følgende formel under antagelse af, at usikkerheden på begge punkter er ens. Da TMK angiver spredningen for værende ens ned til fjerde decimal for testberegningen, vurderes dette at være en rimelig antagelse.

$$\sigma_{Dist} = \sqrt{2} * \sigma_P$$

Figur 7.2.6: Spredning på afstand mellem to punkter Kilde: Jensen (2020, s. 167)

Punktspredningen sættes ind, og spredningen på en afstandsmåling mellem to punkter beregnes.

$$\sigma_{Dist} = \sqrt{2} * 0,85mm = 1,2mm$$

Figur 7.2.7: Spredning på afstand mellem to punkter

Spredningen på afstandsmålingerne, foretaget med totalstationen, beregnes hermed til at være 1,2 mm.

I det følgende beregnes spredningerne på de målte kontrolafstande. For at dette kan lade sig gøre, sammenholdes afstandsmålene fra totalstationen og hybridmodellen, ved at beregne forskellen mellem afstandsmålene. Spredningerne på afstandene vil blive undersøgt, i forhold til spredningen på afstande

målt med totalstation, for at undersøge, om der er en signifikant forskel, eller om bidraget fra totalstationen bliver for stort til at kunne konkludere på de afstande målt i hybridmodellen. De beregnede afstande undersøges også for systematiske afvigelser, for at undersøge tilstedeværelsen af eventuelle fejl i modellen.

Beregningen af spredningen på kontrolafstandene foretages jf. Jensen (2020, s. 168 - eq: 18.5 og 18.7), hvilket kan omskrives til følgende formel.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x-\mu)^2}{n}}$$

Figur 7.2.8: Beregning af spredning på afstande Kilde: Jensen (2020, s. 168)

Her er σ den beregnede spredning, x er afstanden målt i hybridmodellen. μ er kontrolafstanden målt med totalstation, mens *n* er antallet af målte afstande.

Af figur 7.2.9 og 7.2.10 fremgår de differencer, som spredningerne vil blive beregnet efter. Ved beregning af differencerne, er totalstationsmålingen trukket fra hybridmålene. Derved vil et positivt fortegn på differencerne betyde, at målene i hybridmodellen er længere end forventet på baggrund af kontrollen fra totalstation.

		Lodrette kor	ntrolmål	
	Punkt ID	Totalstation	RealityCapture	Difference
Fra	Til			
T1.1	T1.3	0,1870	0,1880	0,0010
T1.3	T1.4	0,2560	0,2580	0,0020
T1.4	T1.8	0,2792	0,2850	0,0058
T1.8	T1.9	0,0701	0,0690	-0,0011
T2.2	T2.3	0,1369	0,1340	-0,0029
T2.3	T2.6	0,3488	0,3570	0,0082
T2.6	T2.7	0,0747	0,0790	0,0043
T2.7	T2.8	0,0923	0,0940	0,0017
T2.8	T2.9	0,1022	0,1040	0,0018
T3.2	T3.6	0,5275	0,5330	0,0055
T3.6	T3.7	0,0811	0,0820	0,0009
T3.7	T3.8	0,0822	0,0830	0,0008
T3.8	T3.9	0,1001	0,1020	0,0019
T4.2	T4.3	0,0992	0,1020	0,0028
T4.3	T4.4	0,2799	0,2800	0,0001
T4.4	T4.5	0,0805	0,0820	0,0015
T4.5	T4.6	0,1016	0,1000	-0,0016
T4.6	T4.7	0,0731	0,0720	-0,0011
T4.7	T4.8	0,0834	0,0830	-0,0004
T4.8	T4.9	0,0970	0,0970	0,0000
T5.5	T5.6	0,0817	0,0820	0,0003
T5.6	T5.7	0,0599	0,0610	0,0011
T5.7	T5.8	0,0704	0,0710	0,0006
T5.8	T5.9	0,0975	0,0960	-0,0015
T6.3	T6.4	0,3178	0,3150	-0,0028
T6.4	T6.5	0,0819	0,0820	0,0001
T6.5	T6.6	0,0800	0,0800	0,0000
T6.6	T6.7	0,0792	0,0790	-0,0002
T6.7	T6.8	0,0819	0,0820	0,0001
T6.8	T6.9	0,0935	0,0940	0,0005

Middel =	0,0010
σ =	0,0026

Figur 7.2.9: Sammenligning af lodrette afstandsmålinger

Vandrette kontrolmål				
	Punkt ID	Totalstation	RealityCapture	Difference
Fra	Til		-	
T1.1	T5.5	22,7872	22,7910	0,0038
T1.3	T5.6	22,7842	22,7920	0,0078
T1.4	T5.7	22,7812	22,7920	0,0108
T1.8	T5.8	22,7785	22,7900	0,0115
T1.9	T5.9	22,7775	22,7840	0,0065
T2.2	T4.2	18,6684	18,6490	-0,0194
T2.3	T4.3	18,6675	18,6460	-0,0215
T2.6	T4.6	18,6676	18,6310	-0,0366
T2.7	T4.7	18,6676	18,6230	-0,0446
T2.8	T4.8	18,6671	18,6210	-0,0461
T2.9	T4.9	18,6674	18,6180	-0,0494
T3.2	T6.3	20,7293	20,7070	-0,0223
T3.6	T6.6	20,7280	20,7000	-0,0280
T3.7	T6.7	20,7279	20,7010	-0,0269
T3.8	T6.8	20,7273	20,7000	-0,0273
T3.9	T6.9	20,7273	20,7010	-0,0263

Middel =	-0,0193
σ =	0,0280

Figur 7.2.10: Sammenligning af vandrette afstandsmålinger

Afvigelserne på målingerne ligger absolut set på mellem 0 og 8,2 mm for de lodrette afstandsmålinger (se figur 7.2.9), for de vandrette afstande er afvigelserne på mellem 3,8 og 49,4 mm (se figur 7.2.10). Middelafvigelsen på de lodrette mål er på 1 mm, hvilket kan antyde en svag systematik i kontrolmålene. Når afvigelserne betragtes, er ca. tre ud af fire afvigelser positive. Afvigelserne er små, men der ses tre afvigelser på over 5 mm, disse er alle positive. Til sammenligning er den største negative afvigelse på 2,9 mm.

På de vandrette mål er middelafvigelsen på -1,9 cm, hvilket antyder en noget stærkere systematik. Her er ca. to ud af tre afvigelser negative. De største negative afvigelser ligger mellem 4,5 cm og 4,9 cm, mens den største positive afvigelse er på 1,2 cm.

Når spredningerne på de lodrette afstande og vandrette afstande beregnes, ser dette ud som følger:

	σ
Kontrol med totalstation	1.2 mm
Korte lodrette mål	2.6 mm
Lange vandrette mål	28 mm

Figur 7	7.2.11:	Spredninge	r
---------	---------	------------	---

For at undersøge, om hvorvidt spredningerne fra hhv. de lodrette og de vandrette mål overholder en tilsvarende præcision, ville der her kunne foretages en F-Test på spredningerne. Men med det lave antal overbestemmelser vil en sådan test ikke give et retvisende billede. Dertil er der en grænse for spredninger, fastsat i kravspecifikationen, hvorfor denne benyttes som mål for, om kontrolmålingerne overholder en tilfredsstillende præcision.

Når spredninger på kontrolmålingerne betragtes, ses det, at de korte mål ligger inde for grænsen fastsat i kravspecifikationen på 5 mm. De lange afstande overstiger derimod betragteligt den fastsatte grænse. En del af årsagen til de store afvigelser på de lange afstande, må findes i modellens ufuldkommenhed.

Gitteret på siden af broen har kastet skygger ind på stolperne, som bliver medtaget i dannelsen af strukturen. Dette betyder i nogle tilfælde, at stolperne er blevet meget ujævne, hvilket kan forklare de store vandrette afvigelser. Denne type ujævnheder vil ikke have samme effekt på de korte mål, da de foretages lodret.

En anden del af forklaringen kan også være, at de lange mål foretages over flere scanninger. Til trods for at der i denne model kun indgår enkeltpunkter fra laserscanningen, bliver disse stadig brugt til at styre geometrien i modellen. De små afvigelser, der kunne ses ved registrering, forplanter sig over flere opstillinger, hvilket også kan bidrage til større afvigelser ved de lange kontrolmål i modellen.

For at undersøge dette nærmere, er der foretaget en ny kontrolmåling. Den er foretaget direkte i punktskyen fra laserscanningen, for dermed at kunne undersøge, om det er punktskyen fra laserscanningen, der er skyld i de store afvigelser. I punktskyen er 12 punkter udvalgt. Disse punkter er, så vidt muligt, sat ved første og sidste kryds på de seks stolper. Da opløsningen i laserscanningen ikke er lige så høj som ved fotogrammetrien, er det primært geometrien der er anvendt til at bestemme den omtrentlige placering af punkterne. Der er derfor også en større usikkerhed ved disse punkter, men formålet er ikke perfekte mål. Formålet er, at undersøge usikkerheden ved laserscanningen og registreringen af punktskyen. Det er derfor også vandrette mål, der fokuseres på, da det var her problemet var ved den tidligere kontrolmåling.

Som beskrevet er der kun udvalgt 12 punkter og dermed seks afstande. Det er derfor en relativ lille stikprøve, men det er nok til at se om afvigelserne generelt bliver større eller mindre. Afvigelserne er beregnet som tidligere, ligeledes gælder det for middelværdi og spredning. Resultatet af denne undersøgelse kan ses herunder, af figur 7.2.12.

	Kontrolmål med laserscanner og totalstation			
	Punkt ID	Laserscanning Totalstation Difference		Difference
Fra	Til			
T1.1	T5.1	22,7757	22,7832	-0,0075
T1.9	T5.9	22,7729	22,7775	-0,0046
T2.1	T4.1	18,6613	18,6684	-0,0071
T2.9	T4.9	18,6634	18,6674	-0,0041
T3.1	T6.1	20,7217	20,7281	-0,0064
T3.9	T6.9	20,7256	20,7273	-0,0017

Middel =	-0,0052
σ =	0,0056

Figur 7.2.12: Afvigelser mellem laserscanning og totalstation

Som det kan ses er afvigelserne, og i forlængelse deraf middelværdi og spredning, blevet betydeligt lavere end ved forrige kontrol af vandrette afstande. Ingen afvigelser overstiger 1 cm, de er dog alle negative, hvilket betyder at der i alle tilfælde er målt for kort i punktskyen. Spredningen beregnes denne gang til at være 5,6 mm, hvilket er meget tæt på den fastsatte grænse i kravsspecifikationen. Ved denne ekstra undersøgelse af punktskyen, som danner grundlag for hybridmodellen, er det blevet klart, at punktskyen danner et fornuftigt grundlag, og at det har været fotogrammetrien, som har givet udfordringer. Dette kommer til udtryk ved de store afvigelser på de vandrette kontrolmål. Spredningen på afstandsmålingerne er lidt højere end den fastsatte grænse på 5 mm, men der er også større usikkerheder ved denne test. Med udgangspunkt i denne undersøgelse må det konkluderes, at det i høj grad er fotogrammetrien, der har bidraget til store afvigelser, der ses af figur 7.2.10.

7.3 Delkonklusion

På baggrund af dataindsamling, databehandling og undersøgelserne foretaget på hybridmodellen, vurderes det, at modellen lever op til fem af de seks opstillede krav i kravsspecifikationen.

GSD på 1 mm og overlap på 60% er begge krav, der skulle tages hensyn til ved dataindsamlingen. For at opnå den rette GSD, med det kamera der var til rådighed til dataindamlingen, blev den rette afstand, hvormed billederne skulle tages, beregnet. Efter billederne var indsamlet, blev overlappet mellem disse beregnet, for at kravet om overlap på 60% kunne kontrolleres. Begge disse krav vurderes at være overholdt.

Præcision ved registrering og punkttæthed omhandler begge laserscanningen.

For at opnå den rette punkttæthed, er der blevet opstillet inden for 10 meters afstand til broen, og scannet med en punkttæthed på 6 mm ved 10 m afstand. Der er scannet med stort overlap, for at sikre at den rette punkttæthed er opnået. Denne er, ved stikprøver, målt til at være 2-3 mm.

Præcisionen ved registrering er blevet kontrolleret ved selve registreringen. Der blev her opnået en spredning på 1,1 mm ved den frie registrering og 1,3 mm ved den fastholde registrering. Begge disse krav vurderes derfor også overholdt.

Kravsspecifikationens femte krav omhandler hybridmodellens detaljeringsgrad, og stiller krav til at skader skal kunne ses.

Som det blev præsenteret i dette kapitel, lever den første hybridmodel delvist op til kravene. Der er store områder, der er tydeligt defineret og med høj detaljeringsgrad, mens der er andre områder med artefakter og huller. I projektets indledning blev en af problematikkerne ved denne type model introduceret, den omhandlede at fotogrammetrien kan være udfordret ved ensformige strukturer. Denne type model kommer med mange udfordringer til den fotogrammetriske del af modellen, da der bl.a. er flere ensformige elementer, men også strukturer, som nettet ved gelænderet skaber udfordringer. Det var ikke muligt at fastholde fotogrammetrien alle steder, hvorfor modellen nogle steder ikke er blevet fyldestgørende til formålet. De steder hvor laserscanningen har kunne fastholde fotogrammetrien, lever modellen tydeligt op til kravene. En fordel ved denne type model er, at selv på områder hvor fotogrammetri ikke har kunnet justeres på plads over laserscanning, vil de oprindelige billeder stadig være til rådighed. Dette betyder, at en visuel inspektion af billederne kan foretages, hvis områder af modellen ikke har den ønskede detaljeringsgrad.

Det sjette krav om geometrisk præcision bliver kun delvist honoreret, da det kun er spredningen på de korte afstandsmålinger, der holder sig under de 5 mm, spredningen på disse var på 2,6 mm. Ved de lange kontrolmål er spredningen oppe på 28 mm, dermed også betydeligt over den opstillede grænse på 5 mm.

For at undersøge årsagen bag de større afvigelser på de vandrette mål, blev der foretaget en kontrolmåling i punktskyen fra laserscanningen. Denne viste lavere afvigelser på de vandrette mål, end ved den oprindelige kontrolmåling. Det antages derfor, at fotogrammetrien er en betydelig faktor ved de store afvigelser på disse mål.

Afvigelser kan blandt andet skyldes, at gitteret på gelænderet har kastet skygger ind på stolperne. Dette har resulteret i ujævnheder på stolperne, da det i denne model ikke er hele laserscanningen, der er anvendt, men kun enkeltpunkter. Ujævnhederne på stolperne ændrer på dybden af stolperne,

men ikke de andre dimensioner, hvorfor dette kun ville give udslag på de vandrette kontrolmål.

For at kunne fastholde dimensionerne bedre, skal der tilføres flere punkter fra laserscanningen, men ved at gøre dette, misfarves meshet, hvormed kontrolmålene går tabt.

Skulle kontrolmålene foretages igen, ville bedre resultater formodentlig kunne opnås ved at vælge et

andet område af broen til målingerne, da der generelt er mange usikkerheder omkring gelænderet oppe på broen.

Et aspekt ved dataindsamlingen, som kunne have gjort beregning af en hybridmodel lettere og mere pålideligt er at anvende en drone og evt. et håndholdt kamera, fremfor udelukkende at benytte håndholdt kamera. Dette skyldes, at der ved dronebilleder ofte kan knyttes foreløbige koordinater til de anvendte billeder. Dertil kan der på nye systemer også tilknyttes rotationerne (ω, ϕ, κ). Dermed sikres et optimalt grundlag for den fotogrammetriske software, da alle billeder hermed har en initierende placering og orientering, i modsætning til den rent håndholdte løsning, hvor alle positioner og rotationer skal bestemmes ud fra fællespunkter og overlap i billeder.

I dette kapitels første afsnit (7.1) blev det præsenteret, at det med hybridmodeller er muligt at konstruere modeller med meget høj detaljeringsgrad. Ligeledes er der i kapitlets andet afsnit (7.2) præsenteret, at disse modeller holder en præcision på få millimeter ved afstandsmålinger på omkring 10-30 cm og få centimeter på afstande omkring 20 m.

Ved brug af moderne udstyr er der, til dette projekt, blevet foretaget datindsamling og beregning af to hybridmodeller. Hver af disse modeller lever delvist op til projektets formulerede krav. Den første model gør det muligt at registrere helt små skader og fejl i broens betonelementer (fejl i millimeter størrelser), mens den anden model gør det muligt at måle korte afstande med en spredning på 2,6 mm og længere afstande på 28 mm. Det er dermed lykkedes at konstruere to hybridmodeller, der kan sammenlignes med hybridmodellerne præsenteret i afsnit 4.2.

8 Konklusion

Der er gennem nærværende projekt arbejdet ud fra at besvare følgende hovedspørgsmål:

Kan hybridmodeller anvendes til eftersyn af broer?

For at kunne besvare dette, er der to spørgsmål, der må undersøges; Hvad er kravene til eftersyn af broer? Kan hybridmodeller teoretisk set, anvendes til dette?

Disse spørgsmål blev undersøgt og beskrevet i rapportens kapitel 4 Empiriske undersøgelser: Eftersyn af broer i teori og praksis.

Hvilke krav skal 3D-modeller leve op til, for at kunne anvendes til eftersyn af broer?

Ved undersøgelse af ovenstående spørgsmål, blev kravene til eftersyn af hybridmollerne belyst. For at dette blev der taget kontakt til Vejdirektoratet, som er myndighed for vedligeholdelse af broer og bygværker på de danske statsveje. Ved eftersyn af broer fokuseres der hovedsageligt på det visuelle aspekt, hvilket også fremgår af vejledningen, der anvendes ved eftersyn. Det blev klart, på baggrund af denne delundersøgelse, at kravene til 3D-modeller ved eftersyn i høj grad var krav til detaljeringsgraden og et spørgsmål om, hvor virkelighedstro modellen kunne gøres.

For at undersøge krav, vedrørende modellens geometriske præcision, blev der foretaget interviews med både Vejdirektoratet og EasyInspect. Det blev igen understreget, at den geometriske præcision ikke er i fokus, men at detaljeringsgraden er det vigtige element ved eftersyn. Det blev dog noteret, at en god geometrisk præcision ville kunne danne grundlag for, at modellen kunne bruges som projekteringsgrundlag. Således ville skader eller projektomdråder kunne måles op til videre planlægning. Med udgangspunkt i denne første delundersøgelse, blev det undersøgt om hybridmodeller ville være en mulig løsning til eftersyn af broer.

Kan hybridmodeller honorere kravene til eftersyn?

For at undersøge om der var belæg for, at hybridmodeller kunne anvendes til eftersyn, blev eksisterende projekter fra hele verden undersøgt. Da hybridmodeller endnu ikke er en bredt anvendt metode, ej heller til eftersyn af broer, blev der taget udgangspunkt i laserscannings- og fotogrammetriske projekter, vedrørerende eftersyn af broer. Dette blev gjort for, at få et indtryk af, hvad der var muligt at opnå ved brug af de to delkomponenter, som hybridmodellen består af. Slutteligt blev hybridmodeller i andre projekter undersøgt, disse omhandlede i høj grad bevaring af kulturarvsbygninger.

På baggrund af de ovenstående undersøgelser kunne det konkluderes, at hybridmodeller med stor sandsynlighed kan leve op til kravene ved eftersyn af broer.

For at teste denne tese, skulle en hybridmodel af en bro konstrueres. For at dette kan lade sig gøre, skulle egne data indsamles, hvilket skulle ske på et grundlag, der sikrede en tilstrækkelig kvalitet af modellen og en efterfølgende vurdering af om denne levede op til kravene. Dette førte til undersøgelsen af følgende spørgsmål:

Hvordan sikres en tilstrækkelig kvalitet af modellen under dataindsamling?

Før at dataene kunne indsamles, måtte det først fastlægges hvilke krav modellen skulle leve op til i sidste ende, da dette ville have betydning for måden data blev indsamlet. Kravene var et resultat af de erfaringer der blev gjort i kapitel 4 "Empiriske undersøgelser: Eftersyn af broer i teori og praksis".

Som grundlag for indsamling af data til en hybridmodel, blev det undersøgt hvilken fremgangsmåde,

der var nødvendig, for at sikre at modellen overholder de opstillede krav. Derved blev der fastsat grænser for afstand mellem kamera og objekt ved den fotogrammetriske dataindsamling, samt opløsning mm. ved laserscanning, som en sikring af at kravene til modellen blev overholdt.

Ved registreringen af laserscanningens punktskyer, blev spredningerne på targets beregnet til at være under de 2 mm, fastsat i kravsspecifikationen. De første fire krav er således mødt og på baggrund af den indsamlede data, kunne der konstrueres en hybridmodel i programmet RealityCapture. Denne model blev efterfølgende undersøgt for at kontrollere de sidste to krav, samt besvare fjerde og sidste underspørgsmål:

Hvilken præcision og detaljeringsgrad kan opnås i et mesh, ved brug af moderne udstyr?

For at undersøge hvilken præcision og detaljeringsgrad der kan opnås i en hybridmodel, deles denne undersøgelse ind i to dele. Først blev den visuelle karakter af hybridmodellen undersøgt. Her kunne det konkluderes, at der i modellen tydeligt kan ses misfarvninger på broen, samt små strukturer i broens betonfundament. Dertil kan det konstateres, at der i denne hybridmodel viste sig udfordringer med eksempelvis, at konstruere rækværket på broen, da dette bestod af et tyndt gitter med reflekterende håndtag, hvilket hverken giver gode forhold for laserscanning eller fotogrammetri. Efterfølgende blev den geometriske præcision undersøgt. Her kunne der konstateres en præcision på få millimeter ved korte afstande og en præcision på få centimeter på længere afstande.

Den samlede vurdering af hybridmodeller til eftersyn af broer er således, at denne type model fortsat er et interessant værktøj til at løse opgaven med. Som helhed vil modellen beregnet i dette projekt ikke kunne anvendes til eftersyn, da der er steder i modellen, hvor artefakter og huller kunne skjule de skader, der skulle registreres. Fokuseres der til gengæld alene på betonelementerne på denne bro, må det konstateres, at disse elementer blev gengivet i modellen med en detaljeringsgrad, hvor betonens strukturer på få millimeter kunne observeres. Svaret på det overordnede spørgsmål om, hvorvidt hybridmodeller kan anvendes til eftersyn af broer er derfor, at det kan de, men at visse betingelser skal være opfyldt. Der skal som udgangspunkt være struktur nok til at fotogrammetrien kan danne de rette fællespunkter.

Yderligere er broen anvendt i nærværende projekt en cykelbro, med nem adgang både over og under broen. En relevant undersøgelse at foretage er derfor, om en tilsvarende model kan konstrueres på baggrund af laserscanning og dronebilleder på større broer.

9 Perspektivering

I dette projekt er mulige anvendelser af produktet hybridmodeller blevet undersøgt. Der er få eksempler at finde på, hvad hybridmodeller anvendes til i dag. Anvendelsesområdet begrænser sig i høj grad til kulturarvsbygniner eller kirker, og bevaringen af disse.

Hovedundersøgelsen i dette projekt omhandler anvendelsen af hybridmodeller til eftersyn af broer. Konklusionen på undersøgelserne foretaget i projektet er, at der er et potentiale i anvendelsen af denne metode til eftersyn af broer. Metoden har dog visse udfordringer. En af disse udfordringer ligger i muligheden for at sammenknytte billeder af meget ensformige elementer, ved brug af fotogrammetri. Det er derfor muligt, at et bedre anvendelsesområde for denne hybrid-metode ville være større bygninger med mere struktur.

Hybridmodeller har stadig de fordele, at laserscanningen bidrager med en skala og en god geometrisk præcision, hvortil fotogrammetrien giver detaljeringsgraden. Det kunne derfor være en mulighed at 3D-modellere høje bygninger, hvori basen af bygningen kan scannes og dermed give en grundlæggende geometri og skala, mens resten af bygningen kunne optages med drone. En sådan model ville ligeledes kunne bruges til renoverings- eller projekteringsformål.

I forbindelse med undersøgelsen af eksisterende inspektionsprojekter, blev et projekt af Mader m.fl. (2015) præsenteret. Her havde man forsøgt sig med anvendelsen af laserscanning fra drone. Der blev i projektet af Mader m.fl. (2015) opnået en præcision på 32 cm, ved brug af denne metode. Dette er på nuværende tidspunkt ikke en tilstrækkelig præcision, men det præsenterer muligheden for anvendelsen af drone til scanning i fremtiden. Såfremt der kan opnås en højere præcision med laserscanning på drone, så vil denne fremgangsmåde kunne anvendes til at styrke geometrien i højden.

Bibliografi

- Alshawabkeh, Yahya og Haala, Norbert (2006). "Combining Laser Scanning and Photogrammetry - A Hybrid Approach for Heritage Documentation." I: *ResearchGate* January, s. 8. URL: https://www.researchgate.net/publication/220955243%7B%5C_%7DCombining%7B%5C_ %7DLaser%7B%5C_%7DScanning%7B%5C_%7Dand%7B%5C_%7DPhotogrammetry% 7B%5C_%7D-%7B%5C_%7DA%7B%5C_%7DHybrid%7B%5C_%7DApproach%7B%5C_ %7Dfor%7B%5C_%7DHeritage%7B%5C_%7DDocumentation.
- Barsanti, Sara Gonizzi, Remondino, Fabio og Visintini, Domenico (2012). "Photogrammetry and laser scanning for archaeological site 3D modeling Some critical issues". I: *CEUR Workshop Proceedings* 948.i, s. 1–10. ISSN: 16130073.
- Castilla, F. J. m.fl. (2021). "3D Sensor-Fusion for the Documentation of Rural Heritage Buildings". I: *MDPI Remote Sensing*, s. 1–15. URL: https://www.mdpi.com/2072-4292/13/7/1337.
- Cederholm, Peter (2000). "Udjævning". I: 2, s. 150.
- El-Din Fawzy, Hossam (2019). "3D laser scanning and close-range photogrammetry for buildings documentation: A hybrid technique towards a better accuracy". I: *Alexandria Engineering Journal* 58, s. 1191–1204. URL: https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.10.003. Sidst besøgt d. 25.10.2020.
- Flatman, Andrew (2018). "Fotogrammetri: Grundformler". I: Slides fra undervisning på landinspektørstudiet.
- Gordon, Stuart J. og Lichti, Derek D. (2007). "Modeling Terrestrial Laser Scanner Data for Precise Structural Deformation Measurement". I: *Journal of Surveying Engineering* 133.2, s. 72–80. ISSN: 0733-9453. DOI: 10.1061/(asce)0733-9453(2007)133:2(72).
- Hellmuth, René, Wehner, Florian og Giannakidis, Alexandros (2020). "Datasets of captured images of three different devices for photogrammetry calculation comparison and integration into a laserscan point cloud of a built environment". I: Data in Brief 33.December. ISSN: 23523409. DOI: 10.1016/j.dib.2020.106321.
- Hoedeman, Frederik, Christensen, Hans Henrik og Sandager, Jens (2019a). "Eftersyn Af Bygværker". I: s. 1–35. URL: http://vejregler.lovportaler.dk/showdoc.aspx?t=%2FV1%2FNavigation% 2FTillidsmandssystemer%2FVejregler%2FDrift%2F&docId=vd20190054-full.

Jensen, Karsten (2020). "Landmåling i Teori og Praksis". I: 4, s. 287.

Jiang, Ruinian, Jáuregui, David V. og White, Kenneth R. (2008). "Close-range photogrammetry applications in bridge measurement: Literature review". I: *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation* 41.8, s. 823–834. ISSN: 02632241. DOI: 10.1016/j.measurement. 2007.12.005.

- Kersten, Thomas, Stange, Mathias og Lindstaedt, Maren (2020). "Geometrische Genauigkeitsuntersuchungen der terrestrischen Laserscanner Leica RTC360 und Z + F IMAGER 5016 im Labor und im Feldprüfverfahren". I: May, s. 2–13.
- Lerma, José Luis m.fl. (2010). "Terrestrial laser scanning and close range photogrammetry for 3D archaeological documentation: the Upper Palaeolithic Cave of Parpalló as a case study". I: *Journal of Archaeological Science* 37.3, s. 499–507. ISSN: 10959238. DOI: 10.1016/j.jas.2009.10.011. URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.jas.2009.10.011.
- Lichti, D.D. m.fl. (2002). "Comparison of Digital Photogrammetry and Laser Scanning". I: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 00.September, s. 39–44.
- Luhmann, Thomas, Chizhova, Maria og Gorkovchuk, Denys (2020). "Fusion of UAV and terrestrial photogrammetry with laser scanning for 3D reconstruction of historic churches in Georgia". I: Drones 4.3, s. 753–761. ISSN: 2504446X. DOI: 10.3390/drones4030053. URL: https: //www.researchgate.net/publication/344684455_Fusion_of_UAV_and_Terrestrial_ Photogrammetry_with_Laser_Scanning_for_3D_Reconstruction_of_Historic_Churches_ in_Georgia.
- Mader, D. m.fl. (2015). "UAV-Based acquisition of 3D point cloud A comparison of a low-cost laser scanner and SFM-tools". I: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives 40.3W3, s. 335–341. ISSN: 16821750. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-3-W3-335-2015.
- Pedersen, Niels Højgaard og Bang, Rasmus (2020). "Droneteknologi broen til fremtidens drift". I: *Trafik & Veje* Feb. 2020, s. 32–35. URL: http://asp.vejtid.dk/Artikler/2020/02/9474.pdf.
- Pinto, L. m.fl. (2020). "Low-cost UAS photogrammetry for road infrastructures' inspection". I: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives 43.B2, s. 1145–1150. ISSN: 16821750. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-1145-2020.
- Pix4D (2021). Ground sampling distance (GSD). URL: https://support.pix4d.com/hc/en-us/ articles/202559809-Ground-sampling-distance-GSD.
- Remondino, Fabio, Guarnieri, Alberto og Vettore, Antonio (2005). "3D modeling of close-range objects: photogrammetry or laser scanning?" I: *Videometrics VIII* 5665.January 2005, s. 216. ISSN: 0277786X. DOI: 10.1117/12.586294.
- Rich, Katrine Clausager (2020). "Nu åbner Folehavebroen". I: *Valby Lokaludvalg Nyheder*. URL: https://www.valbylokaludvalg.kk.dk/nu-aabner-folehavebroen/.
- Riveiro, B. m.fl. (2013). "Validation of terrestrial laser scanning and photogrammetry techniques for the measurement of vertical underclearance and beam geometry in structural inspection of bridges". I: *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation* 46.1, s. 784–794. ISSN: 02632241. DOI: 10.1016/j.measurement.2012.09.018. URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2012.09.018.
- Rusinkiewicz, Szymon og Levoy, Marc (2001). "Efficient variants of the ICP algorithm". I: *Proceedings* of International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, 3DIM. ISSN: 15506185. DOI: 10.1109/IM.2001.924423.

- Rönnholm, P m.fl. (2007). "Integration of Laser Scanning and Photogrammetry". I: *Iaprs* XXXVI.Sep. S. 355–362.
- Teza, Giordano, Galgaro, Antonio og Moro, Francesca (2009). "Contactless recognition of concrete surface damage from laser scanning and curvature computation". I: NDT and E International 42.4, s. 240–249. ISSN: 09638695. DOI: 10.1016/j.ndteint.2008.10.009.
- Tian, Jie (2011). "Basics of Photogrammetry". I: Geodetic Services, Inc., s. 62. URL: https://www.geodetic.com/basics-of-photogrammetry/?fbclid = IwAR3aTeaY8aNDIQ5OIFGF6z18ooeqb8IPdum3jrd-lzXmnMhBcLH7bNCsc-A.
- Zoller + Frölich GMBH (2021). "Z+F IMAGER 5016 Datasheet". I: URL: https://positics.fr/wpcontent/uploads/2020/07/5016-Spec-techniques.pdf.

Figurer

1.0.1 1.0.2	Sammenligning mellem laserscanning og fotogrammetri23D-model lavet på både laserscanning og fotogrammetri4
3.0.1	Rapport flow
4.2.1 4.2.2	Bjælke før og efter deformation 16 To typer af targets 17 Sammenligning af forskellige udbyderes presentation af presiden 18
4.2.5	Vertikal fribøide under bro
4.2.5	Field of View faktorer.
4.2.6	Faktorer der påvirker præcision ved fotogrammetri
4.2.7	Fotogrammetrisk 3D-model fra et spejreflekskamera og en smartphone
4.2.8	Kombination af laserscanning og fotogrammetri vist i punktsky
4.2.9	Dueslag (Castilla m.fl., 2021, s. 10, fig. 8)
4.2.10	Andreas Kirken i Lurdji (Luhmann m.fl., 2020, s. 758 fig. 11)
5.2.1	Flowchart over undersøgelsesdesign
5.2.2	Folehavebroen i Google Maps 35
5.2.3	Cykelbroen over Folehaven i Valby
5.2.4	Cykelbro over Folehaven i Valby
5.2.5	Z+F opløsning ved scanningsinstilliger
5.2.6	Vinkel per pixel i grader, efter antallet af pixels på en omgang
5.2.7	Punkttæthed på 10 m
5.2.8	Beregnede punkttætheder
5.2.9	Planlagt opstilling af scanstationer og targets, på ene side af broen
5.2.10	GSD beregning
5.2.11	Forhold mellem GSD og afstand mellem kamera og objekt
5.2.12	Forhold mellem GSD og afstand mellem kamera og objekt
5.2.13	Maksimal afstand til objekt med $GSD = 1 \text{ mm}$
5.2.14	Planlagt rute for fotografering
5.2.15	Sfærisk target med adapter til prisme
5.2.10	Kovariansmatricen
5.2.17	Foreløbig placering af fikspunkter i projektområdet
5.2.18	
5.2.19	
5.3.1 E 2 0	Opstilling under broen med laserscanner
0.3.∠ ⊑ 2 2	Dilladoparier for fotografing
ວ.ວ.ວ ⊑ວ.₄	Dillede serier tra totogratering
5.3.4	Billede af kontrolpunkter

5.3.5 5.3.6	Ruter ved anden fotografering51Overlap mellem billeder over broen52
5.3.7	Overlap mellem billeder under broen
6.0.1 6.1.1	Flowchart over databehandling og vurdering 55 Netskitse fra ScanObs 56
6.1.2	Udjævning i ScanObs
6.1.3	GNSS punkter i ScanObs
6.1.4	Spredninger på fikspunkter i ScanObs
6.2.1	LaserControl - Registrerede opstillinger
6.2.2	LaserControl - Registrerede opstillinger
6.2.3	LaserControl - Spredninger på opstillinger
0.2.4 6.2.5	LaserControl - Residualer pa targets
626	LaserControl - Spredninger på fastholdte targets ved tranformation
631	Underside af bro - få fællespunkter
6.3.2	Fortyndet punktsky i RealityCapture
6.3.3	Fortyndet punktsky i RealityCapture
6.4.1	Placering af kontrolpunkter, vist i punktskyen fra laserscanningen.
6.4.2	Kontrolmodel med lav detaljeringsgrad på baggrund af både fotogrammetri og la- serscanning.
6.4.3	Første pæl for kontrolmål i RealityCapture
6.4.4	Punkter til afstande udpeget i RealityCapture
6.4.5	Overblik over afstande målt i RealityCapture
6.4.6	30 lodrette afstande målt i RealityCapture
6.4.7	16 vandrette afstande målt i RealityCapture
6.4.8	Beregnede Lodrette afstande
6.4.9	Beregnede vandrette kontrolmål
7.1.1	Beton i RealityCapture
7.1.2	Beton i RealityCapture
7.1.3	Beton i RealityCapture
7.1.4	Mistarve på beton i RealityCapture
7.1.5	Broens start I RealityCapture
7.1.0 7.1.7	Broens vejstribe i RealityCapture
/.l./ 710	Et sted modellen ikke er gaet godt i RealityCapture
7.1.0	Cittor på broon i PoolityConturo
7.1.9	Skæv alignment i RealityCanture
7.1.10	Kontrolmål i RealityCanture set fra siden
722	Kontrolmål i RealityCapture set nå langs
723	Første pæl for kontrolmål i RealityCapture 84
7.2.4	Punktspredning i 3D
7.2.5	Punktspredning fra totalstation
7.2.6	Spredning på afstand mellem to punkter
7.2.7	Spredning på afstand mellem to punkter
7.2.8	Beregning af spredning på afstande
7.2.9	Sammenligning af lodrette afstandsmålinger

7.2.10	Sammenligning af vandrette afstandsmålinger	88
7.2.11	Spredninger	88
7.2.12	Afvigelser mellem laserscanning og totalstation	89
Bilagsliste

BILAG 1 SPØRGSMÅL TIL INTERVIEW

Hvad er omfanget ved inspektion?

Måles der op? I så fald, med hvilken præcision?

Tages der billeder?

Hvor mange billeder?

Hvor tæt på og er der krav om opløsning?

Hvilken detaljeringsgrad er påkrævet? Skal der kunne ses skader på mindre end 1 mm eksempelvis?

Hvilken præcision er nødvendig for at kunne anvende data til projekteringsformål?

Kan intensitet være til nytte?

Ser du nogle anvendelsesmuligheder ved denne type af data? Til rutine- og generaleftersyn.

BILAG 2 KRAVSPECIFIKATION FRA VEJDIREKTORATET

Krav til udstyret

- Billederne skal tagges med exif-data med GPS-position og gerne rotation. Der kan accepteres billeder uden rotation, men det er anbefalet specielt hvis der ikke skal processeres 3D model af dataene.
- Der anbefales at benytte RTK eller PPK til at sikre gode absolutte positioner som kan sammelignes over tid. PPK data skal gemmes i billedets exif i WGS84 koordinat system.
- Billederne skal tages med et kamera som har en høj dynamisk range (stops) som sikrer at skyggeside og solside ikke bliver over- eller undereksponeret. Der anbefales 14 stops eller mere til broinspektioner.
- Billederne skal leveres i det originale JPEG-format. Er billederne taget i RAW, skal de eksporteres til JPEG og bibeholde Exif data.
- Billeder og EXIF-data må ikke ændres, med undtagelse af PPK eller korrigering af farver, kontrast og hvid-balance. Ændres der i billedet skal de originale exif data bevares når billedet gemmes.
 Ændring af diminsioner ved resize eller crop og fjernelse af kamera distortion er ikke tilladt.
- Kameraet skal kunne pege opad for at dække undersider af konstruktionen. Der anbefales en vinkel på minimum 60 grader
- Under flyvning ved vand anbefales der at benytte et pol filter for at fjerne reflektioner.

Krav til droneflyvningen

- Afstanden til konstruktionen afhænger af udstyret og den ønskede Ground Samle Distance (Se guide).
- Der skal være overlap i billederne og alle billeder skal være i forbindelse med andre billeder.
- Overlappet skal være på mindst 60% (Der anbefales 80%).
- Vinklen mellem to billeder i forbindelse må ikke være større end 15 grader. Dvs. at hvis der skal tages billeder rundt om en 90 grader vinkel på en søjle, skal der være 6 rækker af billeder.
- Når der tages billeder close-up skal der også tages oversigt billeder. Close-up billederne sørger for kvalitet og oversigt billederne sørger for at afdække geomtri til opmålinger og placeringer.
- Når der flyves i forskellige afstande må Ground Sampling Distance max fordobles mellem hver afstand. F.eks. flyvning i 5m, 10m, 20m, 40m.
- Billederne skal være i en konsistent god kvalitet, hvilket betyder at de ikke må være over- eller under eksponeret eller slørede.
- Benyttes der kamera med zoom-funktion, må zoom-afstanden ikke ændres under inspektionen. Der skal benyttes en fast focal lenght.
- Hav så meget jord med som muligt i billedet, og hav både strukturen og baggrunden i fokus.
- Undgå så vidt muligt at have himmel og hav med i billederne.

Krav til konstruktionen

- Der skal være et friareal mellem konstruktion og bevoksning/beplantning på minimum 5 meter.
- Dronenpiloten skal altid have mulighed for at se dronen under inspektionen. Derfor kan der være konstruktioner over vand som kræver båd til inspektionen, eller konstruktioner på svært tilgængelige steder som stiller andre krav.





Kilde: Flatman (2018)

		op tr u u
10001 3 10002 3 10003 3 10004 2 10005 3 10005 3 10006 3 10006 3 10002K 1 TARGET10 1 TARGET11 1 TARGET11 1	10001 3 10002 3 10005 3 10006 3 10006 3 10006 3 10002 3 10002 3 10003 3 10006 3 10007 1000 10007 1000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 10000 100000 100000 100000 1000000	TILLINGSOBSER = Antal obser = Antal ej ud = Untal ej ud = Udvægte udv # = Udvægt # = Udvægt # = Udvægt # = Udvægt
		""""""""""""""""""""""""""""""""""""""
		ner p de pl de pl nder: nder: d man d rob d rob ri ko
2110430.3 1 2110430.3 1	210430.1 1 2210430.1 1 2210430.1 1 2210430.1 1 2210430.2 1	er punkt ane observati jdeobservatin uel markerin ust udjævnin de: FR 46 og OpstNr 1b
		r ops ioner oner j g g g g g FR 4
030.2939 017.1690 993.9377 991.3637 091.3637 005.3364 0060.5557 0060.5557 0017.1681 999.5491 999.5491 007.4180	984.9360 9972.7688 0300.7950 0300.7950 019.2868 019.2868 019.2868 021.5750 978.2715 022.1611 006.9801 007.4922 0967.8218 019.0702 997.8218 019.0702 997.8218	tilling per punkt per punkt per punkt kredet 7/ts 2 og . cbsN (m)
956.0 976.3 1018.0 996.3 996.3 976.3 991.5 991.5	984.7 1008.8 1037.7 950.5 950.5 990.7 990.7 991.8 991.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.8 997.	ts 1 obsE
038 038 038 038 038 038 038	247 247 247 247 247 247	(田)
5.6988 6.7825 7.8545 7.6143 5.6143 6.0121 6.0121 6.7828 8.6594 10.1243 11.0195	8.5925 9.6761 10.7481 8.1231 8.9062 6.9629 8.0468 9.1180 8.8780 8.8780 8.8780 8.8780 8.8780 8.8780 8.8780 8.8780 8.8780 8.0211 6.4937 7.2766 6.7950 6.7950 6.7950 9.2836 9.2836 10.4697 11.7781	obsZ (m)
53 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20	122 122 122 122 122 122 122 122	dist2
.3401 .2055 .0170 .0455 .5126 .5126 .6845 .2056 .9366 .2638		D (m)
		р s
1.0 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0 1.0		N (mm)
		ASE (1
		mm) As
*********		2 mm
00000+0000	000000000000000000000000000000000000000	E.
		√7 (m
0 0 0 0 2 4 4 2 0	444W4 4700000000000000000000000000000000	표) 전
	0.000000000000000000000000000000000000	K (mm) 1
		vR
-0.0 -0.2 -0.2 -0.2 -0.0 -0.0 -0.0 -0.0		(mg)
		VA ()
00000000000000000000000000000000000000	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	mm) u
		νZ
0.00000000000000000000000000000000000	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	mm) u

BILAG 4 RESIDUALER PÅ OBSERVATIONER FRA SCANOBS

TARGET1	1169955.8357	646392.6061	3.5993
TARGET2	1169938.5700	646400.8435	4.7244
TARGET 3	1169946.6211	646405.4981	3.3436
TARGET4	1169948.4179	646412.6828	3.4983
TARGET14	1169934.6865	646421.6218	3.6863
TARGET6	1169923.3332	646428.5636	5.9869
TARGET7	1169923.1037	646418.9630	6.7785
TARGET8	1169907.3093	646419.7385	7.1730
TARGET9	1169934.5345	646413.1841	8.4814
TARGET10	1169917.7145	646405.4819	6.6268
TARGET11	1169924.0401	646412.6681	8.0917
TARGET12	1169944.9787	646403.6204	8.9869

BILAG 5 KOORDINATER TIL TARGETS BEREGNET I SCANOBS

BILAG 6 KOORDINATER TIL KONTROLPUNKTER BEREGNET I SCANOBS

8	Nr.	Kode	Northing	Easting	Height
6	T1.1	994.0	1169921.3706	646414.1501	7.6903
6	T1.2	994.0	1169921.3707	646414.1424	7.6012
6	T1.3	994.0	1169921.3718	646414.1350	7.5039
6	T1.4	994.0	1169921.3717	646414.1099	7.2491
6	T1.5	994.0	1169921.3719	646414.1038	7.1830
6	T1.6	994.0	1169921.3711	646414.0943	7.1047
6	T1.7	994.0	1169921.3715	646414.0876	7.0366
6	T1.8	994.0	1169921.3724	646414.0824	6.9713
6	T1.9	994.0	1169921.3731	646414.0758	6.9015
6	T2.1	994.0	1169923.1601	646413.1547	7.8431
6	T2.2	994.0	1169923.1591	646413.1440	7.7493
6	T2.3	994.0	1169923.1594	646413.1312	7.6130
6	T2.4	994.0	1169923.1560	646413.1062	7.4160
6	T2.5	994.0	1169923.1564	646413.0985	7.3305
6	T2.6	994.0	1169923.1558	646413.0911	7.2665
6	T2.7	994.0	1169923.1552	646413.0830	7.1922
6	T2.8	994.0	1169923.1552	646413.0743	7.1003
6	T2.9	994.0	1169923.1529	646413.0609	6.9990
6	T3.1	994.0	1169924.9798	646412.1552	7.9473
6	T3.2	994.0	1169924.9780	646412.1414	7.8556
6	T3.3	994.0	1169924.9774	646412.1303	7.7657
6	T3.4	994.0	1169924.9778	646412.1037	7.5076
6	T3.5	994.0	1169924.9787	646412.0968	7.4246
6	T3.6	994.0	1169924.9807	646412.0917	7.3305
6	T3.7	994.0	1169924.9827	646412.0874	7.2495
6	T3.8	994.0	1169924.9843	646412.0827	7.1674
6	T3.9	994.0	1169924.9842	646412.0738	7.0677
6	T4.1	994.0	1169940.0812	646405.3042	8.5874
6	T4.2	994.0	1169940.0825	646405.2984	8.4944
6	T4.3	994.0	1169940.0835	646405.2929	8.3954
6	T4.4	994.0	1169940.0849	646405.2703	8.1164
6	T4.5	994.0	1169940.0860	646405.2650	8.0361
6	T4.6	994.0	1169940.0863	646405.2559	7.9349
6	T4.7	994.0	1169940.0868	646405.2503	7.8620
6	T4.8	994.0	1169940.0873	646405.2445	7.7788
6	T4.9	994.0	1169940.0879	646405.2371	7.6821
6	T5.1	994.0	1169942.0342	646404.6040	8.6708
6	T5.2	994.0	1169942.0354	646404.5989	8.5892
6	T5.3	994.0	1169942.0365	646404.5931	8.5024
6	T5.4	994.0	1169942.0405	646404.5727	8.1780
6	T5.5	994.0	1169942.0408	646404.5672	8.1002
6	T5.6	994.0	1169942.0414	646404.5630	8.0186
6	T5.7	994.0	1169942.0421	646404.5594	7.9588
6	T5.8	994.0	1169942.0428	646404.5560	7.8885
6	T5.9	994.0	1169942.0439	646404.5500	7.7912
6	T6.1	994.0	1169943.9905	646403.9352	8.7709
6	T6.2	994.0	1169943.9916	646403.9285	8.6933
6	T6.3	994.0	1169943.9931	646403.9200	8.5887
6	T6.4	994.0	1169943.9972	646403.8952	8.2719
6	T6.5	994.0	1169943.9985	646403.8906	8.1901
6	T6.6	994.0	1169943.9998	646403.8870	8.1102
6	T6.7	994.0	1169944.0013	646403.8820	8.0312
6	T6.8	994.0	1169944.0029	646403.8789	7.9494
6	T6.9	994.0	1169944.0045	646403.8745	7.8560