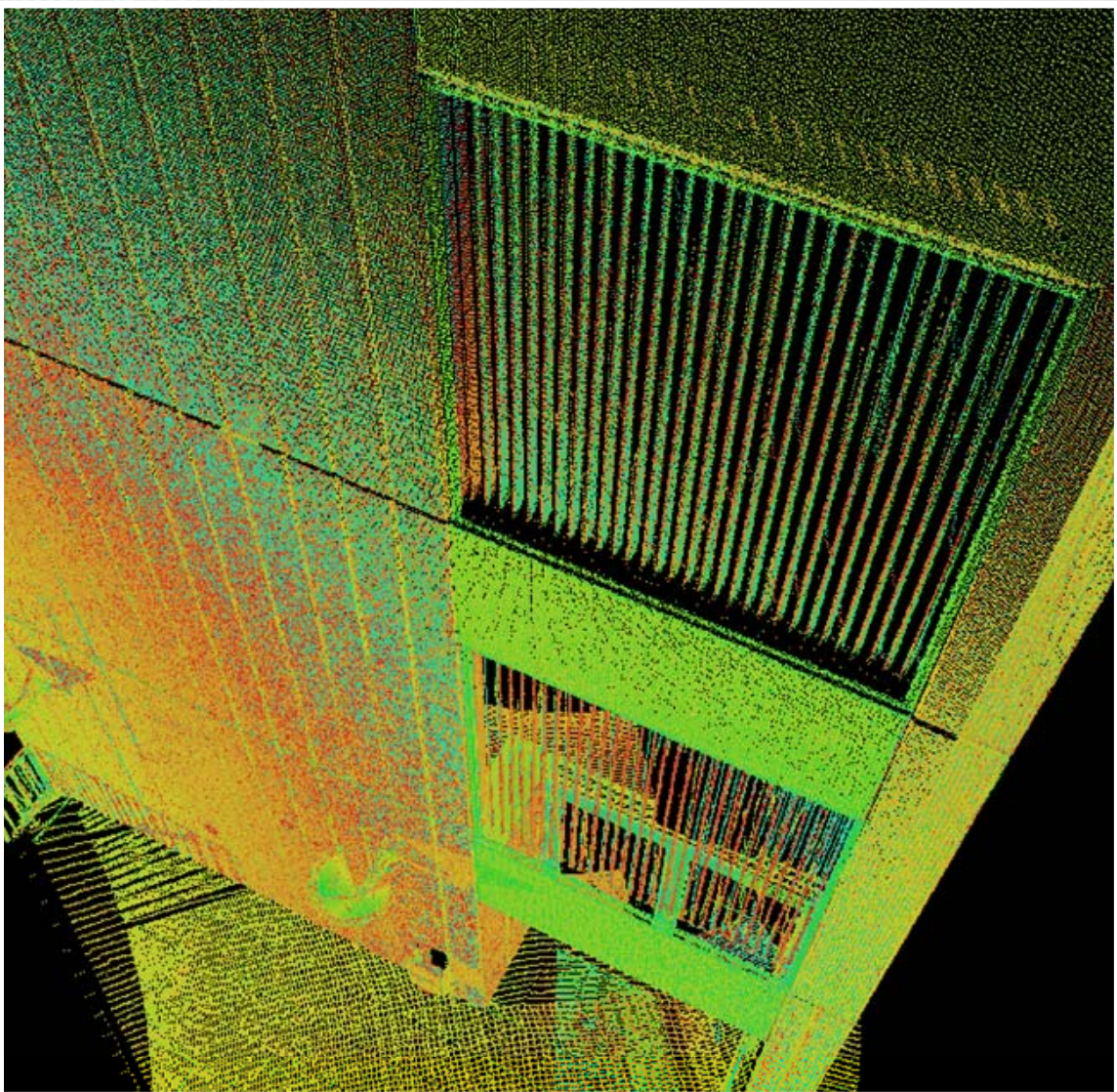


Udnyttelse af 3D scanning til kvalitetssikring i byggeriet



Jens M Vestergård og Sune M Rasmussen

**Specialeafhandling
Byggeledelse
Aalborg Universitet
Juni 2009**

10. Semester

Titel:

Udnyttelse af 3D scanning til kvalitetssikring i byggeriet

Tema:

Afgangsprojekt

Projektperiode:

2/2 til 11/6 2009

Projektgruppe:

Gruppe 4.014a

Deltagere:

Sune Mejlsing Rasmussen

Jens Møller Vestergård

Vejledere:

Kjeld Svidt
Per Christiansson

Oplagstal: 4

Sidetal hovedrapport: 124

Sidetal appendiks: 48

Afsluttet den: 11/6-2009

Synopsis:

Det er erfaret at fejl og mangler, er en væsentlig problemstilling i byggebranchen. Med udgangspunkt i erfaringer fra industrien hvor 3D scanning i en årrække er benyttet til geometrisk kvalitetssikring, opstilles en hypotese omhandlende udnyttelsen af 3D scanning i byggeriet. Ud fra litteraturstudier, virksomhedsbesøg og en feltundersøgelse er der i projektet udarbejdet et system, der integrerer 3D scanning i byggeriets kvalitetssikringsproces. Systemet tager udgangspunkt i, at der under projekteringen udarbejdes en 3D model for byggeriet. I udførelsesfasen scannes den opførte konstruktion, som efterfølgende sammenlignes med 3D modellen for at opdage eventuelle uoverensstemmelser. Systemet afprøves ved hjælp af eksisterende software og hardware, hvorudfra svagheder ved systemet belyses.

Forord

Denne rapport er udarbejdet som et afgangsprøve på uddannelsen Civilingeniør i Byggeledelse ved Aalborg Universitet i perioden fra d. 2. februar 2009 til d. 11. juni 2009. Rapportens målgruppe er vejleder og censor samt andre interesserede, der ønsker at beskæftige sig med emnet 3D scanning i byggeriet. Emnet til rapporten har sin oprindelse fra et medlem af projektgruppens 9. semesters praktik, hvor det blev erfaret at kvalitetssikringen ved in situ støbning var ganske omfattende og omkostningsfuldt. En artikel i fagbladet Ingeniøren omhandlende 3D scanning inden for industrien, gav herefter ideen til at undersøge om denne kvalitetssikringsmetode kunne overføres til byggeriet.

Læsevejledning

Rapporten er opdelt i en hovedrapport og et appendiks. Hovedrapporten indeholder primær læsning. I enkelte afsnit henvises der til yderligere baggrundsviden, som kan findes i appendikset. I starten af hvert kapitel er der et afsnit markeret med kursiv, som beskriver kapitlets formål og indhold. I rapportens indledning beskrives problemstillingen, som konkretiseres i problemformuleringen. Herefter udarbejdes der et løsningsforslag. Der er i forbindelse med rapporten foretaget en praktisk afprøvning af eksisterende software og hardware, hvilket der ligeledes refereres til i rapporten. Bagerst i rapporten findes der en oversigt og en beskrivelse af alle omtalte formater og programmer. Oversigten tjener som et opslagsværk for læseren og kan findes på side 161.

En elektronisk udgave af rapporten kan findes på **www.projekter.aau.dk**

Samarbejdspartnere

Projektgruppen har gennem projektperioden været i kontakt med en række eksterne personer, som har hjulpet med specialviden inden for en række

emner. Projektgruppen retter hermed en stor tak til:

- **Jeppe Hebsgaard Laursen** og **Katja Ramsing** fra Zebicon for viden om 3D hvidlysscanning i industrien, opstart og implementering.
- **Søren Smalbro Sørensen** fra Rambøll Aalborg for viden om kvalitetssikring i byggeriet.
- **Niels Koefoed Nielsen** fra Rambøll Esbjerg for viden om 3D scanning af offshore konstruktioner.
- **Carsten Bech** fra Aalborg Universitet institut for Samfundsudvikling og Planlægning for udlån af og bistand ved brug af 3D laserscanner.
- **Brian Jung** fra Rapidform Tyskland for at stille en prøveversion af inspektionssoftwaren XOV2 til rådighed.
- **Kristian Birch Sørensen**, erhvervs ph.D. studerende fra Rambøll, for hjælp ved arbejdet med 3D modeller samt invitationen til mini konferencen "IT i byggeriet".
- **Anders Haugaard Thomsen** og **Martin Steenberg Hansen**, specialestuderende på landinspektørstudiet AAU, for sparring om emnet 3D scanning i byggeriet.

Abstract

The construction industry is characterized by many building defects which lead to high costs and a bad reputation. To change this situation the quality assurance/quality control from the design phase to the completion of the construction, are investigated. With inspiration from experiences in the machinery industry, a concept for geometric QC by means of 3D laserscanning, is developed. To demonstrate the opportunities in the concept, a practical test of existing software and hardware is conducted. The test involves a setup consisting of a design software (Tekla Structures 13), a laser scanner (Leica HDS 3000) and an inspection software (Rapidform XO2). For demonstration, an existing precast building is scanned with a laser scanner, and compared to a model of the building in the inspection software. The result is a colormap that shows differences between the "as built" data and the 3D model.

A literature survey of 3D models identify a need for a common file exchange format in the concept, and IFC is identified as an opportunity. By investigating the Danish Construction Associations code of practice for precast and cast in place concrete, it is found, that there is a need for a data representation of tolerances or a new practice for describing tolerances.

A practically test of the laser scanner concludes, that the most time consuming part of a scanning is the setup and preparation. As an opportunity for reducing this time, the use of fixed sphere targets are identified. On the basis of four different scan resolutions, it was concluded that a resolution at about 10 mm is suitable for most purpose in the construction industry.

A study of comparison mechanisms identify three different methods whereof the method that is based on calculation of the shortest distance between a surface and a point, are tested through the inspection software. The test shows that the comparison mechanism is usable and that it is not necessary to sort out noise because of a filter opportunity.

On the basis of the conducted tests and the literature surveys an evaluation of the applications of the concept was performed. The result was that the technology is applicable in its present form for control of prefabricated parts for the construction industry and for control of earthworks. If the technology should be usable for concrete work or mounting of precast, further development is needed.

Indhold

1	Indledning	9
1.1	Fokus på fejl og mangler	10
1.2	Erfaringer fra industrien	12
1.3	Hvad er 3D scanning ?	14
1.4	3D scanning i byggeriet i dag	15
1.5	Muligheder for anvendelse af 3D scanning i byggeriet	17
2	Afgrænsning af projektet	21
2.1	Problembeskrivelse	21
2.2	Problemformulering	23
3	Undersøgelsesmetode	25
3.1	Opbygningen af rapporten	25
3.2	Informationskilder	28
4	Kvalitetssikring i byggeriet	29
4.1	Definition af kvalitet	29
4.2	Nuværende situation	31
4.3	Årsager til fejl	35
4.4	Konsekvens af nuværende situation	38
5	Konceptbeskrivelse	39
5.1	Valg af strategi	39
5.2	Overordnet system	40
5.3	Mål for system	44
5.4	Udvælgelse af fokusområder	46
6	Systemudvikling	49
6.1	Systemets delfunktioner	49
6.2	Beskrivelse af underbyggende undersøgelser	51
7	Kontrolgrundlaget	55

7.1	Nedbrydning af funktion	55
7.2	3D modeller	57
7.3	Identificering af tolerancer	59
7.4	Specificering af tolerancer	62
7.5	Praktisk afprøvning af IFC	65
7.6	Opsamling på kontrolgrundlaget	68
8	Scanningsprocessen	71
8.1	Nedbrydning af funktion	71
8.2	Planlægning af scanning	71
8.3	Udføre scanning	81
8.4	Efterbehandling af scanningsdata	84
8.5	Opsamling på scanningsprocessen	86
9	Sammenligningsprocessen	89
9.1	Nedbrydning af funktion	89
9.2	Sammenkædning af model og punktsky	90
9.3	Identificering af afvigelser	90
9.4	Vurdering af afvigelser	94
9.5	Dokumentation af kontrol	95
9.6	Praktisk afprøvning af inspektionssoftware	97
9.7	Opsamling på sammenligningsproces	100
10	Vurdering af anvendelsesmuligheder	103
10.1	Kontrol af elementmontage	103
10.2	Øvrige anvendelsesmuligheder	104
10.3	Samlet vurdering af det udarbejdede system	107
11	Metodekritik	111
11.1	Intern kritik	111
11.2	Ekstern kritik	112
12	Konklusion	115
12.1	Resultater	115
12.2	Yderligere undersøgelser	119
13	Perspektivering	121
13.1	Yderligere anvendelsesmuligheder	121
13.2	ForBAU projektet	122
13.3	Augmented Reality	123
13.4	Teknologi i byggebranchen	124

Appendiks	125
A Metoder	127
A.1 Systemudviklingsmodel	127
A.2 Årsags- virkningsdiagram	128
A.3 Målanalyse	129
A.4 Proceskortlægning	130
A.5 Flowdiagram	131
A.6 IDEF ₀	132
A.7 SWOT-analyse	133
B 3D scanningsteknologier	135
B.1 Udvalgelse af teknologier	135
B.2 3D scanningsteknologier	136
B.3 Vurderingskriterier	138
B.4 3D scannere	139
B.5 Valg af teknologi	142
C Import af IFC modeller	143
D Scanningsrapport	147
D.1 Feltarbejde	147
E Sammenligningsrapport	155
E.1 Inspektionssoftware	155
E.2 Arbejdsgangen	155
F Program og formatbeskrivelse	161
F.1 Modelleringsværktøjer	161
F.2 Viewere	162
F.3 Analysesoftware	163
F.4 Scanningssoftware	163
F.5 Formatoversigt	164
G IDEF₀-diagram	167
Litteratur	169

Indledning

Formålet med det følgende kapitel er at give læseren et indblik i, på hvilken baggrund projektet er blevet til, samt at opstille forskellige alternativer til projektets indhold

Det blev i 2004, af Statens Byggeforskningsinstitut offentliggjort, at der i byggeriet blev udbedret fejl og mangler for et beløb på ca. 12 mia. kr. årligt [EBST, 2004]. Beløbet er baseret på byggeåret 2002 og svarer til omkring 10% af den samlede byggesum. I rapporten blev der lavet en oversigt over de økonomiske konsekvenser, og omkostningerne blev her opdelt i fire faser, hvor det tydeligt fremgik, at størstedelen af udgifterne, hvilket vil sige 67%, blev registreret i udførelsesfasen.

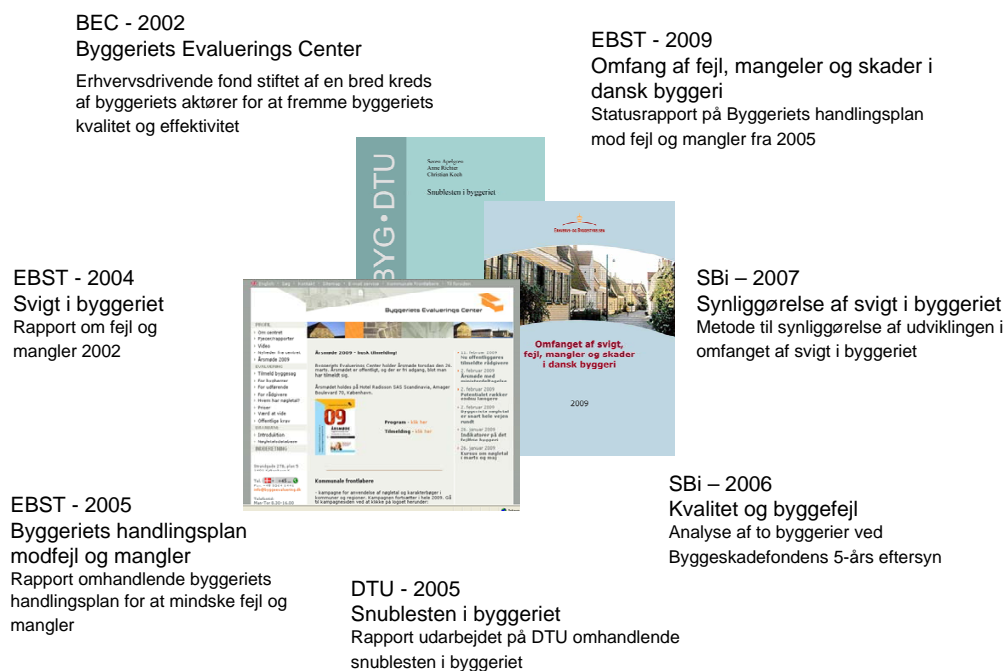
Samtidig udarbejdede DTU i samarbejde med NCC rapporten "Snublesten i byggeriet", der bekræfter udgiften til udbedring af fejl og mangler [Apelgren et al., 2005]. Rapporten tager udgangspunkt i 3 måneders direkte observation af fejl og mangler på en byggeplads, hvor der blev registreret 158 "snublesten". Begrebet "snublesten" betegner alle de forhold, der forhindrer aktøren i at udføre sit arbejde så effektivt som muligt og så rigtigt som muligt - første gang.

Der er i de tidligere nævnte rapporter, givet forslag til forbedringer i byggeriet for at optimere byggeprocessen og hermed mindske antallet af fejl. Flere analyser viser, at der er mange penge at spare ved at mindske antallet af fejl og mangler, hvilket f.eks er beskrevet i [EBST, 2004].

1.1 Fokus på fejl og mangler

Efter offentliggørelsen af de økonomiske konsekvenser af fejl og mangler i byggeriet, blev der i 2005 udarbejdet en handlingsplan til reducere af fejl-ene [EBST, 2005]. Handlingsplanen blev udarbejdet i et samarbejde mellem byggeriets mest fremtrædende organisationer. Målsætningen i handlingsplanen var at halvere mængden af fejl og mangler i løbet af en periode på 5-6 år.

De tiltag, som blev fremlagt i handlingsplanen, tog udgangspunkt i fire indsatsområder med i alt otte initiativer. En evaluering af de otte initiativer [EBST, 2009], der tager udgangspunkt i tal fra byggeåret 2007, konkluderer, at omfanget af fejl og mangler stort set er uændret, hvilket begrundes med, at det har taget længere tid end forventet at implementere tiltagene.



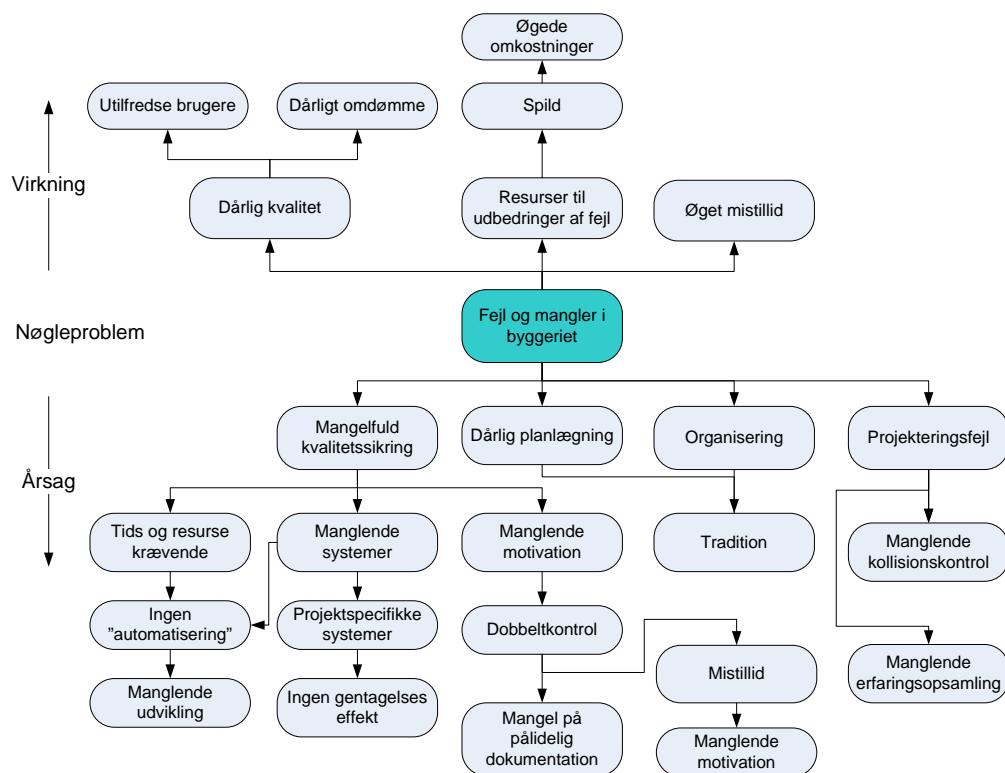
Figur 1.1: Uddrag af litteratur omhandlende fejl og mangler i byggeriet fra 2002 til 2009.

Der har altså i de seneste år været stor fokus på optimering af byggeriets faser med udgangspunkt i at reducere fejl og mangler, se figur 1.1. Men til trods for den megen fokus er det ikke lykkedes at reducere fejl og mangler markant. Derfor er der behov for nytænkning i kampen mod fejl.

Årsager til fejl og mangler

Der er givet mange bud på grunden til den store fejlprocent. Her nævnes blandt andet, at det enkelte byggeprojekt er enestående, hvilket vil sige at virksomhederne i byggebranchen, ikke kan udnytte gentagelseeffekten fra projekt til projekt, som det blandt andet ses ved industriens serie- og masseproduktioner.

De udførende parter giver skylden for fejlene til rådgiverne med begrundelsen, at der er fejl i projekt materialet. Manglende kvalitetssikring bliver også nævnt som en begrundelse. Nogle af årsagerne til den store fejlprocent i byggeriet er af projektgruppen opstillet i et årsag- virkningsdiagram, vist på figur 1.2.



Figur 1.2: Årsags- virkningsdiagram for problemstillingen fejl og mangler i byggeriet.

Nøgleproblemet for årsags- virkningsdiagrammet er "Fejl og mangler i byggeriet". Virkningen af dette (sammen med andre forhold) er, at byggeriet opnår en dårlig kvalitet, hvilket medfører et dårligt omdømme og utilfredse brugere. Der bruges mange ressourcer til udbedring af fejlene, hvilket

medføre et spild, som giver øgede omkostninger. De mange fejl og mangler resulterer også i, at der skabes en mistillid til byggebranchen.

Nogle af årsagerne til de mange fejl og mangler stammer fra manglende kvalitetssikring. Grunden kan her være, at det for entreprenøren er tids- og resurcekrævende at udføre kontrollen, samtidig er der mangel på projektspecifikke systemer, som kan benyttes til kontrol på alle de forskellige typer projekter entreprenørerne arbejder med.

Andre grunde, der kan nævnes som årsager til fejl og mangler, er den generelle organiseringen af byggeriet. Det bliver i rapporten "Snublesten i byggeriet" [Apelgren et al., 2005] fremhævet, at de hyppigste årsager til de registrerede fejl skyldes organisatoriske brister som kommunikation, samarbejde, projekteringsfejl og dårlig planlægning. Det vurderes, at baggrunden for disse årsager er traditionerne i byggeriet samt manglende erfaringsopsamling.

Det ønskes i det videre projekt at tage udgangspunkt i kvalitetssikring i byggeriet og komme med forslag til teknologier, der kan effektivisere og forbedre kvalitetssikringen.

Når emnet kvalitetssikring behandles, er det ofte området forebyggelse der fokuseres på, når der tages initiativer til forbedringer. Bedre samarbejdsaftaler, ændring af organisationen, erfaringsopsamling og digitaliserede kommunikationsværktøjer er bare nogle af de initiativer, som er med til at forbedre byggeriets kvalitet.

Men på trods af de mange forbedringer vil der altid være behov for kvalitetssikring. Fejl og mangler i byggeriet opstår på grund af de fejl byggeriets aktører laver, hvilket oftest kan føres tilbage til menneskelige fejl.

1.2 Erfaringer fra industrien

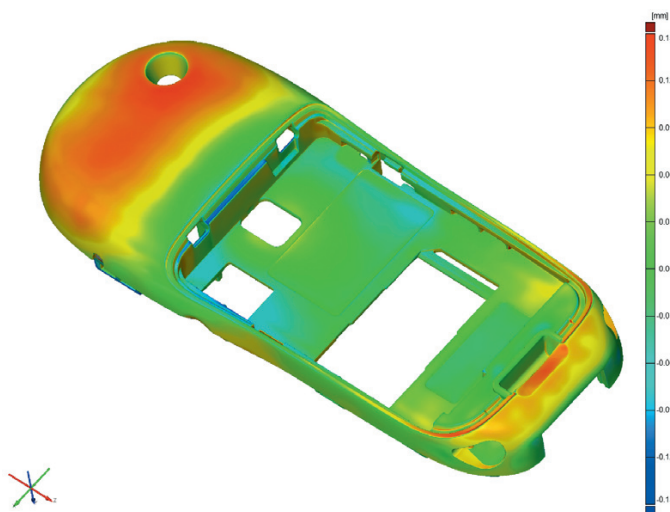
For at finde metoder der kan tages i brug i kampen mod fejl og mangler i byggeriet, er der hentet inspiration i industriens verden. Industrien er på mange områder længere fremme med teknologiudviklingen end byggebranchen. Et af de værktøjer, der blandt andet er taget i brug indenfor industrien til kvalitetssikring, er 3D scanning.

Ved 3D scanning forstås en proces, hvor den fysiske verden digitaliseres, hvilket resulterer i målfaste virtuelle modeller.

Gennem de projekter som er gennemført på byggeledelsesstudiets 1-4 semester, er det erfaret, at 3D scanning til kvalitetssikring inden for byggeriet ikke er et udbredt fænomen, på trods af at teknologien til udførelse af 3D scanninger har eksisteret nogle år.

Teknologien omkring 3D scanning er langt mere udbredt og anvendt indenfor industrien. Dette initierede spørgsmålet omkring hvorledes erfaringerne fra industrien med anvendelse af 3D scanninger kan overføres til byggeriet.

Spørgsmålet, omkring hvorledes erfaringerne fra industrien kan benyttes i byggeriet, virker interessant, da byggeriet arbejder med mindst ligeså komplicerede strukturer som industrien dog i en anden skala. En artikel fra et fagblad [Laursen, 2008] viser bl.a., hvordan en 3D scanning er blevet benyttet til kvalitetssikring af plaststøbelementer til mobiltelefoner. På figur 1.3 kan resultatet af en sådan scanning ses.



Figur 1.3: Eksempel på kvalitetssikring af mobiltelefon vha. 3D scanning. Farverne indikerer om emnet er større eller mindre end CAD modellen. [Laursen, 2008]

Resultatet af 3D scanningen sammenlignes med den eksisterende CAD model, og afvigelserne kan herefter vises ved hjælp af farvekoder jf. figur 1.3. I dette tilfælde viser den røde farve, at der er et overskud af materiale på

det scannede emne i forhold til CAD modellen. Den blå farve indikerer, at der er et underskud af materiale og den grønne farve viser, at der er overensstemmelse mellem scanningen og modellen.

Denne anvendelse af 3D scanning giver anledning til en overvejelse af hvilke anvendelsesmuligheder, der er og kan være for brugen af 3D scanning til kvalitetssikring inden for byggeriet.

1.3 Hvad er 3D scanning ?

Der findes flere teknologier til udførelse af en 3D scanning. Hver scannings-teknologi er udviklet til forskellige formål og har individuelle detaljeringsgrader og arbejdsområder.

I industrien bliver 3D scanning blandt andet benyttet til at digitalisere fysiske modeller og til kvalitetssikring. Indenfor byggeriet bliver 3D scanning benyttet til at scanne eksisterende bygninger med henblik på tilbygning eller renovering.

De mange forskellige typer af scanninger kræver forskellige teknologier. Her er det faktorer som objekt størrelse, tidsforbrug og detaljeringsgrad, der er vigtige for at vælge den rigtige scanningsteknologi.

Ved en 3D scanning beskrives et fysisk emnes overflade digitalt i 3 dimensioner med henblik på for eksempel at lave en nøjagtig kopi.

Når der i denne rapport refereres til 3D scanning og 3D scannere, er det med udgangspunkt i følgende to definitioner.

Definition af 3D scanning

En 3D scanning er en proces til registrering af en stor mængde rumlige data [Kaspar, 2004].

Definition af en 3D scanner

En 3D scanner er et apparat, som automatisk indsamler 3D koordinater af et givet område på et objekts overflade [Boehler, 2009].

Med ovenstående definition udelukkes en række opmålingsmetoder som f.eks. totalstationer og fotogrammetri, da disse ikke kan indsamle koordinater automatisk og kun indsamler informationer om udvalgte punkter. Her udskiller 3D scanning sig væsentligt ved, at der indsamles punkter på hele overfladen af objektet, og først senere udvælges de punkter eller områder der har interesse.

3D scanningsteknologier

I de indledende undersøgelser er det observeret, at kvalitetssikring ved brug af 3D scanning fungerer inden for industrien. Der findes i dag flere teknologier, som opfylder definitionen på en 3D scanning og definitionen af en 3D scanner.

De teknologier som vurderes at være førende, er hvidlysscanning inden for industrien og laserscanning inden for byggeriet. I appendiks B er de to teknologier nærmere beskrevet og det er undersøgt hvilken af de to scanningsteknologier, som er at foretrække til scanning i byggeriet, når der fokuseres på kvalitetssikring.

Resultatet af sammenligningen i appendiks B er en vurdering af, at laserscanning er den teknologi, som er på markedet i dag, der er den bedst egnede til 3D scanning i byggeriet.

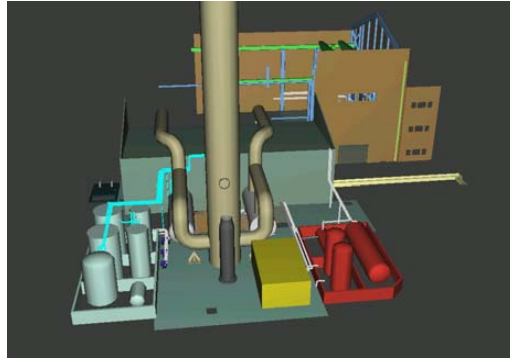
Baggrunden for denne vurdering er, at laserscanning er den teknologi, der har den største mobilitet, og er mest robust overfor vejrforhold. Desuden passer laserscannerens måleområde bedre til byggeri. En ulempe ved laserscanneren er præcisionen på punkterne der registreres, og at målehastigheden (punkter/sekund) er lavere for laserscannere end hvidlysscannere.

1.4 3D scanning i byggeriet i dag

Der bliver i dag benyttet 3D laserscanning i byggeriet inden for en række områder, hovedsageligt inden for opmåling af eksisterende byggeri og ved til- og ombygninger. Der gives her en række praktiske eksempler på, hvor 3D laserscanning bliver benyttet. Eksemplerne er hentet fra virksomheder, der dagligt arbejder med 3D scanning indenfor byggebranchen.

Ingeniør firmaet Lodahl Danmark fik ved en kapacitetsudvidelse af et kraftværk opgaven at udarbejde en "as-build" model af det eksisterende anlæg.

Kraftværket skulle udvides med en dieselgenerator, som skulle placeres midt mellem de eksisterende rørføringer. De eksisterende forhold blev 3D scannet, og scanningsresultaterne dannede her grundlaget for en modellering vist på figur 1.4, hvilket gav mulighed for en høj grad af "space management", fjernprojektering og præfabrikation. [Lodahl Danmark, 2009]



Figur 1.4: Modellering af eksisterende kraftværk ud fra 3D scanning. [Lodahl Danmark, 2009]

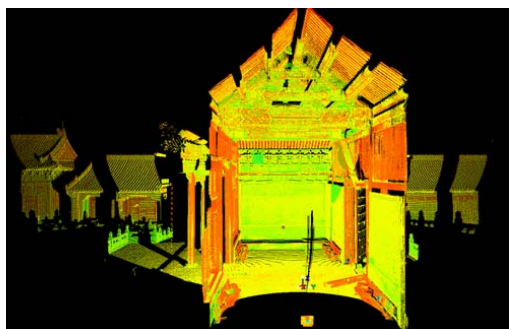
Efter samtale med Niels Koefoed Nielsen, Rambøll Esbjerg, er det erfaret, at Rambøll benytter 3D scanning som en integreret del af projekteringsprocessen inden for offshore projekter. Her er kompleksiteten af anlæggene meget høj, og en scanning af de eksisterende forhold er meget anvendelig, til projektering af for eksempel en ny rørføring.

Det er vigtigt at rørene, der sendes ud til en boreplatform, passer ind i det eksisterende byggeri og ikke kolliderer med eksisterende rørføringer. Omkostningerne ved fejl inden for offshore er høj, og i værste fald kan det resultere i lukning af produktionen i en periode.

Andre konstruktionsområder, hvor Rambøll har erfaringer med at benytte 3D scanning, er ved opmåling af motorvejsbroer for at planlægge ombygning og reovering, samt ved udskiftning af et bagageanlæg i en lufthavn.

Leica Geosystems har i forbindelse med et restaureringsprojekt scannet den forbudte by i Kina jf. figur 1.5.

Formålet var her at genskabe arkitekttegninger som 3D CAD modeller. Ud fra scanningsmodellerne var det muligt at kortlægge arkitekturen og udarbejde nøjagtige arbejdstegninger. [Leica Geosystems, 2009]



Figur 1.5: Resultat af 3D scanning fra den forbudte by i Kina. [Leica Geosystems, 2009]

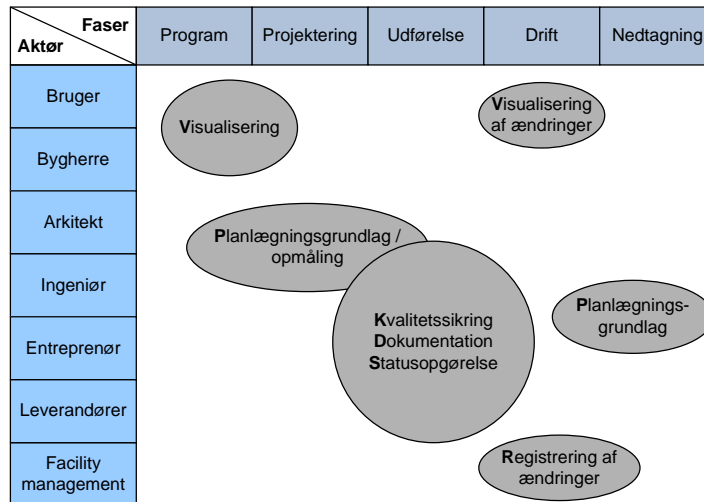
3D scanninger er gode som dokumentation for eksisterende konstruktioner inden projektering af tilbygninger, renovering eller ombygning påbegyndes. Ved komplicerede byggerier, hvor konstruktionstegninger ikke er eksisterende eller dårligt opdateret, giver 3D scanning i dag mulighed for hurtigt at fremskaffe en detaljeret model.

Eksemplerne viser at 3D scanning bliver benyttet inden for byggeriet ved specielle og komplicerede konstruktioner, hvilket betyder at 3D scanning ikke er en helt ny teknologi inden for byggebranchen. Dette giver grundlag for en undersøgelse af, hvilke muligheder der ligger i teknologien inden for andre områder end lige opmåling og modellering.

1.5 Muligheder for anvendelse af 3D scanning i byggeriet

For at skabe et overblik over den videre udvikling af 3D scanning i byggeriet gennemgås de muligheder 3D scanning giver de enkelte aktører gennem byggeriets faser med henblik på at forøge kvaliteten og mindske fejl. På figur 1.6 er anvendelsesmulighederne hos forskellige aktører opstillet. Anvendelsesmulighederne er baseret på projektgruppens ideer.

I den tidlige del af byggefasen handler det om at fange bygherrens og brugerens behov og ønsker, og afstemme dem med budgettet for byggeriet. Her kan 3D scanning benyttes til scanning af et eksisterende område eller en eksisterende bygning, hvorefter 3D modeller fra forslagsfasen kan indsættes i scanningen, og resultatet benyttes til visualisering. Dermed får brugeren og bygherren et bedre grundlag at tage beslutninger omkring byggeriet på.



Figur 1.6: Anvendelsesmuligheder for 3D scanning hos forskellige aktører gennem byggeprocessens forskellige faser.

I projekteringsfasen skal bygningens endelige dimensioner fastlægges. Derfor er det vigtigt at have kendskab til eksisterende forhold specielt ved renovering. I denne situation kan 3D scanning give nyttig information vedrørende forhold, som ikke fremgår af det (måske) eksisterende tegningsgrundlag. Desuden kan en 3D scanning i denne fase fungere som en opmålingsmodel, hvilket danner grundlag for fjernprojektering så antallet af besøg på lokaliteten minimeres.

I forhold til kvalitetssikringen under udførelsesfasen kan en 3D scanning være et nyttigt værktøj til sammenligning af det udførte arbejde med specifikationerne. Ligeledes kan en 3D scanning udgøre dokumentation for den geometriske kvalitet af det udførte arbejde. Gennemføres scanninger af byggepladsen jævnligt, vil scanningerne ligeledes kunne benyttes til at foretage statusopgørelser over byggeriet. Resultaterne af scanningerne vil også kunne benyttes som "as built" bygningsmodel.

Efter opførelse af bygningen kommer selve driftfasen, hvor bygherren overtager byggeriet. I denne fase udføres en løbende vedligeholdelse, og ofte vil der foregå en del mindre ombygninger. I denne fase kan 3D scanning benyttes som baggrund for visualisering af påtænkte ændringer. Ligeledes kan dokumentationen i form af scanninger fra udførelsesfasen benyttes til planlægningsformål i forbindelse med vedligehold og renovering. En anden mulighed er at benytte 3D scanning til registrering af ændringer i bygning-

en f.eks. begyndende revnedannelse.

Ved udgangen af byggeriets levetid kan 3D scanning benyttes som et nyttigt grundlag for nedtagningen af byggeriet.

En betingelse for anvendelse af 3D scanning i byggeriets forskellige faser er, at scanningen tilfører værdi til projektet eller resulterer i en effektivisering. Det er derfor overvejet hvor i byggeprocessen, det største potentiale er. Rent økonomisk ligger den største omkostning ved opførelse af et byggeri i udførelsesfasen, normalt ca. 80 % af de samlede anlægsomkostninger [Anlægsteknikforeningen, 2005]. Det er også i udførelsesfasen at langt de fleste fejl registreres. Ud fra en vurdering af den nuværende anvendelse af 3D scanning i byggeriet er det vurderet, at det mest nyskabende vil være benyttelsen af 3D scanninger i udførelsesfasen.

En oplagt mulighed kunne derfor være at undersøge hvorledes 3D scanning kan benyttes til kvalitetssikring i udførelsesfasen, da blot en lille forbedring af fejlniveauet vil resultere i en væsentlig besparelse.

Afgrænsning af projektet

Det følgende kapitel har til formål præcist at beskrive problemet, således der kan foretages en afgrænsning af emnet. På baggrund af denne afgrænsning vil en problemformulering med tilhørende undersøgelsesspørgsmål blive udført.

2.1 Problembeskrivelse

Fejl og mangler udgør i byggeriet et væsentligt problem, som det på trods af en væsentlig indsats fra blandt andet Erhvervs- og byggestyrelsen, ikke har været muligt at ændre jf. kapitel 1. De to rapporter [Apelgren et al., 2005] og [EBST, 2004] peger på, at en stor del af fejlene først synliggøres i udførelsesfasen, og på grund af en mangelfuld kvalitetssikring i denne fase medfører fejlene væsentlige omkostninger. En bedre og mere systematisk kvalitetssikring i udførelsesfasen vil derfor være en medvirkende årsag til at minimere antallet af fejl og ikke mindst mindske den økonomiske konsekvens af fejlene.

Hypotese

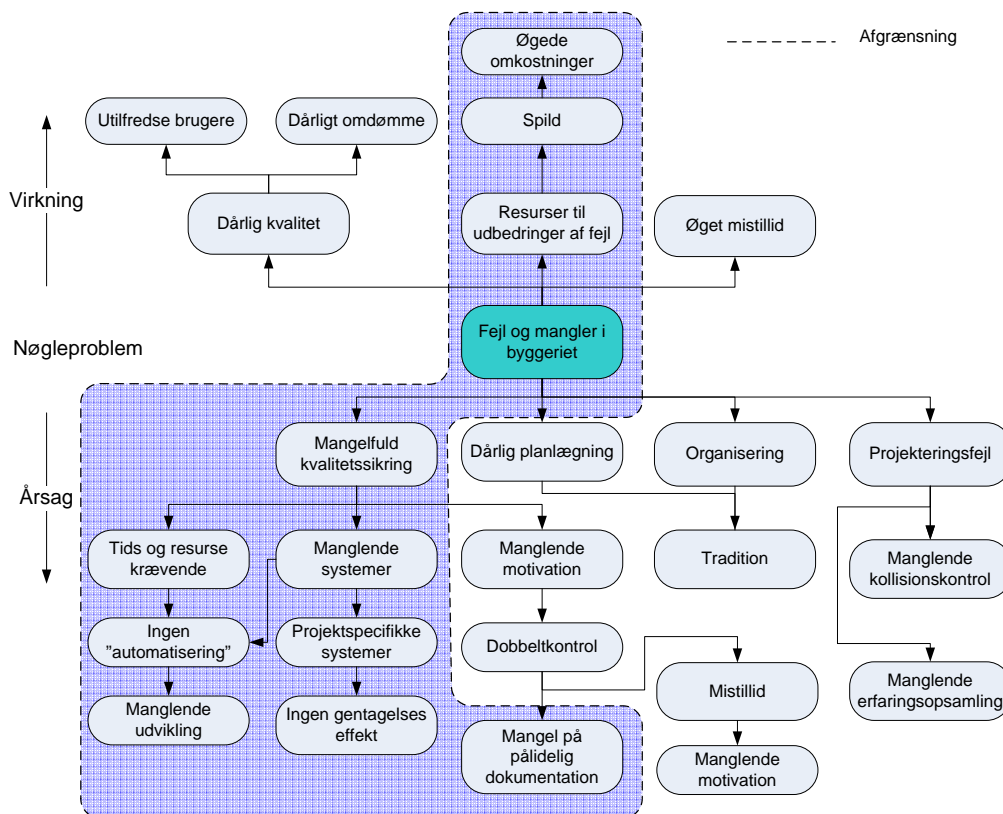
Med udgangspunkt i ønsket om en systematisering af kvalitetssikring i byggeriet samt kendskabet til kvalitetssikring i industrien ved brug af 3D scanning forventes det, at 3D scanning kan indgå som en ny teknologi i byggeriets kvalitetssikringsproces. Kvalitetssikringen ønskes foretaget ved at et objekt 3D scannes hvorefter scanningsresultaterne sammenlignes direkte med 3D modellen for at vurdere fejlmargener.

Denne rapport udarbejdes for at sætte fokus på den forholdsvis lave teknologiske udvikling, der generelt har været og er i byggebranchen. Industrien har i mange år udnyttet de muligheder, den teknologiske udviklingen giver. Det tænkes derfor, at det må være muligt at overføre nogle af industriens teknologier til byggeriet og dermed effektivisere byggeprocessen.

Da det i byggeriet er blevet mere og mere almindeligt at projekttere i 3D, er det næste skridt at gå ud på byggepladserne og scanne de opførte bygnings-elementer, hvorefter scanningsresultat kan sammenlignes med 3D modellen og eventuelle forskelle kan registreres og fejl dermed opdages.

Afgrænsning

For at kunne foretage en afgrænsning af emnet, er der, som tidligere beskrevet opstillet et årsags- virkningsdiagram se figur 2.1.



Figur 2.1: Årsags- virkningsdiagram for det identificerede problem, samt afgrænsning af projektet.

På virkningssiden er dette projekt afgrænset til kun at omhandle de økonomiske konsekvenser af de fejl, der viser sig i udførelsesfasen.

På årsagssiden er det valgt at arbejde videre med udviklingen af et system, der i højere grad er baseret på en automatisk kvalitetskontrol, der producerer pålidelig dokumentation. Her kan netop 3D scanning være en løsning.

2.2 Problemformulering

På baggrund af de gennemgåede anvendelsesmuligheder afsnit 1.5, hypotesen og det opstillede årsags- virkningsdiagram, er der opstillet følgende problemformulering:

Hvordan kan 3D scanning udnyttes til kvalitetssikring i byggeriets udførelsesfase?

Til at underbygge denne formulering er der tilføjet en række undersøgelses-spørgsmål.

- Hvordan foretages kvalitetssikring i udførelsesfasen i dag?
- Hvordan skal et overordnet system til kvalitetssikring baseret på 3D scanning udformes?
- Er det muligt at gennemføre kvalitetssikring ved hjælp af 3D scanning med nuværende teknologier og software?
- Hvilke typer fejl i byggeriets udførelsesfase kan afhjælpes ved hjælp af 3D scanning?

Med udgangspunkt i undersøgelsesspørgsmålene vil denne rapport afdække mulighederne for at benytte 3D scanning i kvalitetssikringsprocessen.

Målgruppe for rapporten

Projektet gennemføres som et "forstudie" der skal dokumentere "state of the art" på det aktuelle felt. Rapportens målgruppe er således institutioner, der har interesse i at undersøge nye muligheder for geometrisk kvalitetssikring i byggeriet ved brug af en 3D scanner, så som universiteter, producenter af 3D scanningsudstyr og softwareudviklere. Samtidig prøver rapporten at belyse hvilke problemer inden for byggeriet, teknologien kan afhjælpe.

Undersøgelsesmetode

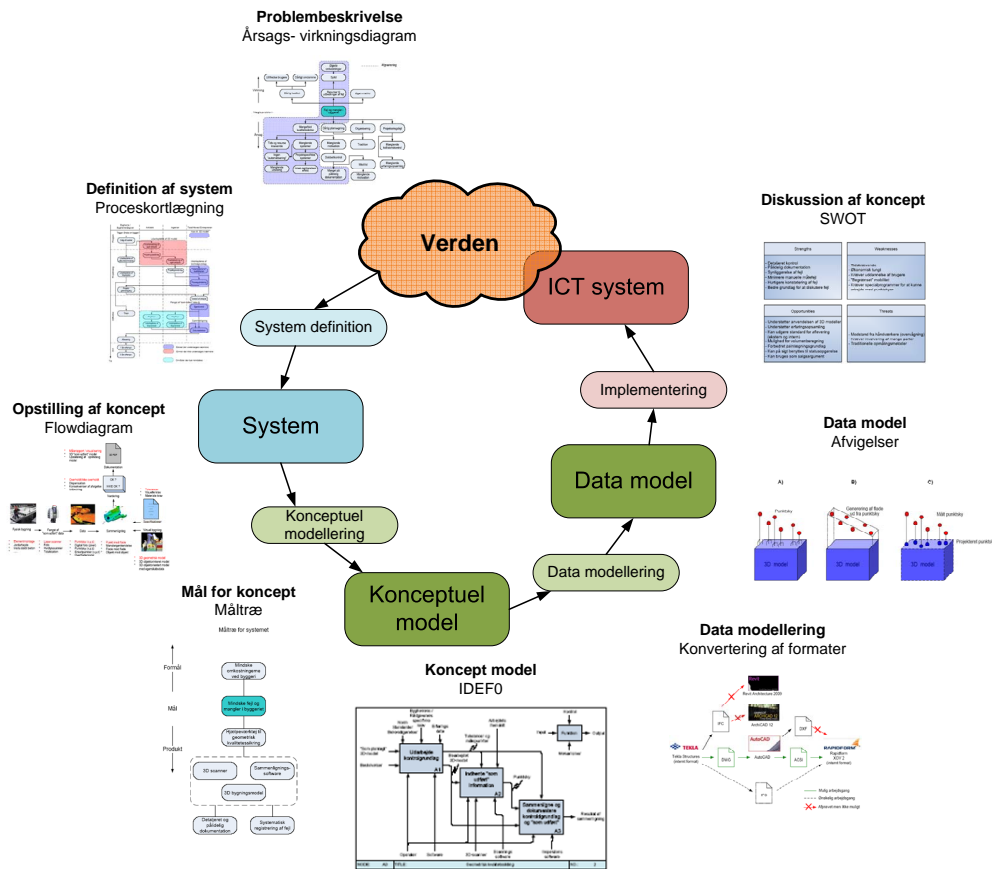
Formålet med kapitlet er at give læseren et indblik i de metoder, der er benyttet i projektet for at opnå den viden, som danner grundlag for rapporten. Desuden redegøres der for rapportens opbygning.

3.1 Opbygningen af rapporten

Projektet er opbygget så det hovedsageligt følger princippet bag systemudviklingsmodellen, der er beskrevet i appendiks A. Modellen beskriver en proces til udvikling af ICT systemer og er udviklet af [Christiansson, 2008]. For at underbygge rapporten benyttes en række metoder til at undersøge relevante problemstillinger. De for rapporten vigtigste metoder er vist på figur 3.1 og beskrevet i appendiks A.

Baggrunden for rapporten er en erkendelse af, at der i byggeriet ofte opstår problemer med fejl og mangler. Problemstillingen omkring fejl og mangler opstilles i et årsags- virkningsdiagram, hvor en række årsager til problemet vurderes. Diagrammet benyttes i problemformuleringen til at afgrænse projektet til et lille fokusområde omkring kvalitetssikring, hvor der koncentrerer om udførelsen af kvalitetssikringen.

Opgavens problemformulering opstilles ud fra en hypotese, som er fremkommet på baggrund af empirisk materiale. Det undersøges hvilke definitioner, der ligger i ordet kvalitet, hvorefter der foretages en proceskortlægning af det generelle kvalitetssikringsystem i byggeriet.

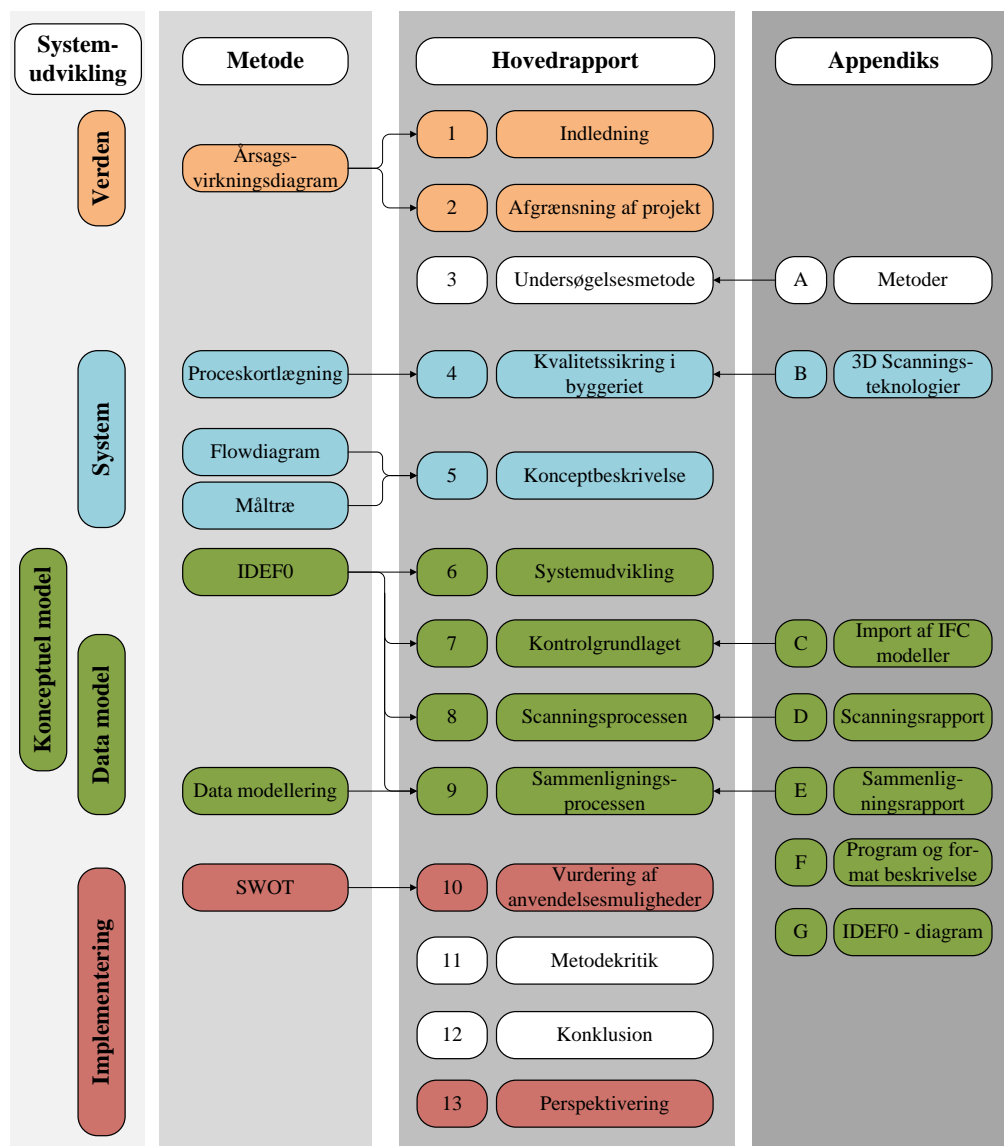


Figur 3.1: Brugen og sammenhængen mellem de i rapporten benyttede metoder. Egen tilvirkning efter [Christiansson, 2008].

Det undersøges herefter i hvilke arbejdsgange 3D scanning kan få indflydelse på kvalitetssikringen, og ved brug af et flowdiagram udvikles der et kvalitetssikringskoncept, hvor 3D scanning er et integreret element. Herefter opstilles der et måltræ for konceptet og funktionerne i konceptet modellen nedbrydes ved brug af et IDEF₀-diagram.

For at underbygge og afprøve funktionerne i konceptet er der foretaget et praktisk feltstudie der løbende henvises til i systemudviklingen. Ud fra litteraturstudier og erfaringerne fra feltstudiet udarbejdes der en række data modeller, som samlet udgør dele til det endelige system. Der udarbejdes en SWOT-analyse på systemet, og problemstillinger ved indførelse af 3D scanning i byggeriets kvalitetssikringsproces diskuteres. Sidst i rapporten perspektiveres systemet, hvor der fokuseres på andre mulige anvendelser af

3D scanning.



Figur 3.2: Rapportens struktur og kapitlernes sammenhæng med de benyttede metoder og appendiks.

På figur 3.2 er rapportens struktur, kapitlernes indbyrdes sammenhænge og hvilke metoder de enkelte kapitler indeholder illustreret. Desuden er det vist i hvilke kapitler, der henvises til appendiks. Farverne beskriver her kapitlers interne relationer ud fra systemudviklingsmodellen.

3.2 Informationskilder

Grundlaget for projektets indledende fase, hvor fejl i byggeriet diskuteres, er empirisk materiale i form af artikler, rapporter, udsagn og interviews. Artiklerne er hovedsageligt hentet fra offentlige institutioner, der uafhængig af private interessenter beskæftiger sig med problemstillinger i byggeriet. Den grundlæggende litteratur stammer fra Erhvervs- og byggestyrelsen samt en rapport fra Danmarks Tekniske Universitet.

Til indhentning af information omkring status på indførelse af 3D scanning i byggeriet i dag, er der læst en række videnskabelige artikler, som beskæftiger sig med emnet. Artiklerne er hovedsageligt udgivelser fra udenlandske universiteter, der beskæftiger sig med hvordan 3D scanning kan indgå som et værktøj til registrering og opmåling af opførte konstruktioner i byggebranchen.

For at supplere litteraturstudiet med praktisk viden, er der oprettet kontakt til private virksomheder, som ligger inde med erfaringer, der kan understøtte projektet. Der er gennemført interviews med virksomhederne Zebicon, Rambøll Aalborg og Rambøll Esbjerg. Virksomheden Zebicon, der rådgiver indenfor 3D måleteknik og digitalisering, har bidraget med praktisk viden omkring 3D hvidlysscanning i industrien, mens Rambøll har været behjælpelige med praktiske erfaringer indenfor kvalitetssikring og 3D laserscanning.

Udover de eksterne informationskilder er erfaringer og oplevelser fra projektgruppens studietid og praktikophold inddraget. Der er indgået et samarbejde med specialestuderende fra Aalborg Universitets landinspektøruddannelse, hvilket har givet mulighed for tværfagligt samarbejde.

Der er gennem projektperioden udarbejdet et feltstudie, hvor teoretiske problemstillinger er undersøgt i praksis. Feltstudiet er udført af projektgruppen og har givet et kendskab til, hvordan en 3D scanning udføres og hvordan de indsamlede data efterfølgende bearbejdes.

Kvalitetssikring i byggeriet

Formålet med det følgende kapitel er at klarlægge hvorledes kvalitetssikring indgår i byggeprocessen i den nuværende situation, samt at identificere de væsentligste årsager til at fejl opstår.

4.1 Definition af kvalitet

For at kunne behandle begrebet kvalitet er det nødvendigt at foretage en klar definition af, hvad der forstås ved kvalitet. Definitionen baseres på [Jul et al., 2005].

Ifølge ISO 9000 standarderne defineres kvalitet som.

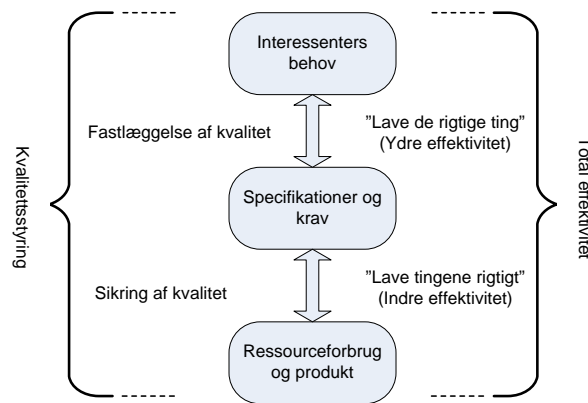
Kvalitet: Grad af sæt iboende karakteristikas opfyldelse af krav.

Denne definition kræver dog en yderligere uddybning. Med *iboende* menes der, at det er en permanent egenskab. Disse egenskaber kan typisk være fysiske, tidsmæssige eller funktionsmæssige. *Krav* referer til en yderligere definition som følgende.

Krav: Behov eller forventning, der er udtrykt, alment underforstået eller obligatorisk. Alment underforstået betyder, at det er almindelig praksis hos virksomheden og for dens kunde, at behovet eller forventningen er underforstået (f.eks. branchekotumer)

Kvalitet handler således om at fange kundens forventninger og behov, og få dem omsat til et produkt, der vedbliver med at opfylde kundens behov og forventninger.

Sammenholdes kvalitetsbegrebet med effektivitetsbegrebet kan der drages visse paralleller. På figur 4.1 er sammenhængen mellem de to begreber illustreret.



Figur 4.1: Sammenkædning af kvalitet og effektivitet. Egen tilvirkning efter [Anlægsteknikforeningen, 2005]

Effektivitet kan jf. [Anlægsteknikforeningen, 2005] opdeles i to niveauer omhandlende hhv. den ydre og den indre effektivitet. Den ydre effektivitet handler om at fange kundens behov og forventninger og få dem omsat til specifikationer. I kvalitetsmæssige henseende handler denne proces om at få specificeret hvilken kvalitet der skal produceres. Denne del af byggeprocessen er hovedsagligt relateret til program og projekteringsfasen i den tidlige del af byggeriet.

Den indre effektivitet omhandler hvorledes specifikationerne med et minimum af ressourcer omsættes til det færdige produkt. Parallelt med dette kan den "indre" del af kvaliteten siges at omhandle hvorledes det sikres, at der er overensstemmelse mellem specifikationerne og det endelige produkt. Det er specielt i denne proces at 3D scanning forventes at kunne bidrage til den *grad*, hvori produktet opfylder de indfangede *krav* jf. ISO 9000.

4.2 Nuværende situation

Kvalitetssikring af byggeprocessen som helhed finder sted hos mange forskellige aktører. Ved offentligt byggeri vil der være visse lovmæssige krav til kvalitetssikringen, mens det ved privat byggeri vil være op til bygherren at sætte kravene til kvalitetssikringen.

Ved offentligt eller offentligt støttet byggeri vil "Bekendtgørelse om kvalitetssikring af byggearbejder" (BEK nr 169 af 15/03/2004 være gældende [Retsinformation, 2009]. Det vurderes at kvalitetssikring i byggeriet foregår efter sammenlignelige principper i den private sektor. Derfor gennemgås bekendtgørelsens indhold i det følgende. Hvis intet andet er angivet er informationerne baseret på [Retsinformation, 2001].

Bekendtgørelsen opdeler ligesom figur 4.1 kvalitetssikringen i to hovedområder, som omfatter hhv. *valg af kvalitet* og *sikring af byggeteknisk kvalitet*. Af bekendtgørelsen fremgår det, at bygherren i program og projekteringsfasen skal drage omsorg for, at byggeriet opnår tilfredsstillende resultater inden for:

- Brugsværdi.
- Arkitektonisk fremtræden.
- Holdbarhed.
- Hensyntagen til miljø og energiforbrug.
- Anlægs- og driftsøkonomi (totaløkonomisk vurdering).

Bekendtgørelsen beskriver ligeledes at både rådgivere og entreprenører skal kvalitetssikre deres ydelser efter god kvalitetssikringskik og at hovedvægten skal ligges på de forhold, der erfaringsmæssigt er behæftet med størst risiko for fejl.

De rådgivende parter skal ligeledes gennemføre projektgranskning af projekt materialet for at sikre kvaliteten af projekteringsarbejdet. Projektgranskningen foregår ved, at en rådgiver, der ikke har haft direkte tilknytning til projekteringen, gennemgår tegninger og beregninger med kritiske øjne. I større virksomheder kan denne granskning foregå internt, mens det hos små rådgivere er nødvendigt med en ekstern person til granskningen.

Entreprenøren er jf. bekendtgørelsen forpligtiget til at foretage procesgranskning inden opstart af arbejdet. I denne proces skal entreprenøren granske "bygbarheden" af det projekterede, om der er særlige områder eller processer, der kræver ekstra opmærksomhed, og om processerne er fornuftigt tilrettelagt.

Bygherren skal inden byggearbejde påbegyndes gennemføre et eller flere projektgennemgangsmøder. Disse møder har til formål at afklare eventuelle uklarheder imellem ydelsernes grænseflader. Til møderne deltager de projekterende parter, og de valgte entreprenører. Møderne skal således sikre, at alle parter har forstået deres opgave og dens omfang, således at der ikke er opgaver, som overses.

Bygherren skal ligeledes udarbejde en plan for dennes tilsyn med byggeriet i udførelsesfasen. Ofte hyres en bygherrerådgiver til disse tilsyn.

I udbudsmaterialet indgår udbudskontrolplanen som en del af det grundlag, hvorpå entreprenøren skal afgive tilbud. Udbudskontrolplanen beskriver detaljeret hvilke kontroller, der skal foretages, samt hvornår og hvorledes de skal dokumenteres. På figur 4.2 ses et eksempel på en sådan plan.

Udbudskontrolplan (paradigma)

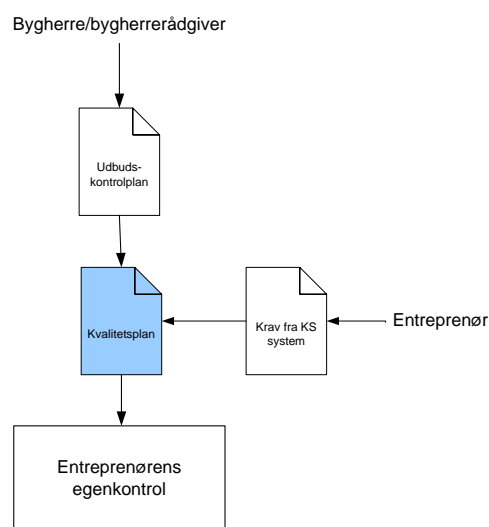
Entreprisen:				Entreprenør:		
				Arbejde: Beton (AAB betonbroer afsnit 8, December 2004)		
Løbe nr.	Reference til AAB	Emne Hvad skal kontrolleres Hvor skal kontrolleres	Kontrolmetode Hvordan kontrolleres	Prøvningsfrekvens Hvornår kontrolleres og frekvens	Acceptkriterium	Dokumentation fremsendes løbende til tilsynet
42	8.4.5.7	Udstøbning	Visuel	Ved hver støbning	AAB 8.3.7, AAB 8.4.5.7 og DS 482 9.6	
43	8.4.5.8	Behandling af ikke hærtnede overflader	Visuel	Ved hver støbning	AAB 8.3.8 og DS 482 9.6	
44	8.4.5.9	Efterbehandling	AAB 8.4.5.9 DS 482 9.7	For hvert støbeafsnit	DS 482 9.7, AAB 8.3.9 og AAB 8.4.5.9	
45	8.4.5.10	Hærdnet beton, overflader	Måling	Efter afformning, inden videre behandling	AAB 8.3.10 og AAB 8.4.5.10	
46	8.4.5.10	Hærdnet beton, overflader, der skal fugtisoleres med kunststof	Aftræksstyrke	Inden videre behandling	AAB 11.8.1.3	

Figur 4.2: Uddrag fra paradigma for udbudskontrolplan til betonbroer. [Vejdirektoratet, 2008]

Under selve udførelsesfasen er der tilknyttet fagtilsyn fra forskellige rådgivergrupper. Disse skal kontrollere at det udførte arbejde, inden for den del de har projekteret, udføres i overensstemmelse med forudsætningerne fra projekteringen. Personerne, der står for fagtilsynet, er ikke nødvendigvis de

samme som dem der har projekteret byggeriet.

Parallelt med fagtilsynets kontrol foretager entreprenøren sin egenkontrol, som er baseret på hans kvalitetsplan. Denne plan er en udbygning af udbudskontrolplanen. Kvalitetsplanen indeholder ligeledes entreprenørens egne krav til kvalitetssikring. På figur 4.3 er dette illustreret.



Figur 4.3: Sammenhæng mellem udbudskontrolplan, kvalitetsplan og egenkontrol.

Kvalitetskontrol i driftfasen

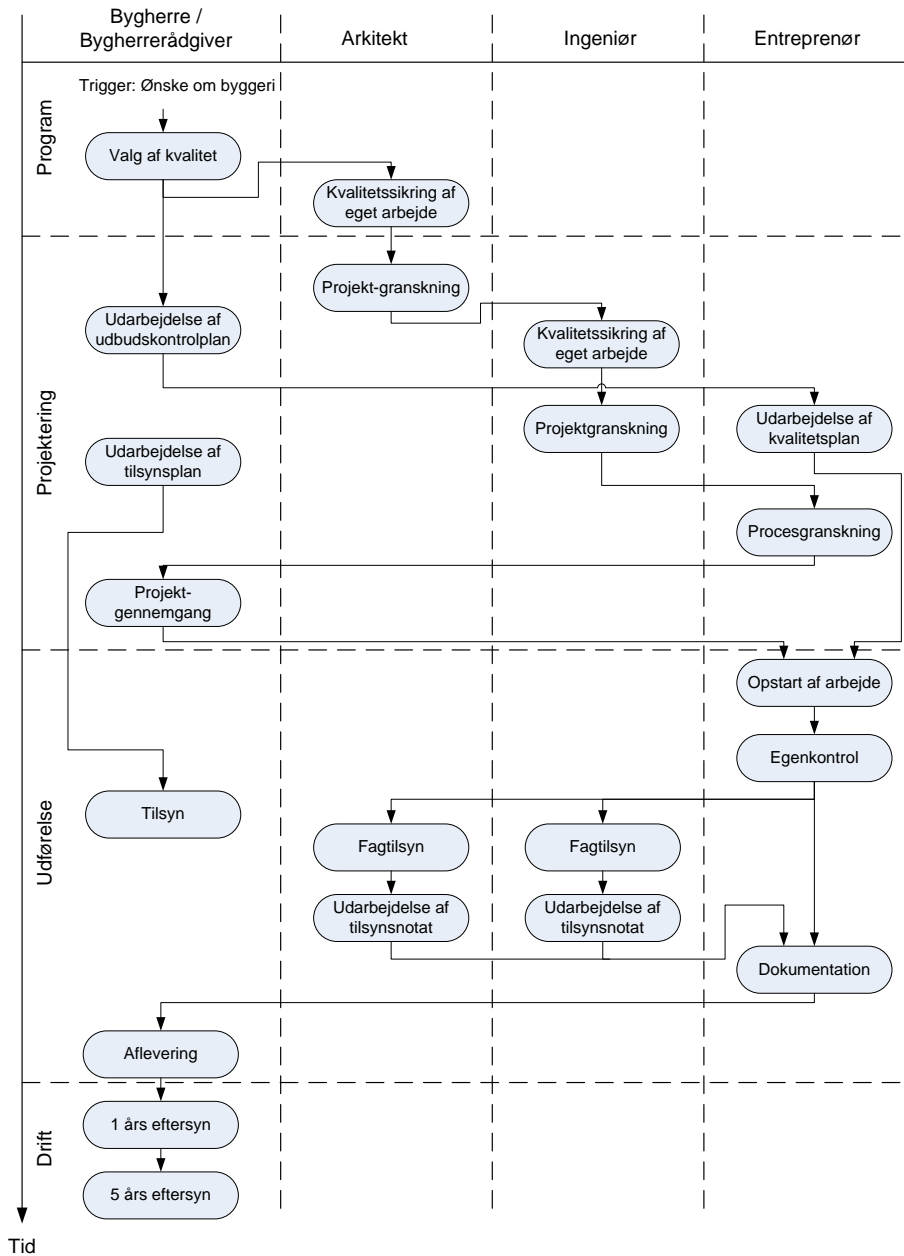
Hvis kontrakten for byggeriet er baseret på AB92 eller ABT93 vil der være indlagt nogle krav til hvilken "kvalitetssikring", der skal foretages af byggeriet efter afleveringen.

Ved afleveringsforretningen overdrages byggeriet til bygherren. Ved denne lejlighed registreres eventuelle fejl og mangler. Desuden skal entreprenøren overdrage vejledninger og anvisninger på drift, eftersyn og vedligehold af bygningsdele og installationer.

Senest et år efter afleveringsforretningen, foretages gennemgang af byggeriet for at konstatere eventuelle fejl og mangler, som ikke var synlige ved afleveringen af bygværket. Ligeledes gennemføres der et eftersyn af bygværket 5 år efter afleveringen, for at konstatere om yderligere fejl og mangler er blevet synlige. Først efter dette eftersyn udløber entreprenørens og råd-

giverens ansvar, og de stillede garantier ophæves.

På figur 4.4 er en samlet oversigt over kvalitetssikringen i byggeriet opstillet.



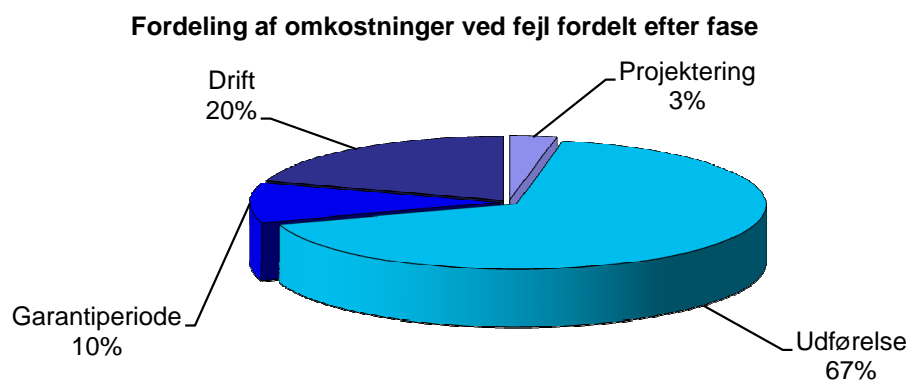
Figur 4.4: Oversigt over den overordnede kvalitetssikring gennem byggeprocessen, baseret på [Retsinformation, 2009].

4.3 Årsager til fejl

Ud fra beskrivelsen af hvorledes kvalitetssikring i dag foregår i byggeriet, vil det følgende afsnit forsøge at afdække eventuelle problemer med den nuværende situation.

Hvor opstår fejlene?

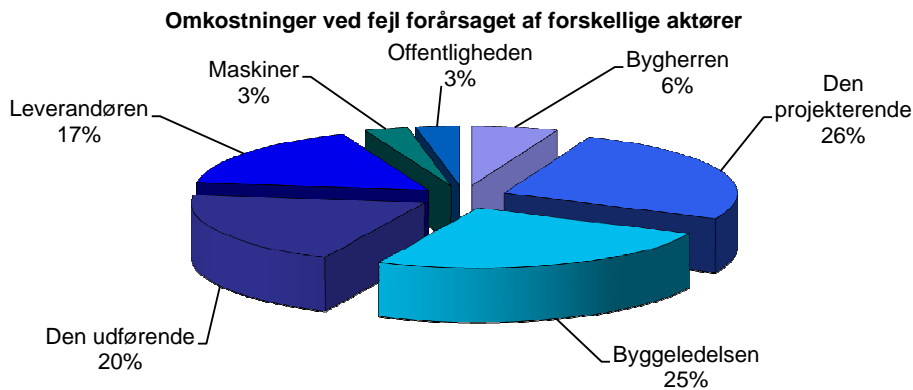
På trods af den kvalitetssikring som er beskrevet i forrige afsnit, forekommer der stadig en lang række fejl i byggeriet. Omkostninger til udbedring af fejl og mangler fordeler sig på byggeriets faser, jf. [EBST, 2004], som vist på figur 4.5.



Figur 4.5: Omkostninger forbundet med fejl, fordelt efter faser. [EBST, 2004]

Langt størstedelen af omkostningerne ved fejl er relateret til udførelsesfasen, jf. figur 4.5. Dette er dog ikke udelukkende et udtryk for, at de udførende virksomheder er skyld i størstedelen af fejlene. Ofte vil projekteringsfejl først blive synlige i udførelsesfasen. En svensk undersøgelse [Hammarlund og Josephson, 1996] af syv byggeprojekter, hvor der ialt blev registreret 2879 fejl, peger på at årsagen til en langt større del af omkostningerne ved fejl og mangler skal findes i projekteringsfasen. På figur 4.6 er resultaterne af undersøgelsen vist.

I følge undersøgelsen, udgør fejl hos den projekterende den største kategori stærk forfulgt af fejl hos byggeledelsen og den udførende jf. figur 4.6. Med denne viden er det således klart at en effektiv kvalitetssikring skal fokusere på både de projekterende, byggeledelse og de udførende i hhv. projekterings og udførelsesfasen.



Figur 4.6: Fejlkostninger fordelt efter rolle. [Hammarlund og Josephson, 1996]

For at få et nærmere indblik i hvilke fejl der forekommer hos de enkelte aktører har [Hammarlund og Josephson, 1996] analyseret årsagerne til fejlene hos aktørerne. Resultatet af denne analyse er gengivet i tabel 4.1 og 4.2.

Projekteringsfejl	Fejl (%)	Fejl hos byggeledelsen	Fejl (%)
Kollision mellem elementer	28	Manglende planlægning	24
Uegnet konstruktion	18	Manglende arbejdsforberedelse	18
Fejlagtig konstruktion	13	Manglende materialeadministration	16
Ufuldstændige tegninger	10	Fejlsætning	16
Fejlagtige mål	9	Forkert metodevalg	14
Uklare tegninger	7	Manglende maskinadministration	5
Fejlagtige specifikationer	5	Manglende personaleplanlægning	3
Øvrige projekteringsfejl	10	Øvrige byggeledelsesfejl	4

Tabel 4.1: Oversigt over årsagerne til fejl hos hhv. de projekterende og byggeledelsen. [Hammarlund og Josephson, 1996].

Ud fra tabel 4.1 er det største problem for de projekterende kollision mellem forskellige elementer, f.eks. vvs og konstruktion, som først konstateres i udførelsesfasen. For byggeledelsen er de væsentligste årsager til fejl planlægning, arbejdsforberedelse og materialeadministration, hvilket også virker logisk, da det er nogle af de vigtigste områder inden for byggeledelsen.

Tabel 4.2 viser at de to væsentligste årsager til fejl hos leverandører af materialer er forsinkelse og fremstillingsfejl. For de udførende entreprenører er den absolut væsentligste årsag til fejl forkert udført arbejde. Dertil kommer en mindre del som skyldes forkert materialehåndtering.

Generelt skal det dog bemærkes at datagrundlaget for undersøgelsen beskrevet i [Hammarlund og Josephson, 1996], er fra perioden 1987 - 1995, og

Materialefejl	Fejl (%)	Udførelsesfejl	Fejl (%)
Forsinkede materialer	37	Forkert udført arbejde	65
Fremstillingsfejl	30	Forkert materialehåndtering	16
Svær bearbejdning	8	Forkert maskinhåndtering	7
Forkert type	7	Manglende rengøring	5
Ufuldstændige materialer	6	Bristet kommunikation med arbejdsleder	4
Forkert mængde	5	Brist vedrørende sikkerhedsspørgsmål	2
Transportskader	4	Øvrige fejl	1
Øvrige fejl	3		

Tabel 4.2: Oversigt over årsagerne til fejl hos hhv. de udførende og leverandørende [Hammarlund og Josephson, 1996].

at undersøgelsen er udført i Sverige, så det er ikke umiddelbart sikkert, at det er muligt at overføre tallene til de nuværende danske forhold. Derfor undersøges resultatet af en nyere dansk undersøgelse ligeledes.

Resultater fra dansk undersøgelse

Som beskrevet i kapitel 1 blev der i 2005 gennemført et projekt i et samarbejde mellem DTU og NCC, hvor alle fejl ved et byggeri blev systematisk noteret i en 3 måneders periode. Resultatet var 158 såkaldte snublesten. [Apelgren et al., 2005]

Ifølge undersøgelsen skal årsagerne til fejlene bl.a. findes i grænsefladerne. Dette er både gældende mellem de enkelte fagentreprenører og de forskellige rådgivere på projektet. Problemet mellem rådgiverne skyldes ofte manglende kollisionskontrol. Dette resulterer i, at kollision mellem forskellige faggrupper først konstateres i det udførte arbejde, og derfor resulterer i øgede omkostninger.

Mellem de enkelte fagentreprenører er problemet ofte, at opfattelsen af hvorledes arbejdet skal afleveres i den ene proces, ikke stemmer overens med opfattelsen af hvorledes arbejdet skal modtages i den efterfølgende proces. Der mangler således overensstemmelse mellem udfalds- og indfaldskrav.

I forhold til intentionerne med projekt- og procesgranskning påpeger rapporten ligeledes, at der ofte ikke er afsat den nødvendige tid til dette, og at granskningen derfor bliver overfladisk i stedet for en grundig gennemgang. En korrekt udført procesgranskning og efterfølgende projektgennemgang, kunne ellers udgøre grundlaget for, at bygbarheden af projektet bliver større.

Rapporten konkludere at et problem ved udbudskontrolplanerne er, at de ofte er alt for generelle og ikke koncentreret om det specifikke byggeri. Desuden vil de ofte som illustreret på figur 4.2 referere til forskellige standarder og beskrivelser, og arbejdet med at gennemføre kontrollerne er derfor forholdsvis uoverskueligt. Derfor følges de ofte ikke af entreprenørerne, som i stedet behandler dem med "let hånd". Kvaliteten af dokumentationen bliver derfor ofte ringe.

Rapporten påpeger ligeledes, at fejl, der opstår under et byggeri, ofte ikke registreres systematisk, og at grundlaget for at forhindre fejlene derfor ikke er tilstede. En af årsagerne til dette kan være, at de direkte omkostninger ved fejlene forekommer hos den enkelte fagentreprenør og leverandør, hvorfor der fra hoved- eller totalentreprenøren ikke er noget incitament for en detaljeret registrering af fejl. Rapporten påpeger dog, at der er en række skjulte omkostninger for hoved- eller totalentreprenøren i form af ventetid og gen planlægning.

4.4 Konsekvens af nuværende situation

Den direkte konsekvens af den nuværende situation er, at omkostningerne til opførelsen af et byggeri er højere, end nødvendigt. Ifølge den svenske undersøgelse [Hammarlund og Josephson, 1996] kan det konkluderes, at de direkte omkostninger ved fejl og mangler udgør fra 2,3% til 9,4% af produktionsomkostningerne. En tilsvarende undersøgelse af et dansk byggeri, konkluderede at omkostningerne ved fejl udgør 8% af produktionsomkostningerne [Apelgren et al., 2005]. Resultaterne skal dog betragtes med en vis skepsis, da de er ved at være nogle år gamle. I den sammenhæng kan det nævnes, at Erhvervs- og Byggestyrelsen i en rapport fra 2009 konkluderer, at der har været et fald i omfanget af fejl fra 2001-2005, men at denne udvikling er gået i stå fra 2005 til 2007 [EBST, 2009]. Det vurderes derfor at resultaterne fra [Hammarlund og Josephson, 1996] og [Apelgren et al., 2005] stadig er brugbare.

Sammenholdes procentsatserne med det faktum at de danske entreprenører med en omsætning på over 1 mia i 2007 havde en gennemsnitlig overskudsgrad på 2,4 % [Ingeniøren, 2008a], må det konstateres, at hvis blot en del af de fejl, der forekommer, kunne undgås, ville det være muligt for entreprenørerne at forbedre deres indtjening væsentligt.

Konceptbeskrivelse

Det følgende kapitel har til formål at skitsere et koncept for, hvorledes 3D scanning kan benyttes til kvalitets sikring i byggeriets udførelsesfase samt afgrænse hvilke elementer af konceptet, der skal undersøges nærmere i denne rapport.

5.1 Valg af strategi

Som det blev konkluderet af afsnit 4.3, er der et behov for at nedbringe antallet af fejl i byggeriet for derved at kunne nedbringe omkostningerne. For at reducere fejl og mangler i byggebranchen kan der jf. en svensk undersøgelse af årsager til fejl identificeres 3 strategier [Josephson, 1994]. Disse er:

- At eliminere årsagerne til fejlene.
- At begrænse fejlens konsekvenser.
- At forhindre gentagelse af fejlen.

Der er allerede en del andre initiativer, som koncentrerer indsatsen imod at eliminere årsagerne til fejlen, som f.eks "Byggeriets handlingsplan mod fejl og mangler" [EBST, 2005]. Derfor er det følgende system koncentreret omkring de to sidstnævnte strategier.

For at kunne begrænse fejlens konsekvenser skal det være muligt at opdage denne. En analyse af de 2879 fejl der blev registreret i den svenske undersøgelse [Hammarlund og Josephson, 1996] viste, at det var relativt let at

opdage 37 % af fejlene, og at det eventuelt var muligt at opdage 35 % af fejlene jf. tabel 5.1, inden konsekvenserne af dem blev væsentlige.

Mulighed for at opdage fejlen	Antal af fejl (%)
Relativt let	37
Eventuelt	35
Ikke muligt	28

Tabel 5.1: Muligheden for at opdage fejlen inden at den fik konsekvenser. [Hammarlund og Josephson, 1996].

Det skulle således jf. tabel 5.1, være muligt at mindske konsekvenserne af op imod 72 % af fejlene ved en mere detaljeret kontrol af det udførte arbejde. Det skal dog nævnes, at langt fra alle fejlene i tabel 5.1 var geometriske fejl.

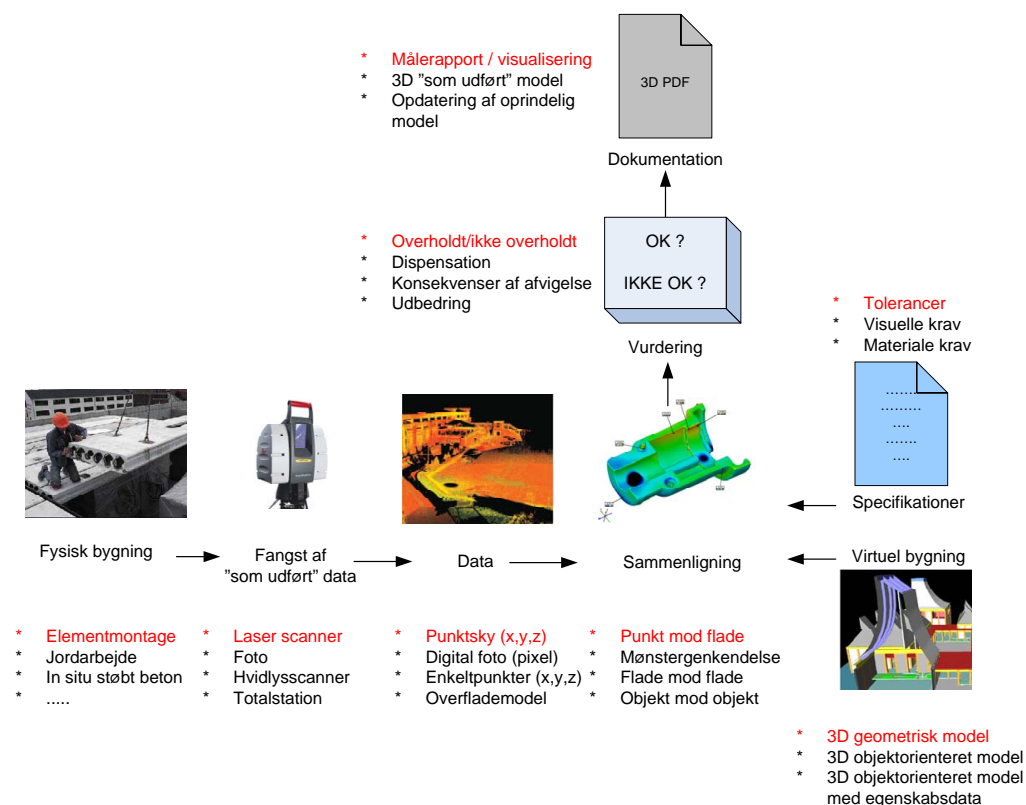
En forudsætning for at kunne bruge strategien om at forhindre at fejl gentager sig er, at fejlen bliver opdaget og analyseret, således at det er klart hvad, der er årsagen til fejlen, og hvordan denne kan undgås. I den forbindelse kan en 3D scanning være et hjælpeværktøj til at måle den geometriske kvalitet af det udførte arbejde.

Strategien for dette projekt er således at begrænse fejlenes konsekvenser ved at opdage dem tidligt, således at følgerne af den enkelte fejl mindskes. Desuden kan en detaljeret analyse af de registrerede fejl være med til at sikre, at de ikke gentages. Dette skal opnås ved en detaljeret kontrol koncentreret om de tidlige dele af udførelsesfasen, da det er her, at konsekvensen af en fejl vil blive størst, hvis den ikke opdages.

Der vil altid kunne ske fejl i byggeriet, da det indeholder en stor del manuelt arbejde, og da der ofte stilles store krav til samarbejdet. Projektets fokus omhandler kun den geometriske del af kvalitetssikringen, da det kun er de geometriske fejl, der kan registreres ved at sammenligne en scanning af den udførte konstruktion med 3D modellen for byggeriet.

5.2 Overordnet system

I det følgende er det skitseret, hvorledes et hjælpeværktøj til geometrisk kvalitetssikring i byggeriet kan opbygges baseret på erfaringer fra industrien. På figur 5.1 er det overordnede koncept for et hjælpeværktøj til geometrisk kvalitetssikring illustreret.

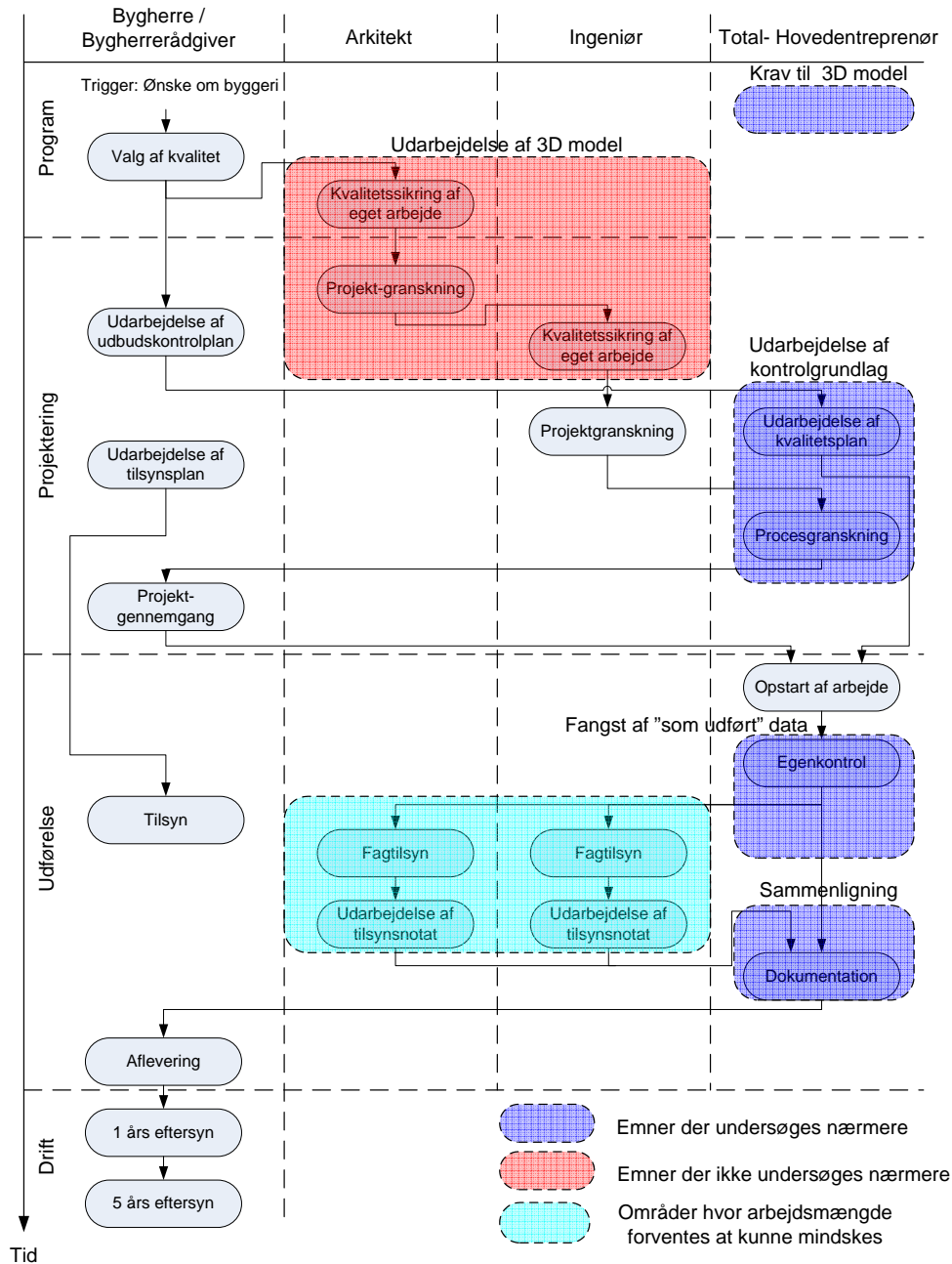


Figur 5.1: Illustration af forudsætningerne for et hjælpeværktøj til sammenligning af det udførte arbejde med de forudsatte specifikationer. Elementer markeret med rødt undersøges nærmere.

Der er opstillet en lang række alternativer til, hvordan de enkelte processer kan foregå, og hvad de indeholder. Listen er ikke nødvendigvis udtømmende, men viser blot, at der er mange andre alternativer. Alt efter hvilket formål systemet skal have, vil det kræve forskellige teknikker. Konceptet illustreret på figur 5.1 vil derfor kunne resultere i en lang række forskellige systemer. Det er derfor valgt at fokusere på et system, der omfatter emnerne markeret med rødt. Gennem beskrivelsen af emnerne, vil der dog blive foretaget en relatering til de mulige alternativer.

For at få overblik over konceptet i sammenhæng med det generelle kvalitetssikringssystem er der opstillet en figur, der viser, hvorledes konceptet tænkes indplaceres jf. figur 5.2.

Forudsætningen, for at systemet kan fungere, er at det indarbejdes allerede i projekteringsfasen. Her er det nødvendigt, at rådgiverne samler informa-



Figur 5.2: Illustration af konceptets placering i forhold til det generelle kvalitets sikrings-system i byggeriet.

tioner på en sådan måde, at de kan tilgås mere eller mindre automatisk. Konceptet forudsætter som minimum, at de rådgivende parter arbejder med 3D modeller, således at disse kan udgøre grundlaget, for en sammenligning med det udførte arbejde. Hvis det ønskes at foretage en automatisk sammenligning af, om det udførte arbejde overholder tolerancerne, er det ligeledes nødvendigt, at tolerancerne struktureres på en måde, så de kan tolkes af en computer. Hvorledes 3D modellen bliver udarbejdet i samarbejdet mellem rådgiverne, er der afgrænset fra, at undersøge i denne rapport, hvorimod de krav, der skal stilles til modellen, vil blive behandlet.

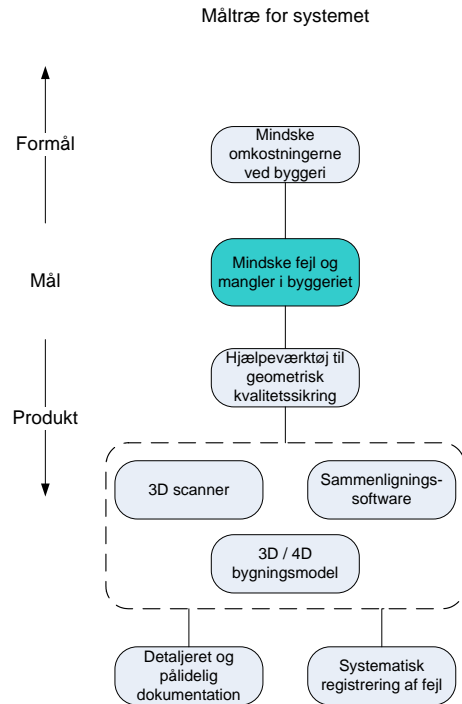
Årsagen til, at det er valgt at placere hoveddelen af konceptet hos hoved- eller totalentreprenøren, er at det vurderes, at det er her at systemet har sin fordel i at kunne understøtte den kvalitetssikring, som hoved- eller totalentreprenøren har det overordnede ansvar for. Hoved- eller totalentreprenøren vil ligeledes have en klar interesse i at opdage fejlene tidligt, da det kan hjælpe ham med at overholde tidsplan og budgetter. Det er ligeledes forventningen, at rådgiverens tilsyn kan mindskes, da systemet vil kunne dokumentere, at den geometriske kvalitet af det udførte arbejde er tilfredsstillende. Det er ligeledes erfaret, at det mange steder i udlandet er de store entreprenører, der driver udviklingen med 3D og 4D modeller [Ingeniøren, 2009], hvorfor det næste naturlige skridt er, at entreprenørerne bruger disse som grundlag for kvalitetssikringen.

For at kunne foretage en sammenligning af den fysiske bygning med den virtuelle model er det nødvendigt at digitalisere den fysiske bygning. Denne digitalisering kan i princippet foregå på mange forskellige måder lige fra simpel opmåling med en tommestok og efterfølgende modellering til avanceret laserscanning. I denne rapport undersøges mulighederne for digitalisering vha. laserscanning. Outputtet af scanningsprocessen er en større mængde tredimensionelle koordinater ofte omtalt som en punktsky.

Denne punktsky, kan ved en fortolkning omsættes til objekter, der kan sammenlignes med den virtuelle 3D model, eller de enkelte punkter i målingen kan sammenholdes med 3D modellen, og deres afvigelse kan visualiseres. Ud fra kravene og specifikationerne kan der foretages en analyse af, hvorvidt der er overensstemmelse. Resultatet af denne analyse kan derefter formidles videre til de involverede, og der kan genereres dokumentation på, at der er gennemført en kontrol, og hvad resultatet af kontrollen blev.

5.3 Mål for system

I forhold til de identificerede årsager til fejl, omtalt i afsnit 4.3 er der opstillet et måltræ for systemet jf. figur 5.3. Måltræet er opstillet for at klarlægge indholdet af systemet.



Figur 5.3: Måltræ for systemet. Produktet beskriver hvilke elementer der benyttes til at opnå målet.

Ud fra måltræet, figur 5.3 vil de enkelte delprodukter blive gennemgået. En væsentlig årsag til fejl hos de projekterende som både [Apelgren et al., 2005] og [Hammarlund og Josephson, 1996] peger på, er kollision mellem forskellige konstruktioner, som først opdages i byggeriets udførelsesfase. Dette problem formodes at blive væsentligt mindre, efterhånden som de projekterende parter begynder at benytte fælles 3D modeller, eller foretager kollisionskontrol mellem de enkelte fagmodeller f.eks vha. applikationer som Solibri Model Checker (Se appendiks F for beskrivelse). Derfor er det tanken at hjælpeværktøjet til geometrisk kvalitetssikring, skal understøtte arbejdet med fælles 3D modeller. For at kunne identificere hvilke elementer i modellen der skal kontrolleres hvornår, er det ligeledes nødvendigt at modellen indeholder information om tiden, hvorved der bliver tale om en 3D / 4D model, alt efter om tiden er angivet implicit i modellen, eller blot haves

eksplicit som f.eks. en tidsplan. En 3D / 4D model bliver således en del af produktet jf. figur 5.3.

For at sikre en fælles forståelse af indfalds- og udfaldskrav, skal systemet kunne benyttes til at sikre overensstemmelse mellem de, som afleverer et stykke arbejde, og de som modtager et stykke arbejde. Med en 3D scanning kan der således foretages en meget detaljeret kontrol af det udførte arbejde, for at sikre at arbejdet er af en sådan kvalitet, at den efterfølgende proces kan forløbe uden komplikationer. 3D scanningen kan således udgøre grundlaget for en intern aflevering mellem de enkelte fag, og på den måde forhindre konflikter omkring standarden af arbejdet. Et eksempel på en sådan "intern" afleveringskontrol af et vindmøllefundament, er vist på figur 5.4.



Figur 5.4: Eksempel på detaljeret afleveringskontrol af bolte i vindmøllefundament i overgangen mellem betonentreprise og mølleleverandør. Kontrollen blev gennemført vha. fotogrammetri. [Zebicon, 2009a]

Et produkt af systemet skal ligeledes være systematisk registrering af fejl, således at grundlaget for at undgå at fejl gentages er til stede. I den forbindelse kan der ved registrering af fejl være både et kortsigtet og et langsigtet perspektiv. Dette tænkes sikret ved, at der for hver skanning udarbejdes en rapport, som lagres centralt, således at der er grundlag for at finde ud af hvilke fejl, der oftest forekommer. Desuden kan scanningen give detaljeret information om, hvad fejlen præcist består i, således at det er nemmere at

finde årsagen.

Det vil selvfølgelig ikke være muligt at opdage alle fejl vha. 3D scanning, men ved at koncentrere indsatsen omkring de vigtigste områder hvor fejl traditionelt koster mange penge at udbedre, vil en del af omkostningerne kunne undgås. Det er for eksempel i analysen af de syv svenske byggerier fundet, at 20% af fejlene stod for 79% af omkostningerne. Kvalitetssikringen skal derfor koncentreres om disse 20% [Hammarlund og Josephson, 1996].

Ved at systemet genererer pålidelig dokumentation af det udførte arbejde, kan systemet ligeledes medvirke til at "dobbeltkontrol" mindskes og tilliden til entreprenøren øges. I stedet for at rådgiverne skal ud på selve byggepladsen og udføre fagtilsyn, jf. figur 5.2, kan entreprenøren dokumentere kvaliteten, ved at fremvise en model af det udførte arbejde.

5.4 Udvælgelse af fokusområder

Da en fuld udvikling af et system som tidligere skitseret falder uden for dette projekts tidsmæssige rammer, er det nødvendigt at afgrænse projektet. I den forbindelse er det valgt at undersøge hvilke dele af det skitserede system, der allerede i dag findes værktøjer til. I det følgende beskrives det, hvad der vil blive fokuseret på under de enkelte faser.

Kontrolgrundlaget

En forudsætning for at kunne foretage en sammenligning mellem det udførte arbejde og specifikationerne er, at der findes en 3D model som sammenligningen kan foretages med. En model af en opført bygning undersøges derfor, for at konstatere hvilke informationer den indeholder, og hvilke specifikationer det er muligt at knytte til modellen. Det undersøges ligeledes hvordan de relevante tolerancer generelt kan identificeres og hvordan tolerancerne kan repræsenteres i sammenhæng med 3D modellen. Slutteligt undersøges det, hvilke formater det kunne være hensigtsmæssigt at eksportere modellen i til det videre sammenligningsarbejde.

Scanningsprocessen

Ud fra beskrivelsen af forskellige 3D scanningsteknologier i appendiks B, er det valgt at undersøge laserscanning nærmere. For at få en ide om hvilke problemer der kan være i forbindelse med selve skanningen, afprøves den

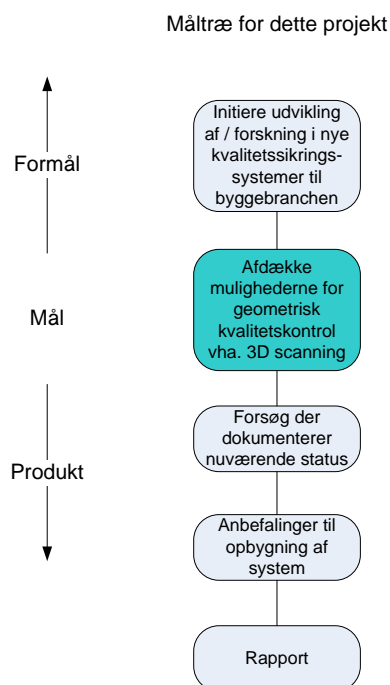
valgte teknologi under forhold svarende til en byggeplads. Desuden undersøges det, hvordan en scanning skal planlægges, samt hvor lang tid scanningen tager, og hvilken efterbehandling der kræves af dataene for, at de kan bruges til en sammenligning med den forudsatte 3D model.

Sammenligningsprocessen

Ud fra resultaterne af henholdsvis scanningen og specifikationsprocessen, gennemføres der en sammenligning for at undersøge, hvilke afvigelser der kan konstateres. I den forbindelse undersøges det, om det er muligt at indlægge automatiske kontroller i sammenligningsprocessen, og det undersøges på hvilke måder sammenligningen kan foretages, og hvordan den kan visualiseres og dokumenteres.

Mål for projektet

Ud fra de beskrevne afgrænsninger og fokusområder, er det således muligt at definere et mål for projektet. Målet og deraf følgende produkt og formål er illustreret på figur 5.5.



Figur 5.5: Måltræ for projektet.

Målet for projektet er at dokumentere eksisterende muligheder og beskrive hvilke forhindringer, der findes i forhold til udviklingen af et samlet system til geometrisk kvalitetssikring. Derudover er det tanken, at projektet ender ud i en række anbefalinger til videre udvikling af et mere komplet system, hvor 3D scanning indgår som hjælpeværktøj til kvalitetssikring i byggebranchen.

Systemudvikling

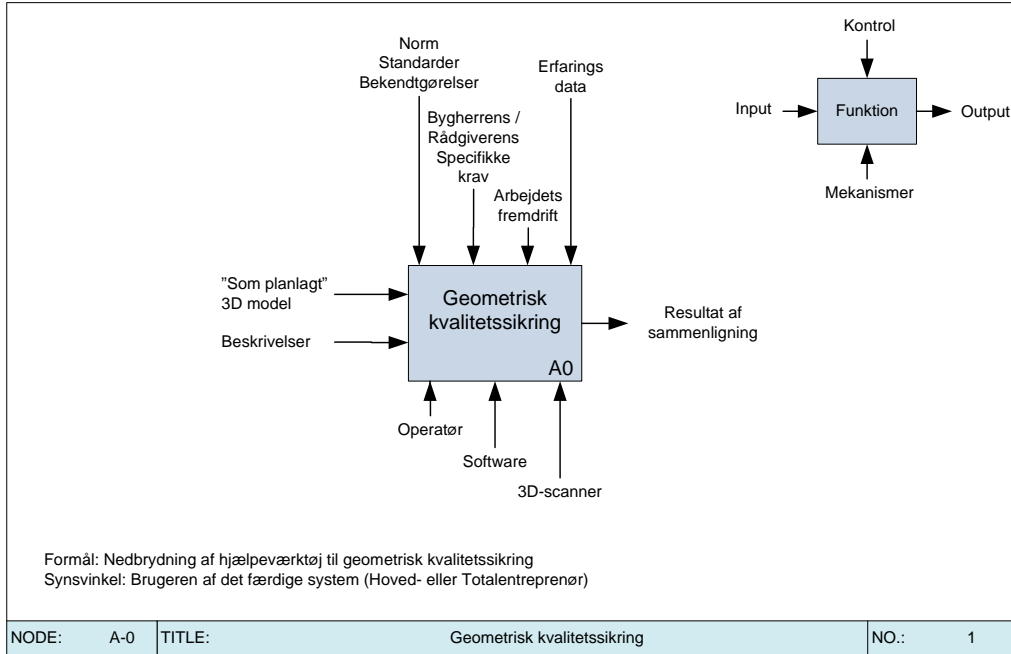
Formålet med det følgende kapitel er at give læseren et overblik over et muligt systems bestanddele og deres sammenhæng. Dette gøres vha. IDEF₀ funktionsdiagram. Et samlet diagram kan findes i appendiks G. Desuden beskrives et byggeri, der danner grundlag for at gennemføre en række praktiske demonstrationer af konceptets enkelte dele.

6.1 Systemets delfunktioner

Ud fra konceptet skitseret i kapitel 5 er det valgt at skitsere et overordnet system og foretage en nedbrydning vha. IDEF₀ diagrammeringsmetoden, se metodebeskrivelsen kapitel A.6. På figur 6.1 er A-0 diagrammet for systemet illustreret.

Det overordnede formål med systemet er at kunne foretage kvalitetssikring af et byggeris geometri. Kvalitetssikringen ønskes gennemført med en 3D model som det primære input, hvor ud fra det skal være muligt at kontrollere om en udført bygningsdel overholder kravene fra hhv. standarder, normer, bygherre, rådgiver og entreprenørens egne krav. Ud fra dette skal systemet dokumentere hvorvidt kravene er overholdt, således at dokumentationen kan lagres eller benyttes som grundlag for at udbedre eventuelle fejl.

For at kunne foretage en nærmere analyse af systemets enkelte dele er systemet nedbrudt yderligere i et A0 diagram, jf. figur 6.2 side 51. Dette diagram opdeler systemet i 3 hovedfunktioner omhandlende grundlaget hvorpå kontrollen gennemføres, indsamlingen af "som udført" information og sammenligningen af kontrolgrundlag og "som udført" information.



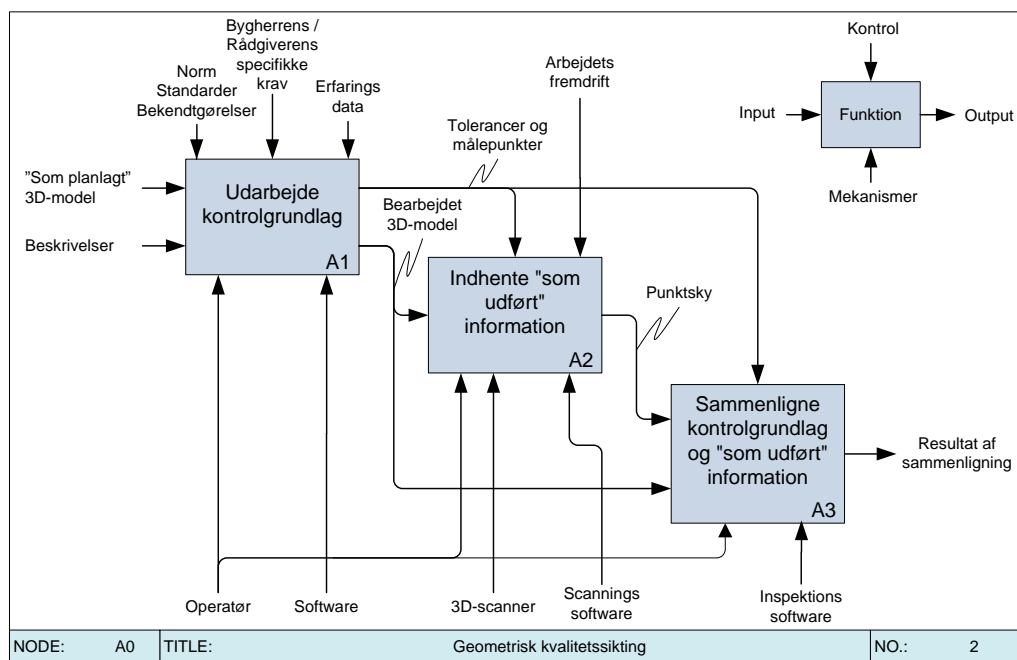
Figur 6.1: Det overordnede IDEF₀-diagram for systemet.

Den første funktion i systemet er udarbejdelsen af et kontrolgrundlag. For at kunne planlægge indsamlingen af data på byggepladsen er det nødvendigt, at få bearbejdet de generelle krav i standarder og normer, således at de er rettet mod det konkrete byggeri. Det færdige kontrolgrundlag bliver således en 3D model med en passende detaljering samt et sæt tilhørende målepunkter og tolerancer. Målepunkter skal i den forbindelse forstås bredt, da der også kan være tale om at definere krav til hele flader.

Den anden hovedfunktion i systemet omhandler indsamlingen af "som udført" information. For at kunne planlægge denne indsamling er det nødvendigt at have kendskab til den geometri, der skal scannes, samt hvilke målepunkter og tolerancer der skal undersøges. Det kontrollerende element for denne funktion er arbejds fremdrift, da der ofte kun vil være et begrænset tidsrum, hvori scanningen kan foregå. Outputtet af processene er en række koordinater, der indeholder de målte punkter.

Den sidste delfunktion i systemet omhandler sammenligningen af de to første delprocesser. Her sammenkædes "som udført" informationen og kontrolgrundlaget og afvigelser identificeres. Vha. tolerancerne afgøres det, om de

identificerede afvigelser er tilladelige, eller om der er opstået en fejl, som skal rettes. Det endelige output af systemet bliver således en dokumentation, der beskriver resultatet af sammenligningen, og som kan lagres, eller bruges som grundlag for udbedring af eventuelle fejl.



Figur 6.2: De overordnede funktioner i systemet illustreret ved et A0 diagram jf. IDEF₀-diagrammeringsmetoden.

I kapitel 7, 8 og 9 udfoldes delfunktion A1, A2 og A3 i en nærmere analyse af deres indhold. Ligeledes foretages en række underbyggende undersøgelser i form af praktiske afprøvninger af udstyr og software.

6.2 Beskrivelse af underbyggende undersøgelser

For at kunne eksemplificere hvorledes 3D scanning kan benyttes til geometrisk kvalitetssikring i byggeriet, er det valgt at tage udgangspunkt i et konkret byggeri. Bygningen er en 4 etagers bygning til undervisningsbrug for AAU studerende beliggende på Skjernvej 4A i den sydøstlige del af Aalborg. Byggeriet er et betonelementbyggeri med en række asymmetrisk placerede vinduespartier jf. figur 6.3.



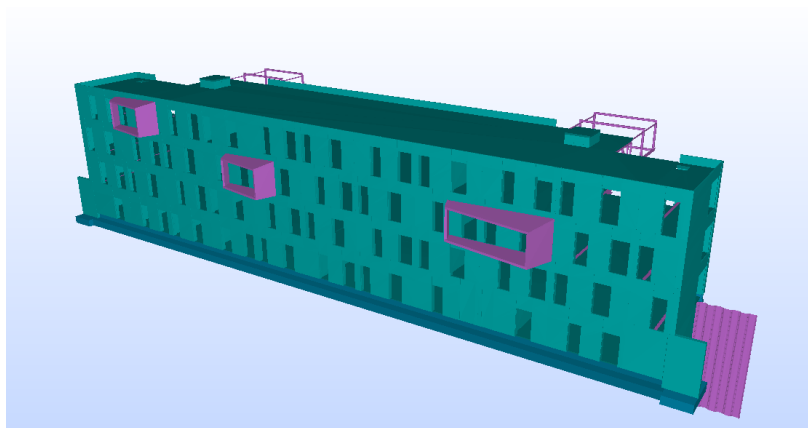
Figur 6.3: Foto af facaden på bygningen der danner grundlag for den praktiske demonstration af konceptet.

Bygningen er projekteret af Rambøll i Aalborg i 3D programmet Tekla Structures 13.0, hvorfra det har været muligt at få en 3D model i IFC 2x3 formatet samt en DWG model. For en nærmere beskrivelse af formater og programmer se appendiks F. Modellen på figur 6.4 indeholder alle de væsentligste beton og stålkonstruktioner.

Ved at foretage en 3D scanning af den opførte bygning og sammenholde den med den viste IFC model, er det ønsket at undersøge, hvorvidt det er muligt at benytte teknologien inden for byggeriet.

I undersøgelsen af årsager til fejl i byggeriet blev der i kapitel 1 refereret til [Apelgren et al., 2005]. I rapporten omhandlende snublesten i byggeriet er det beskrevet, hvordan manglende kvalitetssikring ved opsætning af betonelementer får den konsekvens, at elementerne ikke overholder de interne kvalitetskrav, og at vindueshullerne efterfølgende skal skæres til. Dette resulterer i en udgift på 200.000 kr båret af elementmontagevirksomheden samt 4 ugers forsinkelse.

Med udgangspunkt i dette eksempel vælges det at tage udgangspunkt i, hvordan kvalitetssikring ved opførelse af et elementbyggeri tænkes planlagt, når det forudsættes at 3D scanning benyttes som et hjælpeværktøj. Forsøget gennemføres således som om bygningen var under opførelse, og be-



Figur 6.4: 3D visning af IFC 2x3 konstruktionsmodellen fra Skjernvej 4A. Screenshot fra Solibri Model Viewer 5.0

tonelementerne var monteret i en del af bygningen, hvorfor entreprenøren ønsker at kvalitetssikre sit arbejde vha. en scanning. Scanningen har således til formål at dokumentere eventuelle afvigelser mellem de monterede betonelementer og konstruktionsmodellen.

Den praktiske afprøvning skal således sammen med den følgende undersøgelse, udgøre grundlaget for at vurdere systemets anvendelighed.

Kontrolgrundlaget

Det følgende kapitel har til formål at afdække hvorledes et kontrolgrundlag, der udgør en væsentlig del af et hjælpeværktøj til geometrisk kvalitetskontrol, kan udformes.

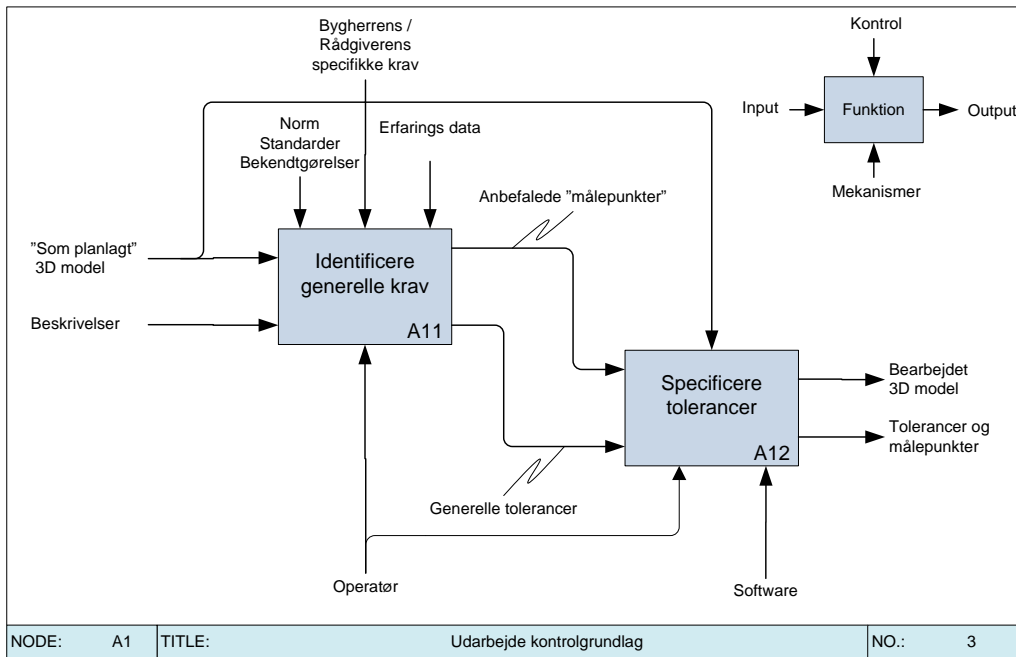
7.1 Nedbrydning af funktion

For at skabe et overblik over hvilke delelementer der indgår i udarbejdelsen af kontrolgrundlaget, er der foretaget en nedbrydning af funktionen jf. IDEF₀ princippet. På figur 7.1 er diagrammet illustreret.

Den overordnede proces for udarbejdelsen af kontrolgrundlaget, er i dette projekt foreslået at forløbe som følgende:

Ud fra en 3D model og eventuelt tilhørende beskrivelser af det konkrete byggeri identificeres de generelle tolerancer i de forskellige normer og standarder. Et eksempel på dette kunne være, at identificere om det er et elementbyggeri, eller et in situ støbt byggeri, da dette er afgørende for hvilke standarder og normer, der skal benyttes. Derudover identificeres det om rådgiveren eller bygherren har opstillet nogle specifikke krav, der eventuelt er strengere, end hvad normer og standarder foreskriver. Sidst men ikke mindst benyttes entreprenørens generelle kvalitetssikringssystem og hans erfaringer, til at identificere områder, der erfaringsmæssigt kan give problemer, og hvor der eventuelt er behov for skærpede tolerancer.

Outputtet af den første funktion (A11) bliver således, at alle geometriske krav til det udførte arbejde er identificeret, og det er identificeret hvilke områder af byggeriet, fokus skal rettes mod.



Figur 7.1: Diagram for udarbejdelse af kontrolgrundlag. Sammenhæng med andre delfunktioner, kan findes på diagram A0 side 51.

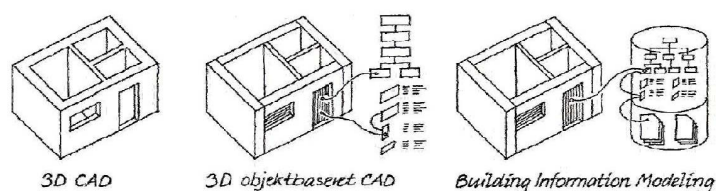
Den efterfølgende funktion (A12), har til formål at tolke de fundne geometriske krav og sammenkæde dem med de enkelte elementer i 3D modellen. Ofte vil tolerancerne være afhængige af bygningskomponenternes størrelse, og funktionen omhandler således at få identificeret størrelsen og beregnet den tilladelige afvigelse. Et eksempel på dette kunne være at der tillades en afvigelse fra lodret på op til 2 mm/m for betonelementer. I dette tilfælde vil funktionen A12 omhandle at identificere hvor højt et givet element i bygningen er, for på den måde at fastlægge den tilladelige afvigelse i de identificerede målepunkter/måleområder. Outputtet af funktionen A12 bliver således en 3D model, hvorpå de maksimalt tilladelige afvigelser i de valgte punkter/områder er angivet.

Det vigtigste input til udarbejdelsen af et passende kontrolgrundlag er en 3D model, der beskriver den ønskede geometri. Der findes dog mange former for 3D modeller, der indeholder forskellige former for information. Derfor undersøges forskellige former for 3D modeller i det følgende.

7.2 3D modeller

Inden for byggeriet er der ikke i samme grad som inden for industrien tradition for at arbejde med 3D modeller som grundlag for produktionen. Nyere initiativer som f.eks. Det Digitale Byggeri søger dog at stimulerer brugen af 3D modeller bl.a. ved fra 1/1 2007 at stille krav om brug af disse ved større projekter, hvor det offentlige er bygherre. [Det digitale byggeri, 2009]

Inden for 3D modeller findes der en lang række forskellige applikationer og formater, som benyttes i byggeriet. Gennem tiden er der foregået en udvikling, således at modellerne er gået fra at være rene geometriske modeller til at være parametriske objektmodeller. På figur 7.2 er de væsentligste koncepter for 3D modeller illustreret.



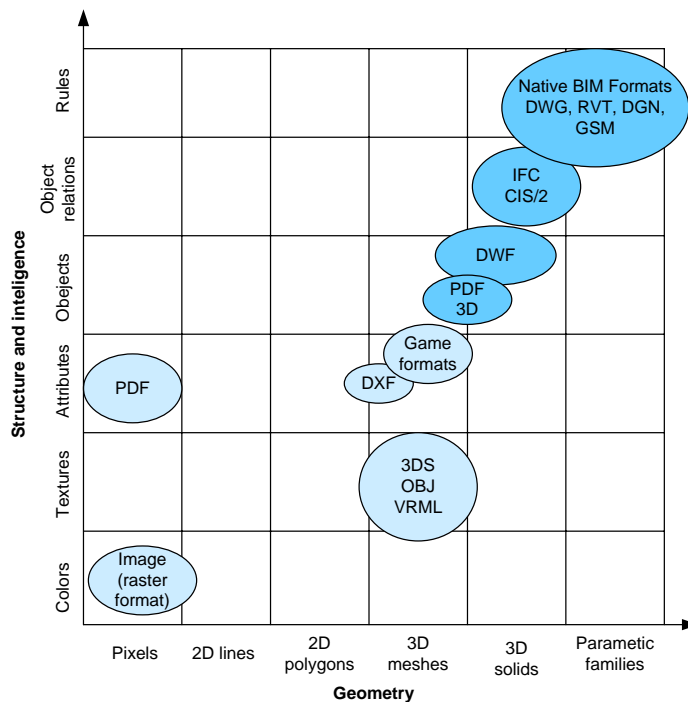
Figur 7.2: Diagram over de væsentligste CAD koncepter. [Bips, 2005]

Der redegøres kort for koncepterne i det følgende. Redegørelsen er baseret på [Bips, 2005] og [Eastman et al., 2008].

De mest simple 3D modeller modelleres vha. solider, flader og andre geometriske elementer. Disse modeller indeholder således kun ren geometrisk information. De tidlige CAD systemer var alle baseret på denne form for modeller.

3D objekt modeller afviger fra de rene geometriske modeller ved at være opbygget af objekter, som kan have tilknyttet informationer, så som materiale, leveringstidspunkt mm. De objektbaserede modeller er baseret på "klasser" således at der f.eks. findes en "væg klasse" der benyttes til at generere forskellige former for vægge, og som beskriver hvilke egenskaber, der skal knyttes til en væg. Objektmodellerne er ofte parametriske, hvilket indebærer at et vindueshul f.eks. automatisk tilpasses det vindue, der indsættes i væggen. Mange af de førende CAD systemer er i dag baseret på objektmodeller.

Den mest avancerede form for modeller er de fælles objektorienterede modeller. Denne form for modeller bygger på, at der opbygges en fælles model for byggeriet, hvor alle informationer lagres gennem hele bygningens levetid. Derved kommer modellen til at indeholde informationer om f.eks. tidsplaner og økonomistyring. Tanken er således, at de forskellige interessenter i en byggesag altid kan udtrække lige præcis de informationer, de har brug for fra den fælles model ved at benytte et filter. Anvendelsen af disse modeller er i dag stadig på et meget tidligt stadie, og de gængse systemer på markedet understøtter ikke dette. Flere steder f.eks [Bips, 2005] omtales de fælles modeller som BIM modeller (Building Information Modelling), men generelt mangler der en klar definition af hvad BIM er [Eastman et al., 2008].



Figur 7.3: Oversigt over de vigtigste udvekslingsformater i byggeriet. [Eastman et al., 2008]

Udviklingen går således imod at tegninger og beskrivelser i større grad integreres i én fælles model. En logisk følge deraf er, at et system til geometrisk kvalitetskontrol, kan håndtere objektorienterede modeller, og er forberedt på at understøtte arbejdet med fælles 3D modeller. I den forbindelse skal det overvejes, hvilket format der eventuelt kan benyttes til den indkommende model i systemet. På figur 7.3 er de vigtigste udvekslingsformater i

byggeriet opstillet.

Et af de mest omtalte formater i forbindelse med byggeriet er IFC (Industry Foundation Classes). Tanken bag IFC formatet er, at det skulle kunne bruges som et åbent udvekslingsformat mellem forskellige applikationer. For en nærmere beskrivelse af IFC formatet, henvises til appendiks F. Der har længe været en forventning om at IFC ville blive den nye standard inden for byggeriet, men grundet vanskeligheder med kompatibiliteten med de mest fremtrædende applikationer på markedet, har IFC endnu ikke haft det store gennembrud. IFC er designet således, at det giver mulighed for at indeholde en lang række informationer ud over de rent geometriske. En mulighed ved IFC kunne derfor være at knytte de geometriske tolerancer til det enkelte element, således at tolerancer og referencegeometri er knyttet sammen i en fil.

En anden mulighed kunne være at adskille referencegeometrien fra tolerancerne og i stedet benytte sammenligningsapplikationen til at etablere koblingen mellem de to sæt data. Det er hovedsagligt denne tankegang, der ligger bag funktionen på figur 7.1.

Da alle afvigelser mellem scanningen og modellen registreres, er det vigtigt at modellen har en høj detaljeringsgrad, da der ellers vil blive skabt nogle "falske" afvigelser.

Generelt vil der ikke findes én 3D model for byggeriet, men en lang række forskellige fagmodeller. Der ligger derfor en udfordring i at identificere hvilken model det er at sammenligningen skal foretages med, da det generelt vil være forskellige modeller, der er relevante gennem forskellige faser af byggeriet. En mulighed kunne i den forbindelse være at benytte fællesmodeller som grundlaget for sammenligningen.

7.3 Identificering af tolerancer

Generelt vil der være specificeret tolerancer for et byggeri i mange forskellige beskrivelser og standarder. Tolerancerne tjener forskellige formål. Disse kan bl.a. være:

- Visuelle
- Funktionsmæssige

- Produktionsmæssige

Tolerancer med et rent visuelt formål beskriver, at f.eks. vinduer skal sidde på en nogenlunde lige række, at der ikke må være for store spring mellem betonelementerne, og at de enkelte elementer f.eks ikke må være skæve. De funktionsmæssige tolerancer omhandler at bygningen i sin færdige form skal kunne fungere acceptabelt. F.eks. skal betonelementer være placeret med en sådan præcision, at de kan føre lasten fra taget til fundamentet, døre skal kunne åbne uden at gå på gulvene osv.

De produktionsmæssige tolerancer omhandler, hvorvidt de efterfølgende fag kan bygge videre på det foregående arbejde uden problemer. Dette bliver specielt vigtigt, hvis der satses på en større grad af præfabrikering, således at det primære arbejde på byggepladsen bliver montage. Det beskrives bl.a. i [Hammarlund og Josephson, 1996] at et af de steder, hvor der oftest opstår problemer, er ved montagen af elevatorer i elementbyggeri, hvor netop to forskellige former for præfabrikerede bygningsdele mødes.

Fastlæggelsen af hvor store tolerancer der kan tillades, er således en svær afvejelse af, hvad der er nødvendigt, da skærpede tolerancer ofte vil resultere i øgede produktionsomkostninger. Hvorledes denne afvejelse foretages, beskrives ikke yderligere i denne rapport, blot konstateres det, at der er mange forhold som har indvirkning på tolerancerne, og at tolerancerne stammer mange steder fra.

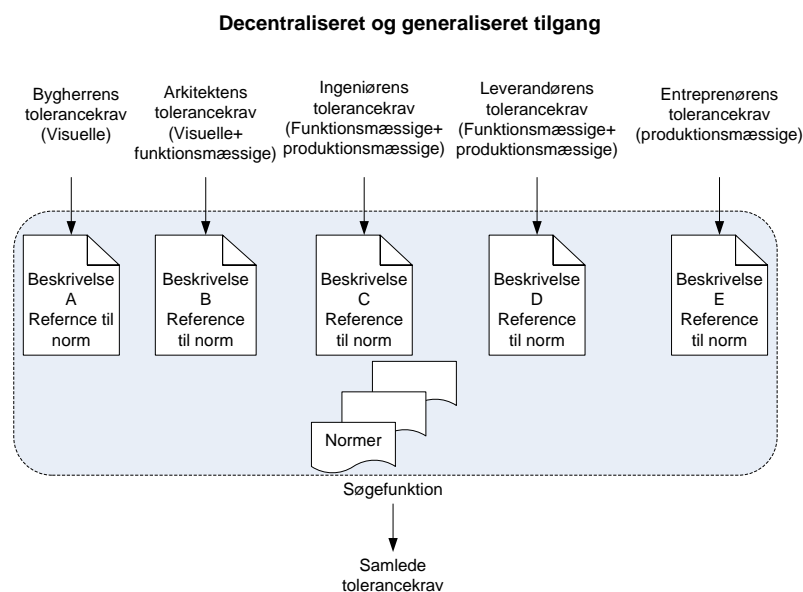
Grundlaget for en mere automatisk kontrol af den geometriske kvalitet er at de nødvendige tolerancer er beskrevet på en sådan måde, at de kan tolkes af en computer. Ifølge [Boukamp og Akinci, 2007] findes der ikke i dag software, der kan behandle specifikationerne fra de forskellige standarder og beskrivelser automatisk. Et Ph.d. projekt, der fokuserer på hvorledes dette er muligt, er derfor gennemført [Boukamp og Akinci, 2007]. Projektet omhandler både geometriske specifikationer og andre specifikationer så som materialeegenskaber mm.

Ph.d. projektet fokuserede på at fremstille et "skelet" eller framework, der kan identificere, hvilke krav der gælder for de enkelte dele af modellen. Skelettet er baseret på et koncept, der ud fra den kontekst som et bygningselement indgår i, samt de egenskaber det besidder, kan identificere om de enkelte specifikationer i de forskellige standarder er *anvendelige*, *muligvis anvendelige* eller *ikke anvendelige*. Resultatet af et syntetisk forsøg med dette skelet viste, at der var en lang række specifikationer, som blev

identificeret som *muligvis anvendelige* og som det derfor var nødvendigt at gennemgå manuelt.

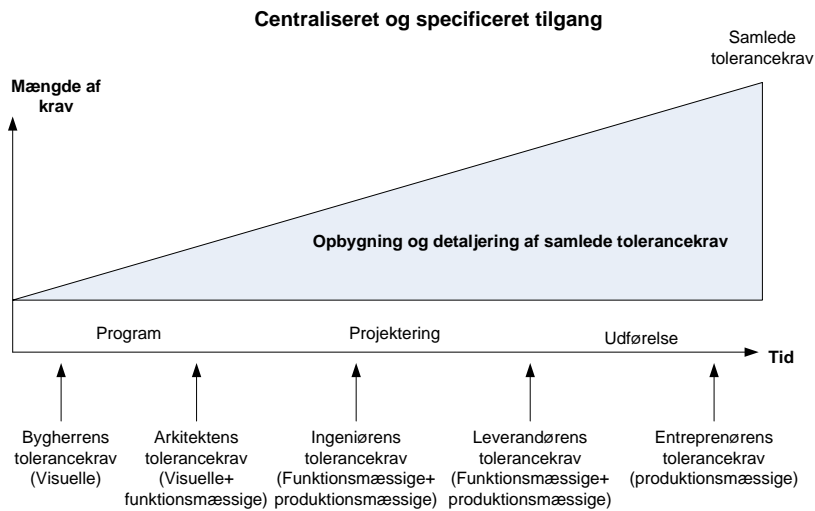
En automatisk identificering af tolerancer, kræver således en yderligere udvikling af det omtalte "skelet", og muligvis en ændring i den systematik og metode som tolerancer beskrives med i dag. Uden denne udvikling bliver hele processen, illustreret på figur 7.1, en manuel proces. En stor del af denne proces skulle dog have været gennemført under alle omstændigheder, hvis der skal udformes en praktisk anvendelig kontrolplan jf. kapitel 4.

Tilgangen benyttet i [Boukamp og Akinci, 2007] er baseret på en decentraliseret og generaliseret opbygning af specifikationerne jf. figur 7.4.



Figur 7.4: Illustration metoden benyttet i [Boukamp og Akinci, 2007] til identificering af de samlede tolerancekrav.

En alternativ metode kunne være at der gennem projekteringen af byggeriet blev foretaget en detaljering af tolerancerne ud fra forskellige aktørers krav, således at der blev opbygget en samlet beskrivelse af kravene til tolerancerne. Denne tilgang kræver dog i større grad, at de enkelte aktører forholder sig til hinandens krav, og specificerer hvilke krav fra de enkelte normer, der er gældende for at sikre en entydig og konsistent beskrivelse af tolerancerne. På figur 7.5 er denne tilgang illustreret.



Figur 7.5: Illustration af en centraliseret og specificeret tilgang til opbygningen af de samlede tolerancekrav.

Den nuværende situation i byggeriet vurderes at være baseret på den decentraliserede og generaliserede tilgang, jf. figur 7.4, og et system der er baseret på den centraliserede og specificerede tilgang vil derfor kræve en ændring i arbejdsgangen hos flere af byggeriets parter, hvilket vil besværliggøre implementeringen.

Outputtet af den beskrevne proces er således, at det er identificeret hvilke dele af byggeriet indsatsen skal koncentreres om, og at det er identificeret hvilke overordnede krav, der er til disse områder. Derudfra skal der foretages en behandling af tolerancerne, sådan at der kan opstilles entydige regler, som kan tolkes af en computer, for hvornår kravene er overholdt.

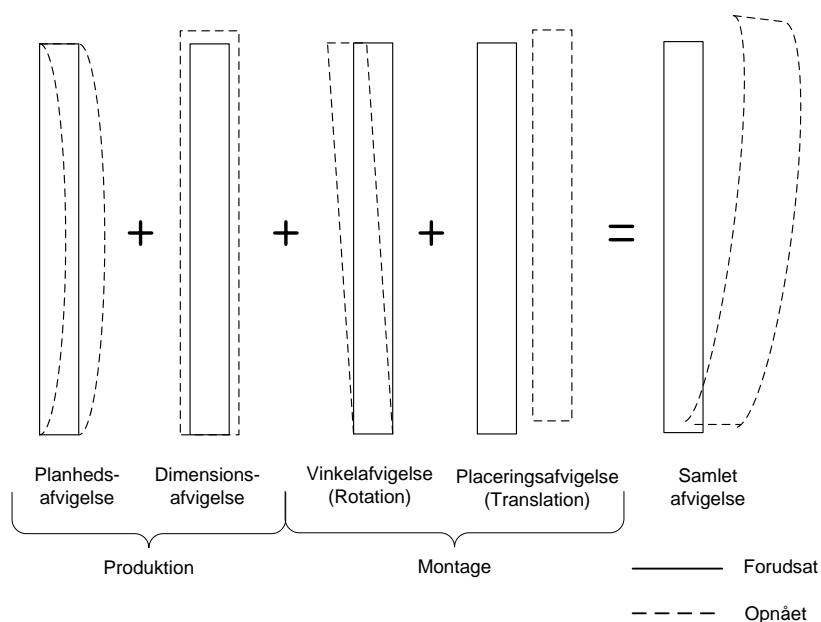
7.4 Specificering af tolerancer

Efter at det er identificeret hvilke tolerancekrav, der er til det udførte arbejde, er det nødvendigt at specificere disse, da en del af kravene kan være afhængige af f.eks. størrelsen på bygningselementet. Et nødvendigt input til denne funktion er derfor den geometriske information indeholdt i 3D modellen. Derfor er 3D modellen illustreret som et *kontrolelement* jf. figur 7.1.

For at kunne specificere tolerancerne er det dog nødvendigt at tage stilling til hvilke former for afvigelser, der kan forekomme, således at målepunk-

terne indlægges de relevante steder. På figur 7.6 er forskellige former for afvigelser illustreret.

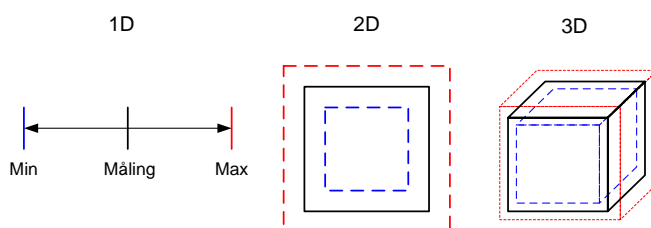
Som figur 7.6 illustrerer, er den målte afvigelse på et monteret bygnings-element, resultatet af de afvigelser, der er opstået ved hhv. produktionen og montagen. Tolerancerne er opbygget således at de normalt er større ved montage end produktion, da afvigelserne under montagen ligeledes påvirkes af kvaliteten under produktionen. Tolerancerne fra montagen adderes således med tolerancerne fra produktionen for at finde de totale tilladelige tolerancer ved måling på det indbyggede element.



Figur 7.6: Illustration af forskellige former for afvigelser for eksempelvis et betonelement.

Hvis det skal være muligt automatisk at kontrollere hvorvidt tolerancerne er overholdt, er det nødvendigt at definere nogle regler for det tilladte udfald af målingen. Ved en enkelt måling i en dimension er dette forholdsvis simpelt jf. figur 7.7, men kompleksiteten stiger, når der arbejdes med mange målinger i 3 dimensioner, og der f.eks. indføres krav til parallelitet. En måde at behandle dette på kunne selvfølgelig være at indføre et tilladt 3D udfaldsrum, jf. figur 7.7, men hvorledes dette fastlægges så eksisterende tolerancekrav overholdes er ikke åbenlyst.

Ved at læse f.eks. Dansk Byggeris vejledning til tolerancer for elementbyggeri [Dansk Byggeri, 2007], kan det konstateres, at den type af tolerancer der er opgivet, i mange tilfælde er relateret til målemetoden, som f.eks. illustreret på figur 7.8.

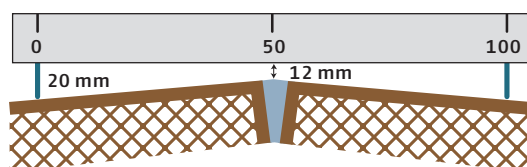


Figur 7.7: Eksempel på hvorledes tolerancekrav kan beskrives i forskellige dimensioner. Så længe målingen er beliggende i rummet mellem den røde og den blå overflade, er kravet overholdt.

Skulle den fysiske måling illustreret på figur 7.8 omsættes til en automatisk kontrol ud fra en punktsky, er det således nødvendigt at definere en betingelse for, hvorledes de tre punkter til kontrol jf. figur 7.8 udvælges, og hvorledes det konstateres, om kravet er overholdt eller ej.

Netop fordi de eksisterende tolerancer er defineret i forhold til målemetoder, der er baseret på måling af enkeltpunkter, kan disse ikke direkte omsættes til brugbare tolerancer i forhold til en 3D scanning. Det kan derfor diskuteres, om det er nødvendigt med en revision af hele tolerancesystemet, hvis 3D scanning skal benyttes til geometrisk kvalitetssikring.

Krav: Planhedsafvigelse ved samlinger max 5 mm målt med 1 m retskinne, jævnt stigende/jævnt faldende, max 1:100. Dvs. at kravene er opfyldt, hvis målene er min. 15 mm og max 25 mm.



Figur 7.8: Eksempel på måling af planhed ved elementsamling. [Dansk Byggeri, 2007]

Ud over at tolke tolerancerne er det nødvendigt at tage stilling til, hvornår de enkelte tolerancer skal kontrolleres, da der ofte kun vil være et begrænset tidsrum, hvor det er muligt at kontrollere tolerancerne, inden det næste lag af konstruktionen bygges oven på. Desuden er tanken bag hele systemet, at kontrollen er foretaget, inden det næste lag i konstruktionen bygges på, således at fejlen kan rettes med mindst mulige konsekvenser.

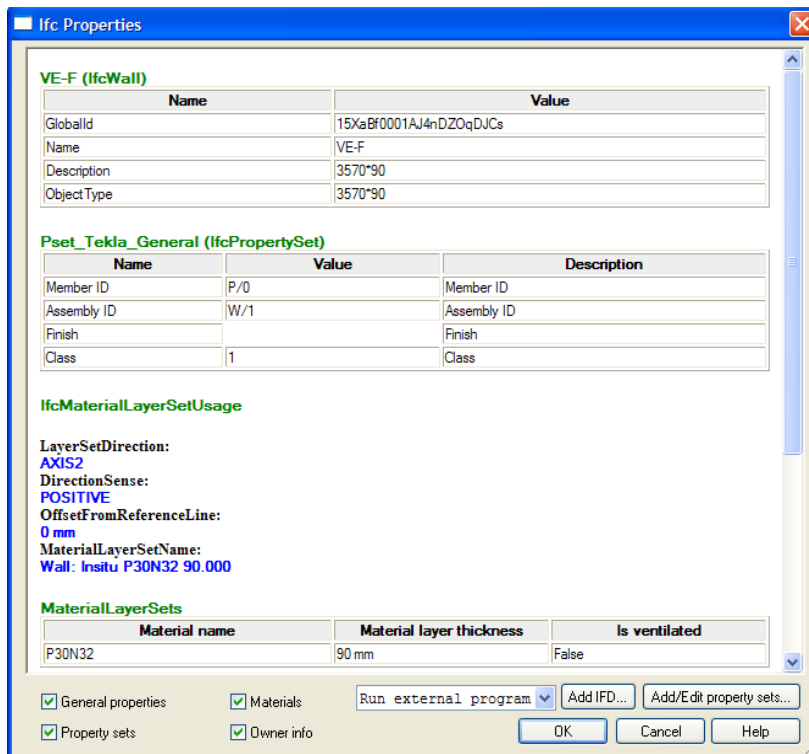
Alt efter hvordan det vælges at strukturere informationerne omkring tolerancer, målepunkter, måletidspunkter og godkendelseskriterier vil outputtet af processen kunne optræde i to former. Outputtet vil enten være en samlet 3D model, som inkluderer al informationen i ét format, eller en separat fil med en 3D model og en fil indeholdende de resterende informationer, struktureret på en sådan måde, at de to sæt data kan kobles entydigt sammen i sammenligningssoftwaren.

7.5 Praktisk afprøvning af IFC

Til den praktiske afprøvning af konceptet er en IFC model af bygningen fra feltundersøgelsen undersøgt. Modellen af bygningen indeholder henholdsvis en konstruktionsmodel, der er eksporteret fra Tekla Structures 13.0 og en VVS model, der er eksporteret fra MagiCad HPV 2006.5. Det er dog kun konstruktionsmodellen, der er behandlet i det videre forløb.

I første omgang er det undersøgt hvilke informationer de enkelte objekter i modellen indeholder. Modellerne er undersøgt i DDS IFC Viewer 6.5, hvorfra det kunne konstateres at muligheden for at knytte information til de enkelte elementer, ikke er fuldt udnyttet. På figur 7.9 er de tilknyttede oplysninger til et element i IFC modellen gengivet. De væsentligste oplysninger jf. figur 7.9 er det unikke identifikationsnummer, at det er en væg med en tykkelse på 90 mm, og at den er udført i en beton med recepten P30N32 (Passiv miljøklasse, styrkeklasse 30 MPa, Normal kontrolklasse, maks stenstørrelse 32 mm).

For at kunne benytte modellen som grundlag for en sammenligning er det nødvendigt at udvælge de elementer i modellen, som er blevet scannet, og konvertere dem til et format, som kan importeres i det program, som benyttes til at lave sammenligningen i. Til behandling af modellen, blev Revit Architecture 2009 og ArchiCAD 12 i første omgang udvalgt. Det viste sig dog, at der opstod problemer med åbninger i elementerne, når IFC modellen blev importeret til disse, jf. appendiks C.

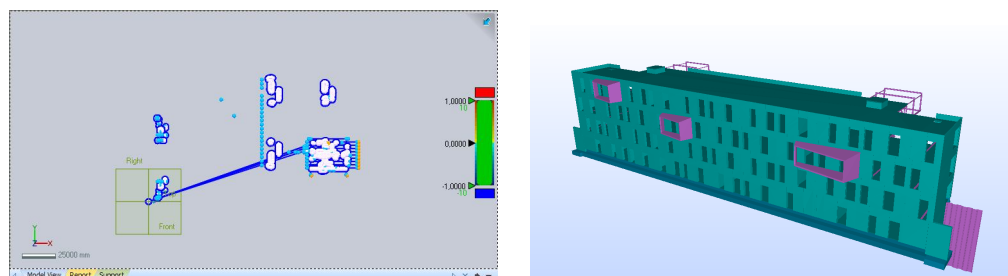


Figur 7.9: Eksempel på oplysninger knyttet til et vægelement i den benyttede IFC-model. Screenshot fra DDS IFC Viewer 6.5

Grundet problemerne med hhv. ArciCAD 12 og Revit Architecture 2009, blev det i stedet forsøgt at eksportere modellen fra Tekla til AutoCAD via DWG formatet, og derefter videre til DXF formatet vha. AutoCAD. Dette lykkedes dog ikke, da inspektionssoftwaren læste DXF formatet forkert, jf. figur 7.10.

Løsningen til at få en brugbar model til inspektionssoftwaren blev til sidst at tegne en ny model af de nødvendige elementer, oven i DWG modellen vha. solider. Denne model kunne herefter eksporteres til ACIS formatet og senere importeres i inspektionssoftwaren. Senere blev det erfaret at det faktisk var muligt at konvertere DWG modellen direkte til ACIS formatet vha. AutoCAD. På figur 7.11 er den ønskede og den praktisk mulige arbejdsgang illustreret.

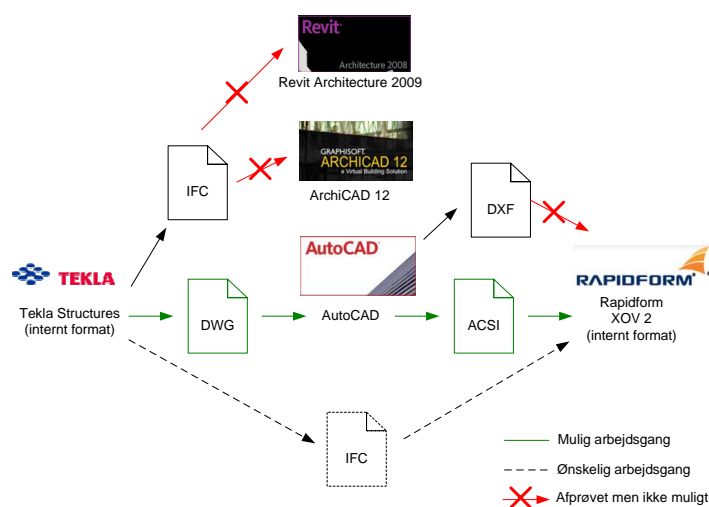
I forbindelse med konverteringen fra IFC til ACIS er det vigtigt at bemærke at ACIS formatet udelukkende indeholder geometri, hvorfor al an-



(a) Screenshot fra Rapidform XO V2 [Rapidform, 2009] inspektionssoftwaren ved importen af DXF fil. (b) Modellen som den burde have set ud efter import til Rapidform XO V2.

Figur 7.10: Fejl i DXF modellen efter import til Rapidform XO V2.

den information indeholdt i IFC modellen vil gå tabt. ACIS formatet er ikke ligesom IFC et uafhængigt format, men ejes af Spatial Corporation som leverer 3D modellerings grundmoduler til andre software producenter. [Spatial Corporation, 2009]



Figur 7.11: Illustration af den ønskede og den praktisk mulige arbejdsgang.

Da der ikke er defineret nogle tolerancer på de enkelte elementer i IFC modellen, og da det ikke har været muligt at fremskaffe udbudskontrolplanen for byggeriet, er det valgt at tage udgangspunkt i en vejledning fra Dansk Byggeri, omhandlende tolerancer ved in situ støbt beton og elementmontage [Dansk Byggeri, 2007]. Vejledningen er opbygget med baggrund i kravene i

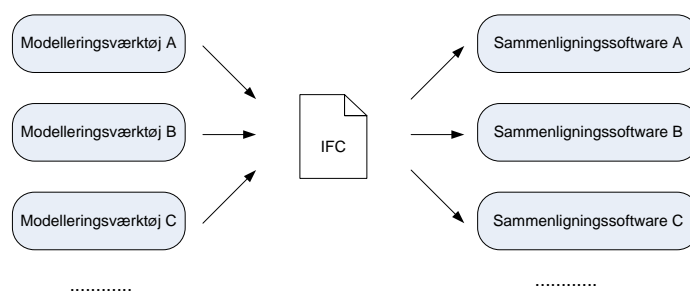
DS 411 Norm for betonkonstruktioner, og DS 482 Udførelse af betonkonstruktioner, men er ligeledes suppleret med branchens egne krav.

Det er undesøgt, hvorvidt det er muligt at indlægge tolerancerne i hhv. ArchiCAD 12 og Revit Architecture 2009, men i begge tilfælde er det fundet, at det kun er muligt at tilføje tolerancerne som uintelegent information, forstået på den måde at informationen kun kan tilføjes som en tekstnote, og det vil derfor ikke være muligt for den software, der skal foretage sammenligningen at tolke tolerancerne. Desuden er der stor sandsynlighed for, at tekstnoten vil gå tabt under eksporteringen til ACIS formatet.

7.6 Opsamling på kontrolgrundlaget

Ud fra litteraturstudiet af 3D modeller og tolerancer samt de praktiske erfaringer med afprøvning af IFC formatet beskrives det i det følgende hvilke forhindringer, der er blevet identificeret.

Ud fra litteraturstudiet omkring 3D modeller blev det konstateret, at udviklingen går mod modeller, der i større grad integrerer information og geometri. Set i forhold til industrien blev det konstateret, at fremstillingen af 3D modellerne finder sted hos en lang række aktører, hvilket stiller krav til kopatibiliteten mellem de programmer der benyttes. I denne forbindelse blev IFC formatet undersøgt. På figur 7.12 er det illustreret hvorledes IFC kunne udgøre bindeledet mellem de forskellige applikationer.



Figur 7.12: Illustration af hvorledes IFC tænkes som bindeledet mellem en række applikationer.

Ved en praktisk afprøvning af IFC formatet blev det konstateret at det ikke var muligt at benytte IFC til den konkrete test. En udvikling af et IFC

plugin til sammenligningssoftwaren samt en forbedring af implementeringen af IFC i modelleringsværktøjerne er derfor nødvendigt. Yderligere bør muligheden for at benytte en fællesmodel/modelserver som kontrolgrundlag for en sammenligning med det udførte arbejde, undersøges.

I forhold til identificeringen af tolerancer kunne det konstateres, at det er nødvendigt med en ændret arbejdsgang i den måde de projekterende parter beskriver og strukturerer tolerancerne. En anden mulighed er udviklingen af et skelet til beskrivelse og søgning blandt bygningsspecifikationer. En nærmere undersøgelse af mulighederne for at tilføje tolerancer som et ekstra lag i IFC strukturen er ligeledes nødvendig. Alternativt kan der udarbejdes et helt separat format til tolerancerne.

I forhold til en datamodel til beskrivelse af hvorvidt tolerancerne er overholdt eller ej, kunne det konstateres, at en omsætning af de eksisterende tolerancer til en entydig og computertolkelig beskrivelse kræver yderligere undersøgelser og eventuelt en ændring i måden at angive og beskrive tolerancer på.

Scanningsprocessen

Formålet med dette kapitel er, at undersøge hvilke muligheder der er for at indhente information om det udførte arbejde ved brug af en 3D scanner. Desuden beskrives det hvorledes scanningen skal planlægges og hvordan dataene efterbehandles.

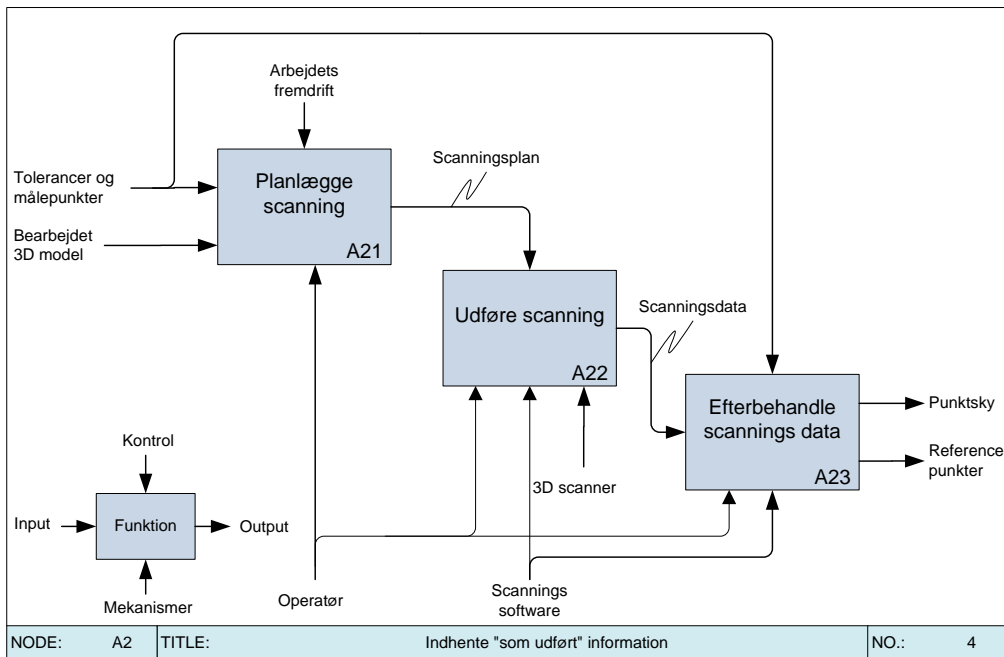
8.1 Nedbrydning af funktion

For at der kan udføres geometrisk kvalitetssikring ved brug af en 3D scanner, skal muligheden for at registrere de opførte konstruktioner undersøges. På figur 8.1 er der vist et funktionsdiagram, der beskriver hvordan det forventes at indhentningen af informationerne omkring byggeriets udførelse skal foregå.

Denne proces er opdelt i 3 funktioner. Først skal scanningen planlægges (A21), scanningen skal herefter udføres (A22) og til sidst skal de registrerede punkter behandles, før de kan afleveres til en sammenligning med 3D modellen (A23).

8.2 Planlægning af scanning

Der skal gennem hele byggeprocessen udføres kvalitetssikring. Dette lige fra programmeringsfasen til afleveringen. Da der i dette projekt er fokuseret på hvordan 3D scanning kan udnyttes til kvalitetssikring af det udførte arbejdes geometri, skal det inden byggeriet starter, planlægges hvor, hvornår og hvor ofte, der skal scannes.



Figur 8.1: Overordnede funktioner til indsamling af information om det udførte arbejde.

Det styrende element for planlægningen af scanningen er arbejdets fremdrift jf. figur 8.1. Med arbejdets fremdrift menes der, hvor langt byggeriet er nået i forhold til det planlagte. I den overordnede planlægning af scanningerne er det således nødvendigt at have kendskab til byggeriets tidsplan, således at det på forhånd kan bestemmes, hvor mange gange der skal scannes, og hvilke elementer der skal kontrolleres. Ud fra dette kan der indlægges en række planlagte scanninger i tidsplanen.

Ved at registrere arbejdets fremdrift kan det således konstateres, hvornår byggeriet er nået til det stadie, hvor scanningen skal udføres. Selvfølgelig kan den praktiske registrering af arbejdets fremdrift ske på enten traditionel vis, hvor entreprenørens formand f.eks. ugentligt kommer med en opdatering, eller vha. nyere metoder hvor en 4D model kobles med byggeriet vha. RFID tags [Ingeniøren, 2008b].

Planlægningen ender ud i en scanningsplan, der indeholder, hvad der skal scannes, hvornår scanningen skal udføres, hvilken opløsning scanningsresultatet ønskes afleveret i samt en skitsetegning over, hvor scanner og targets skal placeres.

Scanningsområde

Området der skal scannes afhænger af, hvilket type byggeri kvalitetssikringen foretages på. Ved elementmontage skal det kontrolleres at monteringen af elementerne overholder de tolerancer, der er angivet i projekteringsmaterialet. Tolerancerne er på figur 8.1 sammen med den bearbejdede 3D model input til planlægningen af scanningen, og hermed grundlag for hvilke dele af montagen der skal scannes.

Eventuelle fejl ved elementmontagen skal opdages, før udbedringen bliver for bekosteligt. Derfor skal kvalitetssikringen foretages inden elementet faststøbes eller i det mindste, før montagen af næste etage påbegyndes.

I appendiks D er en feltundersøgelse foretaget af projektgruppen beskrevet. I feltundersøgelsen er elementerne på gavlen af et byggeri scannet fra to sider. Udfordringen var her at få planlagt scanningerne, så de ønskede informationer blev indsamlet og at de enkelte scanninger efterfølgende kunne sættes sammen til en samlet punktsky.

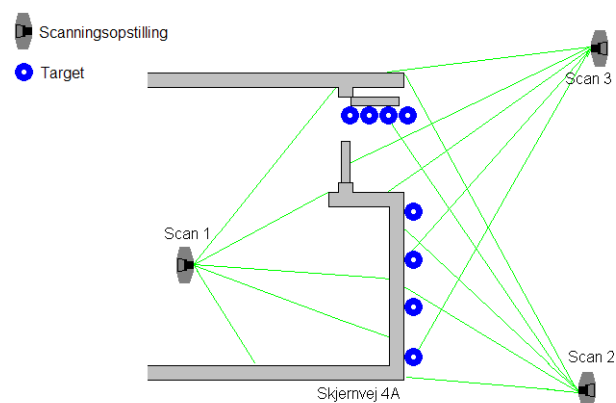
Targets

Ved scanninger fra flere vinkler hvor laserscanneren skifter position, placeres der mindst fire targets ved hver scanningsopstilling. På grund af det retrorefleksive materiale targets består af reflekterer de laserstrålen godt. Scanneren kan identificere og opmåle koordinaterne til hver targets centrum meget præcist. Opmålingen af de placerede targets danner efterfølgende grundlaget for at sammensætte de enkelte scanninger.

I feltundersøgelsen er der udført 3 scanninger. Her er der benyttet targets som grundlag for sammensætningen af punktskyerne og referencepunkter. Det kræver planlægning at placere de nødvendige targets, så de kan opfanges fra flere scanningsvinkler.

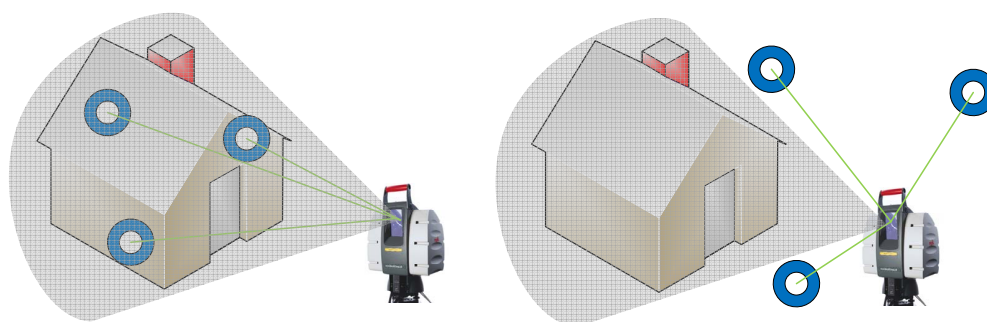
En mulighed for at sammensætte en scanning af elementernes inderside med elementernes yderside er ved at placere targets i en døråbning jf. figur 8.2. De targets som er placeret i døråbningen kan opfanges af både scanning 1 og scanning 2. For at binde scanning 2 og 3 sammen er der placeret targets på gavlen.

Den endelige punktsky består af scanningsresultaterne fra alle opstillin-



Figur 8.2: Planskitse af scanningsopstilling.

gerne, som er sat sammen ved hjælp af de indscannede targets. Det er i feltstudiet valgt at placere targets inden for scanningsområdet. I følge Niels Koefod Nielsen, Rambøll Esbjerg, kunne der alternativt være opsat targets uden for scanningsområdet, jf. figur 8.3.



Figur 8.3: Placering af targets indenfor eller udenfor scanningsområdet.

Ved at placere targets uden for scanningsområdet øges afstanden og vinklen mellem de opsatte targets, hvilket kan give en mere præcis sammensætning. Ved scanninger fra meget forskellige vinkler kan der med fordel benyttes kugletargets jf. figur 8.4.

Fordelen ved at benytte kugletargets er, at de ikke er afhængige af vinklen de bliver scannet i. Kugletargets har dog den ulempe, at de ikke på samme måde som de retrorefleksive targets kan identificeres automatisk af scanneren.



Figur 8.4: Eksempel på kugletarget. Billede fra besøg hos Rambøll Esbjerg

Opløsning

Det skal i planlægningen vurderes hvilken opløsning scanningen skal udføres i, da dette har betydning for datamængden og tidsforbruget ved scanningen. Opløsningen skal derfor vælges ud fra de tolerancer, der er på de elementer, der skal scannes.

For at sikre en ensartet forståelse af begrebet opløsning er det nødvendigt med en klar definition. Definitionen er i denne rapport foretaget ud fra figur 8.5 som følgende:

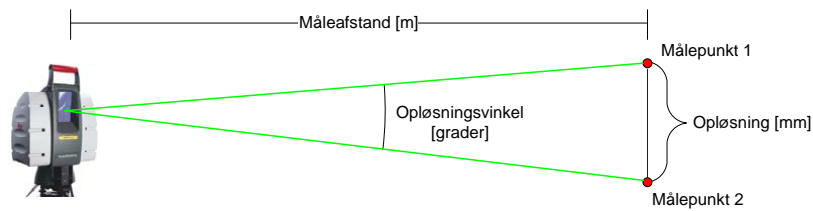
Definition af opløsning

Afstanden mellem to nabopunkter i samme afstand fra scanneren [mm].

Definition af opløsningsvinkel

Vinkelen mellem to målinger [grader].

I en undersøgelse, som er foretaget for at integrere laserscanning og fotogrammetri til statusopgørelse på bygningsprojekter, er der udarbejdet en scanningstabel jf. figur 8.6, der giver et overblik over sammenhængen mellem opløsningsvinkelen og tidsforbruget [El-Omari og Moselhi, 2008]. Til forsøget er der benyttet en LPM 100 VHS LADAR scanner, som kan opfange 2000 punkter pr. sek. Emnet, der er scannet, er her placeret 4,3 m væk fra scanneren og scanningsvinduet havde horisontalt en vinkel på 20°



Figur 8.5: Definition af opløsning og opløsningsvinkel.

og vertikalt en vinkel på 17° .

Scanning session	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	13	14	15	16	17
Resolution angle ($^{\circ}$)	0.015	0.025	0.035	0.045	0.075	0.100	0.125	0.150	0.175	0.200	0.225	0.250	0.275	0.300	.500	0.750
Scanning duration (min)	58:24	35:16	21:02	13:31	04:53	02:34	01:37	01:09	01:01	00:52	00:46	00:40	00:39	00:38	00:23	00:15
Resolution (mm)	1.12	1.87	2.626	3.370	5.250	7.500	9.380	11.250	13.130	15.000	16.880	18.700	20.630	22.500	37.500	56.290
Number of points (thousands)	841.05	508.034	302.904	194.728	70.740	36.960	23.380	16.638	12.896	9.630	7.600	5.538	5.360	4.725	1.710	0.750

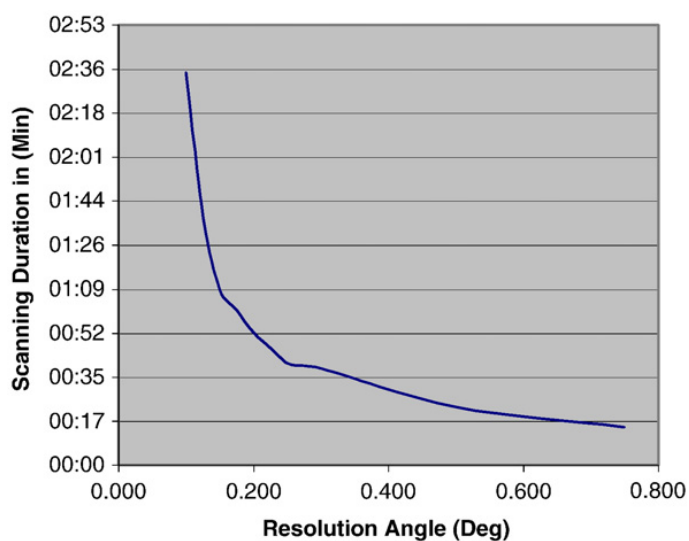
Figur 8.6: Scanningstabel som viser sammenhængen mellem opløsning og tidsforbrug. [El-Omari og Moselhi, 2008]

Der er i forsøget lavet i alt 17 målinger. I hver måling er opløsningsvinkelen ændret jf. "Resolution angle" på figur 8.6. I første scanning er vinklen sat til $0,015^{\circ}$. Med en afstand på 4,3 m til emnet der er scannet, giver dette en opløsning på 1,12 mm. For den benyttede scanner har denne scanning taget 58,24 min. Herefter er opløsningsvinklen forøget, hvilket giver større afstand mellem de observerede punkter.

Ved at tegne grafen op for tidsforbruget pr. scanning i forhold til opløsningsvinklen, findes det i forsøget at tidsforbruget forøges eksponentielt, når opløsningsvinklen sættes ned jf. figur 8.7. Dette forsøg er lavet med en scanner, som kan scanne 2000 punkter pr. sek. Grafen ændre sig derfor, hvis der benyttes en scanner, som kan scanne med flere punkter pr. sek. Det kan derfor være en mulighed at udarbejde en tilsvarende graf for den scanner, det af entreprenøren vælges at benytte, da dette giver et indblik i sammenhængen mellem opløsningsvinkelen og tidsforbruget til scanningen.

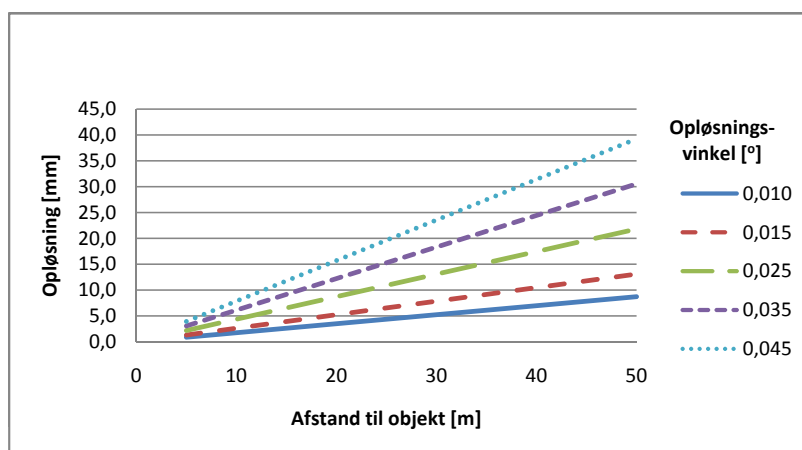
I dette tilfælde tager en scanning med en opløsningsvinkel på $0,15^{\circ}$ op til 1,09 min at udføre, jf. figur 8.6, hvilket giver en opløsning på 11,25 mm ved en scanningsafstand på 4,3 m. Hvis opløsningsvinklen halveres til $0,075^{\circ}$, halveres opløsningen til 5,2 mm, mens tidsforbruget firedobles til 4,53 min.

For at få en ide om hvad opløsningsvinklen betyder i forhold til opløsningen, har projektgruppen udarbejdet en graf, hvor det med simpel trekantgeome-



Figur 8.7: Sammenhængen mellem opløsningsvinkelen og tidsforbruget, [El-Omari og Moselhi, 2008].

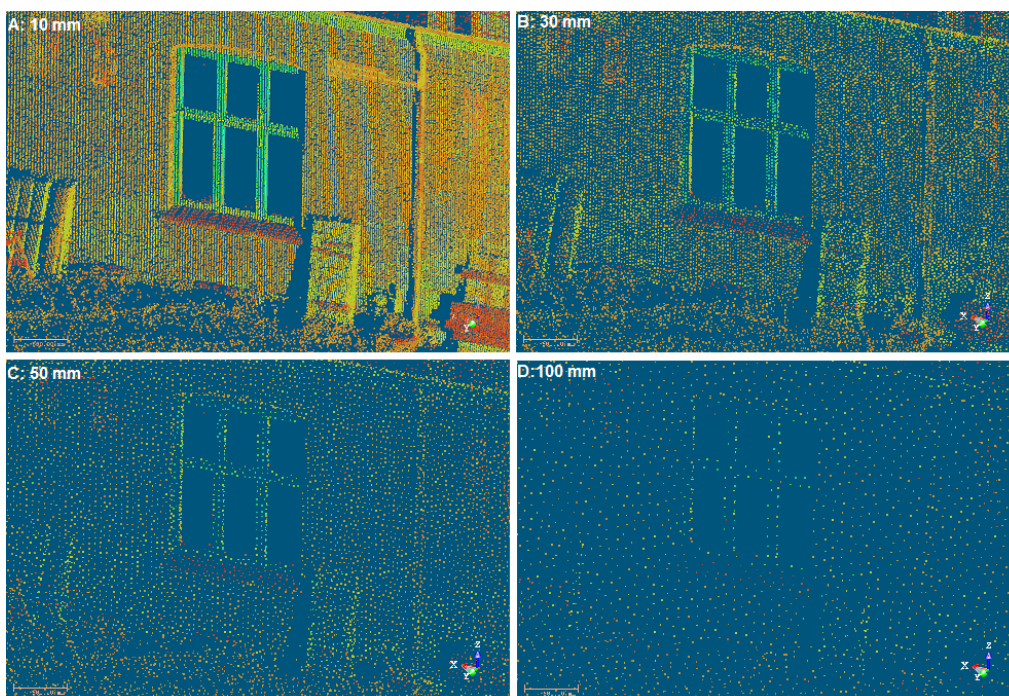
tri er fundet, hvordan sammenhængen mellem opløsningen, afstanden til det scannede objekt og opløsningsvinklen er.



Figur 8.8: Sammenhængen mellem opløsningsvinkelen, opløsning og afstanden til objektet.

Det kan ud fra figur 8.8 findes, at hvis der ved scanningen ønskes en opløsning på 10 mm ved en afstand til objektet på 20 m, skal benyttes en opløsningsvinkel på 0,025 grader. For at få en ide om hvilken opløsning der er nødvendig, gengives her et forsøg gennemført at Rambøll - Olie og Gas,

Esbjerg. I forsøget blev den samme bygning scannet i 4 forskellige opløsninger (10 mm, 30 mm, 50 mm og 100 mm) og resultatet er gengivet på figur 8.9.



Figur 8.9: Illustration af samme bygningsdel i 4 forskellige opløsninger. Materiale fra Rambøll Esbjerg.

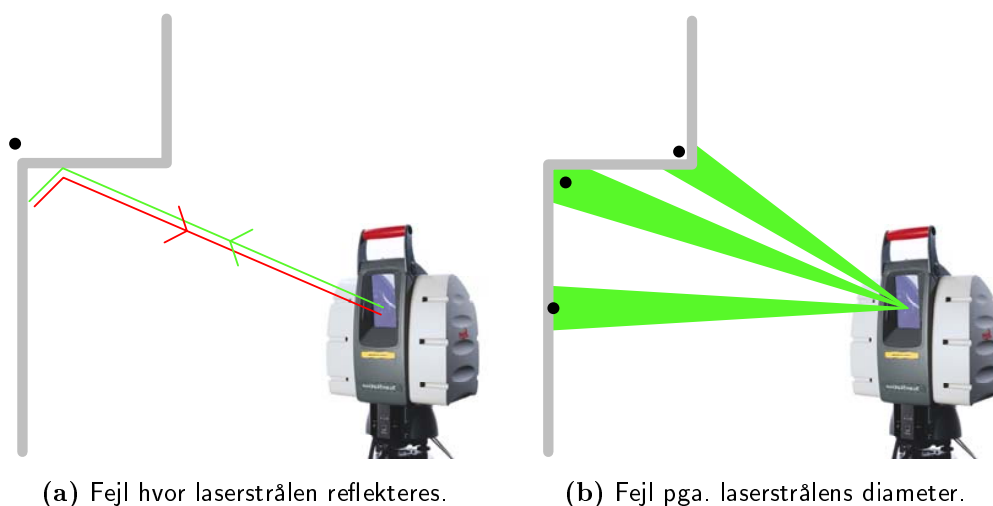
Forsøget viser at det er muligt at orientere sig i modellen med en opløsning på op til 50 mm, men at det er nødvendigt med en opløsning på omkring 10 mm hvis det ønskes at kunne fange detaljer som f.eks. kanter.

Præcision

En scanner har en række fejlkilder, der skal medtages i vurderingen af scanningsresultaterne [Kaspar, 2004]. Det er i specifikationerne for en scanner angivet, hvilken præcision producenten har testet scanneren til. En laser-scanner har en svaghed i, at det er refleksionen af laserstrålen, som opfanges og er bestemmende for målingen. Beregningen af afstanden baseres på tiden der går fra, at laserstrålen sendes afsted til den modtages. Derfor har materialet der scannes en stor betydning for præcisionen af resultatet.

Faktorerne, der spiller ind, er i høj grad farve og overfladestruktur på emnet, der scannes. Hvidt papir giver 100% refleksion, mens en glat beton overflade kun giver 24% refleksion. Jo mindre refleksion jo mere upræcis bliver scanningen. Ud over farve og overflade har temperaturen og luftfugtigheden en indflydelse på præcisionen.

Formen på det som scannes har også en indflydelse. Det mest præcise resultat fremkommer ved en vinkelret scanning på en plan overflade. Ved laserscanning kan der opstå en type fejlmålinger kaldet multipath. Denne type fejlmåling opstår hvis laserstrålen reflekteres af en overflade, hvorefter den rammer en anden overflade inden den returneres til scanneren. Dette betyder, at punktet måles for langt væk i forhold til det reelle, hvilket er vist på figur 8.10a.



Figur 8.10: Fejl ved scanning hvor det sorte punkt markerer det målte punkt [Kaspar, 2004].

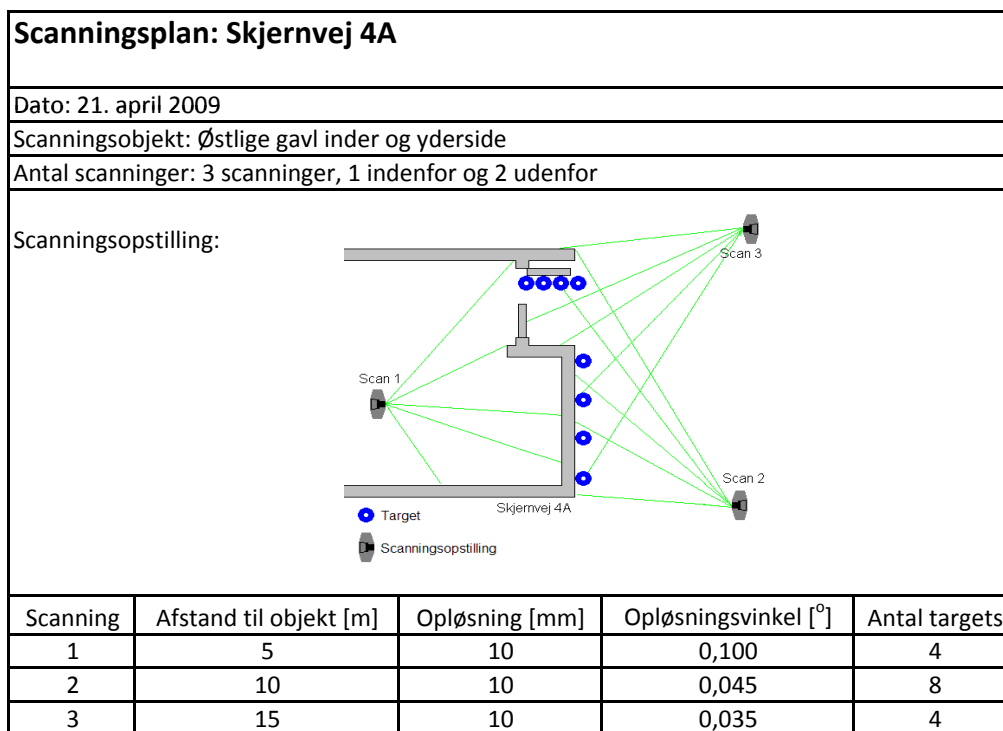
En anden type fejl, der kan opstå ved måling med en laserscanner, skyldes at laserstrålen er kegleformet. Ved en afstand på 50 m vil laserstrålen derfor have en diameter på op til 6 mm. Ved måling af kanter og hjørner bliver målingen upræcis hvilket er vist på figur 8.10b.

Scanneren, som er benyttet i dette projekt, har i anvisningerne fra producenten en præcision på positionen på ± 6 mm og på distancen ± 4 mm ved scanninger fra 1 til 50 m. Hertil skal ligges fejlkilder ved scanning af for eksempel hjørner, som det er nævnt ovenfor. Scannerens præcision skal

indgå i vurderingen af hvilke fejl en 3D scanning, og den efterfølgende kvalitetssikring kan være behjælpelige med at opdage. Det er i dette projekt vurderet, at præcisionen for hvilke fejl, der kan registreres ligger omkring ± 10 mm. Dette er en vurdering ud fra den valgte opløsning samt scannerens præcision.

Scanningsplan

Resultatet af de indledende vurderinger udmunder i en scanningsplan jf. figur 8.11, hvor de valgte kriterier for scanningen er opstillet. Datoen for scanningen afhænger af, hvor langt entreprenøren er med udførelsen af byggeriet. Antallet af scanninger afhænger af størrelsen og udformningen på det som skal scannes.



Figur 8.11: Eksempel på scanningsplan.

Afstanden til objektet jf. figur 8.11, vurderes ud fra 3D modellen for byggeriet, opløsningen vurderes ud fra tolerancerne på det scannede objekt og scanningsvinklen kan herefter findes ud fra figur 8.8. Antallet af targets

vurderes ud fra, at der mindst placeres 4 targets i hver scanningsopstilling.

Ud fra at byggeprojekter er meget forskellige, vurderes det, at der ikke kan opstilles en generel metode til udførelse af scanninger, ud over hvad der tidligere er beskrevet. Derfor skal figur 8.11 kun ses som et eksempel. Det vurderes derfor, at mange af faktorerne som placering af scanner og targets i scanningsplanen skal baseres på erfaring. Ved besøget hos Rambøll olie og gas, Esbjerg udtrykte landinspektør Niels Kofoed Nielsen ligeledes, at planlægningen af deres scanning altid foregår på stedet.

8.3 Udføre scanning

Efter udarbejdelse af scanningsplanen skal scanningen udføres, når byggeriet har nået det stadie, som scanningsplanen forudsætter. Scanningsplanen er her den kontrollerende faktor jf. figur 8.1 funktion (A22). Til udførelse af scanningen skal der benyttes en scanner og software til styringen af scanneren og opsamlingen af informationer samt en operatør. Det tænkes her, at det er total- eller hovedentreprenøren, som stiller udstyr og operatør til rådighed. Alternativt kunne ydelsen udbydes af en landinspektør. Som resultat af scanningen, afleveres en punktsky indeholdende punkter, der beskriver objektet i en opløsning svarende til det, som er beskrevet i scanningsplanen.

Valg af udstyr

Det skal inden 3D scanning benyttes til geometrisk kvalitetssikring vurderes, hvilket scanningsudstyr der skal investeres i for at opfylde de krav, som er til scanningsresultatet bedst muligt. I appendiks B er teknologien bag laserscanning og hvidlysscanning vurderet i forhold til hinanden med henblik på at benytte teknologierne til scanning i byggeriet. Det blev her vurderet, at en laserscanner er mere velegnet til scanning i byggebranchen, da denne type scannere har en større rækkevide, er mere mobile og ikke så påvirkelige af vejr og vind. Samtidig benyttes laserscanningsteknologien allerede i byggebranchen.

En anden fordel ved laserscanning er, at der findes flere producenter, som har udviklet laserscannere specielt til scanning af bygningskonstruktioner. Af virksomheder kan nævnes Leica [Leica, 2009], Trimble [Trimble, 2009] og Faro [Faro, 2009]. Hver fabrikant har flere modeller, som opfylder de kriterier, der i dette projekt er opsat i appendiks B. Variationerne hos de

forskellige producenter ligger blandt andet i scanningshastighed, størrelse på scanner og scannings software.

Det vurderes at panoramascannere generelt er at foretrække ved scanning i byggeriet, da denne type scannere effektivt kan scanne store områder. Op-løsningen og scanningshastigheden er ligeledes en vigtigt egenskab for valget af scanner. I dette projekt er der benyttet en Leica HDS 3000 laserscanner, da denne scanner var til rådighed for projektgruppen. Her ud over er der stiftet bekendtskab med en Trimble GS 200 laserscanner. De to laserscannere er begge kvalificerede til at indhente de scanningsdata, som er krævet i dette projekt.

Softwaren som benyttes til at kontrollere scanneren med afhænger af, hvilken scanner der benyttes. Virksomhederne der producere scannerne udvikler samtidig softwaren. Scannerne kan styres fra en PC, som direkte modtager og gemmer dataerne fra scanningerne. Det er ved nogle scannere muligt at styre scanneren med et betjeningspanel, hvorfra scanningsresultaterne senere kan overføres til en computer. Fordelen ved et betjeningspanel kan være, at det er mere robust end for eksempel en bærbar PC.

Scanningstid

For at kvalitetssikring ved brug af en 3D scanner bliver praktisk anvendelig, er det vigtigt at tidsforbruget undersøges. Der er i forbindelse med udarbejdelse af denne rapport foretaget en feltundersøgelse beskrevet i appendiks D. Der blev i feltundersøgelsen foretaget en scanning ud fra scanningsplanen vist på figur 8.11. Resultatet blev her en punktsky sammensat af scanninger fra 3 forskellige opstillinger.

Under udførelsen af scanningerne blev det observeret, at det tidsmæssigt var forberedelsen af scanningen, som var afgørende for tidsforbruget. Forberedelsen bestod her i opstilling af scanner, ophængning af targets og indscanning af targets. Det var ca. 3/4 af tiden, som blev benyttet til forberedelse, mens 1/4 af tidsforbruget blev benyttet til at udføre selve scanningen. Det kan ud fra observationen af tidsforbruget vurderes, hvor stor betydning scannerens hurtighed har for det samlede tidsforbrug. Der findes i dag scannere, som kan scanne op til 50.000 punkter pr. sek. hvilket er over 10 gange hurtigere end den i feltundersøgelsen benyttede scanner. Dette vil dog kun reducere selve scanningstiden, mens tidsforbruget til klargøring i form af opstilling af scanner og ophængning af tagets ikke vil ændres.

For at indhente viden om udførelsen af en scanning har projektgruppen været i kontakt med Niels Koefoed Nielsen, der arbejder for Rambøll i Esbjerg, hvor han hovedsageligt beskæftiger sig med 3D laserscanning af offshore konstruktioner. Det er erfaret, at tidsforbruget på den scanning projektgruppen udførte er typisk. Det er ifølge Niels Koefoed Nielsen generelt, at det under et scanningsforløb er forberedelsen, som der er bestemmende for hvor lang tid en scanning tager.

Tidsforbruget for en scanning er afhængig af, hvor mange opstillinger scanningen skal bestå af. I Rambøll regnes der med ca. 2 timer pr. opstilling. Et eksempel er en scanning på en offshore konstruktion, som typisk består af 10-12 opstillinger, hvilket kan forventes at tage 1,5-2 arbejdsdage.

Scanningsdata

Resultatet af scanningen er en punktsky, jf. figur 8.12b, der geometrisk beskriver formen af det objekt, der er scannet, jf. figur 8.12a. I eksemplet fra feltstudiet, figur 8.12, viser punktskyen fra scanningen en 3D udgave af bygningens gavl.



(a) Billede af scanningsopstilling.



(b) Eksempel på en punktsky.

Figur 8.12: Billede og scanningsresultat fra feltundersøgelse.

Punktskyen, der er vist på figur 8.12b, er scannet i to omgange, hvilket har resulteret i en farveforskel mellem den nederste og øverste halvdel af bygningen. Der er her den nederste halvdel, som er scannet i den højeste opløsning.

Efter de forskellige scanninger er foretaget ud fra scanningsplanen, skal resultaterne fra de enkelte opstillinger samles til en samlet punktsky, inden den bliver sammenlignet med 3D modellen.

8.4 Efterbehandling af scanningsdata

Det er i figur 8.1 angivet at scanningsdata efterbehandles inden de sendes videre til sammenligning. Det er her den ikke behandlede punktsky fra de enkelte scanningsopstillinger, som er input og en rensset og samlet punktsky, som er outputet sammen med referencepunkter. Efterbehandlingen består her af sammenkædning af de enkelte delscanninger, fjernelse af støj fra scanningen og udpegning af referencepunkter. Referencepunkterne benyttes efterfølgende til at koble scanningen sammen med modellen.

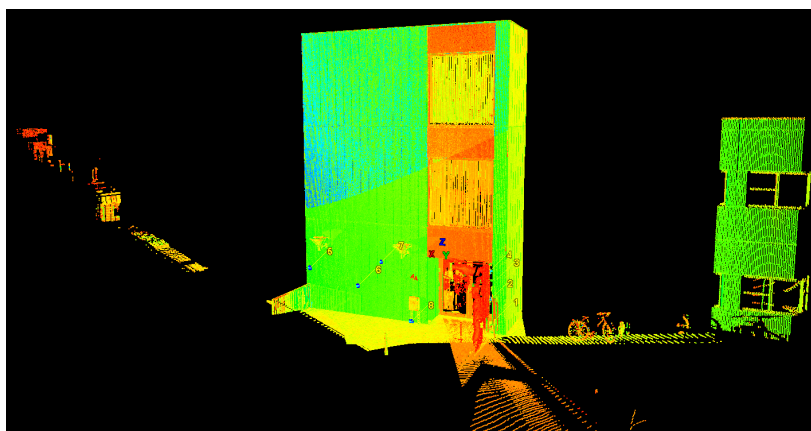
Tolerancer og målepunkter er ud fra figur 8.1 funktion (A23) sat på som værende kontrollerende for, hvad der i scanningen kan betegnes som støj, og hvad der er ønsket scanningsdata. Af mekanismer er der ud fra figuren en operatør, som udfører efterbehandlingen.

Sammenkædning af delscanninger

Hvis scanningen er foretaget fra mere end en opstilling, er det nødvendigt at sammenkæde de enkelte skanninger til en samlet punktsky. Dette foretages typisk i den medfølgende software til scanneren ud fra referencepunkter i de enkelte punktskyer.

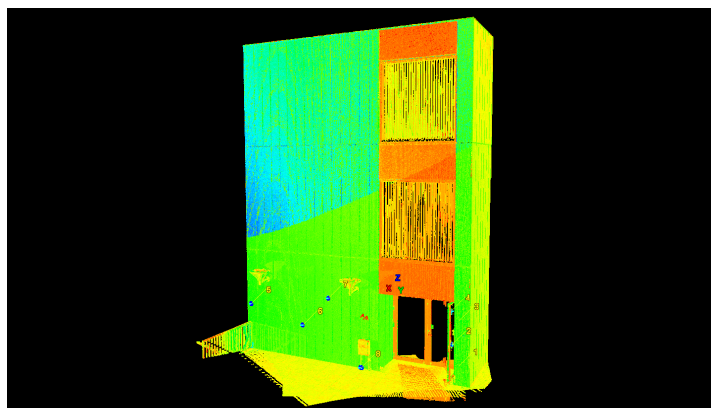
Fjernelse af støj

Det blev i feltundersøgelsen erfaret, at der under en scanning optræder en del registrerede punkter, som er uønskede, jf. figur 8.13. De registrerede punkter fremkommer ved, at ting står i vejen for scanneren, personer bevæger sig forbi det område som scannes eller at scanningsvinduet vælges til at være for stort i forhold til det ønskede.



Figur 8.13: Scanningsresultat med støj.

I softwaren som følger med til en scanner, er der mulighed for at arbejde i den registrerede punktsky og slette uønskede punkter. Afvigelser, der ligger forholdsvis langt væk fra det som scannes, kan let fjernes. Det kan derimod være tidskrævende, at fjerne støj som ligger relativt tæt på de ønskede scanningspunkter. Rensningen af punktskyen foregik i feltundersøgelsen manuelt. Her var det kun punkter, som lå langt væk fra bygningsgavlen, der blev fjernet, jf. figur 8.14.



Figur 8.14: Scanningsresultat uden støj.

Grænsen for hvor detaljeret rensningen af punktskyen skal være, afhænger af hvordan resultatet fra scanningen tænkes sammenlignet med bygningsmodellen. Samtidig er det en vurdering af, hvor meget tid der ønskes afsat til efterbehandlingen. Det vurderes dog at arbejdet med at tolke scanningen

lettes, hvis det væsentligste støj frasorteres.

Referencepunkter

Resultatet fra en scanning er en punktsky, hvor hvert punkt er bestemt ud fra et x-,y- og z- koordinat. Koordinaterne er, hvis ikke andet er defineret, beskrevet ud fra et lokalt koordinatsystem, hvor origo ligger i scannerens centrum. For at kunne kæde punktskyen fra scanningen sammen med bygningsmodellen er det nødvendigt at opstille en række referencepunkter.

En mulighed er at få punkterne fra scanningen over i et globalt koordinatsystem. Dette kan gøres ved at opmåle de targets, som benyttes til at sammenkæde scanningerne med en totalstation, og hermed få flyttet punktskyen over i et globalt koordinatsystem.

Det kan argumenteres for, at en anden noget nemmere løsning kunne være at 3D modellen var refereret til et landsdækkende koordinatsystem, og at der blev foretaget indmåling af scanneren ved brug af for eksempel GPS. Problemet ved denne metode er dog, at præcisionen på GPS selv med kompensering er for upræcis. Ifølge [GPSnet.dk, 2009] er nøjagtigheden af den mest præcise form for GPS (RTK - Real Time Kinematic GPS) på 1-2 cm i planen og 2-4 cm i højden.

Derfor vurderes det at den mest brugbare metode til at etablere af referencepunkter er at landmåleren samtidig med hovedafsætningen af byggeriet afsætter en række permanente kugletargets, som samtidig indføres i 3D modellen. En præcis indmåling af disse targets med en præcision på få millimeter er en nødvendighed, da usikkerheder i disse målinger påvirker alle scanninger, der skal foretages gennem hele byggeriet. Herved kan disse targets benyttes til både sammenkædning af de enkelte punktskyer og sammenkædning af model og scanning.

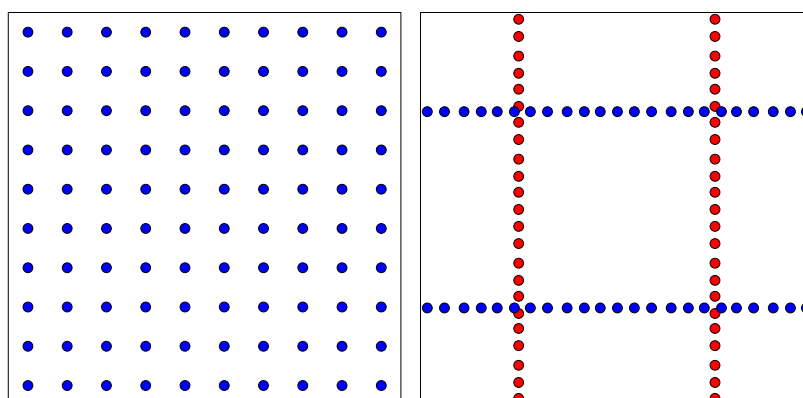
8.5 Opsamling på scanningsprocessen

Formålet med scanningsprocessen er at få indsamlet data, der beskriver det byggeri, som ønskes kvalitetssikret. Det er arbejdets fremdrift, som er styrende for, hvornår der skal scannes. Scanningen skal planlægges ud fra en overvejelse, af hvad der ønskes kvalitetssikret.

Et muligt område hvor geometrisk kvalitetssikring kunne være en fordel, er ved elementmontage. Her er det placeringen af elementerne, der kontrolleres. For at sikre at en opstået fejl bliver opdaget inden den bliver for bekostelig at rette, er det nødvendigt med løbende udførelse af scanninger.

Da udførelsen af en scanning er en tidskrævende proces, skal det nøje overvejes om tidsforbruget for at udføre en scanning, kan retfærdiggøres ud fra den præcise geometriske kvalitetssikring der opnås. En mulighed for at optimere scanningsprocessen er at placere faste targets rundt på byggepladsen. Hvis dette er muligt, kan der, hver gang der skal scannes spares tid. En mulighed kunne være at placere kugletargets rundt omkring på byggepladsen, hvor de ikke generer den daglige byggeaktivitet.

Tiden, det tager at udføre en scanning, er afhængig af, i hvilken opløsning scanningen ønskes. Jo flere punkter der skal registreres, jo længere tid tager det. Denne problemstilling kan afhjælpes ved anskaffelse af nyere udstyr, som kan opfange flere punkter pr. sek. En anden måde at effektivisere scanningen på er ved en ændring af scanningsmønsteret. Generelt er punkterne i en laserscanning, struktureret i et jævnt mønster med en given opløsning. Derfor kan det ud fra en punktsky være svært præcis at opfange hjørner og kanter på for eksempel et element. For at opnå en detaljering af et elements kanter, kunne det være en fordel at scanne i et matrix system. Princippet er baseret på, at der ikke registreres flere punkter end ved en jævnt fordelt scanning, derimod koncentrerer punkterne i en givet matrix opløsning, hvor der i de enkelte rækker og søjler opnås en højre opløsning. Princippet er vist på figur 8.15.



Figur 8.15: Illustration af jævntfordelt opløsning og alternativ matrix opløsning.

Scanneren, der er benyttet gennem dette projekt, har en funktion, så opløsningsvinklen horisontalt og vertikalt kan bestemmes uafhængigt af hinanden. Det er dog nødvendigt at foretage matrix scanningen i to omgange, hvilket er vist på figur 8.15 med rød og blå farve. Tidsforbruget på en scanning vurderes at være afhængigt af antallet af punkter, og i mindre grad af, at der skal foretages to scanninger, da det eneste som skal ændres mellem de to scanninger er opløsningsvinklen.

Fordelen ved at scanne i et matrix system er, at der opnås en høj detaljering i de scannede rækker og søjler uden af forøge antallet af punkter. Ulempen er derimod, at der opstår en usikkerhed ved at der ikke registreres punkter mellem rækkerne og søjlerne. Princippet omkring matrix scanning er kun en idé og er i dette projekt ikke blevet undersøgt nærmere.

Scanneren, som blev benyttet i feltundersøgelsen, bliver styret fra en PC, hvilket er upraktisk, når scanningen foregår ude på en byggeplads. Det er derfor en fordel at benytte en scanner, som kan styres trådløst via en PDA eller et lignende bærbar kontrolpanel, hvilket er en mulighed, der allerede er udviklet til nyere scannere.

Under indsamlingen af data kan scanningsvinduet med fordel præciseres så unødvendigt støj undgås. Store mængder støj kræver ud over den forøgede scanningstid også en ekstra indsats under efterbehandlingsarbejdet. Rensningen af punktskyen inden den videre sammenligning vurderes dog på sigt mindre vigtigt, da dette tilsyneladende kan gøres automatisk i sammenligningssoftwaren.

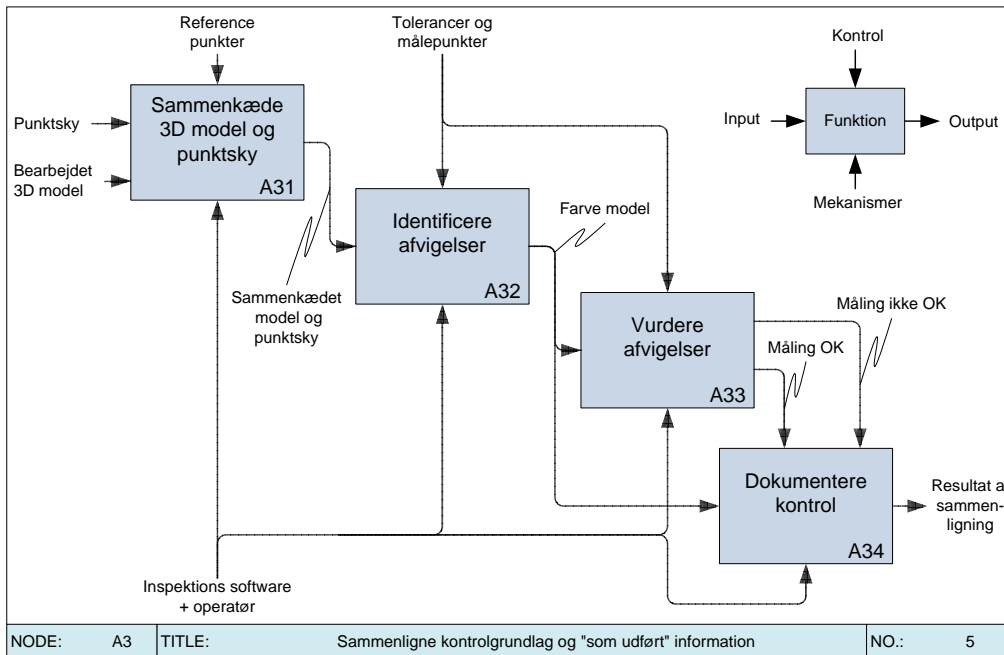
Sammenligningsprocessen

Det følgende kapitels formål er, at afdække hvilke muligheder der er for at foretage en sammenligning af en punktsky og en geometrisk 3D model. Desuden beskrives det, hvorledes resultatet af sammenligningen kan vurderes og dokumenteres.

9.1 Nedbrydning af funktion

For at skabe et overblik over hvilke processer der indgår i sammenligningen af "som udført" informationen og kontrolgrundlaget, er der opstillet et IDEF₀-diagram jf. figur 9.1.

Som det fremgår af figur 9.1 omhandler den første funktion (A31) at få sammenkædet punktskyen og 3D modellen. Funktionen omhandler hovedsagligt at få de to modeller transformeret over i det samme koordinatsystem. Når dette er sket, kan selve sammenligningen foretages. Til denne sammenligning kan der identificeres flere forskellige metoder, som beskrives i de følgende afsnit. En af problematikkerne er bl.a., hvorledes det identificeres, hvilke elementer der skal foretages en sammenligning med. I den sammenhæng er "målepunkterne" og tolerancerne vigtige for at vide, hvor det er nødvendigt at beregne afvigelserne. Ud fra de identificerede afvigelser i A32 skal det visualiseres, hvilke afvigelser der er blevet identificeret, og det skal vurderes om afvigelserne er tilladelige (funktion A33). Det diskuteres senere i dette kapitel om dele af denne vurdering kan foretages automatisk. Ud fra denne vurdering skal der udarbejdes dokumentation på, at kontrollen er gennemført, og hvad resultatet af kontrollen blev.



Figur 9.1: Diagram for sammenligningsproces. Sammenhæng med andre delfunktioner, kan findes på diagram A0 side 51.

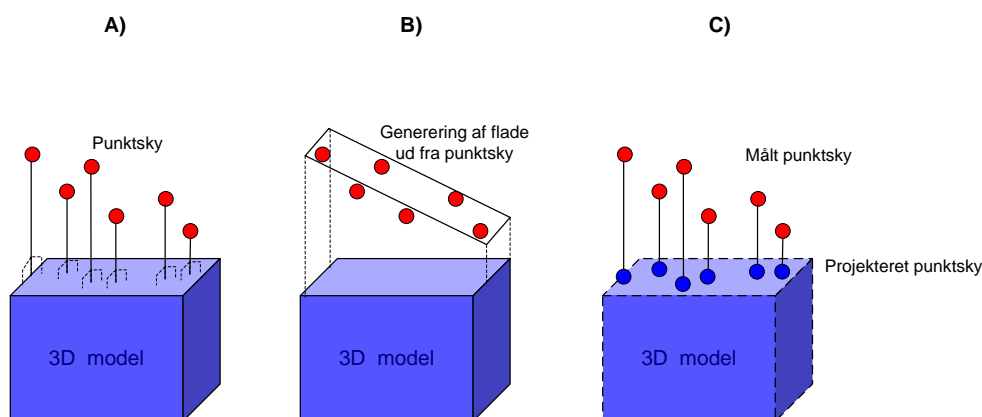
9.2 Sammenkædning af model og punktsky

Da det er ønsket både at kunne identificere afvigelser i placering og udformning, er det nødvendigt, at 3D model og punktsky er refereret til det samme koordinatsystem. Havde det blot været ønsket at kontrollere udformningen af de enkelte elementer, kunne der have været benyttet en "best fit" algoritme til at sammenkæde model og punktsky.

For at kunne transformere punktskyen og modellen ind i samme koordinatsystem, er det nødvendigt med mindst tre punkter i modellen og tre punkter i punktskyen, hvor koordinaterne er kendt i begge koordinatsystemer. Dette opnås ved at benytte faste kugletargets som beskrevet i afsnit 8.4. Selve transformationen fra det ene koordinatsystem til det andet er en ordinær databehandling.

9.3 Identificering af afvigelser

Når punktskyen og 3D modellen er refereret sammen, kan sammenligningen foretages. Til dette kan der identificeres tre hovedprincipper, jf figur 9.2.



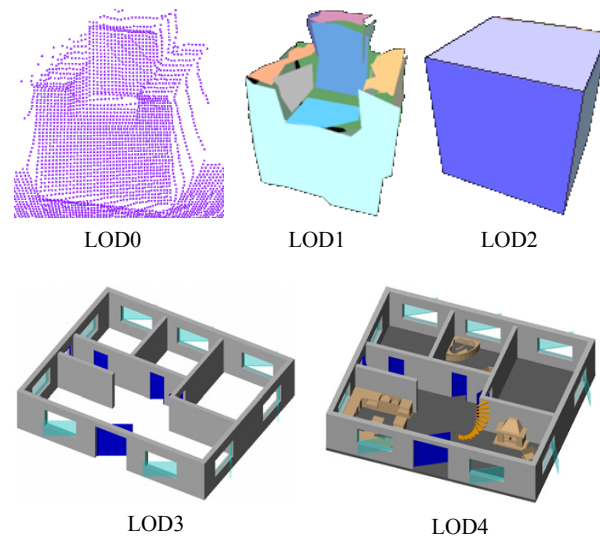
Figur 9.2: Illustration af forskellige principper for sammenligningen af en punktsky med en 3D model.

Princip A) jf. figur 9.2 er baseret på, at det forholdsvis simpelt er muligt at beregne den korteste afstand mellem et plan og et punkt. Udfordringen ligger her i at identificere hvilken flade, der er den nærmeste og kun beregne afstande til denne. Ved denne metode er det således ikke nødvendigt at foretage den store databehandling af hverken 3D model eller punktsky.

Princip B) jf. figur 9.2 er baseret på at punktskyen omsættes til flader, som senere kan sammenlignes med de flader, der er defineret i 3D modellen. En problematik ved dette kan dog være, at der indføres "falske" data i punktskyen, eller at der mistes data. Grunden til dette er, at det er nødvendigt at gøre nogle antagelser for at kunne danne fladerne ud fra punktskyen. Stemmer antagelserne ikke overens med de faktiske målinger, kan data gå tabt f.eks. ved at det antages at en flade er plan, og den ikke er det. Ligeledes vil de fleste mesh-funktioner have det problem at hjørner rundes, fordi der ikke er tilstrækkeligt med målinger lige omkring kanten. For at gøre metoden praktisk anvendelig, er det nødvendigt, at genereringen af flader ud fra punktskyen foregår mere eller mindre automatisk.

En automatisk metode til generering af IFC modeller ud fra en punktsky er nærmere undersøgt i [Li et al., 2008]. Metoden arbejder med fem detaljerings niveauer (levels of details - LOD) jf. figur 9.3, hvoraf niveau 0 er den oprindelige punktsky.

Af de fem niveauer illustreret på figur 9.3 er det eftervist, at der automatisk

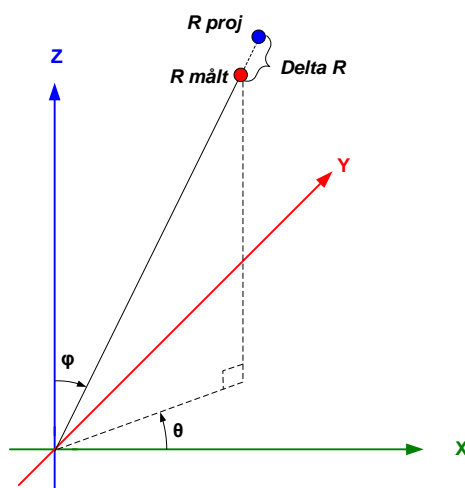


Figur 9.3: Illustration transformeringen fra punktsky (LOD0) til detaljeret IFC model (LOD4). [Li et al., 2008]

kan opnås modeller indtil LOD2 der er en blokmodel. Processen foregår ved at punktskyen segmenteres og der uddrages flader fra de enkelte segmenter. Resultatet af dette er LOD1. Ud fra overflademodellen grupperes sammenfaldende regioner og skæringerne mellem overfladerne beregnes, hvorudfra der dannes solider. Udviklingen af metoder til detaljering af modellen til LOD3 og LOD4 pågår. Perspektivet i denne udvikling er, at det vil være muligt at benytte programmer som f.eks. Solibri Model Checker til at foretage sammenligningen med. Dermed vil det også være muligt at tilføje mere intelligent information til "som udført" modellen.

Princip C) jf. figur 9.2 er baseret på at 3D modellen omsættes til en "som projekteret" punktsky, som kan sammenholdes med "som udført" punktskyen som [Bosche og Haas, 2008] beskriver det. Den store fordel ved denne tilgang er, at sammenligningsprocessen bliver utroligt robust, hvis "som projekteret" punktskyen genereres på den rigtige måde. Her kan det nemlig udnyttes at 3D modellen repræsenterer en god forhåndsviden omkring, hvordan resultatet af scanningen forventes at blive. Ved at simulere en scanning med samme opsætning af opløsningen og fra samme udgangspunkt som den fysiske scanning kan det opnås, at de to punktskyer ligger i præcis samme koordinatsystem. Da laserscannere arbejder i sfæriske koordinater, kan det udnyttes, at for hver måling findes en tilsvarende måling fra "som projekteret" punktskyen. Derved er det blot at sammenligne afstanden (*R målt*) fra

målingen med afstanden defineret i "som projekteret" punktskyen (R_{proj}) jf. figur 9.4.



Figur 9.4: Illustration af sammenligning af måling og projekteret afstand i et sfærisk koordinatsystem. θ måles i x-y planet og φ måles i z-R planet.

Ved at definere en betingelse for hvilket interval ΔR jf. figur 9.4 må ligge i, kan metoden ligeledes benyttes til at genkende, om de enkelte bygningselementer er monteret eller ej, og der er derfor ligeledes et aspekt af objektgenkendelse i denne fremgangsmåde.

Af de tre principper vurderes det at princip A) og C) er de letteste at automatisere, hvorimod princip B) med den nuværende teknologi kræver en stor grad af manuel modellering for at kunne gennemføres tilfredsstillende. Det kan nævnes, at bl.a. Rapidform har udviklet software med det specifikke formål at kunne modellere parametriske modeller ud fra en punktsky, hvilket dog stadig indebære en del manuelt arbejde [Rapidform, 2009]. I den sammenhæng er det valgt at afgrænse fra en dybere analyse af hvilke metoder, der findes til automatisk at modellere objekter ud fra punktskyer.

Et problem ved princip C) er, at en plan flade, der er parallelforskuet i beregningen, vil opnå forskellige afvigelser pga. den vinkel, de enkelte sammenligninger vil have i forhold til hinanden. Hvis der skal kompenseres for dette, er det nødvendigt at beregne de tilladelige afvigelser for hvert enkelt punkt, da de tilladelige afvigelser vil være defineret i et kartesiske koordinatsystem. Effekten af det problem vil aftage, jo mere parallelt målingerne er

foretaget.

Der er fordele og ulemper ved de tre sammenligningsmetoder, som er vist på figur 9.2. Fordelen ved princip A), hvor det er den vinkelrette afstand mellem det målte punkt og modellen, der bestemmes, er at der ikke er behov for den store behandling af model og punktsky, før sammenligningen kan udføres. Samtidig er det denne metode, der i dag hovedsageligt benyttes i kommercielt software. En ulempe er derimod en risiko for, at sammenligningen foretages med en forkert flade, og at det er problematisk at udskille elementer. Princip B) har den fordel, at det ved modelleringen af punktskyen automatisk er muligt at opdele punkterne i elementer, hvilket samtidig reducere data mængden. Ulempen er her, at data går tabt ved modelleringen, og der indføres falsk præcision. Fordelen ved princip C) er sikkerheden for, at et scannet punkt bliver sammenlignet med det rigtige punkt på den rigtige flade, sammenligningen er simpel, og det er muligt at benytte 3D modellen til at opdele punktskyen i elementer. Ulempen er her, at afvigelserne ved en sammenligning, er afhængig af scannerens vinkel ind på fladen som scannes.

Valget af hvilket princip der skal benyttes til sammenligningen afhænger af, hvilket formål sammenligningen har. Princip A) er velegnet til den direkte sammenligning mellem et enkeltstående objekt og 3D modellen for objektet, mens princip B) egner sig bedre til sammenligninger, hvor opdeling i flere objekter er vigtigt. Princip C) er velegnet til en registrering af, om objektet er der, eller ikke er der. Softwaren, der benyttes i dette projekt, bygger på princip A), hvor der laves en direkte sammenligning mellem punkter fra punktskyen og den korteste afstand til en flade i modellen.

9.4 Vurdering af afvigelser

Hele formålet med scanningen og beregningen af afvigelserne er at kunne identificere, hvorvidt de opstillede krav til tolerancer er overholdt. Da denne vurdering i dag er baseret på enkeltpunkter, er det nødvendigt at foretage en nytænkning af disse tolerancer jf. afsnit 7.4. Grundlæggende handler dette om at opstille en række regler for hvilket interval afvigelserne må ligge i.

En anden tilgang til denne sammenligning kan være at benytte den menneskelige intelligens til at vurdere dette. F.eks. kan en model farvelægges alt efter afvigelsens størrelse for derved at give det menneskelige øje mulighed

for at danne et overblik og derudfra vurdere om afvigelserne er tilladelige. Denne vurdering kræver dog et godt kendskab til hvilke afvigelser der er tilladelige og hvor det er kritisk med afvigelser.

På sigt vurderes det at det at være nødvendigt at udvikle en mekanisme, der kan afgøre, om tolerancerne er overholdt for at effektivisere processen, således det at det kun er afvigelser ud over tolerancerne, det er nødvendigt manuelt at tage stilling til.

9.5 Dokumentation af kontrol

Som en del af kvalitetssikringen er det vigtigt, at sammenligningen bliver dokumenteret. I den forbindelse er der to forskellige situationer, som stiller forskellige krav til outputtet.

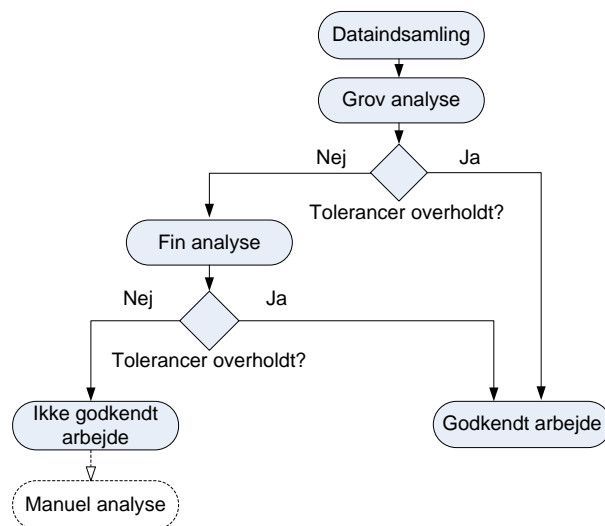
Hvis tolerancerne er overholdt, skal dokumentationen blot være et bevis på, at der er gennemført en kontrol, og at tolerancerne er overholdt. I den forbindelse er det vigtigt at dokumentere hvilke "målinger", der er foretaget, hvornår scanningen er fundet sted, hvem der har været ansvarlig for det og hvad resultatet blev. I den forbindelse skal der tages stilling til, hvorledes det ønskes at lagre informationen. Det er vigtigt at tage stilling til, hvem der skal have dokumentationen, og hvad den skal bruges til. Her vurderes det, at det væsentligste aspekt, er at dokumentere at tolerancerne er overholdt, og en rapport i f.eks pdf-format vurderes derfor at være tilstrækkeligt. Skulle det vise sig, at der er foretaget ændringer i den praktiske udførelse af arbejdet, som ikke er indeholdt i 3D modellen, foreslås det at punktskyen, sammen med en beskrivelse af ændringen, sendes til rådgiveren, så denne kan opdatere 3D modellen. Derved bliver scanningen et væsentligt værktøj til at sikre en konsistent "som udført" dokumentation.

I den forbindelse vurderes det, at der generelt ikke skulle forekomme så mange væsentlige ændringer, at det giver mening at omdanne punktskyen til en millimeterpræcis "som udført" model, da dette ikke er behovet for en drift- og vedligeholdelsesafdelingen, der skal modtage dokumentationen.

Hvis tolerancerne ikke er overholdt, bliver formålet med dokumentationen et helt andet. I denne situation vil det vigtige ved dokumentationen være, at det bliver klart, hvori fejlen består, og hvad årsagen til denne evt. kan være. Fokus er i denne sammenhæng, at fejlen bliver gennemanalyseret og at dens konsekvenser bliver mindsket mest muligt. Derudover er det vigtigt,

at der bliver foretaget en opsamling på fejlen, således at den kan indgå som en væsentlig del af erfaringsopsamlingen og på den måde på sigt være med til at mindske antallet af fejl.

I forhold til det kortsigtede perspektiv med at undgå at fejlen får konsekvenser eller gentages på det enkelte projekt, er responstiden, fra scanningen er udført, til resultatet foreligger meget vigtig. Den optimale situation ville være, hvis beregningen af afvigelser blev foretaget "on the fly" altså parallelt eller i direkte forbindelse med dataindsamlingen. En mulighed kunne i den forbindelse være at opdele sammenligningen i to dele med forskellig detaljering. På figur 9.5 er et diagram for en sådan funktion illustreret.



Figur 9.5: Diagram for en mulig opdeling af sammenligningsfunktionen, der sikrer en kortere responstid.

Ved først at undersøge om nogle få skærpede krav er overholdt, afgøres det, om bygningsdelen umiddelbart kan godkendes. Er dette ikke tilfældet, udvides analysen med en mere detaljeret sammenligning. Viser denne ligeledes, at kravene ikke er overholdt, foretages en manuel undersøgelse af fejlen. Formålet med en opdeling af sammenligningen som illustreret på figur 9.5, er at opnå en mere simpel sammenligningsmekanisme, der kan bruges "on the fly".

For bedst muligt at kunne kommunikere videre hvori fejlen består, er det vigtigt, at informationen om fejlen er udtømmende. Derfor kunne det være

relevant, at dem der skal rette fejlen, har mulighed for at kigge nærmere på selve sammenligningen. Dette kan gøres muligt, ved at benytte en viewer til inspektionssoftwaren. Samtidig kan det ligeledes være relevant at lave en rapport i papirversion, da denne erfaringsmæssigt er nemmere at håndtere på en byggeplads.

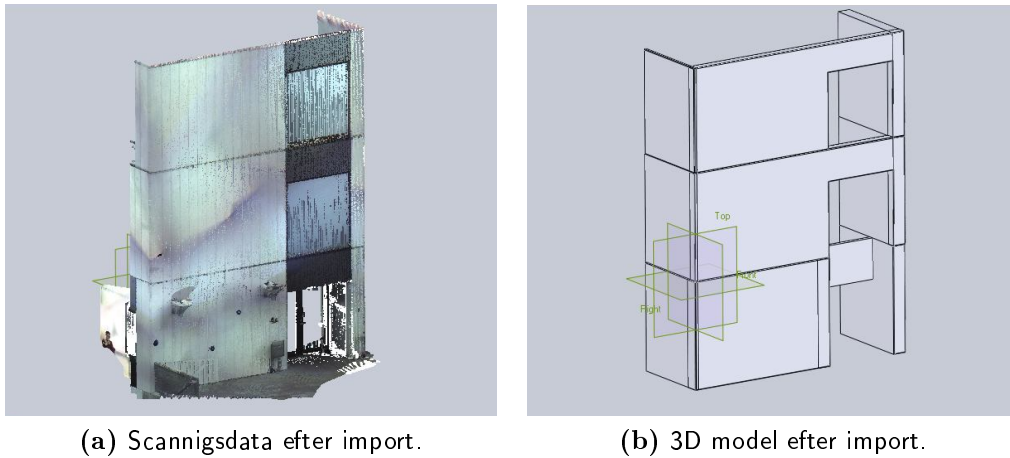
Efter en eventuel fejl er blevet rettet, skal der gennemføres en ny scanning for at dokumentere at fejlen er blevet rettet. Desuden skal der udarbejdes en rapport til erfaringsopsamlingsystemet, som bl.a. beskriver følgende:

- Hvad var fejlen?
- Hvad var den bagvedliggende årsagen til fejlen?
- Hvordan blev fejlen rettet?
- Hvordan kan det undgås at fejlen opstår i fremtiden?

Rapporten til erfaringsopsamlingsystemet skal ligeledes indekseres, således at det er muligt at føre statistik over fejl og søge blandt disse. Med udarbejdelsen af denne dokumentation vil den geometriske kvalitetssikring være afsluttet.

9.6 Praktisk afprøvning af inspektionssoftware

For at demonstrere hvad der er muligt med eksisterende software, er der gennemført en afprøvning af et stykke kommercielt software ved navn Rapidform XOv2 [Rapidform, 2009]. En detaljeret beskrivelse af arbejdet kan findes i appendiks E. Softwaren er baseret på princip A) jf. figur 9.2 og beregner derved afstanden fra hvert enkelt punkt ind til den nærmeste flade. Det første skridt i inspektionssoftwaren er at få importeret scanningsdataene og 3D modellen. På figur 9.6 er scanningsdata og 3D modellen vist efter import til inspektionssoftwaren. 3D modellen var efter import til inspektionssoftwaren stadig opdelt i 11 objekter, ligesom scanningen var opdelt i de enkelte delscanninger, dog korrekt placeret i forhold til hinanden. Scanningsdataene indeholder ca. 2 mio punkter, og fylder ca. 87 Mb i PTS formatet, mens 3D modellen indeholder 11 solider, og fylder ca. 0,17 Mb i ACIS formatet.



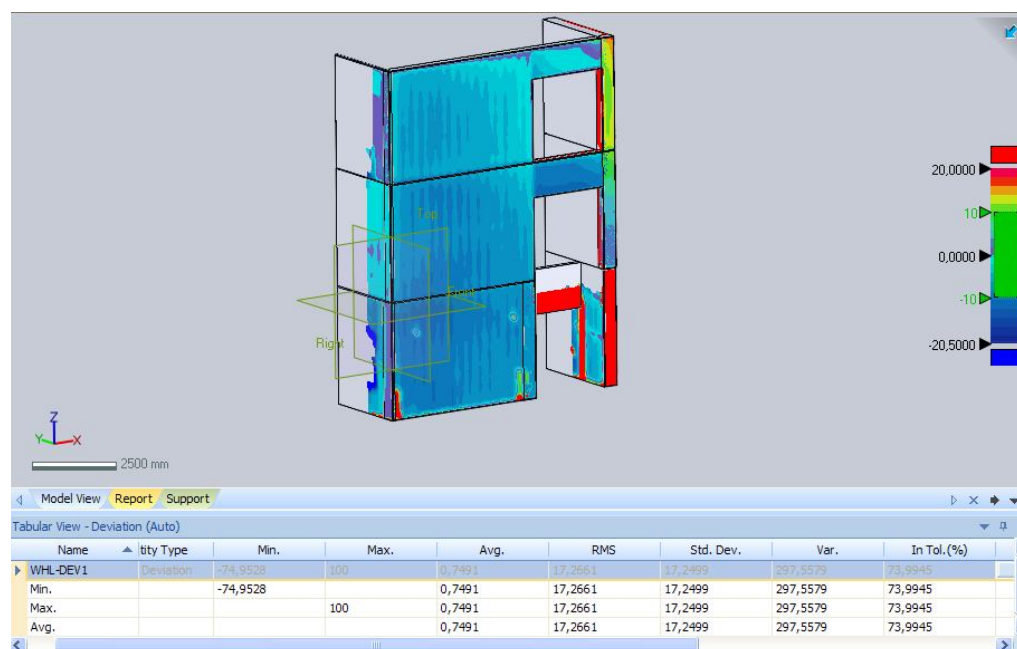
Figur 9.6: Scanningsdata og 3D model efter import inspektionssoftwaren. Screenshot fra Rapidform XOV2.

Inden sammenligningen blev gennemført var det nødvendigt at foretage en sammenkædning af 3D modellen og scanningsdataene, da disse var beliggende i hver deres koordinatsystem. Sammenkædningen blev foretaget ved at vælge 3 sammenfaldende punkter i 3D modellen og scanningsdataene. Efter dette kunne selve sammenligningen foretages. På figur 9.7 er resultatet af sammenligningen illustreret.

I forhold til selve sammenligningen, var der en del tvivl om, hvor meget støj det var nødvendigt at fjerne, men det viste sig, at det var muligt at indlægge en øvre grænse for hvor store afvigelser, der tillades inden punkterne udelukkes fra beregningerne. Dette viste sig at være meget effektivt, således at lamper og andet inventar stort set ikke påvirkede sammenligningen jf. figur 9.8. I det gennemførte forsøg, blev værdien for de maksimalt tilladelige afvigelser valgt til 100 mm.

Med resultaterne fra figur 9.7 er det således demonstreret, at det er muligt at foretage en sammenligning af et udført stykke arbejde med den forudsatte geometri, vha. eksisterende software og hardware.

I inspektionssoftwaren er det ligeledes muligt at indlægge forskellige tolerancer på de enkelte flader i modellen, der er således basis for at kunne foretage en automatisk kontrol af, om tolerancerne er overholdt. Denne mulighed er dog ikke yderligere udforsket i denne rapport, da det ikke umiddelbart var muligt at indlægge tolerancerne beskrevet i [Dansk Byggeri, 2007], jf. afsnit



Figur 9.7: Resultat af afvigelsesberegning. Farvekoden viser afvigelser fra -20 mm (mørkeblå) til +20 mm (rød). Screenshot fra Rapidform XOV2.



Figur 9.8: Visualisering af afvigelser og scaningsdata i Rapidform XOV2. Som det ses giver lamperne ikke anledning til afvigelser pga. valget af maksimalt tilladelige afvigelse på 100 mm.

7.4.

Da det var nødvendigt at optegne en ny model jf. afsnit 7.5, blev en væsentlig problemstilling, omkring hvordan det identificeres hvilke elementer der skal indgå i sammenligningen, ikke behandlet. Hvilket er en væsentlig forskel på den måde, hvorpå teknikken anvendes i industrien, og den måde det tænkes anvendt i byggeriet.

For at det vil være anvendeligt i byggeriet skal der være mulighed for, at kunne load hele modellen i systemet og derefter udvælge hvilke elementer der skal foretages en sammenligning med. Dette stiller således et krav om, at 3D modellen skal være opdelt i lige så mange elementer, som byggeriet rent fysisk er, og at det kan fra- og tilvælges hvilke elementer, der skal sammenlignes med.

9.7 Opsamling på sammenligningsproces

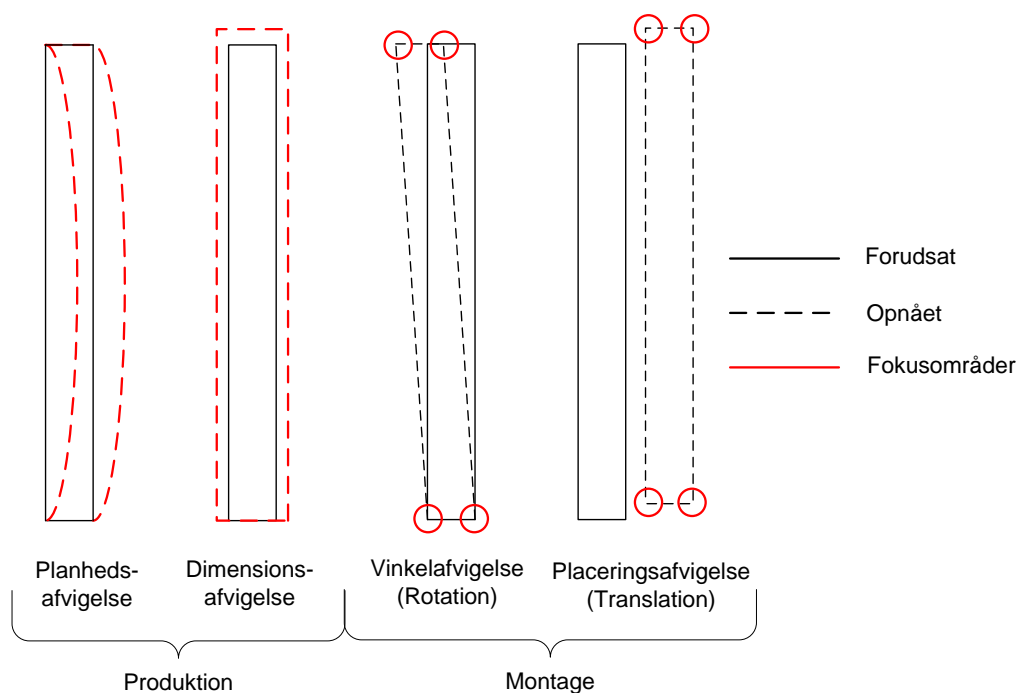
I forhold til selve sammenligningsprocessen er der gennem litteraturstudiet og den praktiske afprøvning identificeret følgende muligheder og forhindringer.

Til sammenkædningen af 3D model og punktsky er det identificeret at den bedste metode, hvis det ligeledes ønskes at kontrollere placeringen af de enkelte bygningsdele, er at opsætte permanente targets, som er indmålt i forbindelse med hovedafsætningen af byggeriet.

Af de tre identificerede metoder til sammenligning af punktsky og 3D model er metoden med beregning af korteste afstand mellem flade og punkt efterprøvet vha. et stykke kommercielt software. Metoden viste sig specielt anvendelig ved anvendelsen af betingelser for maksimalt tilladelige afvigelser. Her viste metoden sig at være robust overfor støj, hvilket er en stor fordel for anvendelsen i byggeriet, da det må forventes at der altid vil være mere eller mindre støj i form af mennesker og materiel, der færdes på byggepladsen.

Gennem det praktiske arbejde med at afprøve software kunne det konstateres, at der endnu er et stykke vej til den automatiske sammenligningsproces. Det skal dog understreges, at arbejdet med sammenligningen generelt tog væsentligt kortere tid end selve dataindsamlingen med laserscanneren.

Med den benyttede sammenligningsmetode er det specielt afvigelser af fladerne, der bliver synlige. Under forudsætning af at udformningen af betonelementerne er kontrolleret på fabrikken, er det dog hovedsagligt placeringen af elementerne, der er interessant i montagefasen, jf. figur 9.9. Det kan derfor diskuteres om det kunne være relevant at udvikle en sammenligningsmetode, der er fokuseret på elementernes kontur til kontrol af tolerancerne i montagefasen.



Figur 9.9: Fokusområder for den geometriske kvalitetssikring i hhv, produktionsfasen og montagefasen.

En ikke behandlet problemstilling er, hvorledes de enkelte bygningselementer identificeres, og hvordan der holdes styr på hvilke dele, der er kontrolleret. Dette er dog et væsentligt problem, som bør undersøges nærmere, da et byggeri ofte består af mange tusind komponenter

I forhold til dokumentationen af de gennemførte kontroller, kan det overvejes, hvorledes denne skal overleveres til bygherren. I den forbindelse bør muligheden for at koble dokumentationen op på en BIM-model undersøges.

Vurdering af anvendelsesmuligheder

I dette kapitel diskuteres det undersøgte systems anvendelighed til geometrisk kvalitetssikring af elementbyggeri. Derefter beskrives nogle øvrige anvendelsesmuligheder, som er fundet gennem projektet, og tidshorisonten for de forskellige anvendelser vurderes. Sidst i kapitlet foretages en generel vurdering af konceptet som helhed vha. en SWOT-analyse

10.1 Kontrol af elementmontage

Gennem analysen af konceptet, er det konstateret, at det er muligt at foretage geometrisk kvalitetssikring i byggeriet ved hjælp af 3D scanning. Dette baseres på at det var muligt at gennemføre en sammenligning af et opført byggeri med den 3D model, der udgjorde grundlaget for opførelsen. Der blev dog ligeledes identificeret en række forhindringer og forbedringsmuligheder.

Ved elementmontage er der generelt en række geometriske tolerancer der skal kontrolleres. Disse omfatter bl.a.

- Kontrol af placering.
- Kontrol af rotation.
- Kontrol af spring i samlinger og parallelitet.
- Kontrol af "spejling".
- Kontrol af "flugt" af vinduer.

Ud fra det gennemførte forsøg viste det sig at være svært at kontrollere disse punkter i sammenligningen. Ligeledes blev der konstateret en række praktiske forhindringer i forbindelse med den 3D model, der skal benyttes som grundlag for sammenligningen. Derfor vurderes det, at teknologien i sin nuværende form ikke er praktisk anvendelig til kontrol af elementmontage.

I stedet anses teknologien for at være anvendelig til kontrol af "let tilgængelig" og enkeltstående geometri. Specielt til kontrol af overflader, vurderes teknologien at være velegnet. Hermed vurderer projektgruppen, at teknologien specielt kan have anvendelse hos nogle af de virksomheder, der laver præfabrikerede dele til byggeriet bl.a. betonelementer. Dette vurderes ud fra, at der stadig mangler udvikling af software, som kan benyttes til at kontrollere montage af præfabrikerede dele, da dette stiller krav om at kunne identificere de enkelte dele og foretage en mere specifik analyse af deres placering.

10.2 Øvrige anvendelsesmuligheder

Det gennemførte forsøg med anvendelse af 3D scanning har fokuseret på den geometriske kvalitetssikring af elementmontage, og det har pga. projektets tidsramme ikke været muligt at afprøve andre anvendelsesmuligheder. Projektgruppen er dog under arbejdet blevet opmærksom på andre anvendelsesmuligheder. Disse gennemgås derfor i det følgende.

Jordarbejde

Et område, hvor teknologien vurderes at være umiddelbart anvendelig, er ved større jordarbejder. Denne vurdering foretages på baggrund af at jordarbejde ofte har en let tilgængelig geometri, hvor der er få ting, der skygger for scanneren, således der kan indhentes information om et større område med nogle få scanninger. Ligeledes vurderes det, at tolerancerne på jordarbejde er i centimeterområdet, således at præcisionen på scanneren ikke udgør et problem. Tolerancerne på jordarbejde er ligeledes simple og symmetriske, hvilket gør det muligt at indlægge automatiske kontroller af tolerancerne i inspektionssoftwaren. For at underbygge dette er det undersøgt, hvilke krav vejdirektoratet stiller til den geometriske udformning, i forbindelse med vejopbygning [Vejdirektoratet, 2009]. Disse er som følgende:

- Planum: ± 40 mm i forhold til det forudsatte profil.
- Bundsikring: ± 20 mm i forhold til det forudsatte profil.

- Bærelag: ± 10 mm i forhold til det forudsatte. profil.
- Generelt: Kontrol i 20 m stationering i alle knæpunkter på profilet, samt vurdering af forløbet mellem kontrolstationeringerne.

Kravene viser, at det er en temmelig omfattende kontrol, der skal foretages. Denne kontrol foretages i dag vha. en totalstation eller med traditionelt nivellerment, hvor det er nødvendigt for den person, der kontrollerer arbejdet, at bevæge sig rundt til de enkelte punkter, der skal kontrolleres. Ved at udnytte mulighederne i 3D scanning kan dette arbejde effektiviseres, og der kan indsamles flere informationer. En mulig plan for kontrol af jordarbejde vha. 3D scanning, kunne være som følgende:

- Scanning af oprindeligt terræn.
- Scanning af planum.
- Scanning af overside bundsikring.
- Scanning af overside bærelag.

Med den foreslåede scanningsplan vil det således være muligt at kontrollere følgende vigtige informationer. Volumen af udgravning/påfyldning, tolerancer på planum, tykkelse af bundsikring, volumen af bundsikring, tolerancer på overflade af bundsikring, volumen af bærelag, tykkelse af bærelag samt tolerancer på overflade af bærelag.

En stor fordel ved at benytte 3D scanning til kontrol af udformningen, i stedet for f.eks. en totalstation, er at scanneren langt hurtigere vil kunne indsamle detaljeret information. Dermed vil det være muligt at foretag fuldstændig kontrol af tolerancerne, i stedet for at basere kontrollen på stikprøver (20 m stationeringer). Samtidig er de fleste af denne type jordarbejder afregnet efter mængde, hvorved scanningen ligeledes kan være grundlag for en præcis beregning af mængden og dermed sikre entreprenør og bygherre en præcis afregning for arbejdet.

Betonarbejde

Ved in situ støbning af beton er der grundlæggende en række geometriske forudsætninger, som skal kontrolleres. Disse er bl.a.

- Placering og størrelse af armering.
- Kontrol af dæklag.

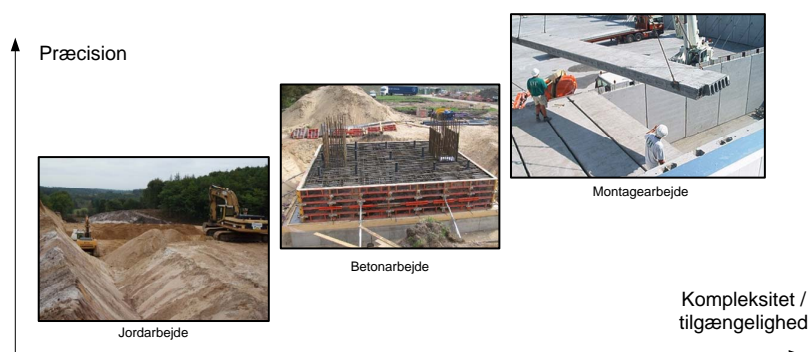
- Kontrol af formarbejde.
- Kontrol af udsparinger.

Kontrollen af de geometriske forudsætninger foretages i dag visuelt, og arbejdet er derfor tidskrævende. Resultatet af kontrollen er ligeledes stærkt afhængigt af den tilsynsførendes erfaring og grundighed, da en stor del af arbejdet må foregå på grundlag af stikprøver og visuelle indtryk. Anvendelsen af 3D scanning kan derfor sikre en mere detaljeret og ensartet kontrol.

Kontrollen af de geometriske forudsætninger skal udføres inden støbningen kan foretages. Det vurderes at være muligt at udføre kontrollen ved at scanne form og armering før støbning og sammenligne resultatet med en 3D model. Udfordringen er i dette tilfælde, at scanningen skal have en detaljeringsgrad så det er muligt at identificere armeringsdiameteren, samt at armeringen generelt vil "skygge" meget for hinanden, hvorfor det muligvis vil være nødvendigt med flere scanninger fra forskellige vinkler. Ligeledes vurderes det at præcisionen på scanneren kan blive et problem. En praktisk afprøvning af hvilke problemer der kan være i forbindelse med scanning af armeringen, er derfor nødvendig.

Vurdering af tidshorisont

Som belyst gennem rapporten er der en række udfordringer, der skal løses, hvis det skal være muligt at anvende 3D scanning til geometrisk kvalitets-sikring af elementmontage. Derfor vurderes det, at denne anvendelse af 3D scanning ligger længere ude i fremtiden, end anvendelse inden for jordarbejde og in situ støbt beton.



Figur 10.1: Vurdering af de tre eksempler på anvendelsesmuligheder i forhold til hinanden.

På figur 10.1 er de tre anvendelsesmuligheder vurderet i forhold til den nødvendige præcision af scanningen, samt hvor kompleks sammenligningsprocessen er, og hvordan tilgængeligheden for at udføre scanningen er. De to vurderingskriterier indikerer således indirekte tidshorizonten for anvendelse af teknologien i forskellige sammenhænge.

For at kunne identificere områder hvor teknologien kan være anvendelig, kræver det et godt kendskab til selve arbejdsprocessen og de krav, der stilles til kontrolomfanget og det færdige resultat. Derfor udgør de gennemgåede eksempler på anvendelsesmuligheder ikke en udtømmende liste, men er sandsynligvis mere en afspejling af projektgruppens viden om byggeprocessen. Fagpersoner fra relevante arbejdsområder vil sandsynligvis kunne identificere flere relevante områder, som kræver yderligere undersøgelser.

10.3 Samlet vurdering af det udarbejdede system

Gennem det udførte forsøg, er det konstateret at det er muligt at benytte 3D scanning til geometrisk kvalitetssikring i byggeriet. Der blev dog konstateret en række forhindringer som vanskeliggør anvendelsen. Derfor er der med inspiration i en SWOT-analyse (se appendiks A.7), gennemført en vurdering for at klarlægge hvilke fordele og ulemper en virksomhed, der vælger at benytte 3D scanning til geometrisk kvalitetssikring, skal være opmærksom på. På figur 10.2 er resultatet af denne vurdering illustreret.

I det følgende gennemgås de enkelte emner fra de 4 kategorier på figur 10.2

Strengths

Et af systemets styrker er, at det sikrer en detaljeret kontrol, da der bliver målt på langt flere punkter, end det er muligt at gøre med traditionelle opmålingsmetoder. Desuden sikrer den automatiske opmåling, at antallet af manuelle målefejl minimeres, hvorved troværdigheden af dokumentationen styrkes. Den detaljerede kontrol er ligeledes medvirkende til at fejl, der ikke ville være opdaget med traditionelle metoder synliggøres, og systemet kan på denne måde være med til, at der sættes fokus på fejlene. Den detaljerede opmåling sikrer ligeledes, at grundlaget hvorpå eventuelle fejl kan diskuteres, er fyldestgørende, således at årsagen til fejlen nemmere kan identificeres. Ved at kontrollen bliver systematisk og detaljeret, forventes det ligeledes at

Strengths	Weaknesses
<ul style="list-style-type: none"> - Detaljeret kontrol - Pålidelig dokumentation - Synliggørelse af fejl - Minimere manuelle målefejl - Hurtigere konstatering af fejl - Bedre grundlag for at diskutere fejl 	<ul style="list-style-type: none"> - Tidskrævende - Økonomisk tungt - Kræver uddannelse af brugere - "Begrænset" mobilitet - Kræver specialprogrammer for at kunne arbejde med punktskyer
Opportunities	Threats
<ul style="list-style-type: none"> - Understøtter anvendelsen af 3D modeller - Understøtter erfaringsopsamling - Kan udgøre standard for aflevering (ekstern og intern) - Mulighed for volumenberegning - Forbedret palnlægningsgrundlag - Kan på sigt benyttes til statusopgørelse - Kan bruges som salgsargument 	<ul style="list-style-type: none"> - Modstand fra håndværkere (overvågning) - Kræver involvering af mange parter - Traditionelle opmålingsmetoder

Figur 10.2: Vurdering af fordele og ulemper, ved at anvende 3D scanning til geometrisk kvalitetssikring.

systemet kan bevirke, at en fejl hurtigere konstateres, hvorved konsekvensen af den kan mindskes.

Opportunities

Da grundlaget for systemet er, at der udarbejdes en 3D model for det udførte arbejde, kan systemet være med til at drive udviklingen og anvendelse af 3D modeller. Dette er ønskeligt, da det forventes at 3D modeller kan være med til at effektivisere byggeriet. Da formålet med systemet er at opdage alle fejl, understøtter det ligeledes at der foretages en erfaringsopsamling med fokus på fremtidige forbedringer. Set i forhold til selve byggeprocessen kan systemet ligeledes være med til at sikre en entydig bedømmelse af, hvorvidt et arbejde afleveret af et fag er af en sådan kvalitet, at den efterfølgende proces kan forløbe uden problemer. For en virksomhed, der vælger at benytte systemet, er det en mulighed at bruge det som et salgsargument overfor potentielle kunder, da det kan være med til at dokumentere at virksomheden har styr på deres kvalitetssikring. Som sidegevinst kan 3D scanningerne udgøre et væsentligt grundlag for planlægningen af det daglige arbejde, statusopgørelser og volumenberegninger.

Weaknesses

Gennem de praktiske erfaringer og litteraturstudiet er der ligeledes identificeret en række svagheder ved et system til geometrisk kvalitetssikring baseret på laserscanning. En af disse svagheder er, at det med den nuværende teknologi tager forholdsvis lang tid at gennemføre scanning og sammenligning, kontra den tid en kvalitetssikring, baseret på konventionelle målemetoder, vil tage. Desuden er det udstyr og software, der kræves forholdsvis dyrt sammenlignet med f.eks. en totalstation. De fleste scannere ligger i prisklassen omkring 1 mio. kr og den nødvendige software omkring 100.000 kr. Til sammenligning kan det nævnes, at en totalstation koster ca. 100.000 kr.

For at kunne benytte systemet er det nødvendigt med uddannelse af brugerne, hvilket er en omkostning, der skal indregnes. En svaghed ved systemet sammenlignet med en totalstation er, at mobiliteten endnu ikke er lige så stor grundet de nødvendige batterier og kontrolenheder. Set i forhold til de gængse tegneprogrammer i byggebranchen er der ligeledes det problem, at resultatet i form af en punktsky ikke kan importeres uden tilkøb af dyre specialprogrammer.

Threats

En af truslerne for at systemet ikke vil blive succesfuldt implementeret er, at de håndværkere, hvis arbejde systemet skal kontrollere, føler, at det er et mistillidsvotum og en form for overvågning. Ligeledes kræver systemet involvering af flere parter, hvis det skal fungere optimalt, hvilket besværliggør implementeringen. Derudover udgør den store prisforskel i forhold til de traditionelle opmålingsmetoder en forhindring, hvis virksomheden, der skal benytte systemet, ikke er sikre på effekten af systemet.

Resultat af SWOT-analyse

Som SWOT-analysen viser, er der en række svagheder, som kan forhindre anvendelsen af systemet. Det kan dog konstateres, at et lignende system anvendes på projekter i industrien. Gennem samarbejdet med Zebicon blev det klart, hvad det er, der kendetegner de projekter hvor 3D scanning benyttes til geometrisk kvalitetssikring i industrien. Jeppe Lauersen, direktør for Zebicon, påpegede, at der generelt er tale om produkter med høj slutværdi eller et høj volumen, når Zebicon bliver kontaktet for at skulle udføre geometrisk kvalitetssikring. Dette vil dog altid være en relativ vurdering, og med udviklingen af nye hurtigere scannere med bedre mobilitet vil grænsen

for, hvornår det er rentabelt at benytte scanning frem for traditionel måling forrykkes.

En forhindring i denne sammenhæng er dog, at der mangler dokumentation for effekten af at benytte 3D scanning til geometrisk kvalitetssikring. Generelt set vil det være svært at dokumentere denne, da en opgørelse af, hvad de fejl systemet forhindrer ville have kostet, er behæftet med stor usikkerhed. Valget af at benytte 3D scanning til geometrisk kvalitetssikring hos den enkelte virksomhed må således i høj grad baseres på en strategisk beslutning frem for en ren økonomisk analyse.

Metodekritik

Formålet med kapitlet metodekritik er, at give læseren et indblik i hvordan projektgruppen forholder sig kritisk til de metoder, der er benyttet i projektet. Kritikken er opdelt i intern kritik, hvor der fokuseres på projektgruppens arbejdsmetoder, og ekstern kritik hvor der fokuseres på de informationskilder projektet bygger på.

11.1 Intern kritik

Metoderne, der er benyttet gennem projektet til analyse og strukturering af de enkelte afsnit, er hovedsagelig hentet fra litteratur, der er stiftet bekendtskab med gennem studiet.

Rapporten er fremkommet ud fra en hypotese om, at der er mulighed for at benytte 3D scanning til kvalitetssikring i byggeriet, se side 21. Hypotesen er opstået på baggrund af en iagttagelse af, hvordan kvalitetssikring foregår i industrien. At rapporten er bygget op på baggrund af en hypotese, har bevirket at formålet med rapporten har været at verificere hypotesen ved at underbygge konceptet med praktiske eksempler. Med fokus på hypotesen er der i mindre grad undersøgt alternative løsninger til den grundlæggende problemstilling omkring fejl og mangler i byggeriet.

Opstillingen af hypotesen har gjort rapporten målrettet og i nogen grad ensrettet, hvilket har givet mulighed for fuld fokus på emnet 3D scanning i byggeriet. En mere grundlæggende analyse af årsagerne til fejl og mangler, samt efterfølgende undersøgelser af mulige løsninger ville have åbnet op for en bredere løsningsmodel, hvor løsningen kunne have omhandlet hele kvalitetssikringsaspektet og i højere grad fokuseret på forebyggelsen af fejl og

mangler

Det har fra projektets begyndelse været et ønske fra projektgruppen, at involvere praktiske undersøgelser i rapportens løsningsforslag. Ved disse øvelser har projektgruppen fået en grundlæggende praktisk erfaring med 3D scanning, hvilket i mange tilfælde har forhøjet forståelsen for problemstillingerne ved konceptet. Samtidig har det i nogen grad begrænset ideudviklingen, da der ved de praktiske øvelser kun har været begrænsede midler til rådighed. Det stod tidligt i projektperioden klart, at projektgruppen havde adgang til en 3D laserscanner, hvilket har været medvirkende til valget af hvilken 3D scanningsteknologi, der har haft hovedfokus i rapporten.

Den praktiske tilgang og ønsket om at afprøve konceptets løsninger har i en vis udstrækning tilsidesat undersøgelsen af hvilke anvendelsesmuligheder, der ligger i brugen af 3D scanning indenfor kvalitetssikring i byggeriet. Hensigten med denne afgrænsning har dog været, at kunne demonstrere hele processen fra tilblivelse af 3D modellen til dokumentation af afvigelse. Der er i projektet fokuseret på kvalitetssikring af elementbyggeri, hvilket er en begrænset del af byggebranchen. En mere direkte observation af et byggeprojekt og flere scanninger af forskellige typer byggeprojekter, kunne i højere grad have været med til en mere detaljeret beskrivelse af anvendelsesmulighederne og klarlægning af, om der er behov for den detaljerede kvalitetssikring, indførelsen af en 3D scanner tilbyder.

11.2 Ekstern kritik

I rapporten er der benyttet forskellige metoder til at underbygge valg og beskrive løsninger. Der er taget udgangspunkt i den overordnede model for systemudvikling, hvilken er benyttet til at vise sammenhængen mellem metoderne. Teorien bag systemudviklingen er i projektet ikke fulgt slavisk, men er benyttet som inspiration til den overordnede opbygning af rapporten. En direkte afvigelse fra en komplet systemudviklingsmodel, er rapportens endelige løsning, som ikke ender ud i et færdigt udviklet ICT system, der kan implementeres i byggebranchen.

Det er gennem projektforløbet erfaret, at der er udgivet flere videnskabelige artikler indenfor emnet 3D scanning i byggeriet. Det vurderes at flere ser muligheder inden for området i sammenhæng med den øgede fokus på 3D modellering. Kilderne, der er refereret til i dette projekt, stammer hovedsa-

geligt fra andre uddannelsesinstitutioner, hvor forskere har beskæftiget sig med emnet, og vurderes derfor at være valide. Kilderne bygger til dels på opstillede scanningsforsøg, der er foretaget i et laboratorium. Det næste skridt på vejen vurderes derfor at være forsøgsprojekter, hvor 3D scanning så vidt muligt integreres gennem hele byggeprocessen fra projektering til aflevering.

Ud over videnskabelige artikler har projektgruppen været meget aktiv for at involvere eksterne parter i projektet, hvilket har resulteret i 3 virksomhedsbesøg, et tværfagligt samarbejde med en landinspektør gruppe samt en mini konference omhandlende IT i byggebranchen. Det eksterne samarbejde har givet projektgruppen mulighed for at præsentere projektets koncept og hermed få umiddelbar respons og vejledning i hvilke fokusområder, de eksterne parter finder relevante. Projektgruppen har udvalgt samarbejdspartnerne ud fra hvilken viden, projektgruppen gennem projektforløbet har haft behov for. Interviews fra de enkelte møder er brugt i rapporten som inspiration til de valg, der er truffet gennem projektet, dog med fokus på at virksomhederne har kommerciel interesse i forskellige områder.

Inden mødet med virksomhederne har projektgruppen udarbejdet en dagsorden og sendt relevant information om projektet, så den eksterne virksomhed har haft mulighed for at forberede sig til mødet. Det er projektgruppens opfattelse, at møderne har været konstruktive, og at både projektgruppen og den eksterne virksomhed har haft udbytte af samarbejdet.

Til indhentning af informationer om de eksterne samarbejdspartnere, viden omkring 3D scanningsteknologier og andet relevant information er der søgt litteratur på internettet. For at sikre pålidelige kilder er søgningen primært foregået på kendte og officielle hjemmesider. Informationer hentet fra kommercielle hjemmesider er vurderet kritisk ud fra en holdning om, at den pågældende virksomhed ønsker at sælge sit produkt ud fra den tilgængelige information.

Konklusion

Med udgangspunkt i den opstillede problembeskrivelse og undersøgelsesspørgsmålene konkluderes der i dette kapitel på resultaterne af de undersøgelser og forsøg, der er gennemført i projektet.

12.1 Resultater

Med baggrund i problemformuleringen (*Hvordan kan 3D scanning udnyttes til kvalitetssikring i byggeriets udførelsesfase?*) er mulighederne for at benytte 3D scanning, som et hjælpeværktøj til geometrisk kvalitetssikring blevet undersøgt.

Undersøgelsen kan konkludere, at det er muligt at anvende 3D scanning til kvalitetssikring i byggeriet, men der er en række forhold, der skal forbedres for at gøre kvalitetssikring med 3D scanning praktisk anvendeligt. Det er gennem projektet vurderet, at følgende løsninger kan medvirke til at gøre konceptet anvendeligt.

For at udnytte 3D scanning til kvalitetssikring i byggeriet skal der udarbejdes en 3D model, som indeholder de for det enkelte projekt relevante tolerancer. Modellen skal udarbejdes i et fælles filformat, som kan eksporteres til relevant sammenligningssoftware. Under udførelsen af scanningen skal der opsættes faste kugletargets. De opsatte kugletargets benyttes til sammensætningen af scanningdata til én punktsky og som referencepunkter mellem modellen og punktskyen. Det kan konkluderes, at det er muligt, at udføre en sammenligning mellem en punktsky og en 3D model med henblik på, at identificere eventuelle afvigelser.

Udgangspunktet for rapporten var ud over problemformuleringen følgende undersøgelsesspørgsmål:

- Hvordan foretages kvalitetssikring i udførelsesfasen i dag?
- Hvordan skal et overordnet system til kvalitetssikring baseret på 3D scanning udformes?
- Er det muligt at gennemføre kvalitetssikring ved hjælp af 3D scanning med nuværende teknologier og software?
- Hvilke typer fejl i byggeriets udførelsesfase kan afhjælpes ved hjælp af 3D scanning?

Med udgangspunkt i undersøgelsesspørgsmålene gennemgås de fundne resultater i det følgende.

Undersøgelse af kvalitetssikring

Ud fra et litteraturstudie om kravene til kvalitetssikring af offentlige bygearbejder kunne det konkluderes, at der stilles krav til både *fastlæggelse af kvaliteten* og *sikring af kvaliteten*. Derudfra kunne det konstateres, at 3D scanning kun vil kunne påvirke *sikring af kvaliteten*.

Et litteraturstudie viste, at på trods af den omtalte kvalitetssikring udgør de direkte omkostninger ved fejl og mangler op til 10 % af anlægsomkostningerne ved nybyggeri. Det viste sig ligeledes, at ca. 67 % af fejlene først bliver konstateret i udførelsesfasen. Årsagen til at fejlene opstår, kunne ud fra undersøgelsen konstateres at være ligeligt fordelt mellem rådgiver, byggeledelse og de udførende parter.

Systemudvikling

Med inspiration fra erfaringerne med 3D scanning i industrien blev der opstillet et koncept for, hvorledes 3D scanning kan benyttes til geometrisk kvalitetssikring i byggeriet. Konceptet tager udgangspunkt i en strategi om at begrænse fejls konsekvenser ved at opdage dem tidligt og forhindre at de gentages. Konceptet opstilles med henblik på anvendelse hos en total- eller hovedentreprenør.

Ud fra konceptet blev der skitseret et konkret system, som blev nedbrudt og undersøgt nærmere. Systemet består overordnet af tre hovedfunktioner hhv. udarbejdelse af kontrolgrundlag, indhentning af "som udført" information

samt sammenligning af kontrolgrundlag og "som udført" information.

Et litteraturstudie af mulighederne for at opbygge et kontrolgrundlag viste, at det er nødvendigt med et transportformat til 3D modellen for at sikre kompatibilitet mellem modelleringssoftwaren og inspektionssoftwaren. I den forbindelse blev IFC formatet identificeret som en mulighed. Ligeledes blev det identificeret, at der skal vælges et format, så tolerancerne automatisk kan indgå i sammenligningen, enten som en integreret del af det fælles filformat eller som et separat format.

I forhold til opbygning af en samlet tolerancebeskrivelse blev der identificeret to grundlæggende metoder. Ved at undersøge tolerancerne beskrevet i branchenormer og standarder kunne det konkluderes, at de nuværende tolerancer for elementbyggeri er rettet mod manuelle målemetoder, hvorfor det er nødvendigt med undersøgelser af en datarepræsentation for tolerancer, der kan tolkes af en computer.

Ud fra et litteraturstudie af laserscanning blev det identificeret, at tiden det tager at udføre en scanning er eksponentielt voksende med en faldende opløsningsvinkel. Det blev konstateret, at det er nødvendigt med faste referencepunkter for at kunne sammenkæde 3D scanningen og 3D modellen. I den forbindelse blev permanente kugletargets identificeret som den bedste løsning. I forbindelse med struktureringen af målepunkterne i scanningen blev en matrix-strukturering identificeret som en mulighed.

I forhold til sammenligningen af det udførte arbejde og 3D modellen, blev der gennem et litteraturstudie identificeret 3 grundlæggende metoder. "Punkt mod flade" metoden blev identificeret som den metode, der kræver mindst databehandling, og er bedst egnet til sammenligning af formen på enkelte objekter. Sammenligningsmetoden baseret på flade eller objekt sammenligning blev identificeret som den bedste metode, hvis det er vigtigt at få opdelt sammenligningen i objekter. "Punkt mod punkt" metoden blev identificeret som mest anvendelig til registrering af, om et objekt er tilstede f.eks. i forbindelse med statusopgørelse.

Praktisk afprøvning

For at illustrere anvendelsesmulighederne i systemet blev et opført elementbyggeri undersøgt i et feltstudie med et setup bestående af Tekla Structures 13 som modelleringsværktøj, en Leica HDS 3000 scanner og Rapidform XOY2 som inspektionssoftware.

Feltstudiet med den praktiske afprøvning af setup'et viste at det ikke var muligt at eksportere direkte fra Tekla structures til Rapidform XOV2. Af de afprøvede løsninger kunne det identificeres, at det var muligt at eksportere modellen fra Tekla til DWG formatet. DWG modellen blev importeret til AutoCAD, hvor en ny model blev optegnet oven i DWG modellen og eksporteret til ACSI formatet. Modellen kunne herfra importeres til Rapidform XOV2. Det blev senere erfaret, at det er muligt, at konvertere direkte fra DWG til ACSI, hvilket dog ikke er afprøvet.

En praktisk afprøvning af en Leica HDS 3000 scanner viste, at det generelt var forberedelsen til selve scanningen, der tog tid. For at optimere den totale scanningstid skal der fokuseres på at optimere opsætningen af scanneren.

Gennem den praktiske afprøvning af inspektionssoftwaren blev sammenligningsmetoden, hvor den korteste afstand til den nærmeste flade beregnes, undersøgt. Afprøvningen viste, at data fra 3D scanneren kunne importeres uden problemer i PTS formatet, samt at det ikke var nødvendigt at fjerne støj pga. muligheden for at filtrere punkter fra i sammenligningsprocessen. Resultatet var en farvekodet model, som viste de scannede punkters afvigelser ud fra en givet farvekode.

Det visuelle resultat af sammenligningen var svært at tolke med henblik på, at afgøre om tolerancerne var overholdt, og det kunne konkluderes, at det er nødvendigt med en udvikling af specialiseret software, hvis systemet skal anvendes til kontrol af montagetolerancer.

Anvendelsesområder

Ud fra feltstudiet og litteraturstudierne kan det konkluderes, at det undersøgte setup vil være bedst egnet til kontrol af produktion frem for montage, hvorved dets anvendelsesområde hovedsagligt bliver hos virksomheder, der fremstiller præfabrikerede elementer til byggeriet.

Et identificeret anvendelsesområde inden for byggeriet, hvor systemet vurderes anvendeligt, er jordarbejde. Denne vurdering er foretaget ud fra kompleksitet af tolerancer og geometri, præcision på arbejdet og tolerancerne, samt tilgængeligheden af det område, der skal undersøges.

12.2 Yderligere undersøgelser

Fra starten af projektet stod det klart, at resultatet af dette projekt ikke ville være et færdigudviklet system, som var klar til anvendelse. I stedet er nuværende status på området dokumenteret, og der er sat fokus på, hvilke mangler der er, før et endeligt kvalitetssikringssystem, baseret på 3D scanning, kan tages i brug.

Rapporten dokumenterer hvilke muligheder, der findes med den eksisterende teknologi. Dette er med hjælp fra mange parter både inden og uden for Danmark lykkedes, og rapporten illustrerer på et meget praktisk niveau en af anvendelsesmulighederne ved 3D scanning.

Parter, der ønsker at bruge projektet i en videre udvikling, kan derfor hovedsageligt benytte rapporten som første skridt, der afdækker muligheder og problemer. En videre udvikling vil derfor sandsynligvis kræve en tilpasning eller redesign af det illustrerede system samt grundigere undersøgelser af de afdækkede problemstillinger.

Rapporten har således givet anledning til en række nye undersøgelsesspørgsmål, som videre forskning kan tage udgangspunkt i.

- Hvordan kan tolerancer beskrives og integreres med IFC?
- Hvordan kan datafangst vha. en laserscanner effektiviseres og forbedres?
- Hvilke fordele har forskellige sammenligningsmetoder?
- Hvorledes identificeres de enkelte bygningselementer og hvordan holdes der styr på hvilke dele, der er kontrolleret?
- Hvordan skal en IFC importfunktion til et sammenligningssoftware opbygges?
- Hvordan skal en mekanisme til kontrol af montagetolerancer opbygges?
- Hvilke besparelser kan opnås ved anvendelsen af 3D scanning til geometrisk kvalitetssikring?

Ud over de nævnte problemstillinger er projektgruppen gennem projektarbejdet blevet opmærksom på en række andre anvendelsesmuligheder for 3D scanning i byggeriet, hvilket kort beskrives i perspektiveringen.

Perspektivering

I dette kapitel redegøres der for hvilke muligheder, der er for at udnytte den information, der indsamles ved en 3D scanning til andre formål end geometrisk kvalitetssikring. I den forbindelse refereres der til relevante projekter, som projektgruppen er blevet opmærksomme på gennem projektarbejdet.

13.1 Yderligere anvendelsesmuligheder

Ud over geometrisk kvalitetssikring er der gennem rapporten fundet en række områder, som det kunne være oplagt at integrere i et kvalitetssikrings-system, hvor der jævnligt udføres kontrol af det opførte byggeri ved hjælp af en 3D scanner.

Det vil med opdaterede scanninger af det udførte arbejde være muligt at lave veldokumenterede statusopgørelser. Her kunne det tænkes at afregningen blev baseret på scanningsopmålingerne. En detaljeret scanningsplan er samtidig en mulighed for at registrere produktiviteten på byggepladsen, hvilket kan give et grundlag for opfølgning på tidsplanen, og hermed effektiviserer planlægningen. Et udviklingsområde kunne være automatisk objektgenkendelse, der ville effektivisere registreringen.

Ved registrering af hvilket emne der er scannet samt tidspunktet for scanningen, er grundlaget til stede for at udarbejde veldokumenterede "som udført" modeller. Disse kan senere indgå i den endelige afleveringsdokumentation og ved udarbejdelse af drift og vedligeholdelsesplaner.

Som beskrevet er der et stort potentiale i anvendelsen af 3D scanning, hvilket dog kræver yderligere udvikling i teknologien. Det er projektgruppens

opfattelse, at der er tilstrækkelige muligheder i teknologien omkring 3D scanning til, at det er relevant at fortsætte undersøgelserne og videreudvikle konceptet. Et projekt, som i fremtiden vil kunne være med til at føre dette ud i virkeligheden, er ForBAU projektet. Et andet udviklingsprojekt, som arbejder med nogle af de samme problemstillinger, er COWIs 3D briller.

13.2 ForBAU projektet

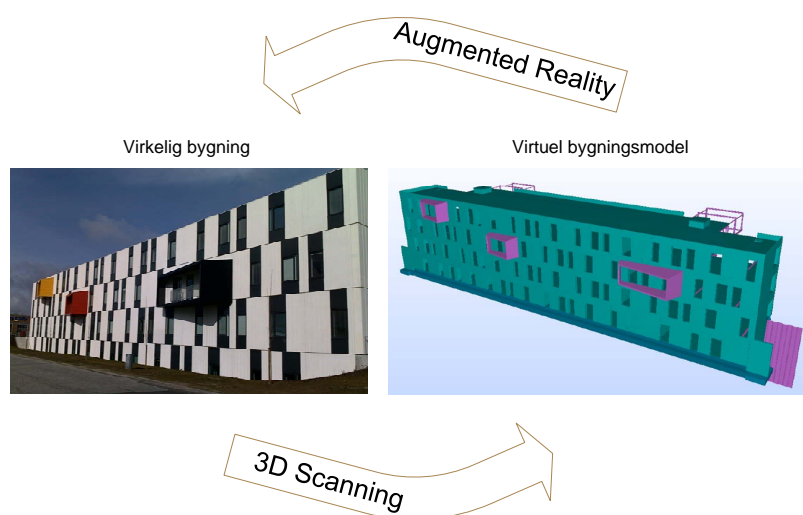
Emnet omkring hvordan blandt andet 3D scanning kan benyttes til statusopgørelse og kvalitetssikring i byggeriet, er et emne, andre forskningsinstitutioner ligeledes har fokus på. Et af de projekter projektgruppen har fået kendskab til, er et tværfagligt tysk forskningsprojekt under navnet ForBAU omhandlende virtuelle byggepladser [ForBAU, 2009].

Projektet har tilknyttet 15 forskere, der beskæftiger sig med emner som byggepladssimuleringer, automatisk registrering af arbejdets fremdrift og digital planlægning. Omdrejningspunktet for forskningen er at integrere hele byggeprocessen i et PDM (Product Data Management) system. Som forsøg benyttes et mindre broprojekt, hvor der blandt andet er lavet forsøg med automatisk registrering af materialer, som kommer ind på en byggeplads, ved brug af RFID tags. Derudover er der lavet 3D scanninger af den opførte konstruktion med flere forskellige scannere med det formål at sammenligne resultaterne. Det ønskes i det videre forløb at sammenligne scanningsresultaterne med opmålinger fra en totalstation for at vurdere fordele ved de to opmålingsmetoder. Desuden er det målet at modellere en 3D model ud fra scanningerne og sammenligne denne med 3D CAD modellen.

Projektgruppen har været i kontakt med den ansvarlige for forskningen omkring 3D scanning. Han kunne fortælle, at der endnu ikke er offentliggjorte resultater fra de foretagne scanninger, men at en foreløbig vurdering er, at det ikke er selve indhentningen af scanningsdata, der skaber problemer men i højere grad sammenligningssoftwaren. Det næste mål er indkøb af egen scanner til ForBAU projektet og en bredere undersøgelse af hvilken inspektionssoftware, som er egnet til sammenligningen.

13.3 Augmented Reality

Et af initiativerne, der beskæftiger sig med en højere grad af automatiseret geometrisk kvalitetssikring, er et udviklingsprojekt, som den rådgivende ingeniørvirksomhed COWI er med i. I et samarbejde med 20 andre virksomheder og forskningsinstitutioner har de udviklet et par 3D briller, som baseret på Augmented Reality kan vise 3D CAD modellen samtidig med, at den tilsynsførende går rundt i den virkelige bygning. Han kan, ved hjælp fra brillerne, se 3D modellen direkte i forhold til bygningen [COWI, 2008].



Figur 13.1: Augmented Reality fører den virtuelle model ud i virkeligheden, mens 3D scanning fører virkeligheden ind i den virtuelle model.

For at kunne se 3D modellen i brillerne, når man fysisk bevæger sig rundt i bygningen, er det ligesom ved 3D scanning nødvendigt at udarbejde en præcis 3D model. Forskellen mellem 3D briller og 3D scanning er, at det ved 3D brille projektet er den virtuelle 3D model, som føres ud i virkeligheden, mens det ved 3D scanning er virkeligheden, som føres ind i den virtuelle verden, hvilket er illustreret på figur 13.1.

Fordelen ved 3D brillerne er at personen, som har brillerne på, direkte kan se om der er uoverensstemmelse mellem modellen og den virkelige verden. Ulempen er derimod, at sammenligningen foregår manuelt, hvor den ved 3D scanning foregår automatisk.

13.4 Teknologi i byggebranchen

For at forbedre kvaliteten i byggebranchen og forbedre statistikken over fejl og mangler er det nødvendigt med flere initiativer, der i højere grad arbejder for at integrerer teknologiske løsninger i byggebranchen. Forskningsprojektet, ForBAU og det omtalte Augmented Reality projekt er tegn på en erkendelse af, at der er muligheder i de teknologier, som findes. Om det så er den virtuelle verden, der skal ud på byggepladsen i form af et par 3D briller, eller om virkeligheden skal 3D scannes, så den kan sættes ind i den virtuelle bygningsmodel, afhænger af formålet.

Problemstillingen ligger her i koblingen mellem den virtuelle verden og den virkelige verden. Ind til nu er denne kobling mellem modeller og det udførte arbejde varetaget af de personer, der har udført arbejdet og ført tilsyn med arbejdet. Selvom forskningsinstitutioner kommer op med mulige løsninger, er der lang vej fra teori til praksis, hvilket også er erfaret i arbejdet med dette projekt. Der er derfor behov for flere udviklingsprojekter, hvor forskere kommer med ud på byggepladserne og afprøver teorierne.

Som belyst gennem rapporten findes der allerede i dag en række teknologier, som kan medvirke til at forbedre kvaliteten og effektivisere byggeriet. Det er derfor i stor grad et spørgsmål om, at byggeriets parter har mod til at tage nogle af disse teknologier til sig, og udvikle dem da kun den praktiske brug af dem, kan bevise deres effekt. Spørgsmålet er så, hvem der har mod til at gå forrest i udviklingen, og bære den risiko et udviklingsprojekt altid vil være.

DEL

Appendiks

Metoder

Dette appendiks er udarbejdet for at give et indblik i de metoder og modeller, som danner grundlag for dette projekt. Den teoretiske gennemgang foretages i forhold til anvendelsen i projektet, hvorfor der henvises til litteratur omkring generelle metoder i de enkelte afsnit.

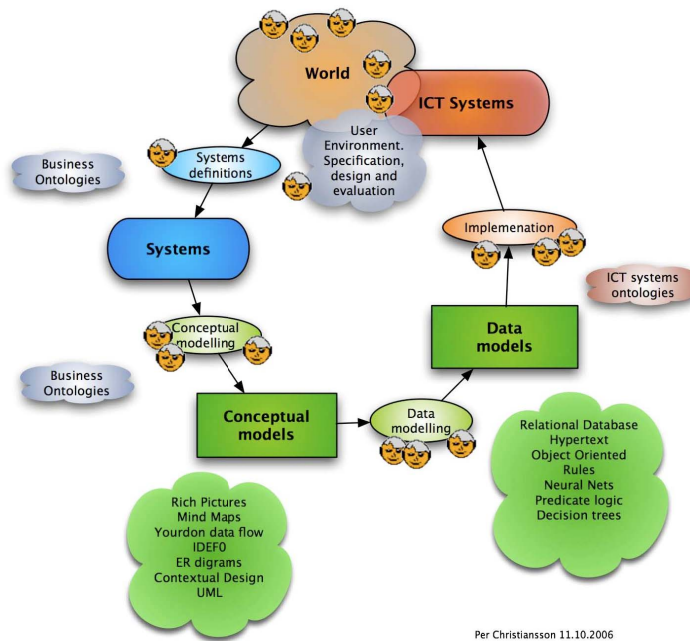
A.1 Systemudviklingsmodel

Systemudviklingsmodellen benyttes til at formidle arbejdsgangen samt de ideer og tanker, som ligger bag projektets koncept. Metoden beskriver sammenhængen mellem de processer projektgruppen har været igennem, for at undersøge muligheden for at benytte 3D scanning til geometrisk kvalitetssikring. Litteratur omkring systemudviklingsmodellen tager udgangspunkt i [Christiansson, 2008].

Modellen figur A.1 er en model som illustrerer hvordan et system kan opbygges. Pointen er her, at det er vigtigt at få beskrevet de miljøer konceptet får indflydelse på. Ud fra en observation af den "virkelige", verden defineres det system, som ønskes ændret.

Systemets struktur beskrives og modelleres for at fremhæve de indsatsområder konceptet får indflydelse på. Når systemet er modelleret kan der opstilles en konceptmodel. Ud fra konceptmodellen opbygges grundlaget til data modellen for at digitalisere konceptet jf. figur A.1.

Data modellen skal herefter implementeres i form af et ICT system i de miljøer, systemet har forbedret. Efter implementeringen skal der laves evalueringer af systemet. For at sikre en løbende udvikling og opdatering af



Figur A.1: Systemudviklingsmodel [Christiansson, 2008].

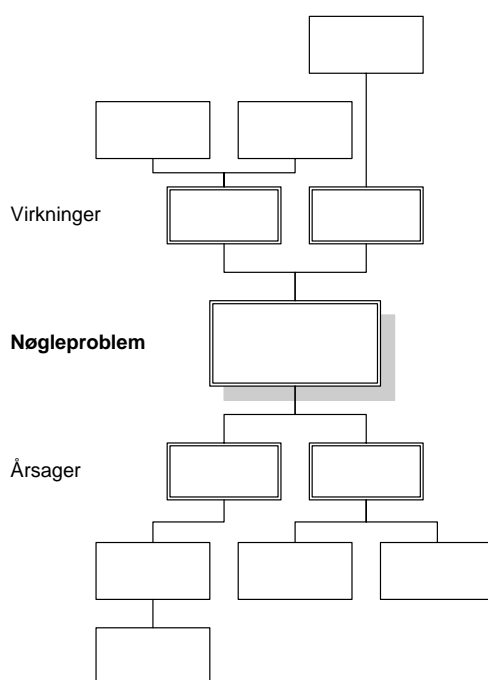
systemet, kan modellen figur A.1 benyttes, når der skal foretages ændringer.

A.2 Årsags- virkningsdiagram

For at kunne beskrive de problemstillinger der er i byggeriets kvalitetssikring, benyttes et årsags- virkningsdiagram. Metoden er en del af Logical Framework Approach (LFA), som er en metode til styring og opfølgning af projekter [Anlægsteknikforeningen, 2005].

Årsags- virkningsdiagrammet opstiller en sammenhæng mellem et problems årsager og virkninger. Diagrammet, som også kaldes for et problemtræ, optegnes ved at placere nøgleproblemet i midten. Ovenfor nøgleproblemet placeres virkningerne af problemet og nedenfor placeres årsagerne til problemet. Diagrammets principielle opbygning er vist på figur A.2.

Optegningen af henholdsvis årsagerne og virkningerne resulterer i en række problemkæder, hvor de yderste årsager og virkninger belyses. Diagrammet kan udformes på forskellige detaljerings niveauer, det er dog vigtigt at enkelte problemkæder fortsættes så langt som muligt.

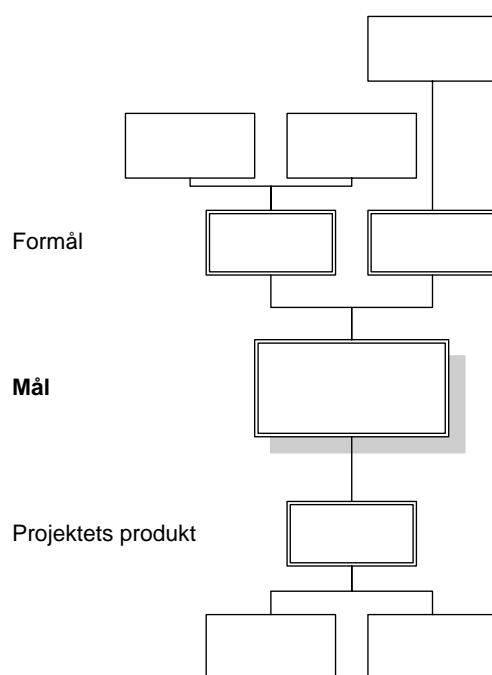


Figur A.2: Årsags-virkningsdiagrammets principielle opbygning [Anlægsteknikforeningen, 2005].

A.3 Målanalyse

Beskrivelsen tager udgangspunkt i [Anlægsteknikforeningen, 2005]. Målanalysen er sammen med Årsags-virkningsdiagrammet grundlaget for udarbejdelsen af en problembeskrivelse i LFA metoden. Målanalysen opstilles ud fra årsags-virkningsdiagrammet. Her omformuleres nøgleproblemet til en målsætning for projektet jf. figur A.3. Analysen eller måltræet, som det også kaldes, viser sammenhængen mellem projektets formål, der er en omskrivning af problemtræets virkninger og projektets mål, der er en omskrivning af nøgleproblemet. Projektets produkt er ligeledes en omskrivning af de fundene årsager, og bliver elementer i den strategi som leder frem til målet.

Opstillingen af målanalysen er en mulighed for at inddrage interessenter, for at få afklaret forventninger til projektets formål og det produkt, som i sidste ende bliver resultatet af projektet. Det skal på baggrund af måltræet besluttes, om de opsatte mål er acceptable i forhold til de overordnede mål og strategier for projektet.



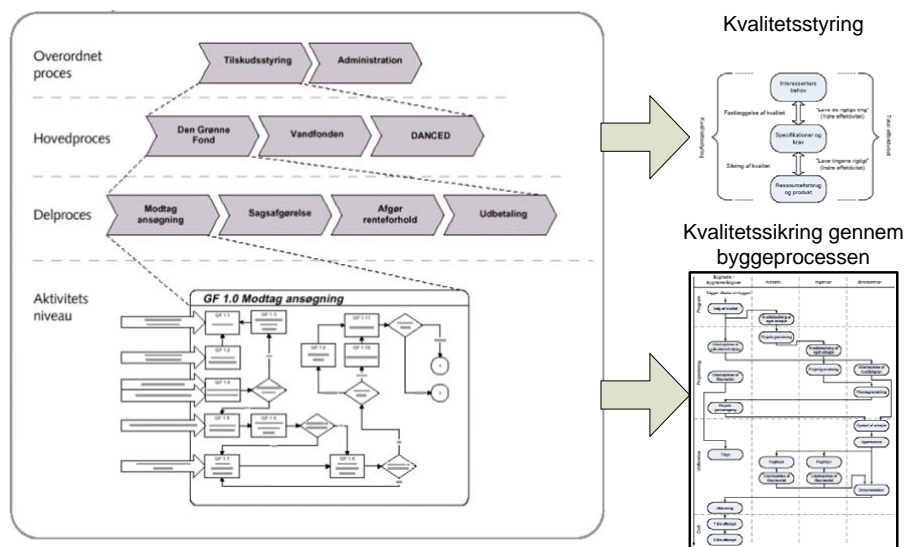
Figur A.3: Målanalysens principielle opbygning [Anlægsteknikforeningen, 2005].

A.4 Proceskortlægning

Principperne bag proceskortlægning er hentet fra [Finansministeriet, 2009]. Proceskortlægning er et centralt element i ethvert effektiviseringsprojekt. Metoden benyttes til at få et overblik over den eksisterende proces, hvor kortlægningens resultat afspejler de nuværende arbejdsprocesser.

Udfordringerne ved at kortlægge en proces ligger i, at begrænse de områder kortlægningen skal dække og fastlægge den ønskede detaljering. Resultatet af proceskortlægningen er et procesdiagram understøttet af procesbeskrivelser for de valgte processer, jf. figur A.4.

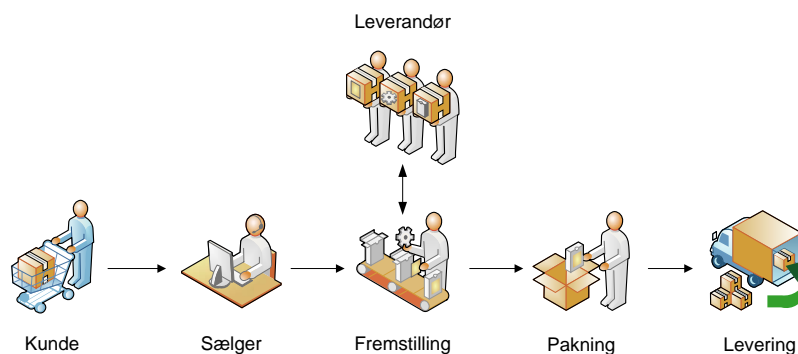
Den overordnede proces i dette projekt er kvalitetsstyring gennem en byggeproces. En af delprocesserne i kvalitetsstyringen er en beskrivelse af den generelle kvalitetssikringsproces i byggeriet jf. figur A.4. Den overordnede kvalitetssikring gennem en byggeproces beskrives i projektet ved brug af proceskortlægning.



Figur A.4: Proceskortlægnings model, med reference til proceskortlægningen i denne rapport [Finansministeriet, 2009].

A.5 Flowdiagram

En anden metode til at beskrive en proces er et flowdiagram. På et overordnet niveau beskriver flowdiagrammet de elementer og arbejdsgange, som er en del af en samlet proces. Eksemplet figur A.5 viser hvordan et flowdiagram kan opbygges. Diagrammet benyttes her til at give et overblik over processen fra at en varer sælges til den leveres.



Figur A.5: Eksempel på flowdiagram, der viser flowet fra en kunde bestiller en varer til den bliver leveret [Beyer og Holtzblatt, 1998].

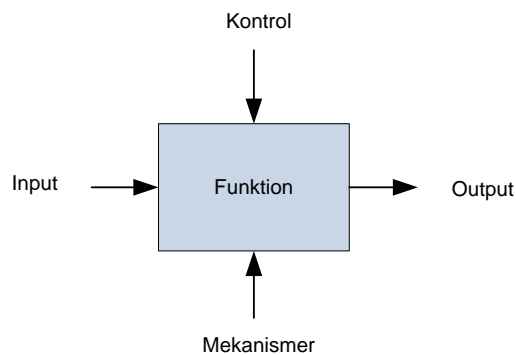
I dette projekt benyttes flowdiagrammet til at beskrive det overordnede system, som integrerer 3D scanning i kvalitetssikringsprocessen.

A.6 IDEF₀

Til at nedbryde projektets koncept til præcise beskrivelser af de enkelte processer er der udarbejdet et funktionsdiagram ved brug af IDEF₀ metoden. Baggrunden for metoden er hentet i [Rasmussen, 1996].

IDEF₀ benyttes til at generere en funktionsmodel, som er en struktureret repræsentation af funktionerne (=handlingerne/aktiviteterne) i et system og dets omgivelser og af de informationer og objekter, som forbinder disse funktioner.

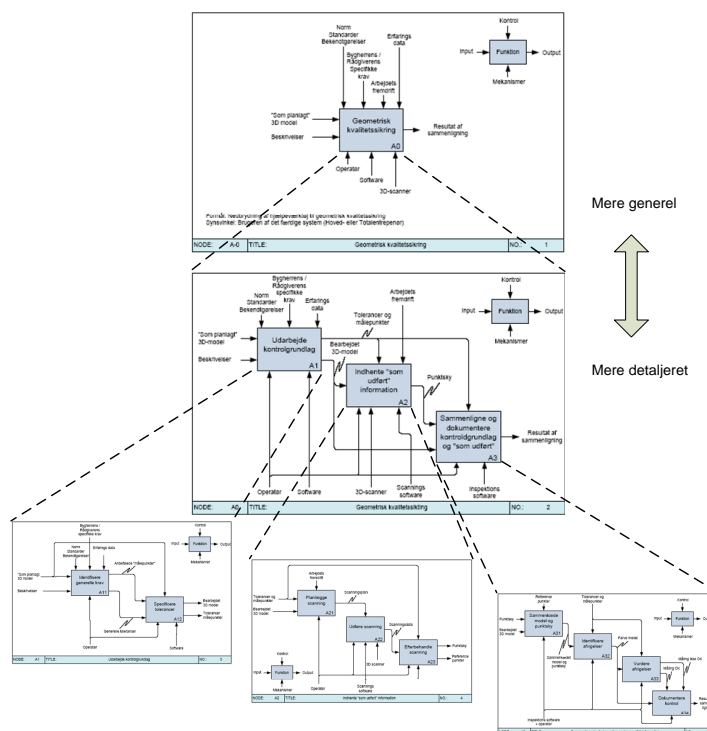
Grundelementerne i metoden er bokse og pile. En boks repræsenterer en funktion som betegner en aktivitet, handling, proces eller operation mens pilene repræsenterer data, informationer eller objekter.



Figur A.6: Pilenes betydning afhængig af deres placering [Rasmussen, 1996].

Pilene har forskellig betydning afhængig af, hvor de er forbundet til boksen jf. figur A.6. Pile, der kommer ind for oven er kontrollerende og angiver betingelser eller forhold, der styrer eller begrænser funktionen. Pile, der kommer ind fra venstre er input og angiver data eller objekter, som funktionen ændrer eller transformerer. Pile, der går ud til højre angiver output hvilket er objekter eller data, som funktionen resultere i. Pile, der indgår fra neden angiver mekanismer i form af udstyr, der anvendes ved udførelsen

af aktiviteten eksempelvis værktøjer og edb-systemer. Der skal til hver boks som minimum være en kontrol og et output.



Figur A.7: Struktur i IDEF₀.

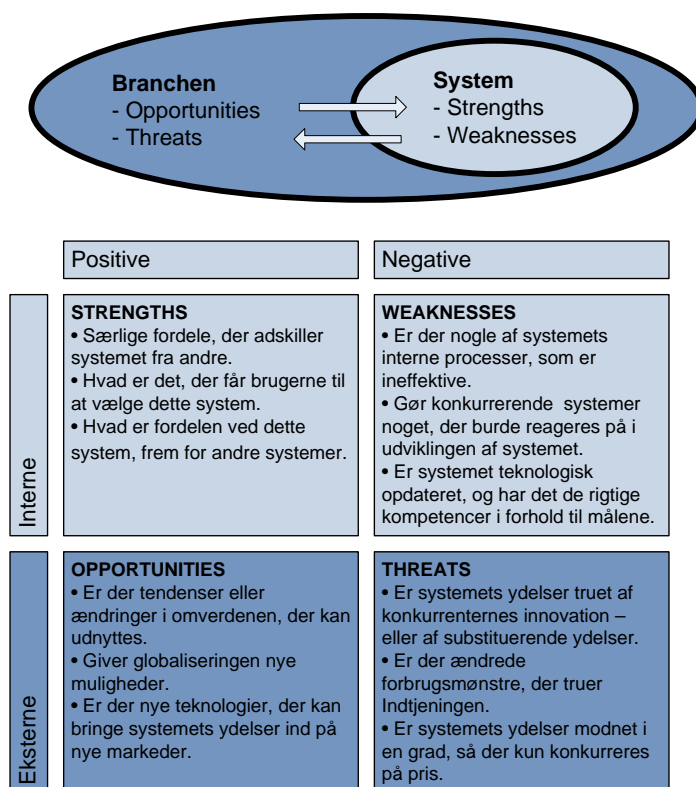
Strukturen i IDEF₀ modellen betegnes som et forældre-børn diagram. Forsiden A-0 karakteriserer det modellerede system og er toppen af modellen. Ved detaljering af A-0 diagrammet fremkommer A0 som viser de vigtigste funktioner i konceptet. Hver funktion/boks i A0 diagrammet kan detaljeres i nye diagrammer kaldet A1, A2 og A3, som igen kan opdeles i A11, A12 osv. Strukturen er vist på figur A.7.

A.7 SWOT-analyse

SWOT-analysen er en strategisk planlægningsmetode, som ofte benyttes til at vurdere en virksomheds generelle situation [Nilsson, 2007]. Ved udarbejdelsen af en SWOT-analyse indgår virksomhedens indre forhold i form af styrker (Strengths) og svagheder (Weaknesses) i forhold til de ydre vilkår,

muligheder (Opportunities) og trusler (Threats) jf. figur A.8. Det er således et værktøj, der kan sammenholde virksomhedens indre forhold med den ydre verden og analysere et problematisk område i virksomheden.

I stedet for at kigge på en virksomhed er SWOT-analysen i dette projekt benyttet til at analysere det udformede systems styrker, svagheder, muligheder og trusler i forhold til den branche, som systemet indgår i.



Figur A.8: SWOT matrix med eksempler hvor der fokuseres på analysering af et system [Nilsson, 2007].

Målet med SWOT-analysen i dette projekt er, at vurdere det udviklede systems egnethed til kvalitetssikring og samle de fordele og ulemper, der er fundet ved systemet gennem projektet. Det ønskes ud fra SWOT-analysen at give et overblik over hvilke problemstillinger, der ligger ved at implementere et kvalitetssikringssystem, hvor 3D scanning benyttes til geometrisk kvalitetssikring.

3D scanningsteknologier

Formålet med dette appendiks er at give en beskrivelse af hvilke teknologier, der findes indenfor 3D scanning. Her behandles principperne bag teknologierne samt en diskussion af teknologiernes anvendelighed ved scanning i byggeriet.

B.1 Udvalgelse af teknologier

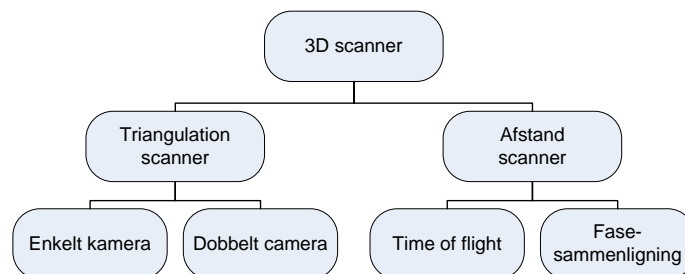
Projektet tager udgangspunkt i, at der foretages en 3D scanning og ikke en opmåling. I dag benyttes avancerede målesystemer til opmåling i byggeriet. Dette sker både før, under og efter udførelsesfasen. En opmåling tænkes her som en enkeltstående registrering af et koordinatsæt. Antallet af registrerede punkter bliver herved lig med antallet af opmålinger. Til forskel herfra registreres der ved en enkelt scanning mange tusinde punkter.

Da der her fokuseres på scanning er der en række teknologier, som er valgt fra, da de i denne forbindelse opfattes som opmålingsteknologier og ikke scanningsteknologier. Et nyere redskab som totalstationen der er udviklet til opmåling, vurderes her til at være et måleapparat idet totalstationen opmåler et punkt af gangen.

En anden teknologi som dukker op i sammenhænge med 3D scanning og opmåling, er fotogrammetri. Fotogrammetri er en gammel metode til afstandsbestemmelse ved hjælp af fotografier, og er grundlaget for nogle af de 3D opmålingsmetoder, der benyttes i dag. Der afgrænses i dette projekt fra en yderligere undersøgelse af fotogrammetri, da metoden beskæftiger sig med opmåling af enkeltpunkter.

B.2 3D scanningsteknologier

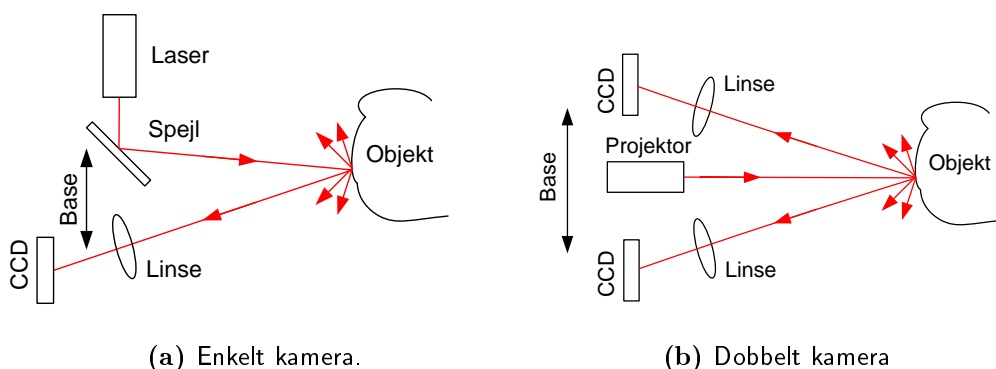
Der findes inden for 3D scanning forskellige teknologier. Det ønskes her at vurdere de relevante teknologier for til sidst at udvælge den eller de scanningsteknologier, som vurderes bedst egnet til scanning i byggeriet, med henblik på at benytte resultatet til en sammenligning med en eksisterende CAD model. Der tages her udgangspunkt i teknikken triangulation og teknikken afstandsmåling, jf. figur B.1.



Figur B.1: Opdeling af 3D scannere ud fra opmålingsprincipperne triangulation og afstandsmåling, [Kaspar, 2004].

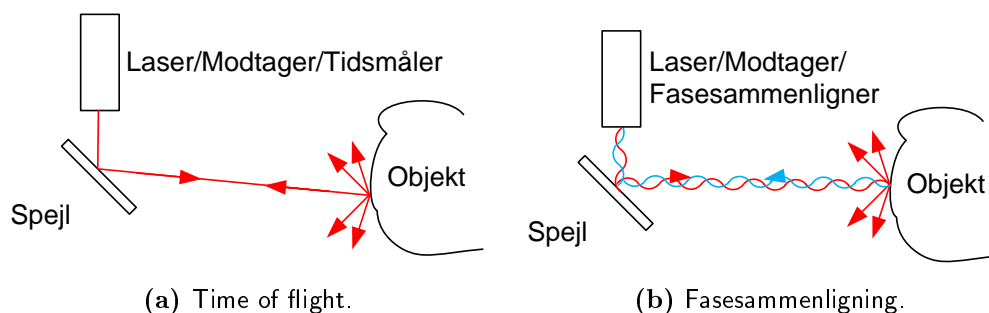
En triangulationsscanner fungerer ved, at en lys- eller laserstråle projekteres på et punkt på emnet, hvorefter et kamera opfanger refleksionen [Ingeniøren, 2007]. Kameraet er placeret i en kendt afstand fra laseren eller projekteren, så vinklen mellem den afsendte laserstråle og modtagerenheden kan bestemmes, og 3D målingen afgøres, princippet er visualiseret på figur B.2a.

En triangulationsscanner kan også være forsynet med to kameraer, som vist på figur B.2b. Her opfanger begge kameraer den udsendte stråle eller lysmønster og beregner herefter punktets position, hvilket blandt andet er princippet bag hvidlysscanning [Ingeniøren, 2007]. Lyset lægger sig som et stribenet nedover genstanden, der scannes. For at indsamle 3D informationen anvender softwaren det kendte lysmønster og ved hjælp af afstanden og vinkelen mellem de to kameraer afgøres 3D målingerne. Scanneren anvender to CCD-kameraer til at tage billederne, og hver pixel bliver så omregnet til et punkt i et 3D koordinatsystem.



Figur B.2: Triangulations principper [Kaspar, 2004].

Indenfor afstands scanning benyttes to metoder til opmåling af afstanden fra scanneren til emnet der scannes. Den ene metode måler tiden, det tager en laserstråle, fra den er afsendt af scanneren til refleksionen modtages, hvilket kaldes "time of flight". Metoden er her vist på figur B.3a. Metodens præcision afhænger her af kvaliteten på det ur, som måler laserstrålens rejsetid.



Figur B.3: Princip for afstandsscanner [Kaspar, 2004].

Den anden metode er fasesammenligning, hvor laserscanneren tæller antallet af lysbølger, som udsendes inden refleksionen modtages, jf. figur B.3b. Når bølgelængden er kendt kan denne multipliceres med antallet af udsendte bølger. På grund af den komplicerede teknologi bliver målingen mere præcis i forhold til "time of flight" metoden. Denne opmåling kræver at alle bølger, der udsendes fra scanneren, bliver modtaget, da målingen bliver forkert, hvis en eller flere bølgelængder går tabt [Kaspar, 2004]. Dette betyder, at en scanner med denne teknologi har en kortere rækkevidde.

Generelt for de forskellige 3D scanningsteknologier er, at resultatet af en scanning ender ud i en punktsky. En punktsky er en række punkter angivet med et x-, y- og z-koordinat. Antallet af punkter afhænger af teknologien samt den valgte opløsning.

B.3 Vurderingskriterier

For at kunne vurdere teknologierne i forhold til hinanden opstilles en række vurderingskriterier, der er relevante i forhold til at skulle scanne bygnings-elementer.

Synsfelt

Synsfeltet for en 3D scanner er vigtig for at kunne scanne opførte konstruktioner i fuld skala. Størrelsen på synsfeltet skal være i overensstemmelse med det måleområde, der ønskes scannet. Herudover skal den mulige måleafstand ligeledes vurderes.

Præcision

Præcisionen og detaljeringsgraden af en scanningsteknologi skal vurderes i forhold til scanningssystemet og afstanden til emnet, der scannes. Det skal samtidig undersøges hvilken opløsning scanningresultatet skal leveres i. Ved høj detaljeringsgrad kan udfaldet blive at scanningresultatet bliver for tungt at arbejde med.

Tid

Tidsforbruget for at udføre en scanning er vigtig i forhold til effektiviteten og udbyttet af en scanning. Det er her det samlede tidsforbrug, der skal undersøges, hvilket indebærer forberedelse, scanning og efterbehandlingstid. En vigtig parameter er dog stadig målepunkter pr. sekund.

Eksterne forhold

At arbejde på en byggeplads indebærer langt fra optimale arbejdsforhold. Det skal derfor vurderes hvorledes eksterne forhold, så som vejret, har indflydelse på en scanningsteknologi. Det kan være påvirkninger som vind, regn og sollys, der forringer eller umuliggør en scanningen. Andre forhold der kan have indvirkning på en scanning er støv, stilladser og maskiner, der skygger for det emne der ønskes scannet.

Begrænsninger

Det skal undersøges hvilke begrænsninger de enkelte scanningsmetoder har i forhold til materialer, farver og afstande. Herudover skal scanningsteknologiernes mobilitet undersøges og om den er afhængig af ekstern strømfor-
syning.

B.4 3D scannere

Det er valgt kun at opstille specifikationerne for to forskellige produkter. Produkterne repræsenterer her hver sin scanningsteknologi og er hver i sær nyere produkter på markedet.

Hvidlysscanner

For at kunne beskrive de egenskaber en 3D hvidlysscanner har, er der taget udgangspunkt i ATOS [GOM, 2009], der er vist på figur B.4. ATOS er en serie mobile høj kvalitets 3D scannere, der er udviklet af det tyske firma GOM og bliver blandt andet benyttet af Zebicon til scanningsydelser [Zebicon, 2009b]. Scanneren er baseret på triangulationsprincippet med dobbelt kamera.



Figur B.4: Atos 3D hvidlysscanner [GOM, 2009]

ATOS scanneren fra GOM har et scanningsfelt fra 30x30 mm op til 2000x2000 mm med en opløsning på op til 4400 punkter pr. mm² [GOM, 2009].

Scanning af 20 meter emner har en nøjagtighed på $\pm 0,6$ mm med en opløsning på 0,8 mm. [Zebicon, 2009b]

En hvidlysscanner fra GOM kan opfange op til 4.000.000 punkter på 2 sek. Varigheden for en hel scanning afhænger af emnets størrelse og kompleksitet. Scanningen af et emne af en størrelse på 50x50x50 mm tager omkring 5 min, mens scanningen af et emne på 2000x2000x2000 mm kan tage 4-5

timer [Zebicon, 2009b].

Scanneren har en arbejdstemperatur der ligger mellem 0°C og 40°C . Den skal under opbevaring, transport og brug beskyttes mod støv, vand og fugt. Under scanningen skal baggrundsbelysningen fra blandt andet solen være konstant og ikke stærkere end scannerens projektor. [GOM, 2009]

Da selve scanningen er afhængig af, at lyset fra projekteren belyser scanningsemnet, besværliggøres scanningen, hvis den skal foregå udendørs. Samtidig er synsfeltet begrænset til 4 m^2 , hvilket begrænser muligheden for at scanne store emner på kort tid. Scanneren er afhængig af elektricitet.

Hvidlysscanning er meget brugt til kvalitetssikring i industrien. Ved introduktionen af hvidlysscanning i halvfemserne var arbejdsopgaverne hovedsageligt digitalisering af fysiske modeller. I dag benyttes scanningmetoden fortrinsvis til kvalitetssikring ved, at en scanning af det producerede emne sammenlignes direkte med den tilhørende CAD model [Zebicon, 2009b].

Der er her taget udgangspunkt i en hvidlysscanner fra GOM [GOM, 2009]. Andre producenter er Breuckmann, der blandt andet benyttes af Model og Effekt Fabrik [Model og Effekt Fabrikken, 2009]. Af virksomheder hvor 3D scanning er et integreret kvalitetssikringsværktøj, kan blandt andet nævnes LEGO Systems A/S, Novo Nordisk A/S og Danfoss A/S [Zebicon, 2009b].

Laserscanner

Som et eksempel på en 3D laserscanner benyttes Leica Geosystems - Scan Station 2, der er baseret på "time of flight" princippet.

Scan Station 2 er en panorama laserscanner, som har en horisontal synsvinkel på 360° og en vertikal synsvinkel på 270° jf. figur B.5.

Scanneren udsender laserstrålen mod et sæt roterende spejle, som reflekterer strålen i horisontal og vertikal retning. Ved hjælp af spejlene og det roterende scannerhoved, bliver laserstrålen sendt rundt, så den rammer det ønskede objekt i det af brugeren definerede synsfelt.

Opløsningen i en ønsket afstand defineres ligeledes af brugere. Laserscanneren har en rækkevidde på op til 300 m ved en overflade refleksion på 90 %, hvilket svarer til overfladen af bearbejdet fyrtræ [Kaspar, 2004]. Ved en overflade refleksion på 18 %, hvilket svarer til asfalt, har scanneren en



Figur B.5: Synsfeltet for en Leica Scan Station 2 laserscanner [Leica, 2009]

rækkevidde på 130 m.

Ved en scanning der foretages i en afstand fra 1 til 50 m fra scanneren er præcisionen på positionen ± 6 mm og på distancen ± 4 mm. Under optimale forhold kan der scannes med op til 50.000 punkter pr. sek. Den samlede scanningstid afhænger af størrelsen på emnet, der skal scannes samt den ønskede opløsning.

Laserscanneren har en funktionstemperatur, som ligger mellem 0° og 40°C . Det er muligt at benytte et 36 V batteri som strømforsyning til scannere, dette giver 6 timers funktionstid pr. opladning. En laserscanner virker både i stærk sollys og mørke. Selve scanneren vejer 18,5 kg og batteriet vejer 12 kg.

Laserscannere af denne type benyttes i dag til blandt andet scanning af offshore konstruktioner, hvilket giver mulighed for at fjernprojektere om- og tilbygninger. Herudover benyttes laserscanning som et alternativt opmålingsredskab i situationer, hvor der hurtigt skal opmåles mange punkter.

Der er her taget udgangspunkt i en laserscanner fra Leica Geosystems. Der findes mange andre producenter af 3D laserscannere, her kan nævnes blandt andet nævnes Trimble og Faro. Af virksomheder der benytter 3D laserscannere kan nævnes Lodahl, Rambøll og Landmålergården.

B.5 Valg af teknologi

Hvidlysscanning egner sig bedst til scanning af mindre og enkeltstående elementer, hvor der er behov for et meget præcist scanningsresultat. Laserscanning giver til forskel mulighed for en hurtig scanning af større konstruktioner.

Den undersøgte hvidlysscanner har et maksimalt måleområde på 4 m² pr. scanning. Hvilket er meget lidt i sammenligning med en laserscanner, som har en målelængde på over 100 m, og et 360x270⁰ synsfelt. En af laserscannerens problemer er dog præcisionen, der på de undersøgte scannere ligger på $\pm 4 - 6$ mm for de enkelte punkter hvor hvidlysscanneren ligger på 0,6 mm. Hvidlysscannerens præcision gør den meget anvendelig indenfor industrien, mens det bliver meget detaljeret, når der arbejdes med almindelige bygningskonstruktioner.

Den laserscanner, der er medtaget i denne vurdering, er forholdsvis mobil. Selve scanneren består kun af en enhed og kan operere på batterier. Laserscannerne opstilles på en trefod som kendes fra traditionelt landmålingsudstyr. Hvidlysscanneren, der sammenlignes med i denne rapport, er afhængig af adgang til elektricitet og kræver en special holder.

Tidsforbruget på en scanning afhænger for alle scannere af størrelsen på det der skal scannes og hvilken opløsning, der ønskes. Scanningshastigheden (punkter pr. sekund) er dog væsentligt højere for hvidlysscanneren.

Ud fra de opsatte kriterier, er det vurderet at en laserscanner har den bedst udviklede teknik til scanning af konstruktioner. Her er fordelene hovedsageligt den store rækkevidde en laserscanner har, mobiliteten samt at den ikke påvirkes af lys og mørke. Det vurderes at laserscannerens præcision er tilstrækkelig til formålet.

Import af IFC modeller

Under arbejdet med at undersøge IFC modellen for Skjernvej 4A er det konstateret, at der forekommer visse problemer, når IFC modellen importeres til Revit Architecture 2009. Af ukendte årsager tolker Revit åbningerne i elementerne som en væg, således at der indsættes et vægelement oven i åbningen. På figur C.1 er fejlen i Revit illustreret.

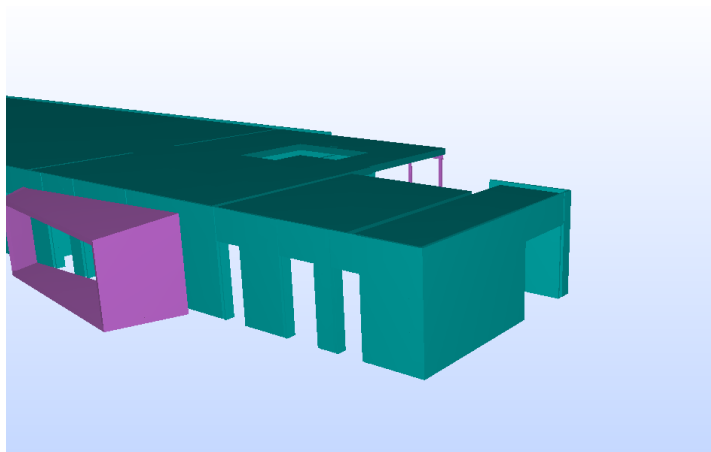
Ud over importen til Revit, er det ligeledes testet hvordan IFC modellen opfører sig, når den importeres til ArchiCAD 12. Som det ses af figur C.2 opstår det samme problem, når IFC modellen importeres til ArchiCAD 12.

Det er derfor undersøgt hvilken IFC version de to programmer er kompatible med, og resultatet er gengivet i tabel C.1.

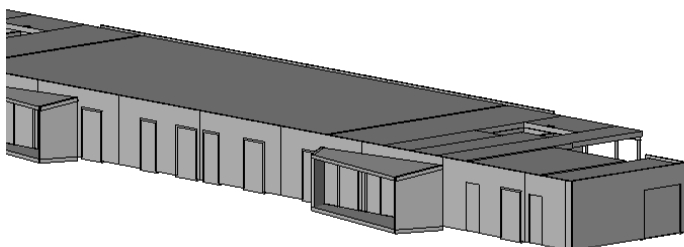
Program	ArchiCAD 12	Revit 2009	DDS Viewer 6.5	Solibri Model Viewer 5.0
IFC 2x3	+	+	+	+
IFC 2x2	÷	+	Ikke oplyst	+
IFC 2x	÷	+	Ikke oplyst	+
IFC 2.0	÷	Ikke oplyst	Ikke oplyst	+

Tabel C.1: Muligheden for at importere forskellige IFC formater til forskellige applikationer, jf. systemdokumentationen.

Modellen der forsøges importeret til de to programmer er i det nyeste IFC 2x3 format, og der skulle derfor ikke være nogle problemer ved at importere modellen. En tidligere rapport [Tredal og Johnsen, 2005] peger dog på samme problem, når en model eksporteres fra Tekla version 11.1 til ArchiCAD 9 i IFC 2x2 formatet. Hvorvidt det er eksport funktionen i Tekla, eller importfunktionen i Revit og ArchiCAD, der er problemet, vides ikke. Det kan blot konstateres, at når IFC filen åbnes i Solibri Model Viewer eller

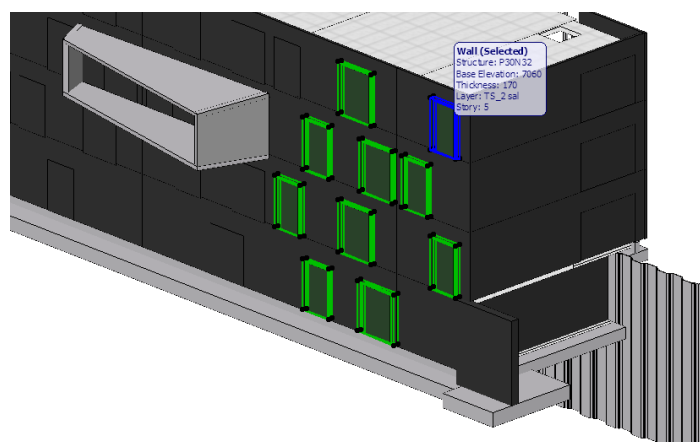


IFC model i Solibri model viewer



IFC model importeret til Revit Architecture 2009

Figur C.1: Eksempel på fejl ved importering af IFC fil til Revit Architecture 2009. Som det ses bliver åbninger i elementerne ikke importeret korrekt i Revit.



Figur C.2: Eksempel på fejl ved importering af IFC fil til ArchiCAD 12. Som det ses er det markerede element blevet importeret som en væg i stedet for en åbning.

DDS IFC Viewer 6.5 importerer åbningerne korrekt.

Scanningsrapport

Formålet med dette appendiks er at give en beskrivelse af det feltarbejde, som er udført i forbindelse med den 3D scanning, der er foretaget.

D.1 Feltarbejde

Som et led i undersøgelsen af om 3D scanning kan benyttes i byggeriets kvalitetssikringsproces, er der lavet en feltundersøgelse, hvor en allerede opført og fungerende bygning er blevet scannet. Bygningen ligger Skjernvej 4A i Aalborg Øst og huser Aalborg Universitets institut for Fysik og Nanoteknologi.

Scanningen blev foretaget tirsdag formiddag d. 21. april af projektgruppen. Udstyret til udførelsen af scanningen var venligst udlånt af Carsten Bech, institut for Samfundsudvikling og Planlægning.

Formål

Udfører scanninger af en bygningskonstruktion fra flere vinkler og sammensætte scanningerne, så der dannes en 3D model af konstruktionen, som kan sammenlignes med en virtuel bygningsmodel.

Udstyr

Scanneren, der blev benyttet var en Leica HDS 3000 laserscanner. HDS 3000 er en panoramascanner med en præcision på 6 mm ved en måleafstand på op til 50 m. Scanneren kan under optimale forhold indsamle op til 4.000 punkter pr. sek. og har et synsfelt på 360x270⁰. Scanneren har indbygget et

digitalkamera, som blandt andet benyttes under udvælgelsen af scanningsområdet og kan benyttes til at give de indscannede punkter autentisk farve.

Scanneren styres via et netkabel fra en PC med programmet Cyclone. Ved hjælp af programmet bestemmes scanningsområdet og opløsningen.



Figur D.1: Opstilling af Leica HDS 3000 laserscanner.

Opstilling af laserscanneren foregår ligesom opstilling af traditionelt landmålingsudstyr. Den benyttede laserscanner er vist på figur D.1, hvor apparatet er placeret på en trefod. Når der arbejdes i felten, kan der benyttes et 36 V transportabelt batteri som strømforsyning til scanneren, hvilket giver op til 6 timers funktions tid.

Ved flere scanninger, hvor laserscanneren skifter position, placeres der targets, som kan opfanges af scanneren fra de forskellige scanningspositioner jf. figur D.2. Targets er skiver af retrorefleksivt materiale, der reflekterer laserstrålen godt, hvormed scanneren kan identificere dem og opmåle koordinaterne til targets centrum meget præcist. Opmålingen af de placerede targets danner efterfølgende grundlaget for at sammensætte de enkelte scanninger.



Figur D.2: Placering af targets på gavlen af bygningen.

Forberedelse

Før selve scanningen blev udført lavede projektgruppen en række forberedende øvelser. Disse øvelser formål var at blive fortrolig med brugen af laserscanner, placering af targets og styringsprogrammet Cyclone. Indledningsvis fik projektgruppen en introduktion til scanneren og det medfølgende software af Carsten Bech fra institut for Samfundsudvikling og Planlægning, hvorefter det resterende arbejde med scanneren har været selvstudie.

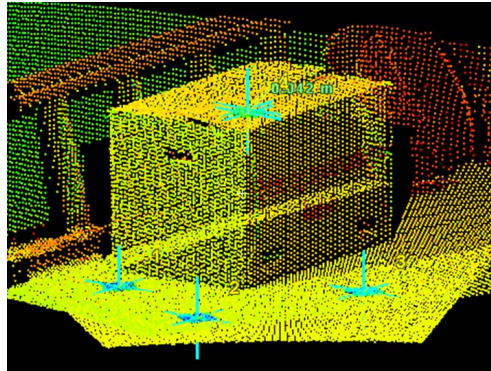
Af indledende forsøg blev der foretaget en scanning af en flyttekasse jf. figur D.3 med det formål, at scanne kassen fra to vinkler og binde scanningerne sammen ved hjælp af targets placeret på og omkring kassen. Som vejledning til forsøget havde projektgruppen adgang til en forsøgsvejledning, der blandt andet bliver benyttet til en fri studieaktivitet for Landinspektørens 7. semester, som introduktion til opmåling ved brug af en laserscanner.

Det blev af de indledende forsøg erfaret, at scanningsprocessen forenkles, hvis der under forberedelsen af en scanning bliver taget stilling til, hvor scanneren skal placeres i forhold til det emne, der ønskes scannet. Det skal ligeledes vurderes, hvor targets skal placeres, så mindst 4 targets kan opfanges af scanneren i hvert scan. Samtidig skal det undgås at et target placeres med en for spids vinkel i forhold til scanneren da dette giver en upræcis indmåling. Det er også vigtigt at vurdere, hvilken opløsning scanningsresultatet ønskes i, da selve scanningen tager længere tid, hvis der ønskes en høj opløsning.

Under klargøringen af scanningsudstyret til en scanning, skal det kontrolle-



(a) Flyttekasse med targets, billedet er fra scannerens digitalkamera.



(b) Scanningsresultat efter at to scanninger er sat sammen.

Figur D.3: Indledende øvelse hvor flyttekasse scannes fra to vinkler.

res at batterier til scanneren og PC er fuldt opladet, strømkabler, netkabler og targets er pakket med og der skal medbringes tape til ophængning af targets.

Udførelse

Dagen hvor scanningen skulle udføres, startede med at projektgruppen hentede scanningsudstyret og transporterede det til lokaliteten jf. figur D.4a. Destinationen var Skjernvej 4A hvor der skulle udføres tre scanninger, en scanning indenfor og to udenfor.



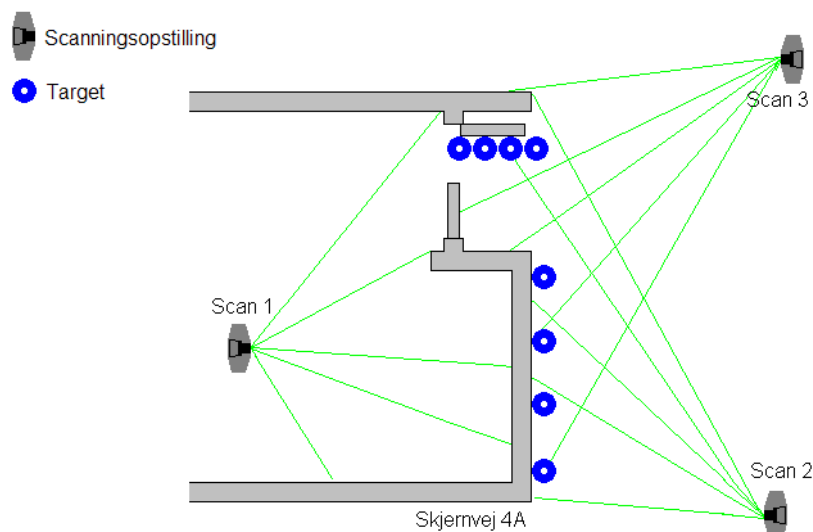
(a) Transport af scanningsudstyr.



(b) Klargøring til første scanning.

Figur D.4: Billeder fra feltarbejde på Skjernvej 4A i Aalborg.

Efter ankomsten blev scanneren stillet op inde i bygningens forgang, så den nederste etage af gavlen kunne scannes indefra jf. figur D.4b. Der blev op-hængt targets på bygningens yderdør, så scanningen kunne sættes sammen med de efterfølgende scanninger, jf. figur D.5.



Figur D.5: Planskitse af scanningsopstilling på Skjernvej 4A.

Efter at scanneren og PC'en var opstillet og tændt, blev Cyclone åbnet, og der blev oprettet en database, hvor scanningsdata kunne gemmes. Forbin-delse til scanneren blev oprettet, og fotos til at orientere scanningen efter blev taget. Scanningen startede, da det ønskede scanningsområde var mar-keret og indstillingerne for den ønskede opløsningen indtastet. Det blev her valgt at foretage scanningen med en opløsning på ca. 10x10 mm på selve bygningen. Før scanningen blev de fundne targets markeret og hver target identificeret med et ID nummer, hvorefter de blev finscannet for at bestemme koordinaterne til targets centrum.

Der blev under scanningen udarbejdet en tidstabel for at undersøge tids-forbruget, jf. tabel D.1. Tiden angiver hvornår en aktivitet er påbegyndt. Der blev i alt brugt 2 timer og 20 minutter til at udføre scanningerne.

Af den brugte tid er det ud fra tabel D.1 vist, at der til den første scanning blev benyttet 45 min, hvoraf selve scanningen kun tager ca. 10 min. Den resterende tid bliver brugt på opstilling af udstyr, placering af targets og indscanning af targets.

Tid	Min	Aktivitet
09:20	0	Ankomst
09:25	5	Opstilling af udstyr
09:30	5	Targets placeres på dør
09:35	5	Scanner klar til fotografering
09:45	10	Prøve scanning af dør
09:55	10	Targets på dør indscannet
10.00	5	Indstilling af scanner
10.10	10	Første scanning
10.15	5	Scanner flyttes til ny placering
10.20	5	Targets på gavlen opsat
10.30	10	Scanner klar til fotografering
10.35	5	Targets klar til indscanning
10.45	10	Targets på dør og gavlen indscannet
10.50	5	Venstre gavlhjørne finscannet
11.00	10	Anden scanning
11.05	5	Scanner flyttes til ny placering
11.20	15	Targets på gavlen indscannet
11.30	10	Tredje Scanning
11.40	10	Oprydning

Tabel D.1: Tidstabel for udførelse af scanning.

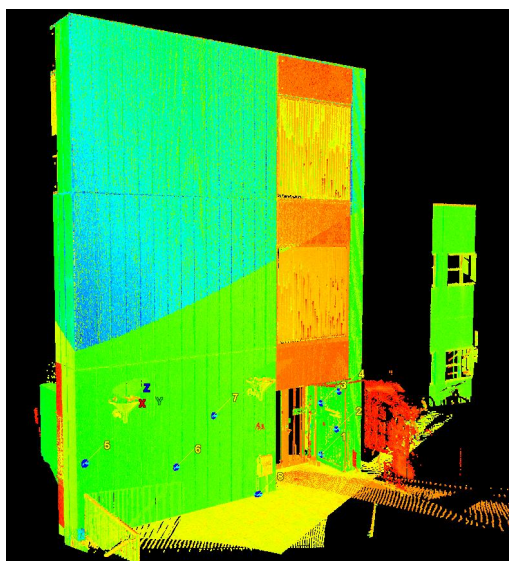
Efter første scanning flyttes opstillingen til en anden position, (scan 2) jf. figur D.5. Det er ud fra tidstabellen fundet, at selve scanningen af gavlen her også kun har taget ca. 10 min mens totaltiden for scanning 2 har været tilsvarende 45 min. Det kan derfor tyde på at opstilling af udstyr og indscanning af targets, tager lang tid i forhold til den tid scanneren arbejder, med scanning af selve konstruktionen.

Det samlede tidsforbrug til scanning 3 var på 30 min. Her bliver de første 20 min brugt på at flytte scanneren og indscanne targets og de sidste 10 min på at scanne bygningen. Da de indscannede targets her allerede er sat op og scanningsugstyret ikke skal flyttes så langt, er forberedelsestiden her mindre end ved de to første scanninger.

Det er vigtigt, at der laves et godt forarbejde før en scanning udføres, så det er klart, hvor scanneren og targets skal placeres. Det forventes at tiden til opsætning af scanner og targets kan mindskes ved gentagelses effekten.

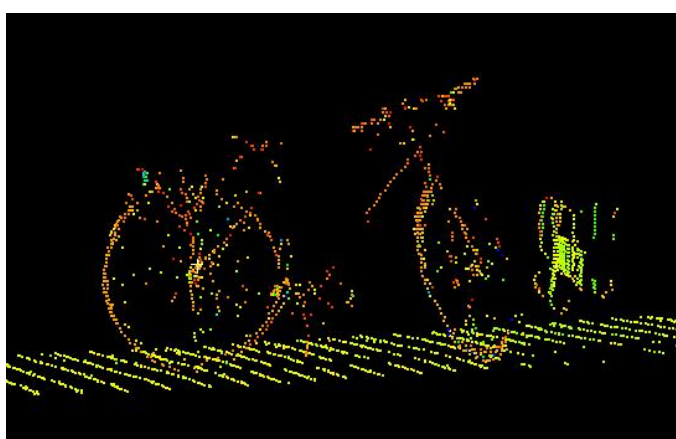
Databehandling

Scanningsresultaterne fra de tre scanninger blev efter udførelsen samlet i en samlet punktsky ved brug af programmet Cyclone. På figur D.6 er den samlede punktsky illustreret.

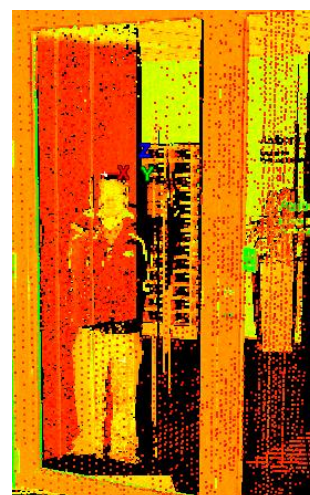


Figur D.6: Scanningsresultat.

Selve databehandlingen med at sætte de tre scanninger sammen er forholdsvis simpel og tager kun ca. 5 min. Det er dog vigtigt at targets er blevet nummereret med det rigtige ID nummer, da scanningerne ellers skal sammensættes manuelt.



(a) Cykel.



(b) Person.

Figur D.7: Eksempler på støj.

Efter sammensætningen brugte projektgruppen noget tid på at rense scanningerne for støj, jf. figur D.7. Da laserstrålen går gennem vinduer, blev dele af vinduernes baggrund scannet. Bygningen fungerer i dag til undervisningsbrug, og da scanningerne foregik omkring en døråbning, blev personer som gik gennem døren også i enkelte tilfælde opfanget af scanneren.

Det blev erfaret, at der kan bruges lang tid på databehandling i form af fjernelse af støj fra punktskyen. Det skal her vurderes hvilke typer af støj, som har betydning for sammenligningen med 3D modellen.

Sammenligningsrapport

I det følgende beskrives det hvorledes det praktiske forsøg med sammenligningen af den udførte scanning og 3D modellen er gennemført.

E.1 Inspektionssoftware

Til at gennemføre sammenligningen er der brugt inspektionssoftwaren Rapidform XOv2 [Rapidform, 2009]. Denne software er udviklet specielt med det formål, at kunne bruges til at kontrollere tolerancer på emner i industrien.

Programmet er parametrisk opbygget, således at der til enhver tid kan ændres på valg foretaget tidligere i processen. Dette giver ligeledes mulighed for, at når først programmet er opsat til at kontrollere en bestemt del, er det blot scanningsdata, der skal udskiftes for at gennemføre kontrollen for et nyt emne.

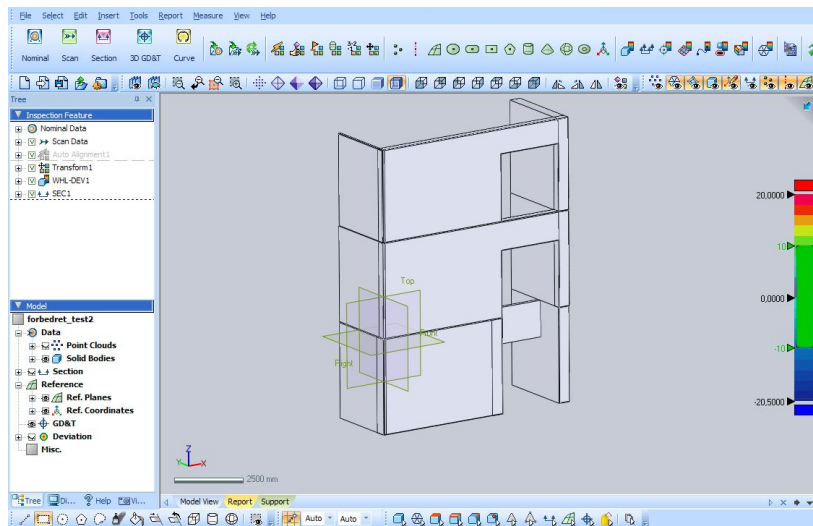
Programmet blev kørt på en HP Pavilion dv2000 med en AMD Turion 64X2 1,61 GHz processor og 2 GB ram, hvilket svarer til en gennemsnitlig bærbar computer pt.

Af lignende software kan nævnes Geomagic og Atos Inspection.

E.2 Arbejdsgangen

Det første skridt i sammenligningsprocessen er at få importeret 3D modellen eller det nominelle data, som det kaldes i Rapidform. Efter at have fået

løst problemerne med formatet jf. afsnit 7.5 forløb importen af ACIS uden problemer. Modellen importeres som enkelte dele og består i dette tilfælde af 11 enkeltdele. På figur E.1 ses modellen efter import.



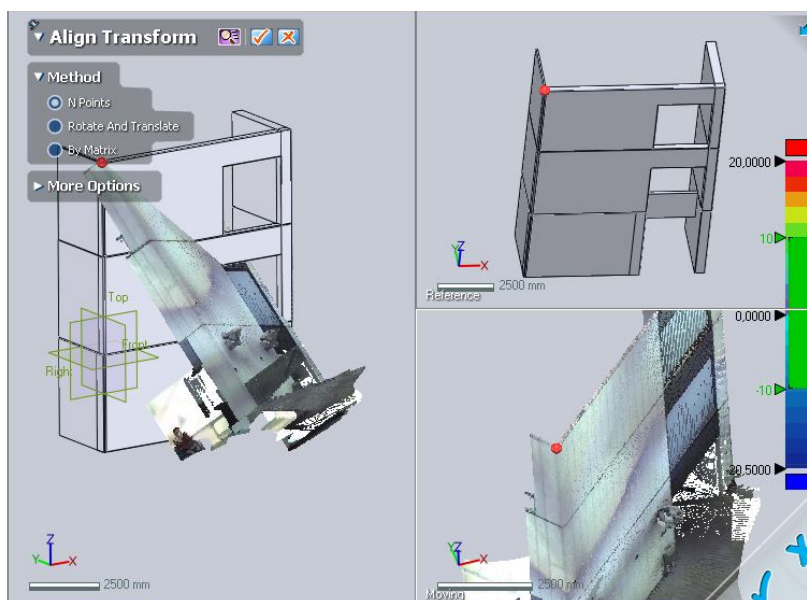
Figur E.1: 3D modellen efter import til inspektionssoftwaren. Screenshot fra Rapidform XOV2.

Efter importen af 3D modellen skal data fra scanningen indlæses. De enkelte delscanninger var forinden blevet samlet i en samlet .PTS fil. Importen af filen forløb uden problemer, og det kunne konstateres at punktskyen efter import stadig var opdelt i de enkelte delscanninger, dog placeret korrekt i forhold til hinanden. Softwaren foreslog at foretage en alignment af delscanningerne i forhold til hindanden, hvilket allerede var gjort i scanningssoftwaren Cyclone. Det gav dog ingen problemer at forsætte uden at foretage denne alignment. Den importerede punktsky var jf. figur E.2, ligeledes forsynet med farvedata fra scannerens digitalkamera.

Efter import af scanningen kunne det konstateres, at hhv. scanning og 3D model var beliggende i hvert sit koordinatsystem. Det var derfor nødvendigt at foretage en justering af de to modeller jf. figur E.3. Det optimale ville selvfølgelig have været at have nogle referencepunkter i punktskyen, som var indmålt med f.eks. en totalstation, men da dette ikke var udført i felten, blev der i stedet benyttet en metode, hvor de to datasæt kunne refereres sammen ved at vælge sammenfaldende punkter i hhv. 3D modellen og punktskyen jf. figur E.4.



Figur E.2: Scanningsdata efter import til inspektionssoftwaren. Screenshot fra Rapidform XOV2.



Figur E.3: Orientering af scanning og 3D model i inspektionssoftwaren. Screenshot fra Rapidform XOV2.

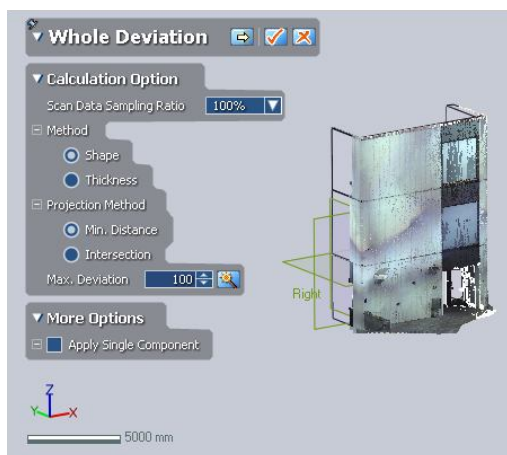


Figur E.4: 3D model og scanningsdata efter oriering i inspektionssoftwaren. Screenshot fra Rapidform XOV2.

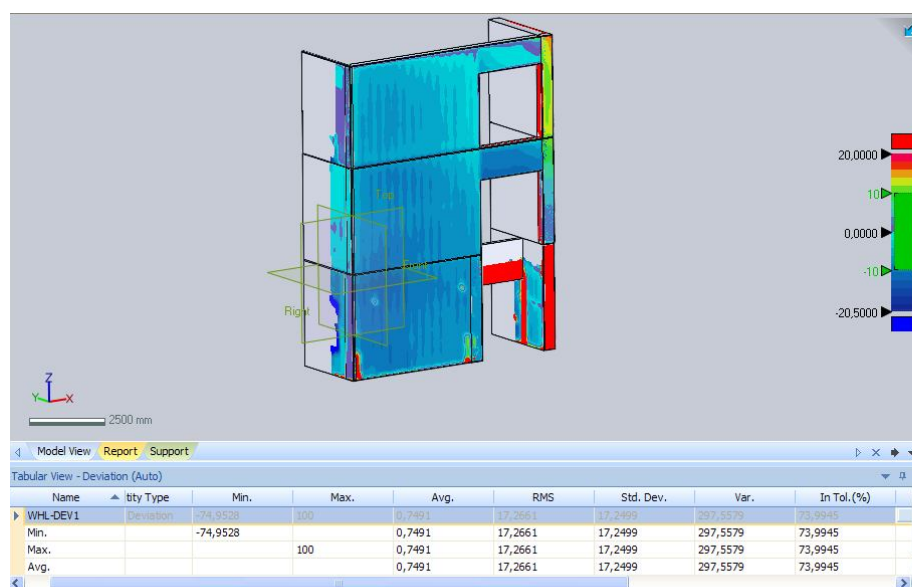
Efter at 3D modellen og punktskyen var blevet refereret sammen, kunne sammenligningen foretages. I forbindelse med sammenligningen var der visse valgmuligheder jf. figur E.5. Her blev det valgt at sammenligne alle punkter i punktskyen, og det blev valgt at det var formen og ikke tykkelsen, der skulle sammenlignes. Derudover blev det valgt, at det var den korteste afstand mellem fladerne i 3D modellen og punkterne i punktskyen, der skulle beregnes. En sidste mulig parameter, der blev valgt, var den maksimale afvigelse. Denne er vigtig, da softwaren benytter den til at udelukke punkter fra beregningen, som ligger usandsynligt langt fra fladerne. På denne måde kan påvirkningen fra støj i sammenligningen minimeres. I den konkrete test blev det valgt at frasortere punkter med en afvigelse på over 100 mm.

Beregningen af afvigelsen blev derefter foretaget, hvilket tog ca. 5 min, hvorefter resultatet blev visualiseret ved at omsætte afvigelserne til en farvekode, som blev projiceret ind på 3D modellen. Resultatet af sammenligningen er vist på figur E.6.

Resultatet af afvigelsesberegningen viser at størstedelen af facaden er placeret med en afvigelse på ca. 5 mm. Det lodrette mønster der forekommer skyldes, at der på bygningens facade var en række lodrette fordybninger, som ikke er modelleret i 3D modellen. Som det ses, er der nogle markante

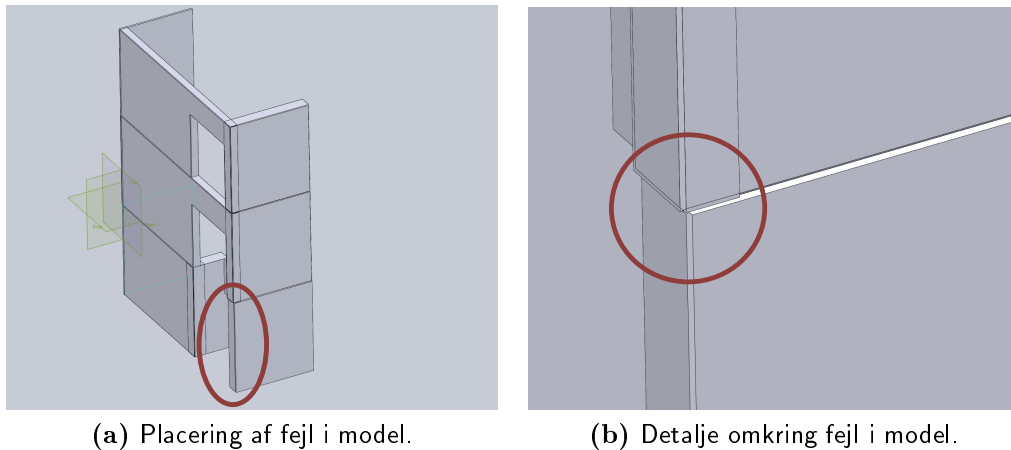


Figur E.5: Valgmuligheder ved beregning af afvigelser i inspektionssoftwaren. Screenshot fra Rapidform XOV2.



Figur E.6: Resultat af afvigelsesberegning. Farverne repræsenterer afvigelser fra -20 mm (blå) til +20 mm (rød). Screenshot fra Rapidform XOV2.

afvigelser omkring døråbningen. Hvorvidt disse skyldes fejl i modellen, eller det udførte arbejde vides ikke. Der er dog noget, der tyder på, der muligvis er en fejl i modellen, da der er et spring mellem de to nederste elementer jf. figur E.7.



Figur E.7: Illustration af mulig fejl i 3D modellen, som har ført til afvigelser.

Ud fra resultatet af sammenligningen kan det konstateres, at hvis blot den maksimalt tilladelige afvigelse vælges korrekt, har støj i selve scanningen ikke den store indflydelse på resultatet, jf. figur E.8. Dette er således en stor fordel, da det er forventeligt, at der vil være en del støj på en byggeplads.



Figur E.8: Visualisering af afvigelser og scaningsdata. Som det ses giver lamperne ikke anledning til afvigelser pga. valget af maksimalt tilladelige afvigelse. Screenshot fra Rapidform XO2.

Program og formatbeskrivelse

Dette appendiks tjener som et opslagsværk for læseren således, at der hurtigt kan gives et overblik over, hvad de enkelte applikationer og formater indeholder.

F.1 Modelleringsværktøjer

Den følgende kategori af programmer benyttes alle til at skabe forskellige former for 3D modeller. I projektet er programmerne hovedsageligt brugt til at ændre i modellerne eller konvertere modellerne fra et format til et andet.

Revit Architecture 2009

Revit Architecture forhandles af amerikanske Autodesk og er et objektorienteret og parametrisk 3D tegneprogram rettet mod arkitekter. Revit skulle efter specifikationerne være fuldt kompatibelt med IFC 2X3 formatet. I Revit arbejdes der direkte i en 3D model, hvor ud fra der automatisk kan genereres 2D tegninger.

ArchiCAD 12

ArchiCAD udvikles af ungarnske Graphisoft og er et objektorienteret parametrisk 3D tegneprogram rettet mod arkitekter. ArchiCAD skulle efter specifikationerne være fuldt kompatibelt med IFC 2X3, DWG samt DXF formatet.

AutoCAD 2007

AutoCAD udvikles af amerikanske Autodesk og har traditionelt været et tegneprogram hovedsageligt rettet mod fremstillingen af 2D tegninger. Gennem tiden er der dog blevet tilføjet muligheden for at arbejde med 3D modeller. AutoCad er ikke objektorienteret, men strukturerer istedet tegningen i lag.

Tekla Structures 13

Tekla Structures udvikles af finske Tekla Corporation og er et objektorienteret parametrisk 3D tegneprogram rettet mod ingeniører. Programmet er hovedsageligt rettet mod projektering af beton og stålkonstruktioner, men der kan desuden tilkøbes moduler, der gør det muligt at bruge programmet til planlægning i 4D. Programmet er kompatibelt med bl.a. IFC, DWG, DXF og CIS/2.

MagiCad HPV 2006.5.

MagiCAD udvikles af finske Progman Oy og er et program til projektering af installationer. MagiCAD er IFC kompatibelt.

F.2 Viewere

Denne kategori af programmer benyttes til at undersøge forskellige modeller.

DDS IFC Viewer 6.5

Denne viewer er udviklet af norske Data Design Systems, og kan gratis hentes på deres hjemmeside. Vieweren kan åbne IFC, DWG og DXF filer og bruges til at undersøge hvilke informationer, der er tilknyttet de enkelte elementer.

Solibri Model Viewer 5.0

Denne viewere er udviklet af finske Solibri og er gratis tilgængelig på internettet. Vieweren kan udelukkende åbne IFC filer.

F.3 Analysesoftware

I denne kategori beskrives software, der kan benyttes til at analysere afvigelser mellem forskellige former for modeller.

Navisworks

Naviswork er udviklet af amerikanske Autodesk, og indeholder en del flere funktioner end de typiske viewere. Formålet med programmet er at kunne bringe data fra forskellige applikationer hos arkitekter og ingeniører sammen i en samlet applikation således, at kollisioner gøres synlige. Programmet kan håndtere meget store datamængder og kan derfor ligeledes bruges til at visualisere en CAD model og en punktsky i samme applikation.

Solibri Model Checker

Solibri Model Checker er endnu et produkt fra finske Solibri. Programmets hovedfunktion er som et analyseværktøj til kollisionkontrol mellem forskellige fagmodeller, men kan også fungere som en viewer. Solibri Model Checker understøtter alle de større BIM værktøjer, og er ligeledes IFC kompatibelt. Solibri Model Checker kan ikke importere punktskyer.

Rapidform XO2

XO2 er udviklet af koreanske Rapidform og er et specialiseret program med det specifikke formål at kunne visualisere afvigelser mellem en punktsky og en CAD model. Programmet er rettet mod industrien og benyttes til at kontrollere tolerancer på emner. Programmet understøtter en omfattende række "industri" formater inden for punktskyer og 3D modeller. Hverken DWG eller IFC understøttes dog.

F.4 Scanningssoftware

Her beskrives den software som er benyttet til at styre den anvendte scanner og foretage den indledende databehandling.

Cyclone 5.4

Cyclone er udviklet af schweiziske Leica Geosystems med det specifikke formål at gøre det muligt for brugeren at styre deres laserscanner vha. en bærbar computer. Programmet indeholder desuden en databehandlings del,

som gør det muligt at sammensætte data fra forskellige scanningsopstillinger. Ligeledes findes der i programmet en række værktøjer til at foretage en modellering ud fra de målte punkter.

F.5 Formatoversigt

I dette afsnit beskrives de formater som benyttes i projektet.

IFC

IFC er en forkortelse for *Industry Foundation Classes*, og er et åbent filformat til udveksling af data omkring byggeri. IFC er udviklet af International Alliance for Interoperability (IAI). Formatet er udviklet ud fra den objektorienterede tankegang, og er designet til at indeholde en lang række informationer ud over de rent geometriske. [IAI, 2008]

DWG

DWG er et kommercielt format som ejes af Autodesk, og benyttes bl.a. af AutoCAD. DWG formatet blev i 1998 af Autodesk vurderet til at være det mest brugte format til CAD tegninger med mere end to mia filer på verdensplan [Autodesk, 1998].

DXF

DXF er en forkortelse for *Drawing Exchange Format* og ejes af Autodesk. DXF er Autodesk's forsøg på at lave et filformat til udveksling af data med andre applikationer. Tidligere var specifikationerne for formatet ikke offentligt tilgængelige, men i dag er specifikationerne frit tilgængelige på Autodesk's hjemmeside. [Autodesk, 2009]

ACIS

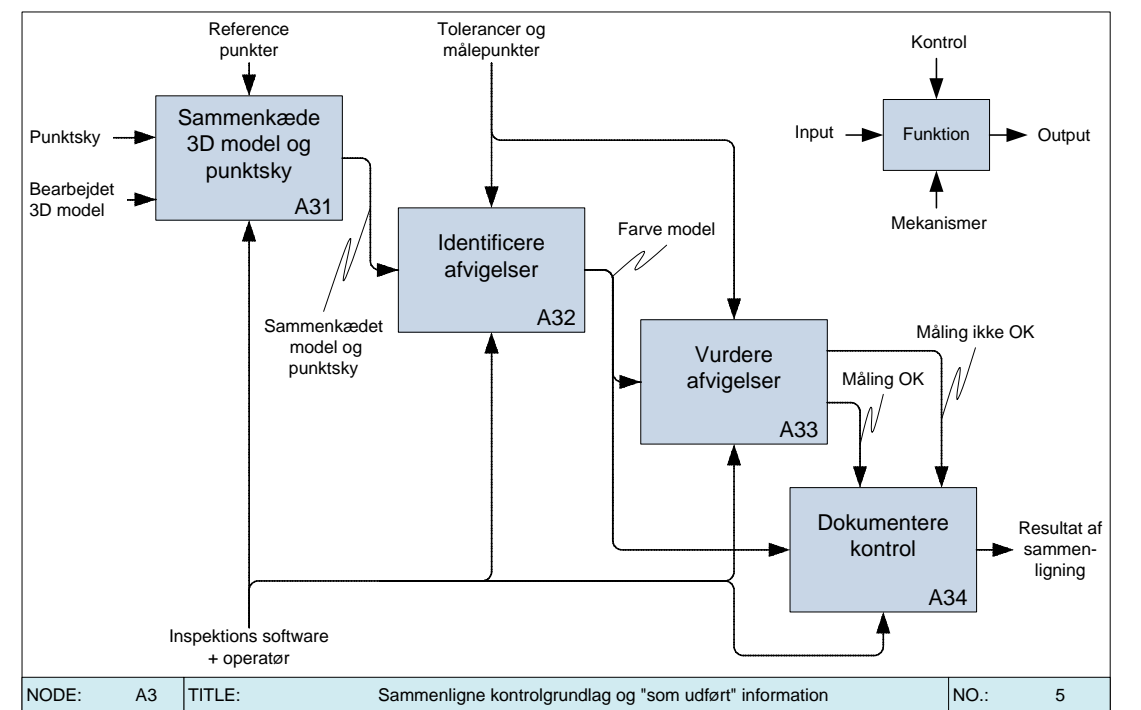
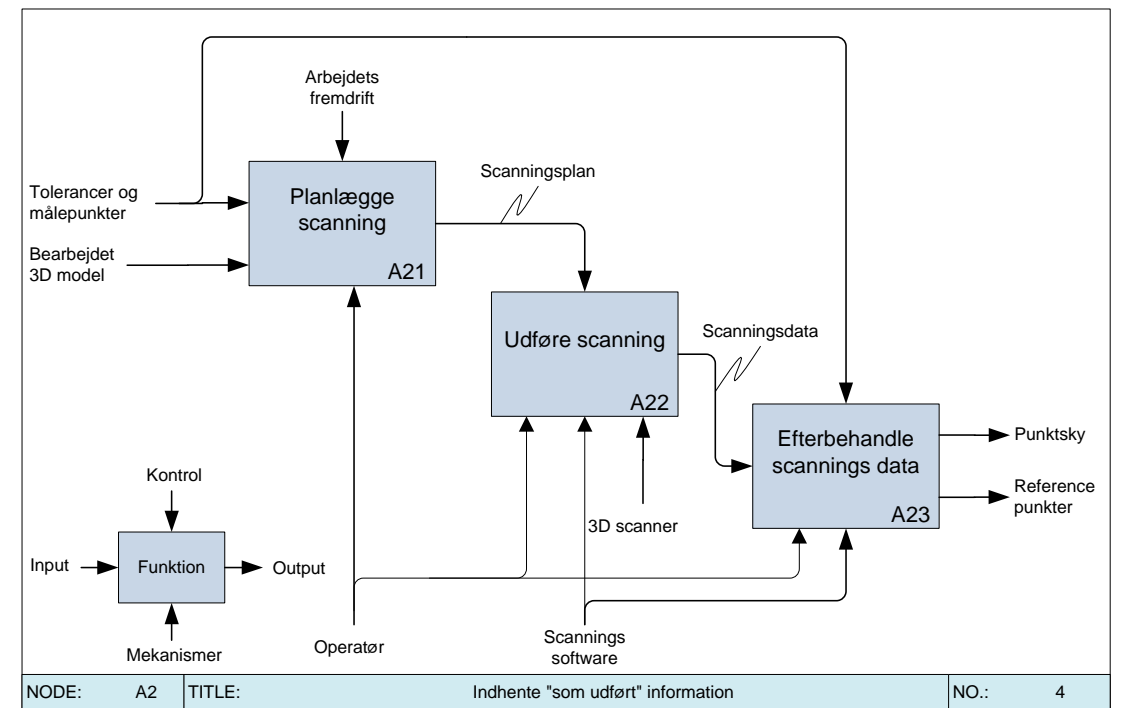
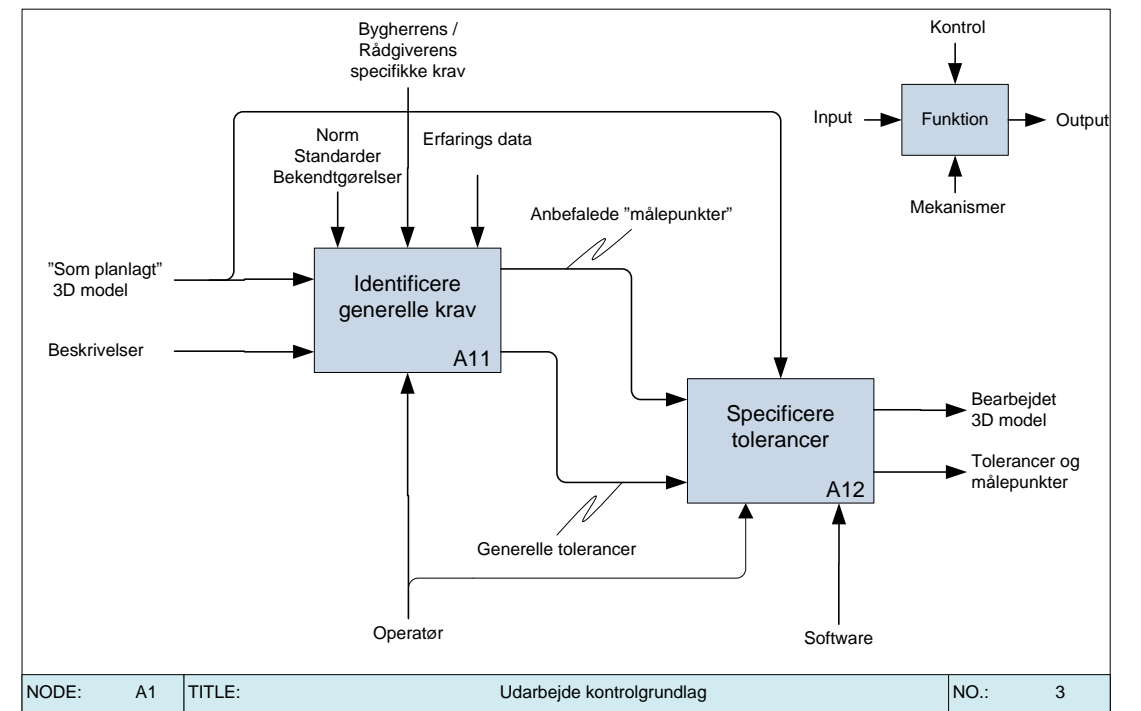
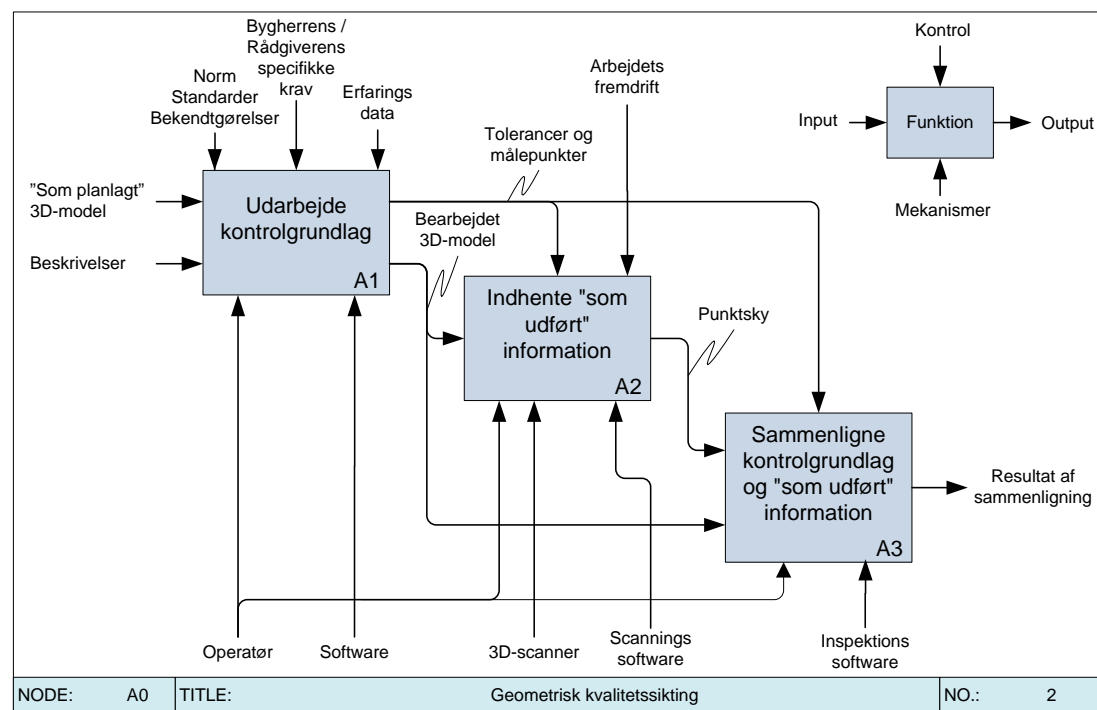
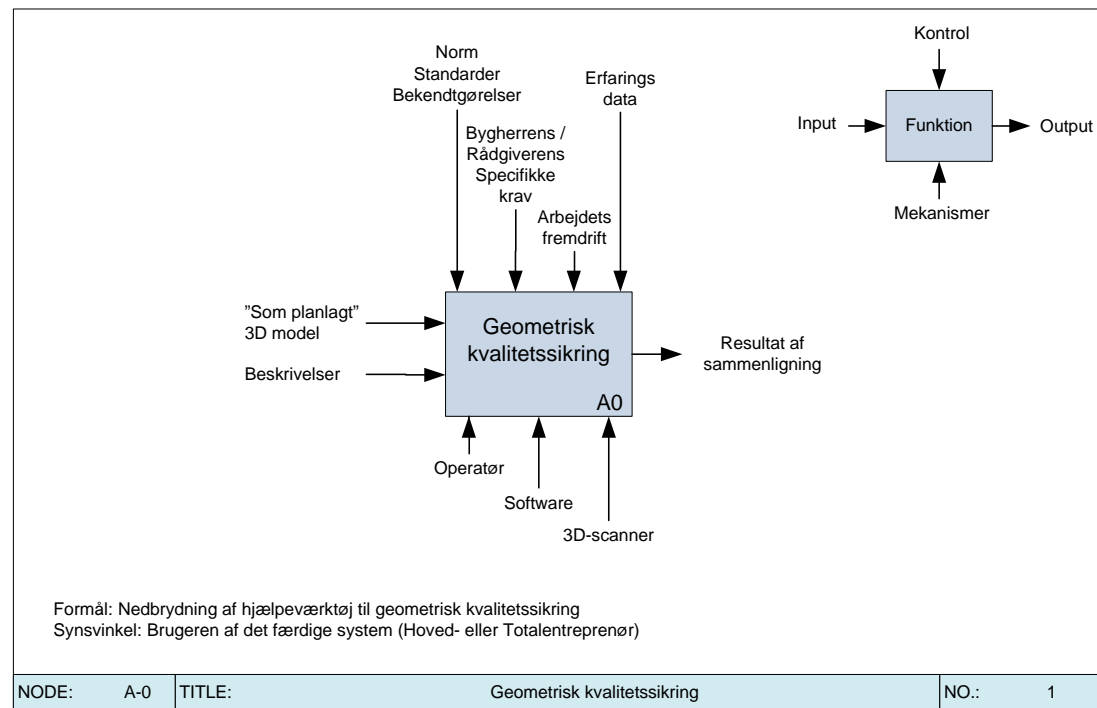
ACIS formatet er et format designet udelukkende til at transportere 3D geometri. Formatet ejes af amerikanske Spatial Corporation, som leverer 3D modellerings grundmoduler til andre software producenter. ACIS formatet har forlængelsen .SAT hvilket står for *Standard ACIS Text* og gemmes som tekstfiler, der kan åbnes med en almindelig texteditor. Formatet har en objektorienteret arkitektur. [Spatial Corporation, 2009]

PTS

PTS formatet bruges til transport af data fra scanneren. Formatet gemmer de enkelte målinger i en textfil (ASCII) med tre koordinater (x,y,z) samt intensiteten af målingen for det enkelte punkt og farven, opfanget af kameraet, i RGB kode. Punktskyernes koordinater er alle angivet i det fælles brugerdefinerede koordinatsystem. Enheden for koordinaterne vælges af brugeren. Indeholder filen flere punktskyer, der er refereret sammen, gemmes de enkelte punktskyer adskilt internt i formatet. [Laserscanning.org.uk, 2009]

APPENDIKS G

IDEF₀ - diagram



Litteratur

- [Anlægsteknikforeningen, 2005] Anlægsteknikforeningen (2005). *Anlægsteknik 2*. Polyteknisk Forlag, 2. udgave.
- [Apelgren et al., 2005] Apelgren, S., Richter, A. og Koch, C. (2005). *Snublesten i byggeriet*. Danmarks Tekniske Universitet, 1. udgave.
- [Autodesk, 1998] Autodesk (1998). Frequently asked questions. Set d. 13. maj 2009. <http://web.archive.org>.
- [Autodesk, 2009] Autodesk (2009). Dxf reference. Set d. 15. Maj 2009. <http://images.autodesk.com>.
- [Beyer og Holtzblatt, 1998] Beyer, H. og Holtzblatt, K. (1998). *Contextual Design*. InContext Enterprise.
- [Bips, 2005] Bips (2005). 3d arbejdsmetode 2006. Set d. 15. april 2009. www.detdigitalebyggeri.dk/.
- [Boehler, 2009] Boehler, W. (2009). 3d scanning instruments. Set d. 13. april 2009. <http://www.i3mainz.fh-mainz.de/>.
- [Bosche og Haas, 2008] Bosche, F. og Haas, C. (2008). Automated retrieval of 3d cad model objects in construction range images. *Automation in construction*, 17.
- [Boukamp og Akinci, 2007] Boukamp, F. og Akinci, B. (2007). Automated processing of construction specifications to support inspection and quality control. *Automation in construction*, 17.
- [Christiansson, 2008] Christiansson, P. (2008). Systemudvikling. Set d. 14. Maj 2009. <http://it.civil.aau.dk/it/education/index.html>.
- [COWI, 2008] COWI (2008). 3d-briller kombinerer virkelighed med bygningsmodel. Set d. 26. Maj 2009. <http://www.cowi.dk>.

- [Dansk Byggeri, 2007] Dansk Byggeri (2007). *Hvor går grænsen? Beton - in situ, elementer og montage*. Dansk Byggeri, 1. udgave.
- [Det digitale byggeri, 2009] Det digitale byggeri (2009). Det digitale byggeris side for byg- og driftsherre. Set d. 22. April 2009. <http://www.detdigitalebyggeri.dk>.
- [Eastman et al., 2008] Eastman, C., Teichlos, P., Sacks, R. og Liston, K. (2008). *BIM Handbook*. John Wiley and Sons.
- [EBST, 2004] EBST (2004). Svigt i byggeriet. Set d. 18. februar 2009. <http://www.ebst.dk>.
- [EBST, 2005] EBST (2005). Byggeriets handlingsplan mod fejl og mangler. Set d. 18. februar 2009. <http://www.ebst.dk>.
- [EBST, 2009] EBST (2009). Omfanget af svikt, fejl, mangler og skader i dansk byggeri. Set d. 18. februar 2009. <http://www.ebst.dk>.
- [El-Omari og Moselhi, 2008] El-Omari, S. og Moselhi, O. (2008). Intergrating 3d laser scanning and photogrammetry for progress measurement of construction work. *Automation in construction*, 18.
- [Faro, 2009] Faro (2009). Faro. Set d. 29. april 2009. <http://www.faro.com>.
- [Finansministeriet, 2009] Finansministeriet (2009). Effektive offentlige arbejdsprocesser - værktøjer. Set d. 18. maj 2009. <http://www.fm.dk>.
- [ForBAU, 2009] ForBAU (2009). Lehrstuhl für fördertechnik materialfluss logistik. Set d. 26. maj 2009. <http://www.fml.mw.tum.de/forbau/>.
- [GOM, 2009] GOM (2009). Industrial 3d measurement techniques. Set d. 9. marts 2009. <http://www.gom.com>.
- [GPSnet.dk, 2009] GPSnet.dk (2009). Rtk - real time kinematic gps. Set d. 11. maj 2009. <http://www.gpsnet.dk>.
- [Hammarlund og Josephson, 1996] Hammarlund, Y. og Josephson, P. (1996). *Kvalitetsfelkostnader på 90-talet - en studie av sju byggprojekt*. Chalmers Tekniska högskola, 1. udgave.
- [IAI, 2008] IAI (2008). Model - industry foundation classes (ifc). Set d. 15. Maj 2009. <http://www.buildingsmart.com/>.

- [Ingeniøren, 2007] Ingeniøren (2007). Når scanningen lyser rødt og blå er det en om? Set d. 5. marts 2009. <http://ing.dk/artikel/83486>.
- [Ingeniøren, 2008a] Ingeniøren (2008a). Entreprenører: Katastrofeår med konkurser piner branchen. Set d. 17. marts 2009. <http://ing.dk/artikel/92304>.
- [Ingeniøren, 2008b] Ingeniøren (2008b). Rambøll afprøver rfid-chip på byggepladsen. Set d. 19 Maj 2009. <http://ing.dk/artikel/91319-ramboell-afproever-rfid-chip-paa-byggepladsen>.
- [Ingeniøren, 2009] Ingeniøren (2009). Standford har styrket troen på det digitale byggeri. Avisartikel fra Ingeniøren d. 3/4.
- [Josephson, 1994] Josephson, P. (1994). *Orsaker til fel i byggandet - en studie om felorsaker, felkonsekvenser, samt hinder for inlarning i byggprojekt*. Chalmers Tekniska högskola, 1. udgave.
- [Jul et al., 2005] Jul, T., Larsen, J. og Møller, J. (2005). *Kvalitetsstyrning og måleteknik*. Erhvervsskolernes Forlag, 3. udgave.
- [Kaspar, 2004] Kaspar, M. (2004). *Laser scanning systems in civil engineering and land surveying*. VEGA, 1. udgave.
- [Laserscanning.org.uk, 2009] Laserscanning.org.uk (2009). About 3d point cloud format. Set d. 15. maj 2009. <http://www.laserscanning.org.uk>.
- [Laursen, 2008] Laursen, J. H. (2008). 3d scanning - gi'r løsninger. Set d. 18. februar 2009. <http://www.zebicon.com>.
- [Leica, 2009] Leica (2009). Leica geosystems. Set d. 8. marts 2009. <http://www.leica-geosystems.com>.
- [Leica Geosystems, 2009] Leica Geosystems (2009). Leica scanner den forbudte by i 3d. Set d. 17. marts 2009. <http://www.leica-geosystems.com>.
- [Li et al., 2008] Li, S., Isele, J. og Bretthauer, G. (2008). Proposed methodology for generation of building information model with laserscanning. *Tsinghua Science and Technology*, 13.
- [Lodahl Danmark, 2009] Lodahl Danmark (2009). Projekt reference liste. Set d. 17. marts 2009. <http://www.lodahl.com>.

- [Model og Effekt Fabrikken, 2009] Model og Effekt Fabrikken (2009). Model og effekt faprikken - gør ideer til virkelighed. Set d. 30. marts 2009. <http://moef.dk>.
- [Nilsson, 2007] Nilsson, E. (2007). *SWOT-analysen som et dynamisk og løsningsorienteret værktøj*. Center for Technology, 1. udgave.
- [Rapidform, 2009] Rapidform (2009). Xov2 - inspektionssoftware. www.rapidform.com.
- [Rasmussen, 1996] Rasmussen, A. (1996). *Introduktion til IDEF₀*. DTU, 1. udgave.
- [Retsinformation, 2001] Retsinformation (2001). Vejledning om kvalitetssikring i byggeriet. Set d. 18. marts 2009. <https://www.retsinformation.dk>.
- [Retsinformation, 2009] Retsinformation (2009). Bekendtgørelse om kvalitetssikring af byggearbejder. Set d. 24. marts 2009. <https://www.retsinformation.dk>.
- [Spatial Corporation, 2009] Spatial Corporation (2009). Set d. 7. maj 2009. <http://www.spatial.com/products/3d-acis-modeling>.
- [Tredal og Johnsen, 2005] Tredal, N. og Johnsen, J. S. (2005). 3d projektering hos rådgiverer. Set d. 11. marts 2009. <http://3dprojektering.dk/>.
- [Trimble, 2009] Trimble (2009). Trimble. Set d. 6. maj 2009. <http://www.trimble.com>.
- [Vejdirektoratet, 2008] Vejdirektoratet (2008). Paradigma for udbudskontrolplan (ukp-p). set d. 9. marts 2009. <http://www.vejsektoren.dk>.
- [Vejdirektoratet, 2009] Vejdirektoratet (2009). Udbudsforskrifter. set d. 22. maj 2009. <http://www.vejsektoren.dk>.
- [Zebicon, 2009a] Zebicon (2009a). Billeder fra zebicons arkiv. Modtaget efter møde d. 2 marts.
- [Zebicon, 2009b] Zebicon (2009b). Industriel 3d måletiknik og digitalisering. Set d. 8. marts 2009. <http://www.zebicon.com>.

5.796171 1.201577 -1.628032 -45 89 98 98
5.806189 1.212108 -1.630239 -67 85 94 93
5.804252 1.211234 -1.625261 -54 96 105 104
5.811057 1.214375 -1.634428 -80 79 88 87
5.821687 1.230773 -1.657625 -67 86 96 95
5.834409 1.242629 -1.653519 -66 86 96 95
5.794479 1.194960 -1.667679 -64 93 103 102
5.809489 1.213663 -1.662257 -80 89 98 97
5.809615 1.213732 -1.656795 -36 90 100 99
5.794140 1.194815 -1.662307 -91 92 101 100
5.799743 1.203251 -1.654619 -85 91 101 100
5.793745 1.194632 -1.656874 -79 91 101 100
5.799065 1.202926 -1.660355 -65 93 102 101
5.803003 1.204766 -1.664695 -72 92 101 100
5.818466 1.223528 -1.659153 -74 88 98 98
5.815042 1.222001 -1.654661 -75 89 98 97
5.826319 1.232936 -1.634531 -83 82 91 90
5.844337 1.252770 -1.650142 -39 83 91 90
5.842429 1.251900 -1.645317 -83 83 92 91
5.846709 1.253889 -1.638671 -82 79 87 87
5.837217 1.243958 -1.641866 -83 80 89 88
5.827796 1.233614 -1.650555 -75 85 94 93
5.824263 1.231980 -1.646063 -40 80 89 88
5.825232 1.232435 -1.640327 -70 81 89 88
5.832411 1.241747 -1.648633 -76 86 94 94
5.841633 1.251564 -1.634634 -95 81 90 89
5.834088 1.242530 -1.637283 -73 81 89 88
5.840656 1.251122 -1.629414 -79 84 93 92
5.835758 1.248851 -1.625316 -74 95 101 101
5.827174 1.233314 -1.628856 -72 79 87 86
5.822559 1.237202 -1.624019 -64 93 99 99
5.823815 1.231764 -1.624303 -74 78 87 86
5.833983 1.242477 -1.631790 -82 81 90 89
5.826848 1.239179 -1.628298 -164 85 94 94
5.807502 1.218483 -1.623764 -73 95 104 103
5.806781 1.212404 -1.652060 -91 83 93 92
5.808389 1.213156 -1.646142 -61 85 95 95
5.800187 1.203484 -1.649004 -91 83 93 92
5.794918 1.195174 -1.651078 -67 92 101 100
5.797588 1.202248 -1.644178 -106 80 90 89
5.796818 1.201863 -1.638897 -94 81 90 89
5.795696 1.195534 -1.639788 -43 82 92 91
5.805551 1.211859 -1.641376 -81 81 90 89
5.818536 1.223594 -1.637211 -69 82 90 89
5.817906 1.223284 -1.648379 -61 82 91 90
5.815098 1.221990 -1.643705 -83 83 92 91
5.816632 1.222694 -1.632294 -80 77 86 85
5.814815 1.221835 -1.627347 -56 80 89 88
5.684889 1.071702 -1.632122 -72 90 98 100
5.690716 1.074646 -1.692984 -77 94 104 103
5.716102 1.104828 -1.695202 -79 92 104 102
5.718462 1.105954 -1.688980 -95 94 106 104
5.712990 1.103363 -1.684851 -82 94 106 104
5.688299 1.073482 -1.699328 -83 96 106 105
5.687533 1.073115 -1.705156 -80 96 108 106
5.683632 1.065232 -1.689928 -46 97 106 105
5.689247 1.073955 -1.687733 -94 97 106 105
5.688299 1.073482 -1.699328 -83 96 106 105
5.688299 1.073482 -1.699328 -83 96 106 105
5.796818 1.201863 -1.638897 -94 81 90 89
5.795696 1.195534 -1.639788 -43 82 92 91
5.805551 1.211859 -1.641376 -81 81 90 89
5.818536 1.223594 -1.637211 -69 82 90 89
5.817906 1.223284 -1.648379 -61 82 91 90
5.815098 1.221990 -1.643705 -83 83 92 91
5.816632 1.222694 -1.632294 -80 77 86 85
5.814815 1.221835 -1.627347 -56 80 89 88
5.684889 1.071702 -1.632122 -72 90 98 100
5.690716 1.074646 -1.692984 -77 94 104 103
5.716102 1.104828 -1.695202 -79 92 104 102
5.718462 1.105954 -1.688980 -95 94 106 104
5.712990 1.103363 -1.684851 -82 94 106 104
5.688299 1.073482 -1.699328 -83 96 106 105
5.832411 1.241747 -1.648633 -76 86 94 94
5.841633 1.251564 -1.634634 -95 81 90 89
5.834088 1.242530 -1.637283 -73 81 89 88
5.840656 1.251122 -1.629414 -79 84 93 92
5.835758 1.248851 -1.625316 -74 95 101 101
5.716608 1.105103 -1.672528 -81 92 104 102
5.722693 1.114094 -1.664626 -84 94 104 103
5.713039 1.103363 -1.662298 -84 93 105 103
5.722094 1.113823 -1.659193 -69 94 104 103
5.722976 1.114235 -1.653305 -75 93 103 102
5.713631 1.103646 -1.656470 -57 93 103 102
5.690982 1.074727 -1.664542 -85 95 104 103
5.692421 1.075463 -1.681085 -88 96 105 104
5.684606 1.065656 -1.683888 -108 96 105 104
5.694086 1.076253 -1.675046 -47 94 103 102
5.690474 1.074517 -1.670401 -65 95 104 103
5.688588 1.073578 -1.659442 -60 95 105 106
5.686454 1.072556 -1.654433 -71 93 103 104
5.694433 1.082473 -1.668660 -53 91 101 102
5.709446 1.095719 -1.675148 -101 99 109 108
5.705452 1.093841 -1.670624 -89 93 105 103
5.697754 1.084080 -1.673396 -105 92 101 100
5.694729 1.082621 -1.679830 -47 97 106 105
5.708134 1.095101 -1.664281 -69 93 105 103
5.700476 1.085366 -1.661285 -119 91 101 102
5.708612 1.095307 -1.658453 -84 93 103 104
5.705726 1.093910 -1.653596 -73 91 101 102
5.698841 1.084531 -1.656095 -56 92 102 103
5.723624 1.114507 -1.636246 -63 87 95 97
5.721542 1.113518 -1.648023 -82 91 101 100
5.712831 1.103257 -1.651037 -118 93 103 104
5.716469 1.104979 -1.644512 -87 90 98 100
5.713613 1.103586 -1.639564 -70 90 98 100
5.723176 1.114256 -1.630813 -80 88 96 98
5.717168 1.105235 -1.633009 -111 86 94 96
5.722959 1.114126 -1.625259 -92 99 107 109
5.712483 1.102991 -1.628667 -90 90 98 100
5.713161 1.103316 -1.622839 -78 103 111 113
5.709946 1.107947 -1.623009 -77 106 116 117
5.686237 1.072426 -1.648726 -87 95 103 105
5.686632 1.072561 -1.643051 -78 93 101 103
5.684267 1.071416 -1.638011 -75 91 99 101
5.695486 1.082853 -1.628715 -69 92 100 102
5.707913 1.094953 -1.647374 -80 90 100 101
5.709203 1.095541 -1.641364 -92 90 98 100
5.703010 1.086527 -1.643620 -92 91 101 102
5.693747 1.082111 -1.651813 -57 89 99 100
5.694560 1.082444 -1.640279 -81 93 101 103
5.705943 1.093942 -1.636629 -60 89 97 99
5.708099 1.094980 -1.630468 -84 85 93 95
5.701532 1.085765 -1.632814 -98 88 96 98
5.698168 1.090214 -1.627369 -80 95 103 105
5.694991 1.088687 -1.622572 -97 102 110 112
5.748589 1.144226 -1.633367 -64 89 98 97
5.741228 1.134589 -1.686280 -59 89 99 98
5.726729 1.115982 -1.691580 -75 92 104 103
5.730747 1.123730 -1.689840 -64 89 99 98
5.729086 1.117139 -1.685389 -89 93 105 103
5.748862 1.144345 -1.627660 -110 89 99 98
5.776760 1.175111 -1.657257 -68 87 97 98
5.781533 1.183168 -1.671906 -55 89 98 97
5.741228 1.134589 -1.686280 -59 89 99 98
5.776760 1.175111 -1.657257 -68 87 97 98
5.781533 1.183168 -1.671906 -55 89 98 97
5.717168 1.105235 -1.633009 -111 86 94 96
5.722959 1.114126 -1.625259 -92 99 107 109
5.712483 1.102991 -1.628667 -90 90 98 100
5.713161 1.103316 -1.622839 -78 103 111 113
5.709946 1.107947 -1.623009 -77 106 116 117
5.686237 1.072426 -1.648726 -87 95 103 105
5.686632 1.072561 -1.643051 -78 93 101 103
5.684267 1.071416 -1.638011 -75 91 99 101
5.695486 1.082853 -1.628715 -69 92 100 102
5.707913 1.094953 -1.647374 -80 90 100 101
5.709203 1.095541 -1.641364 -92 90 98 100
5.703010 1.086527 -1.643620 -92 91 101 102
5.717168 1.105235 -1.633009 -111 86 94 96
5.722959 1.114126 -1.625259 -92 99 107 109
5.712483 1.102991 -1.628667 -90 90 98 100
5.713161 1.103316 -1.622839 -78 103 111 113
5.709946 1.107947 -1.623009 -77 106 116 117
5.686237 1.072426 -1.648726 -87 95 103 105
5.686632 1.072561 -1.643051 -78 93 101 103
5.684267 1.071416 -1.638011 -75 91 99 101
5.695486 1.082853 -1.628715 -69 92 100 102
5.707913 1.094953 -1.647374 -80 90 100 101
5.709203 1.095541 -1.641364 -92 90 98 100
5.703010 1.086527 -1.643620 -92 91 101 102
5.717168 1.105235 -1.633009 -111 86 94 96
5.722959 1.114126 -1.625259 -92 99 107 109
5.712483 1.102991 -1.628667 -90 90 98 100
5.713161 1.103316 -1.622839 -78 103 111 113
5.709946 1.107947 -1.623009 -77 106 116 117
5.686237 1.072426 -1.648726 -87 95 103 105
5.686632 1.072561 -1.643051 -78 93 101 103
5.684267 1.071416 -1.638011 -75 91 99 101
5.695486 1.082853 -1.628715 -69 92 100 102
5.707913 1.094953 -1.647374 -80 90 100 101
5.709203 1.095541 -1.641364 -92 90 98 100
5.703010 1.086527 -1.643620 -92 91 101 102
5.693747 1.082111 -1.651813 -57 89 99 100
5.694560 1.082444 -1.640279 -81 93 101 103