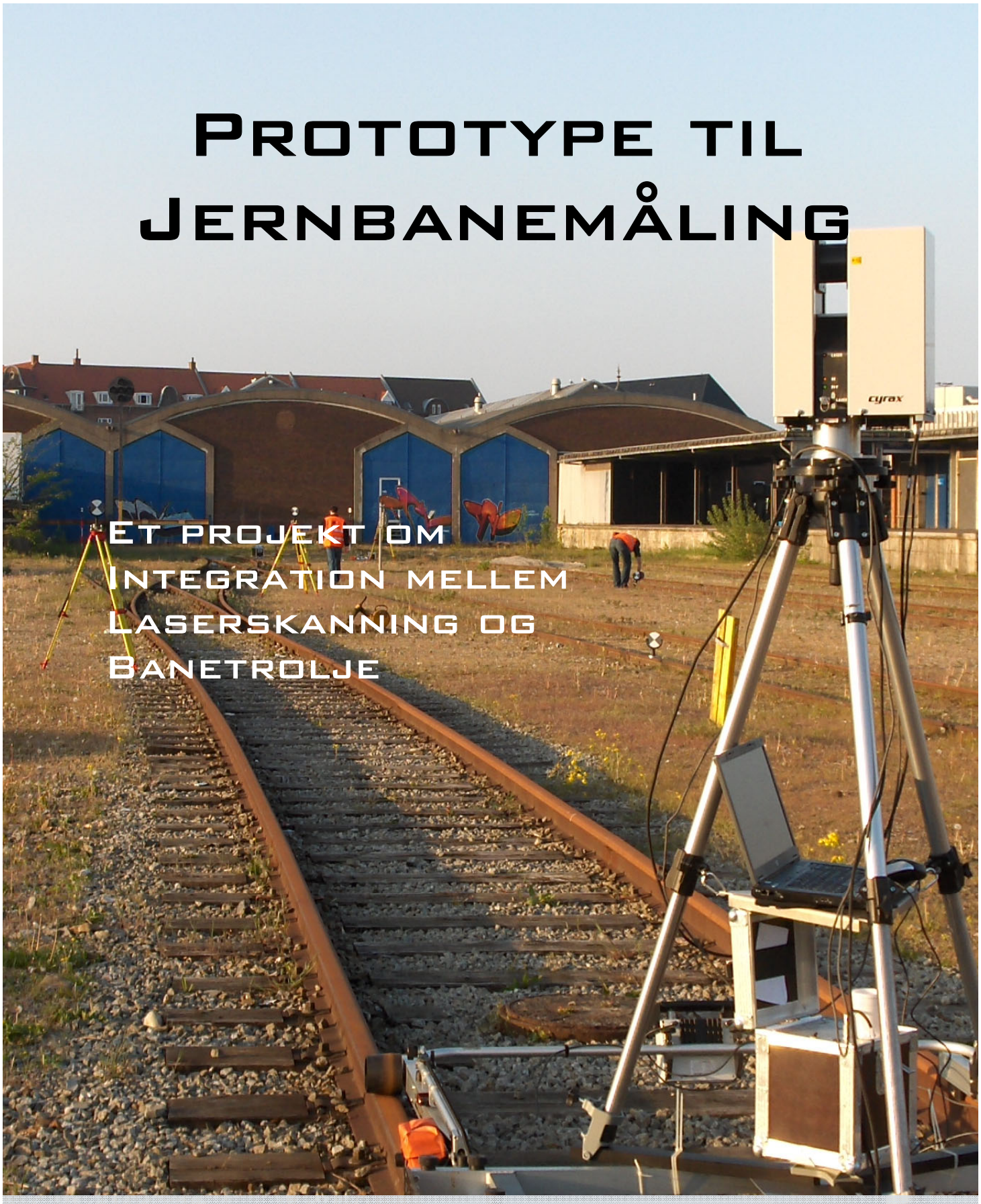
Prototype til Jernbanemåling



Et projekt om Integration mellem Laserskanning og Banetrolje

Landinspektørstudiets 10. semester. Measurement science
Afgangsprojekt 2007 Aalborg Universitet.

Jesper Rønbøg Nørnberg, Uffe Ravn-Christensen & Lau Jensen

AALBORG UNIVERSITET

Titel: **Prototype til banemåling**
Et projekt om Integration mellem Laserskanning og Banetrolje

Tema: Kortlægning og Geoinformation

Projektperiode: 01/02-07 – 25/06-07

Projektgruppe:

Jesper Rønbøg Nørnberg

Lau Jensen

Uffe Ravn-Christensen

Vejledere:

Joachim Höhle

Peter Cederholm

Oplagstal: 10

Sideantal: 122

Bilagsantal: 4

Afsluttet den: 25/06-07

AALBORG UNIVERSITET

Synopsis

Gennem dette afgangsprojekt forsøges at udvikle en ny og effektiv prototype til jernbanemåling gennem en integration mellem en laserskanner og en jernbanetrolje, der indeholder flere sensorer, da den traditionelle målemetode ved anvendelse af totalstation, benyttes i dag, er en meget tidskrævende process. Projektets foranalyse indeholder en analyse af kravene til banemåling i Danmark og et litteraturstudie af eksisterende løsninger og allerede undersøgte metoder til banemåling. Projektets instrumentvalg og egentlige problemformulering opstilles på baggrund af foranalysen og besvarelsen af den initierende problemstilling.

De valgte instrumenter til opgaven undersøges (Leica HDS4500 Laser skanner og Abtus 4530 banetrolje), og der designes et integreret system til jernbanemåling, som efterfølgende kalibreres. Der er blevet udført testmålinger af det integrerede system på en nedlagt banestrækning ved Aalborg, hvorefter der bliver udført diverse undersøgelser af de opnåede nøjagtigheder for at se, om denne integration fremover vil være en mulig løsningsmodel til jernbanemåling i Danmark. Den integrerede løsning er testet i både teori og praksis.

Til databearbearbejdningen gennem projektet anvender projektgruppen programmerne-
Geooffice, Matlab, TMK og Cyclone.

Abstract

This master thesis concerns the development of a new and effective prototype for railway measurement through integration of a laser scanner and a rail trolley consisting of several sensors, since the measurements using traditional land surveying methods is a very time consuming process.
In the preliminary analysis of the project the demands in rail measurements in Denmark are investigated and studies of existing solutions are made. These studies make it possible to choose the most useful sensors for the task, which leads to the projects problem formulation. To answer this problem formulation the sensors skills are investigated and a possible integration is designed.

The designed system using a Leica HDS4500 laser scanner and an Abtus 4530 trolley is tested in theory and practice. The tests have been carried out in a closed rail yard in Aalborg, Denmark. The system was calibrated and then tested. In closing an analyse and an evaluation of the achievement of accuracy through the field work is made, and finally the project ends up with a conclusion and suggestions for further investigations by putting the subject railway measurement into perspective.

Forord

Dette projekt er et afgangsprojekt på landinspektøruddannelsens 10. semester. Projektet omhandler udviklingen af et målesystem ved anvendelse af en terrestrisk laserskanner og forskellige sensorer i en banetrolje til opmåling af jernbanestrækninger. Projektets emne ligger i forlængelse af andre projektemner, som tidligere er behandlet på specialiseringen "Measurement Science". På 7. semester arbejdede projektgruppen med sammenkobling af data fra laserskanning og fotogrammetri og på 8. semester arbejdede projektgruppen med mobile kortlægningssystemer og billedbehandling. 9. semester blev af alle i projektgruppen tilbragt i projektpraktik. Arbejdsopgaver i forbindelse med ét af praktikforløbene har dannet grund for idéen til dette projekt.

Læsevejledning:
Projektet er delt op i to dele:

- Del 1 er en foranalyse. Den initierende problemstilling præsenteres, undersøges og besvares for efterfølgende at kunne opstille projektets egentlige problemformulering. Gennem foranalysen arbejdes der ligeledes frem mod at kunne opstille krav til målearbejdet på banen. Foranalysen har til formål at lede projektets brede initierende problemstilling frem til en konkret problemformulering.
- Del 2 er analyse. Deri undersøges nøjagtighedsforhold ved instrumenterne for at kunne danne en tilfredsstillende integration og kalibrering heraf. I del 2 indgår både en præsentation af opmålingssystemets forventede nøjagtighed og en test af det udviklede system, hvor der efterfølgende analyseres og vurderes på resultaterne. Dernæst konkluderes der på de sammenstillede resultater og den opstillede problemformulering besvares.

Engelske ord og termer indenfor emnet skrives som "Engelske ord" med efterfølgende oversættelse første gang og herefter blot oversættelsen eller "engelske ord".
Ved udtryk, både danske og udenlandske, der ikke anses for gængse indenfor projektets emne, er der udarbejdet en ordliste med forklaring. Disse ord er undervejs i projektet skrevet med kursiv. Ordlisten findes i bilag A - Ordliste.

Kildehenvisninger er angivet som [Efternavn, Udgivelsesår] eller som [Kildenavn, Udgivelsesår]. Der tilføjes et numerisk tal efter efternavnet/kildenavnet ved brug af flere kilder af samme forfatter fra samme år. Hvis der er gjort brug af en titel på et projekt, en rapport, artikel eller lignende angives titlen i kursiv i teksten "*titlen på projekt, rapport o. lign.*".
Kildehenvisningerne refererer til kildelisten bagest i rapporten. Kildelisten er alfabetisk og opstillet efter kildetype. Her findes ligeledes rapportens bilag.
Datamateriale fra projektet er vedlagt på en CD, hvor strukturen fremgår af herpå vedlagte vejledninger (Læs_mig.txt). Cd'en er at finde i bilag C – CD.

Tak til:
Der rettes en speciel tak til COWI for udlån af udstyr og support gennem projektarbejdet. COWI har, desuden stillet op til interview, fundet en egnet teststrækning i Aalborg hos Banedanmark samt givet en introduktion af den udlånte banetrolje. Takken henvendes specielt til Morten Thoft Christoffersen, Jan Falster Hansen, Carsten Jørgensen og Erik Rasmussen.
Yderigere sendes en tak til Rikke Pedersen og Chris Loveday fra henholdsvis Leica og Abtus for deres hjælp gennem mailkorrespondance.

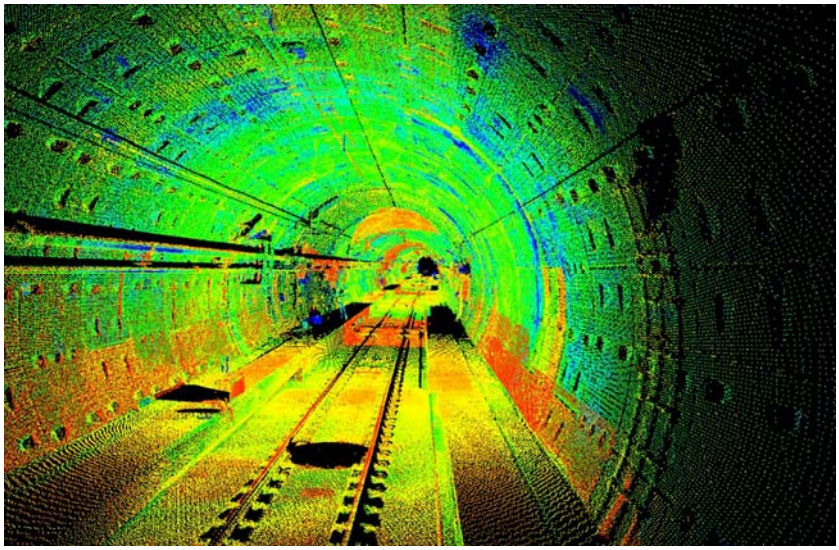
Indholdsfortegnelse

1 Indledning 4
2 Metode 7
2.1 Anvendte værktøjer 7
2.2 Metoder til systemudvikling 8
2.3 Struktur over foranalyse 12
3 Banemåling 15
3.1 Banenormens krav 15
3.2 Forholdsregler 20
3.3 COWIs banemåling 22
3.4 Opsamling på banemåling 24
4 Eksisterende løsninger 27
4.1 Kommercielle systemer til banemåling 27
4.2 Forskende projekter vedrørende banemåling 29
4.3 Øvrige relevante mobile kortlægningssystemer 32
4.4 Opsamling på eksisterende løsninger 36
5 Teori om instrumenttyper 37
5.1 Laserskanning 37
5.2 Sensorer på banetroljer 40
6 Problemafgrænsning og analysestruktur 43
6.1 Opsamling på foranalyse 43
6.2 Problemformulering 44
6.3 Struktur over analyse 45
7 Beskrivelse af valgte instrumenter 47
7.1 Banetrolje Abtus 4530 47
7.2 Laserskanner Leica HDS 4500 53
8 Systemopbygning 57
8.1 Indledende overvejelser 57
8.2 Opbygning af system 58
8.3 Kalibrering af system 63
8.4 Sammenkobling af data fra laserskanner og trolje 69
9 Testteori 71
9.1 Beregninger 71
9.2 Vurdering 78
10 Testområde og markarbejde 81
10.1 Opmålingsområde 81
10.2 Indledende overvejelser 84
10.3 Markarbejde 86
11 Databehandling og test 89
11.1 Klargøring af data 89
11.2 Sammenknytning af punkskyer 91
11.3 Sammenknytning af fire skan 97
11.4 Forbedring af sammenknytning 104
11.5 Transformation af troljedata 108
11.6 Opsamling på databehandling 112
12 Konklusion 114
13 Perspektivering 117
14 Litteraturliste 119
14.1 Artikler 119
14.2 Bøger 120
14.3 Vejledninger og infomateriale 120
14.4 Internetsider 121
14.5 Projekter fra Aalborg Universitet 122

1 Indledning

Dette projekt omhandler udvikling af en metode og et system til opmåling af jernbanestrækninger. Der tænkes her på banelegemet og andre relevante objekter i tilknytning hertil. I dag udføres meget af baneopmålingen for Banedanmark ved hjælp af traditionel terrestrisk landmåling med totalstation, hvilket er en tidskrævende proces såvel i marken som ved den efterfølgende databehandling. Emnet banemålingen, analyseres og forsøges effektiviseret både tids- og datamæssigt under forudsætning af, at nøjagtighedskravene overholdes. Dette gøres ved en integreret målemetode med flere sensorer.

Interessen for projektet er skabt på baggrund af et 9. semesters praktikophold hos COWI Aalborg. Under praktikopholdet blev der stiftet bekendtskab med banemåling i praksis, og der blev ligeledes udført test med laserskanning af jernbaneforløbet under Storebælt. Laserskanning anvendes desuden også til skanning af vejbroer og lignende hos COWI. Det var således herigennem, at ideen omkring skanning af selve baneforløbet er opstået.
Da, der blev skannet under Storebælt var det med megen besvær, at laserskanneren blev transporteret langs banen. Alt udstyr skulle pakkes sammen efter et udført skan og bæres langs banen 30-40 m for efterfølgende at stille det op igen. Testen blev udført på en 300 m lang banestrækning under Storebælt. Resultatet af laserskanningerne er efterfølgende blevet fremlagt for Banedanmark for skabe mulighed for, at laserskanning i fremtiden vil være en mulig målemetode ved opmåling af jernbaneforløb. Denne form for dataindsamling er ikke nær så tidskrævende som den terrestriske landmåling med totalstation set i forhold til datamængden. Brugen af laserskanning vil således give Banedanmark et større og mere detaljeret datagrundlag for jernbanens forløb, jf. figur 1.1.
Den terrestriske opmåling med totalstation omfatter i dag tværprofiler på skinnerne i et givet interval samt opmåling af det tilhørende baneudstyr såsom master, skilte, signaler osv. Datamængden gennem den terrestriske laserskanning indeholder betydeligt flere punkter end ved måling med totalstation, og derved opnås der en mere detaljeret beskrivelse af jernbanens forløb.



Figur 1.1: Eksempel på den datamængde der er opnået ved laserskanning i Storebæltstunnelen. Illustrationen er et skærmbillede fra laserskannerens databehandlingsprogram – Cyclone.

Efter at have set datamaterialet fra de udførte testskan har Banedanmark vist stor interesse for jernbanemåling med terrestrisk laserskanner. De ovennævnte skan danner derfor baggrunden for ideen til et integreret system til banemåling. Det skyldes som nævnt, at dette målesystem kan

erstatte den mere traditionelle terrestriske målemetode med totalstation, som anvendes ved banemåling i dag. Det gør sig gældende for de rådgivende ingeniørfirmaer COWI og Atkins.
Yderligere er der fra Banedanmarks side ønsket forbedringer af nøjagtigheden på skinnerne i forhold til data udelukkende fra laserskanneren, da det ikke er muligt at opnå den nøjagtighed, der er foreskrevet i Banenorm BN2-94-1 bl.a. på skinnehøjden. Dette har resulteret i, at projektgruppen har overvejet at integrere den terrestriske laserskanner med andre sensorer, der skal kunne holde de høje nøjagtighedskrav fra banenormen. Ideen er den, at integrationen dermed vil kunne indsamle store datamængder af omgivelserne på relativ kort tid med terrestrisk laserskanning og samtidig måle mere nøjagtigt på selve skinnen med én eller flere sensorer.
De øvrige sensorer kan være monteret på en banetrolje, der kører på skinnerne, og som måler på selve banelegemet. Denne løsning vil ligeledes bevirke, at operatøren ikke skal bære rundt på skannerudstyret.
Efter at have foretaget en kort undersøgelse af emnet har projektgruppen stiftet bekendtskab med et måleinstrument udviklet af Leica. Måleinstrumentet integrerer flere sensorer i et samlet system til banemåling. Systemet kaldes GRP5000 og består af en laserskanner, der er integreret med en banetrolje, hvilket stemmer overnes med projektgruppens idé.

COWI har bekræftet, at de er meget interesseret i resultatet af integrationen mellem de to komponenter, og at de ser mulighed og marked for en integreret løsning, hvis det er muligt at overholde Banedanmarks krav til banemåling i Danmark. COWI har ligeledes oplyst, at Banedanmark tidligere på året har oplyst, at der over de næste fire år skal måles godt og vel 2.000 km jernbane i Danmark. Dette bekræfter, at der kan blive et marked for en løsning som denne. Gennem terrestrisk laserskanning af et baneforløb vil punktskyen og data fra øvrige sensorer kunne give samme information som den opmåling, der udføres i dag med totalstation. Samtidig er det også muligt at opbygge 3D-modeller til planlægning og præsentation eller fotorealistiske modeller af baneforløb.

Før opstillingen af den konkrete problemformulering har projektgruppen haft en bred tilgang med flere undersøgelsesspørgsmål.
Relevante emner er undersøgt for at kunne finde frem til de krav og ikke mindst de sensorer, der vil være anvendelige til et projekt som dette. Da muligheden for et sådan system skulle undersøges, kom projektgruppen frem til følgende undersøgelsesspørgsmål, der skulle undersøges og besvares før den endelige problemformulering kunne opstilles:

- Hvilke krav er der til banemåling?
- Hvordan foretager COWI terrestrisk opmåling på banen i dag?
- Hvordan har andre løst opgaverne med opmåling på banen og med hvilke sensorer?
- Hvilke sensorer er optimale til udførelse af denne type detaljeret banemåling?

Ud over disse spørgsmål skulle der ligeledes findes frem til en metode, der er anvendelig ved produktion af en prototype som det målesystem, der arbejdes frem mod, kan betegnes som. Derfor skulle det ligeledes undersøges hvilken metode og fremgangsmåde, der ville være hensigtsmæssig til at løse projektets problemstillinger. Dette er nærmere beskrevet i det kommende kapitel.

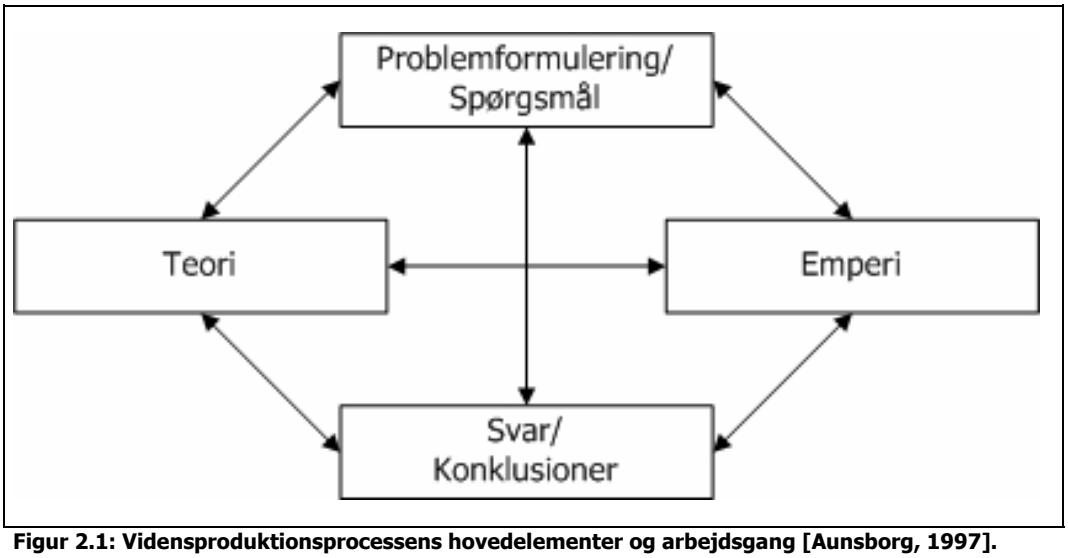
2 Metode

I det følgende kapitel beskrives foranalysens opbygning og de metoder og værktøjer, der er anvendt under løsningen på projektets problemstillinger. Indledningsvis præsenteres relevante værktøjer fra undervisning i metodelære. Efterfølgende præsenteres forskellige mulige metoder til systemudvikling, hvorefter den mest anvendelige fremgangsmåde til løsning af dette projekt vælges. Afslutningsvis præsenteres projektets struktur i et strukturdiagram med tilhørende beskrivelse.

Metodevalget er en vigtig proces i forbindelse med udvikling af nye produkter. Det er således vigtigt at kunne analysere bredt og herudfra afgrænse problematikken til en afgrænset problemformulering. Efter problemet er fastlagt, er det ligeledes vigtigt at have klare linjer for fremgangsmåden. Vælges den forkerte metode kan fokus være svært at fastholde gennem udviklingsprocessen.

2.1 Anvendte værktøjer

Værktøjer og metoder fra metodelære anvendes gennem projektet til at opstille projektets problemformulering. I metodelære er der stiftet bekendtskab med vidensproduktionsprocessens hovedelementer og arbejdsgang. I denne analyseres det efter en opstået idé frem mod en afgrænsning af den problemstilling, der ønskes undersøgt. Dette kan eksempelvis ske på baggrund af litteraturstudier og interview. Når problemet er defineret, opstilles de teoretiske løsninger, og herudfra udvikles det ønskede produkt. Evalueringen af produktet sker ved, at der foretages empiriske undersøgelser frem mod den endelige konklusion på projekt og resultater. Herunder sammenstilles den opstillede teori med de empiriske undersøgelser, og der ledes tilbage til den erhvervede viden fra foranalysen. I figur 2.1 vises hovedelementerne ved en vidensproduktionsproces, og det illustreres, hvorledes elementerne agerer i samspil med hinanden.

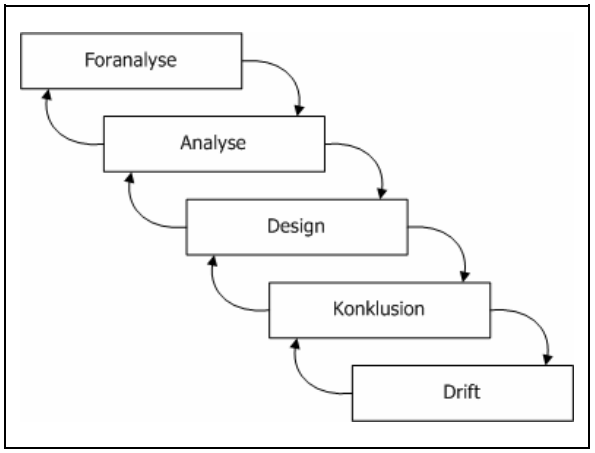


Figur 2.1: Vidensproduktionsprocessens hovedelementer og arbejdsgang [Aunsborg, 1997].

2.2 Metoder til systemudvikling

Projektgruppen ønsker at udarbejde et målesystem. For ikke at arbejde blindt frem mod det endelige produkt er det vigtigt koordinere og styre udviklingen. Ved system- eller produktudvikling findes der forskellige metoder til at gribe problematikker an på. I det følgende afsnit beskrives forskellige metoder til systemudvikling for at gøre det muligt for projektgruppen at udvælge den metode, der passer bedst til dette projekt.

Generelt har metoderne til systemudvikling den samme struktur. Det betyder, at det er de samme aktiviteter, der indgår i alle metoderne. Overordnet tager modellerne udgangspunkt i det samme skelet eller den samme fasemodel, der opdeler processen i forskellige faser fra start til slut. Faserne kan gennemføres på forskellige måder. Skelettet til den generelle projektmodel kan ses i figur 2.2.
Modellerne til systemudvikling opdeles i to hovedkategorier, hvor den ene type modeller primært er sekventielle og den anden type primært er iterative. Definitionerne på de to forskellige metoder er som følger:



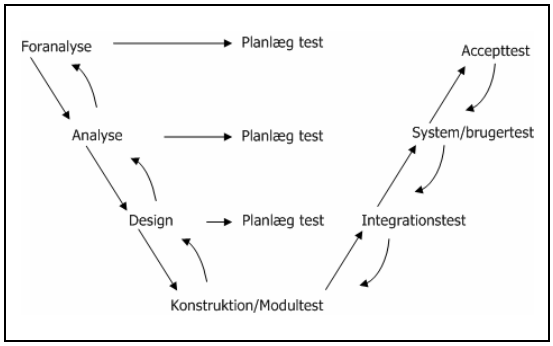
Figur 2.2: Den generelle projektmodel, der anvendes i de forskellige metoder, der findes til systemudvikling [Jepsen et. al., 2003].

Sekventielt
Sekventielt betyder, at forløbet i projektet gennemføres i rækkefølge, altså én ting ad gangen. Dette betyder, at der hele tiden arbejdes fremad, og at der ikke springes mellem nuværende og tidligere faser for evaluering. Sekventielle forløb kaldes også for vandfaldsforløb eller vandfaldsmetoden. Disse blev typisk anvendt igennem 70'erne og 80'erne. Metoden er ikke særlig brugbar i praksis, da det ofte kan være nødvendigt at springe mellem faserne. Sekventielle forløb anvendes hovedsageligt i de tilfælde, hvor opgavedefinitionen og dennes løsninger klar, så der kan arbejdes stringent fremad.

Iterativt
Iterative forløb betyder, at de enkelte handlinger i forløbet kan gentages og forbedres. Der sker derfor hele tiden gentagelser af faseforløb for at optimere systemet. Heller ikke den iterative er helt igennem anvendelig i praksis, da det ikke er hensigtsmæssigt at gentage et faseforløb, hvis der ikke er behov for det. Dermed vil det iterative projektforløb altid have mulighed for sekventielle forløb undervejs. Det er hensigtsmæssigt at anvende de iterative forløb i de tilfælde, hvor det er vanskeligt at få konkretiseret kravene til opgaven. Påstanden om, at nogle projektmodeller er rent sekventielle eller rent iterative, er mest hjemhørende i teorien, hvorimod modellerne i praksis rummer muligheder for både sekventielle og iterative faser. Dermed er det altså hensigtsmæssigt med en model, hvor der er mulighed for begge forløb [Jepsen et. al., 2003].

2.1.1 V-modellen

V-modellen har umiddelbart et sekventielt faseforløb og lægger sig også tæt op af skelettet i figur 2.2. Der er her mulighed for undervejs i forløbet at gennemføre iterative tilbageløb og koble dem med tidligere faser. V-modellens faseforløb er illustreret i figur 2.3. Mulighederne for iterative tilbageløb eller tests undervejs i forløbet er styrken ved denne model, og de tests, der planlægges undervejs, er med til at sikre kvalitet i det endelige system. Modellen skal læses fra venstre mod højre, således at der arbejdes frem i et V med start i en foranalyse og slut i en accepttest. V-formen kommer af, at der sideløbende med systemudviklingen planlægges tilsvarende tests, som gennemføres efter konstruktionsfasen. De pile, der går tilbage fra de tre tests, skal dog ikke ses som realistiske, da en afvist test sjældent vil lede tilbage til en anden test. Pilene skal i stedet indikere, at der ved en afvist test ledes tilbage til de fire emner i venstre side af diagrammet for at foretage ændringer i systemet [Jepsen et. al., 2003].



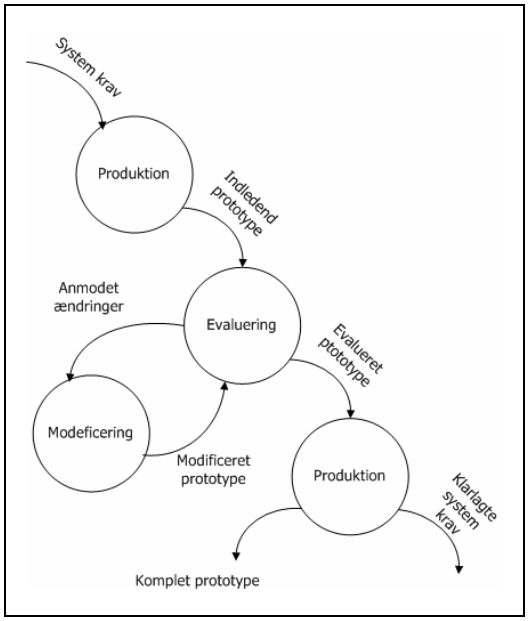
Figur 2.3: Illustration af V-modellen, der kan anvendes til udvikling af systemer [Jepsen et. al., 2003].

2.1.2 "Prototyping" - prototypefremstilling

"Prototyping" er en metode, der er opstået på baggrund af et ønske om at kunne kombinere sekventielle forløb med iterative forløb. "Prototyping" kan f.eks. involvere brugere og kritiske tests af komplekse systemer, arbejde med dele af større systemer og/eller indgå i forskning eller eksperimenterende arbejde. Skelettet i et "prototyping" forløb kan ses i figur 2.4.

"Prototyping" er et kommunikationsmedium, som sikrer en forståelse mellem brugeren og udvikleren, når de samarbejder om at udvikle systemet. Det sikrer også opfyldelse af brugerens ønsker og forventninger selv i meget tekniske systemer. Her kan det siges, at de krav COWI i samarbejde med Banedanmark (brugerne) har opstillet i en banenorm for opmåling på jernbaner, er de krav, som produktet skal overholde og de krav, som projektgruppen (udvikleren) har som succeskriterium for prototypen.

Test og analyser af prototypen skal tage udgangspunkt i anvendelsesområdet. En prototype er altså et mere eller mindre færdigudviklet produkt, som gør brugere og udviklere i stand til at undersøge forskellige dele af et system og derigennem fastslå, om det er egnet som det færdige produkt. I dette projekts tilfælde vil det sige, at de testmålinger, der vil blive udført på banen, vil kunne analyseres og vurderes for at undersøge om prototypen er anvendelig, eller om der skal udføres yderligere forbedringer, før prototypen kan færdigudvikles [Reeve & Petch, 1999].



Figur 2.4: Skelettet ved metoden 'prototyping' til systemudvikling [Reeve & Petch, 1999].

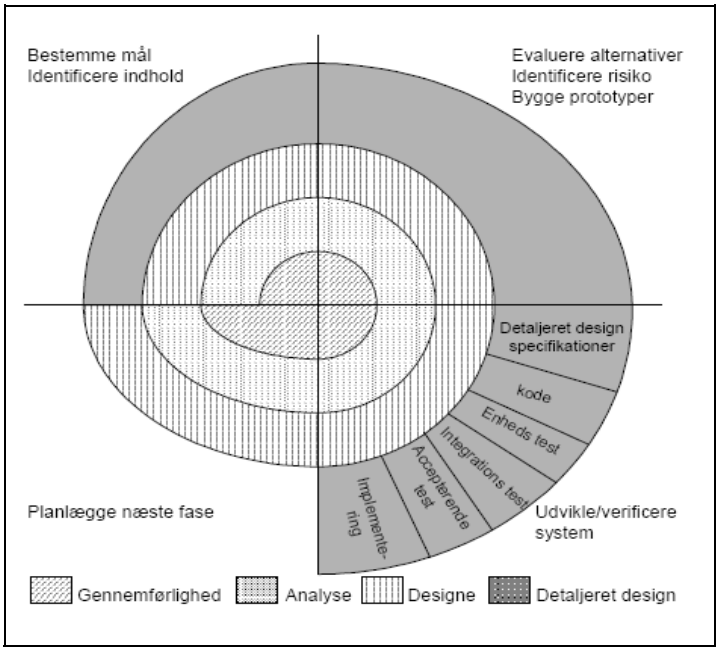
Metoden "prototyping" kan anvendes på forskellige måder alt efter formål, og der findes således forskellige former for "prototyping":

"Throw-away prototyping" - smid-væk prototypefremstilling
Denne type af "prototyping" anvendes til at udvikle prototyper, der er beregnet til at afdække, af- eller bekræfte ideer for derefter at blive "smidt væk". Prototypen, som udvikles, bliver dermed ikke en del af det endelige system. Udbyttet af denne form for "prototyping" er, at erfaringerne kan føres med videre over i en ny prototype [Prototyping, 2004]. "Throw-away prototyping" vil være meget anvendelig i dette projektarbejde, da der her arbejdes med test og analyse, der kan resultere i en idé, der kan bygges videre på mod et endeligt system.

"Evolutionary prototyping" - udviklende prototypefremstilling
Metoden "Evolutionary prototyping" har det samme formål som "Throw-away prototyping" bortset fra, at den endelige prototype her bliver til et system eller til en del af et system, se figur 2.4. Udvikleren foretager ændringerne på prototypen undervejs i processen mod det endelige mål. På baggrund af faglig viden og ideer udvikles en prototype, som testes og analyseres, for derefter at blive lavet om på baggrund af resultaterne og så fremdeles. Det er altså en stærk iterativ og eksperimenterende proces, der også er kendt under navnet "reverse engineering" – baglæns udvikling [Prototyping, 2004].
Sat i forbindelse med dette projekt vil det sige, at der i denne metode er mere fleksibilitet til at forkaste resultater og idéer og gå et skridt tilbage og forsøge noget nyt. Dette kan blive en langsommelig fremgangsmåde, der kan være økonomisk belastende for en virksomhed, idet målet med prototypen ikke er egentligt fastlagt.

2.1.3 "Organic Life Cycle" - Organisk Livs Cyklus

Denne metode er en kombination af den sekventielle metode (vandfaldsmetoden) og "prototyping" (den mere iterative løsning). Metoden er udformet efter en spiral, som det ses af figur 2.5. Som det fremgår af figuren, så er der fire handlinger svarende til de fire kvadranter i diagrammet. Figuren læses indefra og ud og snor sig med urets retning udad. Ses figuren som en urskive svarer kl. 9 i spiralen til der, hvor der træffes beslutninger på baggrund af de foregående analyser af alternativer og risiko, som dermed danner grundlag for en ny omgang. Hovedformålet ved de gentagne omgange er at nedbringe usikkerheden og dermed fremkomme med et godt og sikkert produkt. I et projekt kan der indgå flere omgange, som hver især afsluttes med et resultat. Hver omgang følger en

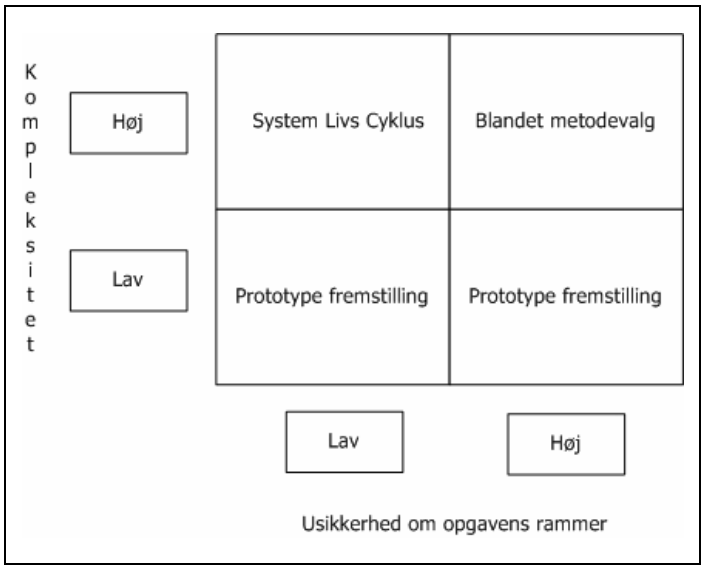


Figur 2.5:"Organic Life Cycle" metoden, der er udformet som en spiral og snor sig mod midten, oversat fra [Reeve & Petch, 1999].

fastlagt plan. "Organic Life Cycle" adskiller sig grundlæggende fra andre metoder ved, at de underlæggende modeller er dynamiske, kontinuerte og ikke sekventielle, som tilfældet er i f.eks. vandfaldsmodellen. Udviklingen af et system foregår efter samme metode, som nævnt i afsnittet om "prototyping". "Organic Life Cycle" er en overordnet metode, og den er egnet til design af større systemer, hvor mange delsystemer eller delprocesser skal koordineres og planlægges i forhold til hinanden for at opnå et samlet fælles mål [Reeve & Petch, 1999].

2.1.4 Valg af metode til systemudvikling

Når der skal vælges en metode til et systemudviklingsprojekt, er det vigtigt at overveje kompleksitet og usikkerhed. Et projekt som dette har en lav usikkerhed, idet det er klart, hvad der arbejdes frem mod, og har en lav kompleksitet, grundet projektgruppens fagspecifikke viden. Dog bevæger projektet sig også over i høj kompleksitet i de enkelte facetter af systemet, nemlig de enkelte instrumenters virke og samspillet mellem disse. Ud fra skemaet i figur 2.6 leder disse valg frem mod "prototyping" som metode, men også lidt imod "Organic Life Cycle". Her er det dog projektgruppens vurdering, at "Organic Life Cycle" er for overordnet, selv om elementer herfra kan anvendes. Ligeledes kan der anvendes elementer fra andre metoder til systemudvikling. Det vigtigste er blot, at der anvendes et kombineret sekventielt og iterativt forløb, hvor der i visse faser er mulighed for at gå tilbage og anvende erfaringer til nye tiltag til systemet.



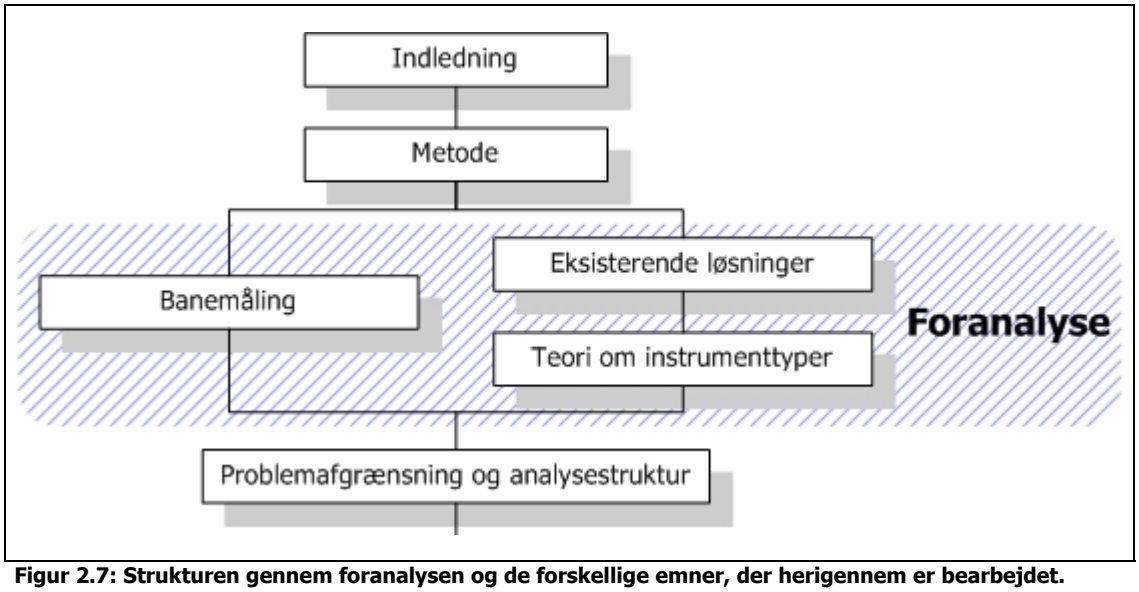
Figur 2.6: Her vises hvilken metode, der skal anvendes ved høj og lav kompleksitet og ved høj og lav usikkerhed om opgavens rammer [Stage, 2003].

I forlængelse af gennemgangen af de forskellige metoder, der vil kunne anvendes til dette projekt, har projektgruppen fundet frem til, at "throw-away prototyping" er den rette metode, da den giver mulighed for forskende og eksperimenterende arbejde, og da prototypen derved indgår som et endeligt system eller dele af det. Prototypen er ikke det endelige produkt, da laserskanneren og trolje, der benyttes i projektet, kun er til låns. Desuden er COWI, som kan forventes at være den kommende bruger af systemet, inddraget i et vist omfang i de indledende test og analyser, der har dannet idégrundlaget, men ikke under udvikling, konstruktion og test af systemet.
Når metoden "prototyping" benyttes, er det nødvendigt, at COWI som brugere på forhånd ved, hvad det er, de ønsker. Det vil sige, at COWI skal have et klart mål, hvilket sker gennem kravene i banenormen, mens udvikleren, som her er projektgruppen, skal belyse, om det kan lade sig gøre eller ej. Derfor er vores rolle i samarbejdet med COWI, som den lyttende at opnå viden og information gennem foranalysen og ved demonstration opnå kendskab til det udlånte udstyr. Efterfølgende i processen har projektgruppens rolle skiftet karakter til en mere forklarende rolle, f.eks. ved præsentation og forklaring af det integrerede system. Tests og analyser af prototypen skal udføres af projektgruppen, som udvikleren, og brugerne er ikke direkte inddraget i denne design- og konstruktionsdel. Det har de ulemper, at systemet måske ikke testes og analyseres så

brugerspecifikt og -venligt, som hvis brugerne havde været inddraget. Derimod kan den viden, projektgruppen som udvikleren har om systemet, benyttes til at gå dybere ned i tests og analyser, hvilket brugerne ikke umiddelbart har mulighed for. Fordelen ved, at det er os selv, der tester og analyserer prototypen, er, at det giver vished om, at det er foregået på tilstrækkeligt grundig vis, hvilket er vigtigt for at kunne uddrage brugbare resultater.

2.3 Struktur over foranalyse

Når metode og fremgangsmåden er fastlagt, kan der opstilles et strukturdiagram for projektets fornanlyse. Strukturen er her opbygget efter principper fra vidensproduktionsprocesens hovedelementer.
Projektet ønskes udarbejdet som et problemorienteret projektforløb, hvor der indledes med en bredere problemstilling, der tjener som det initierende problem. Herefter foretages dybdegående undersøgelse af det initierende problem, og der arbejdes frem mod en afgrænsning af det initierende problem i en foranalyse. Denne afgrænsning tjener som problemformulering for selve projektets formål. Figur 2.7 viser strukturdiagrammet frem til og med problemformuleringen.



Figur 2.7: Strukturen gennem foranalysen og de forskellige emner, der herigennem er bearbejdet.

Beskrivelse af foranalyse
I projektets foranalyse gives der indledningsvist et indblik i de krav, der findes til opmåling af jernbanestrækninger i dag, hvorefter det beskrives, hvorledes COWI foretager opmåling på banen og hvordan data behandles og afleveres. Under beskrivelsen af COWIs metode til at løse disse opgaver omtales ligeledes tidsforbruget, da dette projekt har til hensigt at effektivisere processen og dermed nedsætte tidsforbruget samtidig med, at der samles tilstrækkelig data til overholdelse af kravene i banenormen. Kapitlet om banemåling afsluttes med opstilling af relevante nøjagtighedskrav, der skal overholdes ved en senere fremstilling af et integreret målesystem.
Sideløbende med denne granskning af kravene i banenoremen ses der på publiceret litteratur om emnet for at opnå kendskab til eksisterende løsninger til opmåling af banestrækninger og kombinationer af sensorer. Her er de projekter og artikler, der er fundet mest relevante beskrevet for at kunne anvende erfaringer herfra ved opbyggelsen af et nyt system.
Ud fra erfaringerne fra de eksisterende løsninger sammenstillet med kendskab til nøjagtighedskrav

i banenormen vælges de instrumenttyper, der er fundet mest hensigtsmæssige til et målesystem afslutningsvis i foranalysen, og herudfra kan projektets problemformulering opstilles. Opsamling og problemformulering efter foranalysen virker således som bindeled mellem projektets foranalyse og den efterfølgende projektanalyse.

3 Banemåling

I dette kapitel beskrives kravene til banemåling i Danmark, herunder også hvilke regler der er for opmålingsarbejde på bane. Den føromtalte banenorm indeholder detaljerede beskrivelser af hvilke objekter, der skal måles langs en jernbane, hvilke nøjagtigheder de forskellige objekter skal måles med, hvor på objekterne der skal måles, hvordan de skal kodes i marken og beskrivelse af datastruktur ved aflevering af materiale til Banedanmark. Denne vejledning for landmåling på banen er omdrejningspunktet, når der skal planlægges en opgave i sammenspil med regler omkring sikkerhed på banen, da disse kan have stor indflydelse på, hvorledes det er muligt at udføre målingen.
Igennem kapitlet vil der blive taget uddrag fra banenormen, der bliver beskrevet i detaljer for at give et indblik i kravene, der skal overholdes, når der måles. I forlængelse af disse krav beskrives, hvorledes COWI foretager banemåling rent praktisk for at give et indblik i, hvordan opmålingen af banestrækninger foregår i dag. Ideen til dette projekt udspringer af erfaringer med disse opgavers omfang. Ved gennemgangen af den praktiske udførelse af arbejdet præsenteres et bud på det nuværende tidsforbrug ved denne type af opmåling.
Kapitlet afsluttes med at opstille krav fra BN og de forholdsregler, der gør sig gældende ved måling på banen, hvilket er krav og regler, der skal haves for øje gennem udviklingen af et nyt system.

3.1 Banenormens krav

Da opgaver angående banemåling kan være af varierende karakter er de anvendte målemetoder ligeledes varierende. Der eksisterer dokumenter med regelsæt for forskellige opmålingssituationer. Et af disse er omtalte Banenorm fra maj 2005 (Landmåling på banen), som indeholder beskrivelser af de objekter, der skal måles og med hvilke nøjagtigheder, målingerne skal foretages. Banenormen er vedlagt på bilag C - CD. Når der gennem resten af projektet refereres til banenormen, er det denne der menes. Der bliver i det følgende afsnit fremhævet de områder af banenormen, der findes relevante gennem selve opmålingsprocessen og de krav, der findes til objekttyper og nøjagtigheder. Alle er uddrag fra banenormen.

3.1.1 Generelt om nøjagtigheder i banenormen

Der har gennem det analyserende arbejde af banenormen været tvivl om, nøjagtighederne er relative eller absolutte. Der har ligeledes været tvivl om definitionen på de maksimal tilladte fejl, der præsenteres gennem banenormen. Der kan dog ud fra mailkorrespondance med Carsten Jørgensen (CJ) fra COWI, der har udarbejdet banenormen for Banedanmark, konkluderes følgende:

- Alle henvisninger i banenormen er relateret til absolutte værdier.
- De nævnte nøjagtighedskrav i banenormen er tre gange spredningen.

Et andet problem omkring nøjagtighed er, at der ifølge CJ ikke påskrives nogen fejl, hvis der stilles op over et fikspunkt. Derved mener CJ, at der laves det, som han betegner et stærkt polygon, der derved medfører, at fikspunkterne anses som fejlfrie. Det er en påstand, som projektgruppen ikke er enig i. CJ giver projektgruppen medhold i, at nøjagtighedskravene ikke er entydige, og CJ oplyser, at han selv på et tidspunkt havde et ønske om i stedet at vende situationen og undersøge eksempelvis, hvor nøjagtigt et sporombygningstog kan aflevere et produkt. Det er den samme proces, som projektgruppen selv følger i dette projekt, da den har måttet indse at kravene, som de står i BN i dag, må vurderes meget høje og ikke medtager unøjagtigheder på måling af

fikspunkter. Her bør der tages højde for nabonøjagtighed i forhold til de nærmest tilstødende fikspunkter. Hele mailkorrespondancen med CJ er vedlagt på projektets bilag C - CD

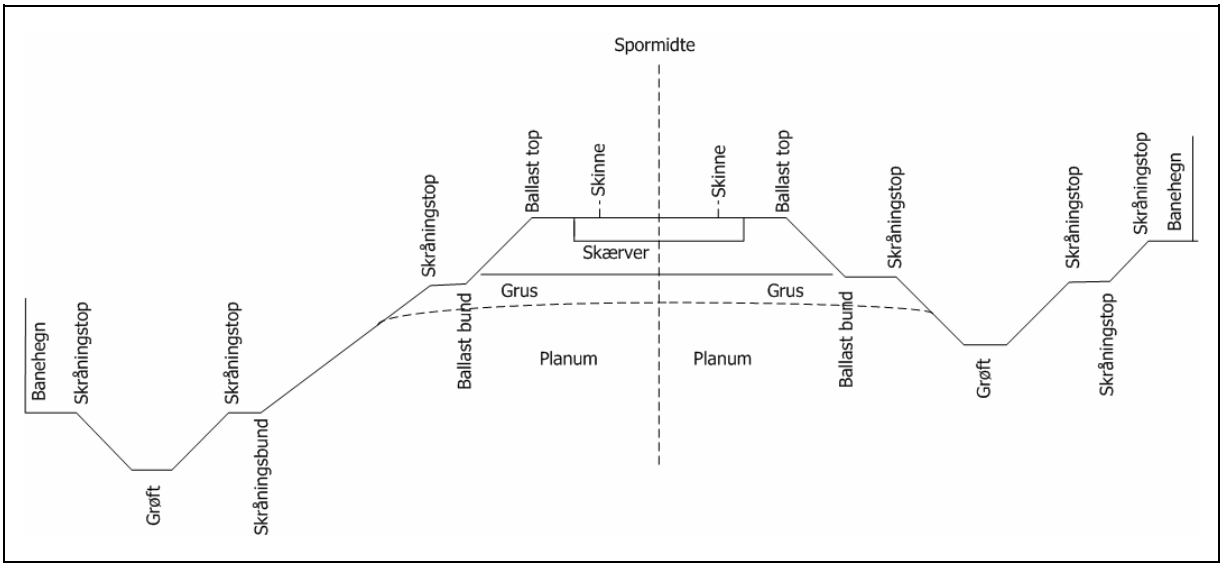
3.1.2 Fikspunkter

For at kunne opmåle de ønskede objekter med den krævede nøjagtighed, er det nødvendigt at anvende fikspunkter. Disse fikspunkter eksisterer eller oprettes langs banenettet afhængigt af måleopgaven. Fikspunkterne er angivet/angives i landskoordinater i KP2000. De eksisterende fikspunkter langs banen er yderligere opgivet i fikspunktregistret Valdemar.
Når der nykoordineres planfikspunkter, skal der som udgangspunkt opstilles over alle disse. I situationer hvor dette ikke er muligt, kan der måles med overbestemt polær måling eller GPS, og der skal sikres fuldstændig overensstemmelse mellem punkterne. Nettet skal omregnes til RefDK for dermed at optimere integrationen i et eventuelt eksisterende system eller net. Eksisterer der ikke noget anvendeligt net, skal systemet eller nettet tilknyttes GI-systemet eller GPS-referencen. Den tilladte punktspredning på planfikspunkterne er afhængig af den tilladte hastighed på den pågældende bane, hvor der ved hastigheder til og med 120 km/t er tilladt en punktspredning på 7 mm og over 120 km/t er grænsen 5 mm.
Ved højdefikspunkter må koterne mellem de officielle højdefikspunkter maksimalt afvige 5 mm/km. Ved overskridelse af denne grænse skal der foretages en nykoordinering. Såfremt der etableres et nyt fikspunktsnet må den maksimale afstand mellem to fikspunkter ikke overskride 200 m. I banenormen står det ligeledes, at etablering af fikspunkter til brug i et enkelt projekt skal foretages i faste elementer og overholde nøjagtighederne, som er opstillet for fikspunkter.

Opmåling af fikspunkter skal, jf. banenormen, ske med en nøjagtighed på 5 mm i både plan og højde.

3.1.3 Tværprofiler

Ved en banemålingsopgave er det banens forløb, der tilkendegiver hvor ofte, der skal måles langs banen. Der skal måles baneprofiler, hvor afstanden mellem to profiler afgøres af sporets forløb samt eventuelle stigninger eller fald på skinnerne. Det vil sige, at måles der på en ret strækning, som i længderetningen ikke overskrider en pilhøjde på 15 cm, måles der tværprofiler pr. 20 m. I kurver og på ret spor, der overskrider den anførte pilhøjde, måles der tværprofiler pr. 10 m. Denne proces er en vurderingssag for den person, som foretager opmålingen i marken og har stor indflydelse på tidsforbruget på målingen. En illustration af et tværprofil ses på figur 3.1.



Figur 3.1: Figuren viser de objekttyper, der skal måles til et tværprofil. Eksemplet skal ikke betragtes som et gældende eksempel, men nærmere idealtilfældet, da det i marken sjældent er muligt at definere alle disse punkter.

Ifølge banenormen skal der i alle tilfælde måles minimum 3 m til hver side, målt ud fra banens midte, uafhængigt af om der er banehegn, skel eller andre afgrænsninger. Efter samtale med Niels Henrik Kjær Jensen fra COWI Vejle er projektgruppen dog blevet opmærksom på, at det er ønsket, at der kan måles ca. 4 m til hver side fra spormidten. Et referat af interviewet med Niels Henrik Kjær Jensen fra COWI Vejle kan findes i projektets bilag B – Interview med COWI Vejle

De tværprofiler, der skal måles, kan have forskellig karakter alt afhængig af, hvad der kan og skal måles. Dette kan også betinges af, hvor der skal måles i landet. Eksempelvis er det kun på Sjælland, Fyn og få strækninger i Sønderjylland, hvor der anvendes køreledninger. En køreledning er den ledning, der overfører elektrisk strøm til toget. I alt kræves dog to ledninger, hvor den anden typisk er togskinnerne. Køreledningen er hårdt opstrammet og placeret i master over toget langs med jernbanestrækningen, normalt i en højde af 5,50 m over skinnekant. [Wikipedia, 2007]. Figur 3.2. viser et eksempel på disse køreledninger. Opmålingsmæssigt er kravene til nøjagtigheden på disse køreledninger tilsvarende kravene på skinnerne.

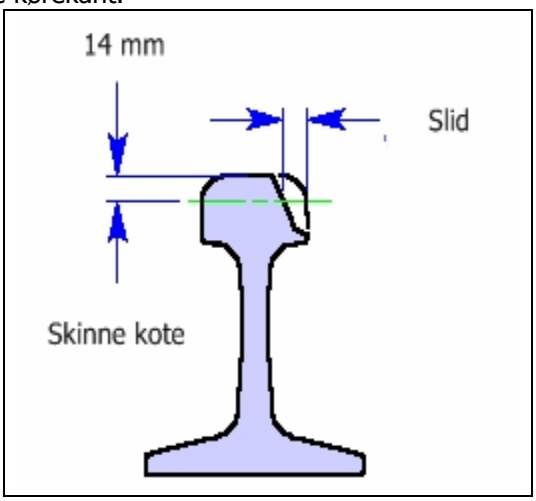
Figur 3.2: Køreledningernes placering over banelegemet [Wikipedia, 2007].

3.1.4 Opmåling af spor

Formålet med opmåling af sporet er at fastlægge sporets fysiske placering samt at opnå data til analyser og beregninger. Gennem disse analyser er det eksempelvis ønsket at kunne beregne sporets midte og overkant. I banenormen defineres, hvordan de ønskede data måles. Eksempelvis måles skinnens plane målepunkt som værende inderste kørekant.

Spormidten ses som en fiktiv størrelse og beregnes som punktet midt imellem og ortogonalt på de to skinner. Koten til skinnerne måles i midten af begge skinners top for at opnå en overhøjde, der er defineret som skinnernes overkant. Koten til banen defineres derimod som koten til den lavest liggende skinne. Den inderste kørekant ligger 14 mm under den definerede overhøjde, se figur 3.3.

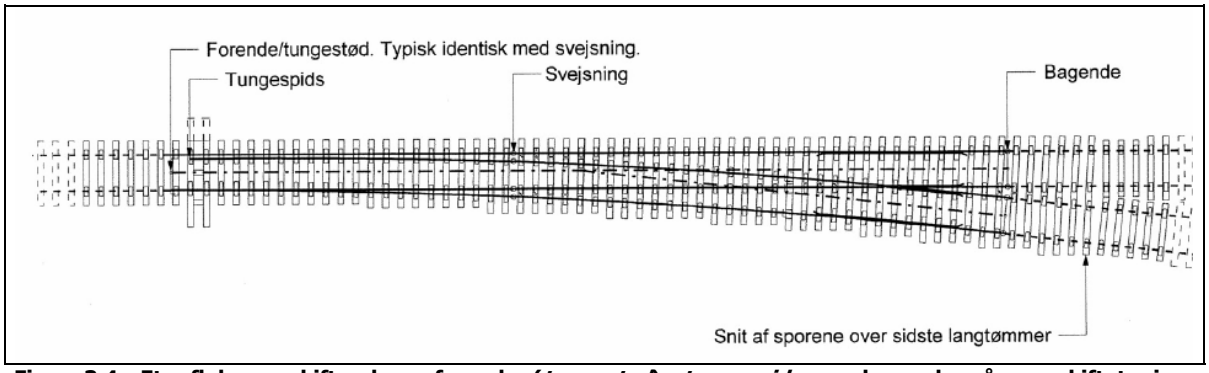
Opmålingen af sporet foregår ved måling af tværprofilerne, hvor det dermed måles for minimum hver 20 m for lige strækninger og minimum hver 10 m ved kurver. Ligeledes skal alle tangentpunkter måles. Dette betyder, at alle knæk i det horisontale og vertikale plan skal koordineres og gives en kote. Tangentpunkterne er normalt markeret med kurvetavler i marken ved kurvers start og stop. Dette indikerer, hvornår der sker en ændring fra ret spor ind eller ud af en kurve. Nøjagtigheden ved opmåling af spor skal være 1 cm i plan og 0,5 cm i højden.



Figur 3.3: Definition af den inderste kørekant på skinnen, placeret 14 mm under skinnes overhøjde.

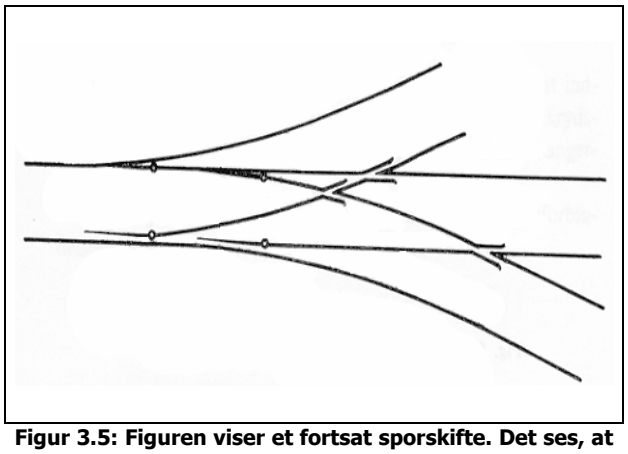
3.1.5 Sporskifter

Alle sporskifter i Danmark klassificeres som standardsporskifter, hvorfor disse er bestemt af en helt bestemt geometri, herunder længde, radius m.m. Der findes dog forskellige typer af sporskifter, hvorfor opmålingerne ikke er ens i alle tilfælde. For at illustrere detaljeringsgraden af det, der skal måles i marken, vises forskellige typer af sporskifter, og det beskrives, hvad der skal måles på disse forskellige typer af sporskifter.
Afløbssporskifte er et sporskifte, hvor det ene spor fortsætter sin bane mens sidesporet udstikkes fra hovedsporet. En illustration af et afløbssporskifte ses i figur 3.4, hvori nogle af de vigtige elementer i forbindelse med opmåling er vist.



Figur 3.4: Et afløbssporskifte, hvor forende (*tungestød*), *tungespids*, og bagende på sporskiftet vises [Reenberg et. al., 2005].

Symmetriske sporskifter er sjældne i Danmark. De er karakteristiske ved, at de to grene har samme kurveradius. Dette minder lidt om et fortsat sporskifte, som det ses på figur 3.5, hvor det fortsatte sporskifte principielt består af to sammenbyggede krumme eller rette sporskifter og et spor, som fortsætter ligeud. Krydsningssporskifte er spor, der krydser hinanden, hvilket kan ske ved lige strækninger eller kurver. Et eksempel på et sådant sporskifte ses i figur 3.6. Drejeskive sporskifte er et cirkulært sporskifte, der er udformet som en stjerne og dermed kan drejes, og give åbne ind- og udgange heraf.



Figur 3.5: Figuren viser et fortsat sporskifte. Det ses, at sporskiftet minder om en sammensætning af to afløbssporskifter [Modelbaneteknik, 2007].

Figur 3.6: Figuren viser et krydsningssporskifte, hvor to spor krydser hinanden [Modelbaneteknik, 2007].

Der er stor forskel på de forskellige sporskifter, hvorfor der er forskel på hvilke punkter, der er vigtige ved det enkelte sporskifte. I figur 3.7 gives et overblik over de punkter, der skal måles ved de enkelte sporskifter.

Sporskiftetype	Hvad skal måles
Afløbssporskifte	Spormidte og skinner måles i følgende punkter: Gennemgående gren: begyndelses punkt og slutpunkt. Ved krumt spor skal måles et spormidtpunkt i gennemgående gren Afvigende gren: Bagende
Symmetrisk sporskifte	Spormidte og skinner måles i følgende punkter: begyndelses punkt og slut punkt samt bagender på begge spor
Fortsat sporskifte	Sporstrenge samt spormidte
Krydsende sporskifte	Gren 1: Forende, krydsningspunkt og bagende Gren 2: Forende og bagende
Drejeskive	Opmåles som udformet eller som cirkel ved minimum 3 punkter

Figur 3.7: De punkter/objekter, der indgår i målingen af de forskellige typer af sporskifter.

3.1.6 Opmåling af objekter af særlig vigtighed

Ved baneopmåling er der objekter, der har særlig vigtighed, hvilket er veje og stier, overføringer, underføringer m.m. I forbindelse med disse skal der måles midte og kanter, belægningsgrænse samt alle knækpunkter på alle veje og stier i en afstand af 20 m fra sporet. Målingerne skal have en nøjagtighed, der er bedre end 1 cm. Ved over- og underføringer afhænger målingernes omfang af dennes længde i forhold til sporets længderetning. Figur 3.8 giver et overblik over disse målinger, hvori det noteres, at grænserne er ved 10 m og 20 m.

	Længder mindre end 10 m	Længder mellem 10 m – 20 m	Længder mere end 20 m
Overføring	Tværprofil af overføringens midte	Tværprofil af hver ende af broen	Tværprofil af hver 10. meter
Underføring	Tværprofil af underføringens midte	Tværprofil af hver ende af tunnelen	Tværprofil af hver 10. meter

Figur 3.8: Angivelse af hvor ofte der skal måles tværprofiler ved forskellige situationer ved over-/underføringer.

Yderlig er der en række objekter som, jf. banenormen, vurderes for værende objekter af særlig vigtighed, og som dermed kræves opmålt ved banemåling. Objekterne består bl.a. af teknik og udstyr langs banen samt de topografiske forhold og skal måles uafhængigt af tværprofilerne. Når objekterne langs banen måles, er der ligeledes et krav om, at der ud for objektet skal måles på banelegemet perpendikulært ud for det sted, hvor objektet er placeret. Objekterne er ikke videre omtalt i dette afsnit, men er opstillet med nøjagtighedskrav i plan og højde i projektets afsnit 3.4 – *Opsamling på banemåling*.

3.2 Forholdsregler

Ved opmåling på banen er der bestemte sikkerhedsregler, som skal overholdes. Disse regler findes i "*Arbejde i spor*", som derfor anvendes som kilde i dette afsnit. Opmåling kan, som det sker hos COWI, foregå enten ved traditionel opmåling med totalstation, som kræver to personer, eller som enkeltmandsopgave, hvor der anvendes en robottotalstation.

Før måling på banen kan påbegyndes, skal der ifølge Banedanmarks regler, gennemføres et såkaldt "*Pas på, på banen-kursus*", som er et dagskursus, hvor regler om færden og arbejde på banen gennemgås. Kurset indeholder desuden et besøg på banen, hvor signaler og baneudstyr

præsenteres. Efter bestået prøve udstedes et banebevis, så det er lovligt at arbejde på banen. Såfremt et sådant kursus ikke er bestået, er det ikke tilladt at komme nærmere sporet end 4 m.

Når der arbejdes på banen, skal der være banevagter tilstede. Det er vagternes ansvar at medbringe en banesikkerhedsplan og holde øje med togtrafikken, så det er sikkert for måleren at bevæge sig rundt på banen. En jernbanesikkerhedsplan er en plan, hvor den jernbanesikkerhedsmæssige del af et arbejdes planlægning beskrives. Formålet med planen er som følger:

- *at arbejdet planlægges og udføres, så jernbanetrafikken ikke udsættes for fare.*
- *at arbejdet planlægges og udføres så den person, der udfører arbejdet ikke udsættes for fare.*
- *at alle risici kortlægges og forebygges gennem planlægning og instruktion.*
- *at arbejdet udføres under overholdelse af jernbanesikkerhedsreglerne.*

[Banedanmark, 2005]

Da sikkerheden på banen bl.a. afhænger af tog i bevægelse er det nødvendigt at tage højde for, hvilken type opgave, der arbejdes med. Sikkerhedsomfanget afhænger af den tid, som det tager at fjerne mandskab og materiel fra sporet (rømningstiden). Tiden afhænger af hvor meget personel og materiel, der skal rømmes fra sporet, og afhænger af togenes hastighed og udsigtslængden. Eksempelvis er rømningstiden 5 sek., med en udsigtslængde på 750 m i begge retninger på strækninger, hvor togene kører med 180 km/t. Der er ligeledes regler om, at der ikke må rømmes over andet spor, så disse arbejdssituationer kan være besværlige og kræve flere banevagter og gode udsigtsforhold, især hvis rømningstiden og udsigtslængder skal overholdes i nærheden af en kurve.
Rent målemæssigt skal der også tages højde for udsigtslængder. Banevagten skal altid være i berøringsafstand af måleren og samtidig kunne overholde den udsigtslængde, der er angivet i banesikkerhedsplanen. En udsigtslængde varierer efter hastighederne, men som hovedregel skal en banevagt kunne se så langt frem på sporet, at det kan rømmes 10 sek., før toget passerer. Kan dette ikke overholdes, skal der udsendes en fremskudt vagt, der kan fortælle den vagt, der befinder sig ved måleren, hvornår der kommer tog. Derfor kan det, hvis der arbejdes i begge spor i en længere kurve være nødvendigt at have tre vagter på en måler, hvilket er en økonomisk belastning i forhold til udbyttet. Desuden gælder der specielle regler i forbindelse med begrænset sigtbarhed, eksempelvis i tilfælde af regn- eller snevejr.

Ved strækninger med køreledninger er der sikkerhedsafstande til køreledningen. Sikkerhedsafstanden til disse køreledninger er 1,75 m, og hvis der f.eks. måles med terrestrisk landmåling, skal der tages hensyn til prismestokkens længde.

3.3 COWIs banemåling

Arbejdet i marken foregår i dag ved, at målinger foretages med totalstation og kobles til fikspunkter, der er etableret langs banen. Målingerne består af de tidligere omtalte tværprofiler. De i figur 3.1 viste objekter opmåles, og såfremt der findes andre objekter langs banen, skal disse ligeledes måles ind, og der skal ydermere måles et punkt på skinnen ud for disse.
Når der måles i marken, tildeles punkterne en kode efter kodetabellen i banenormen. Yderligere liniekodes alle punkter langs banen som linier, så tværprofilerne dannes af punkter, der indgår i disse. Fikspunkterne skal overholde de omtalte nøjagtigheder afhængigt af den hastighed, der er tilladt på den pågældende strækning.
Langs banen udføres en fotoregistrering til orientering. Det vil sige, at der pr. 200 m skal tages et digitalt foto og noteres hvilken kilometrering og retning, det er taget i.

Når markarbejdet er udført, bearbejdes data. Banedanmark har specielle ønsker til, hvordan data skal afleveres, hvilket er beskrevet i banenormen. Processen frem mod det ønskede output er ligeledes en tidskrævende opgave, og blot det at føre fotoregistreringer digitalt med dato og positionering i forhold til kilometrering er en tidskrævende proces.

3.3.1 Databearbejdning

Første skridt i bearbejdningen af data er at beregne opstillingerne og nettet af opmålte fikspunkter og detailpunkter. Herefter dannes en DGN-microstation fil, hvor der tages hensyn til kravene i banenormen. Data opdeles i tre filer; en sporfil, der indeholder informationer fra målinger på selve sporet, en teknikfil, der indeholder målinger af sporteknik, signaler, kabelkasser osv. samt en terrænfil med målinger af ballast top og bund, skråning top og bund o. lign. Disse filer kan så kombineres til de forskellige resultater/produkter Banedanmark ønsker.
Den førnævnte fotoregistrering udføres i marken ved, at der noteres kilometrering samt retning på de indsamlede fotos langs banen. Denne proces er i dag manuel og er tidskrævende i forhold til udbyttet. Figur 3.9 viser et eksempel på et sådan foto, efter informationerne er noteret herpå.

Figur 3.9: Et eksempel på fotoregistrering, der er gjort klar til digital registrering.

3.3.2 Tidsforbrug ved COWIs målemetode (egne erfaringer)

Projektgruppens erfaring med banemåling stammer bl.a. fra strækningen Køgebugt i nærheden af København. Ved den opgave var der et målehold bestående af to personer, der blev anvendt på hele strækningen, og der blev målt ca. 700 m om dagen. På strækningen var der meget teknik, mange master, under- og overføringer, *nedstik* og meget reflektorløs måling til køreledninger. Det

var en opgave, der ikke vil være at finde tilsvarende på strækninger i Nordjylland eksempelvis. Opgaven omfattede spor i begge retninger og bugseringsområder samt stationer, hvor der skulle måles skilte, perronkanter, brønddæksler og lignende. Denne omfattende måling kunne kun udføres af et målehold med to personer og var derfor ressourcekrævende.
En anden erfaring er opnået på banestrækningen Esbjerg-Bramming, hvor der blev anvendt enkeltmandsopmåling. Dette skyldes, at denne strækning kun omfattede et spor, og at der ikke var master og køreledninger ligesom der heller ikke var teknik i samme omfang som langs Køgebugt-strækningen. Dette forsøg gik tilfredsstillende, og én mand kunne nå op til 1 km om dagen. Det skal dog nævnes, at såfremt strækningen indeholdt kurver, eller hvis der var dårlig sigtbarhed, var det ikke muligt at nå mere end 500 m. Ydermere blev der set bort fra elementer som over- og underføringer eller banehegn, som var besværlige at opmåle med robotstation, og som kunne være klaret bedre med to personer på måleholdet.

Opsamles der på den praktiske erfaring fra marken kan det konstateres, at der i gennemsnit for én mand måles omkring 650 m om dagen ved måling af enkelt spor og 400 m om dagen ved dobbelt spor, da det er selve opstillingen og tilknytningen til fikspunkter, der tager meget tid. Er der to personer om opmålingen, kan der måles omkring 700 m om dagen ved dobbeltspor og ca. 1.200-1.300 m ved enkelt spor. Det skal nævnes, at disse længder er ved 12 timers arbejdsdage. Ud fra projektgruppens erfaring kan det konstateres, at de to metoder strækker lige langt rent måleholdsmæssigt. Dog skal der her foretages en yderligere betragtning i forhold til antallet af banevagter. En mand kræver én banevagt på lige strækninger, hvor to personer skal have to, men i kurver skal den enkelte måler bruge to eller tre banevagter, hvilket er det samme med to personer. To personer måler dog hurtigere igennem kurven, og derved bruges samme antal banevagter i kortere tid. Derfor er det afhængigt af, hvordan strækning forløb er, hvorvidt det er fordelagtigt at måle med én eller to personer.

3.4 Opsamling på banemåling

I forlængelse af gennemgangen af de forskellige krav, der skal tages højde for i forbindelse med opmåling på jernbaner, samles her op på kravene, som så senere i projektet skal fungere som vejledning i projektgruppens arbejde med at effektivisere de nuværende målemetoder. I denne opsamling findes en oversigt over de objekttyper, der skal måles ved banemåling og over de nøjagtigheder, som disse skal måles med. Desuden tages højde for de krav, der er til arbejdet på banen og de forholdsregler, der er nødvendige for at opnå en sikker måling. Også tidsperspektivet i forhold til datamængden behandles, da dette skal tages til efterretning ved en effektivisering.

3.4.1 Objekttyper og nøjagtigheder

De objekttyper, der indgår ved banemåling og den nøjagtighed, som objekterne skal måles med, er i figur 3.10 opstillet ifølge banenormens krav.

Objekttype	Plan nøjagtighed [cm]	Højde nøjagtighed [cm]
Fikspunkter	0,5	0,5
Veje og stier	1	1
Bygninger, bygværker mm.	2	1
Broer	2	1
Ramper	2	1
Søjler mv.	2	1
Støttemur	2	1
Hegn	5	5
Plankeværk mv.	2	1
Grøfter	5	5
Skråninger og baneskråninger	2	1
Terrænpunkter	2	1
Diverse enkeltpunkter	2	1
Brudlinjer	2	1
Fundamenter	1	1
Kabelkasser	1	1
Kilometersten/ tavler	5	5
Ballast- og gruskanter	2	1
Perronforkant	1	1
Brønde	2	1
Køreledninger	1	0,5
Skinner	1	0,5

Figur 3.10: Nøjagtighedskravene i banenormen på de forskellige objekttyper. Nøjagtighederne er angivet i plan og højde.

3.4.2 Hensyn til forholdsregler

De forholdsregler, som det i projektgruppens tilfælde er nødvendigt at tage hensyn til, er rømningstiden og afstanden til køreledningen. Rømningstiden skal overholde de angivne standarder, jf. figur 3.11, men i de tilfælde hvor dette ikke er muligt, skal der opstilles sporspærringer for at foretage opmåling.
En sporspærring giver visse fordele, da der hermed må overskrides afstandskrav og målingerne kan foregå uden rømninger, da der ikke kan komme tog.
Sikkerhedsafstanden til en køreledning er 1,75 m, hvilket sætter krav til, hvor højt instrumenter kan række op fra jernbanen. Idet køreledningen er placeret 5,50 m over skinnens overhøjde, medfører dette, at et instrument på skinnerne ikke må være højere en 3,75 m.

Største tilladte togha-stighed	Udsigtslængde i meter ved rømningstid på					
	5 sek.	10 sek.	20 sek.	30 sek.	40 sek.	50 sek.
180	750					
160	660					
140	580	780	1170	1560	1950	2330
120	500	670	1000	1340	1670	2000
100	420	560	840	1120	1390	1670
90	380	500	750	1000	1250	1500
80	330	450	670	890	1120	1340
75	310	420	630	840	1020	1250
60	250	340	500	670	840	1000
50	210	280	420	560	700	840
40	170	230	340	450	560	670
30	130	170	250	340	420	500

Figur 3.11: Rømningstider og udsigtslængder ved forskellige størst tilladte toghastigheder [Banedanmark, 2005].

Foruden de ovennævnte forholdsregler, skal målerne desuden have gennemgået banekursus og være iklædt korrekt påklædning. Der skal forud for målingen ligeledes oprettes en sikkerhedsplan, som efter reglerne medbringes af banevagterne.

3.4.3 Tidsforbrug

Som nævnt gennem kapitlet er banemåling tidskrævende, og der er derfor ønske om i dette projekt at effektivisere opmålingen tidsmæssigt i forhold til datamængden. Umiddelbart er kravet til tidsforbruget, at projektgruppens forslag til effektivisering øger produktiviteten samtidig med, at der opnås større datamængde eller et bedre produkt. Det er dermed opgaven at fremstille et system, der kan opnå dette. Forbedringerne i tid og datamængde skal helst være markante, da det er hele formålet med projektet.

Der holdes gennem projektet kun fokus på tidsforbruget. Det vil sige, at der ikke regnes på det økonomiske aspekt ved denne effektivisering. Det gøres, da projektet er af forskende karakter mere end værende et endeligt produkt. Hvis det økonomiske aspekt medtages, skal der også regnes afskrivning af instrumenter ligesom, at det skal indgå, at der opnås anderledes datamateriale og derved eventuelt en merpris for produktet. Brug af banevagter eller sporspærringer, som er afhængigt af opgavens ordlyd og baneforløb på strækningen, skulle i så fald også medtages.

4 Eksisterende løsninger

Dette kapitel behandler nogle af de metoder, der i dag anvendes til opmåling af f.eks. jernbane, køreteknik mm. Dette gøres for at sætte fokus på hvilke målemetoder og hvilke sensorer, der er de mest anvendelige til en integreret løsning til opmåling af jernbanestrækninger i Danmark og som samtidig kan overholde nøjagtighedskravene fastsat i banenormen.
Litteratursøgning har resulteret i forskellige artikler og tidligere projekter udarbejdet om emnet. De, der er fundet mest relevante til at begrunde valg af metode til systemsammensætning og valg af komponenter i systemet, beskrives kort igennem kapitlet. Det er her valgt at opdele de forskellige systemer i tre afsnit. Et, der beskriver kommercielle systemer til banemåling, et, der beskriver øvrige banemålingssystemer, og et, der beskriver relevante mobile kortlægningssystemer.

4.1 Kommercielle systemer til banemåling

Først beskrives de kommercielle systemer, der har direkte relation til dette projekt ved at omhandle opmåling af jernbaner. Systemerne er alle produkter, der kan erhverves til at foretage opmåling mod betaling, ved kontakt til firmaet bag. Disse systemer er:

- Strukton
- Leica GRP5000
- Fli-map

4.1.1 Strukton

Det hollandske firma Strukton foretager banemåling, hvor skinner og omgivelser opmåles ved en hastighed på 120 km/t med et måletog. Firmaet er blevet rekvireret af Banedanmark til at foretage opmålinger af dele af det danske skinnenet. En ulempe ved et system som Struktons måletog er, at det grundet den høje hastighed kun arbejder på hovedspor og ikke på strækninger, der ikke er beregnet til højhastighedstog. Et system, som det, der udarbejdes gennem dette afgangsprojekt, skal kunne anvendes på alle typer af spor. Struktons måletog har nogle af de egenskaber, der søges gennem et integreret system. Figur 4.1 viser de data, der indsamles, jf. firmaets hjemmeside.

Objekt klasse	Data
Skinnegeometri	Skinnegab, skinneoverkant, skinnernes liniestilling, skinnens hældning, skævhed, dyk i en eller begge skinner
Køreledning	Ledningshøjde, horisontalposition for max. fire ledninger, position af mast
Skinnetværsnit	Skinnehøjde, bredde på skinnehoved, skinne hældning, skinnetype
Skinnedeformationer	Amplitude, bølgelænge
Skinneoverflade	Revner i skinne, skinnesamling, burns, slid på svejsninger, deformation af rullelejekugler, manglende bolte
Videoobservation	Baneforløb - baneomgivelser, signalsynlighed, vegetation kontrol, køreledning
Positionering	D-GPS, automatisk afstandskorrektioner til objekter som magneter (UK, NL), master

Figur 4.1: En oversigt over de data Strukton-toget indsamler langs en banestrækning. Således bemærkes, at der opnås forskelligt data til skinnegeometrien samt køreledningen. Ligeledes kontrolleres signalsynlighed samt baneomgivelser vha. videoobservationer. Figuren er udviklet jf. specifikationer på firmaets hjemmeside [Strukton, 2007].

Toget måler skinnegeometrien, hvor skinnegabet er afstanden mellem indersiderne af de to skinner. Ligeledes måles forskellige skævheder og uregelmæssige skinneforløb, hvilket kan have indflydelse på sikkerhed og komfort. På skinneoverfladen observeres, vha. videoobservationer,

eventuelle revner manglende bolte samt slid på svejsninger. I form af disse videoobservationer er det ligeledes muligt at kontrollere signalsynlighed og objekter i omgivelserne [Strukton, 2007].

Der har ikke været mulig at fremskaffe yderligere informationer omkring systemet. Det er ligeledes uden held forsøgt at skabe kontakt til firmaet Strukton for oplysninger omkring nøjagtigheder.

4.1.2 Leica GRP5000

Leica producerer i samarbejde med Amberg et instrument, GRP5000, som integrerer banetrolje og laserskanner. Dette instrument anvender en Zoller+Fröhlich Imager 5003 laserskanner, som placeres således, at den måler perpendikulært på kørselsretningen. Samtidig anvendes en banetrolje til opmåling af skinneafstand, gradient, højdeforskel m.m. Der er i litteratursøgningen ikke fundet litteratur, som undersøger GRP5000, hvorfor der her refereres til de specifikationer, der eksisterer fra Amberg. En illustration af en opmålingssituation med GRP5000 ses på figur 4.2, hvor det bemærkes, at der skannes profiler, og at skanneren er placeret ortogonalt på kørselsretningen. Instrumentet måler i bevægelse, hvor hastigheden afhænger af den ønskede punkttæthed. Således kan der ved tæt skanning (5X5 mm) køres 1 km/t og ved 20X20 mm skan, op til 7 km/t. Ved fine skan har laserskanneren en frekvens på 500.000 punkter/sek. Nøjagtigheden på skinnegabet er ±0,5 mm, på højdeforskellen er den ±1,0 mm, og selve profilnøjagtigheden angives til ±1 cm [Amberg, 2007].

Figur 4.2: Opmålingssituation, hvor GRP5000 kan anvendes. GRP5000 skanner således profiler af omgivelserne og måler skinnedata vha. troljen [Amberg, 2007]

4.1.3 Fli-map

Fli-map arbejder med en totalløsning til opmåling af banestrækninger og omgivelser. Metoden hedder Fli-map og er udviklet hos Fugro i Holland. En helikopter flyver over skinneforløbet og skanner området ved en overflyvning. Fli-map indeholder to laserskannere, der optager 10.000 punkter pr. sek., hvilket resulterer i ca. 20-30 punkter pr. kvadratmeter. Samtidig optager to digitalkameraer og to digitale videooptagere løbende til efterfølgende klassificering af objekter i de indsamlede laserskannerdata. Af disse kameraer er et video- og et still kamera orienteret fremad og et video- og et still kamera orienteret nedad Der er mulighed for at addere fire kameraer ekstra, hvoraf to er infrarøde og to er kameraer, der optager ved dårligere lysforhold. Disse kameraer orienteres som de påmonterede. Fli-map måler 40-90 miles (64.37-144.84 km) på en dag og holder en nøjagtighed på 10 cm i planen og 15 cm i højden. Det angives ikke, om der er tale om punktspredning eller tre gange punktspredningen, hvorfor det antages at være punktspredning [Fli-map, 2007].

4.2 Forskende projekter vedrørende banemåling

Foruden de kommercielle systemer til banemåling er der stiftet bekendtskab med mere forskende løsninger til, hvordan banemålingen kan effektiviseres ved hjælp af forskellige komponenter. Disse er følgende:

- Wildi & Glaus' banemålingssystem
- Lysehøj & Nielsens laserskanning af jernbaner
- Alippi et. al.'s fotogrammetriske opmåling af banelegemet
- Fararooy & Mairs opmåling af køreledninger

4.2.1 Wildi & Glaus' banemålingssystem

Schweiziske Thomas Wildi og Ralph Glaus har udarbejdet et banemålingssystem. Baggrunden for systemet er, at det grundet højere hastigheder på sporene, er nødvendigt at have et godt og nøjagtigt kendskab til skinner og tilhørende teknik. For at opnå et sådant kendskab er traditionel landmåling ikke tilfredsstillende økonomisk set, hvorfor det søges at opnå samme kendskab til skinner og teknik ved alternativ opmåling [Wildi & Glaus, 2002].
Målingerne ønskes foretaget kinematisk, og systemet er opbygget over en base, som består af en let ramme, hvorpå der er placeret to odometre, to inklinometre samt en skinneafstandsmåler. Fordelen ved den lette ramme er, at systemet gøres lettere at manøvrere. Odometrene anvendes til at måle den tilbagelagte afstand, hvorfor det er nødvendigt med to sensorer for at beregne eventuelle kurver. Inklinometrene anvendes til at måle gradienten og/eller eventuel forskel i skinnehøjde [Wildi & Glaus, 2002]. For at måle skinneafstanden anvendes to sensorer, som presses mod skinnens inderside vha. fjedre. Disse sensorer måler afbøjninger af fjedrene [Glaus, 2006]. Fra basen anvendes data til forskellige oplysninger, som udover de ovennævnte er temperatur og strækning. Ud fra disse data beregnes længdeprofiler og vertikale deformationer.
På basisdelen af systemet er der foretaget forskellige foranstaltninger for at minimere de fejlbidrag, som kan have betydelig indflydelse på målingernes kvalitet. Inklinometrene er følsomme overfor temperaturændringer, hvorfor de to sensorer placeres i en isoleret boks, hvor temperaturen holdes konstant på 60° C.
Systemet består desuden af en positioneringsdel, hvilket kan være en dobbeltfrekvent GPS-RTK modtager for dermed at positionere den tilbagelagte bane. For at konstruere terrænprofiler anvendes en SICK laserskanner [Wildi & Glaus, 2002].

Systemet blev anvendt til opdatering af en banestrækning mellem Giubiasco og Locarno i Schweiz, hvor nøjagtighedskravet til målingerne var en absolut nøjagtighed på 5 cm for vertikale - og horisontale positioner. Dog er tolerancerne ikke ligeså høje på strækninger, hvor der anvendes højhastighedstog. Her er denne nøjagtighed på 3 mm. Opmålingerne blev foretaget med basissystemet og med positioneringsdelen i form af GPS. For at opnå en tilstrækkelig nøjagtighed blev der foretaget *postpositionering* af GPS-observationerne.
Resultatet for målingerne var af tilstrækkelig nøjagtighed, idet der på plane målinger kunne opnås en punktspredning på ca. 1,5 cm og en spredning i højden mellem 2 cm og 4 cm [Wildi & Glaus, 2002]. Målingerne med GPS resulterede i plane nøjagtigheder på 1,5 cm, men var forringet med en faktor 1,5 i højden. Højdedataene kunne udglattes vha. målinger fra inklinometrene og odometrene. Ved en forbedring af udglatningsalgoritmerne forventes det, at nøjagtigheden kan øges [Wildi & Glaus, 2002].

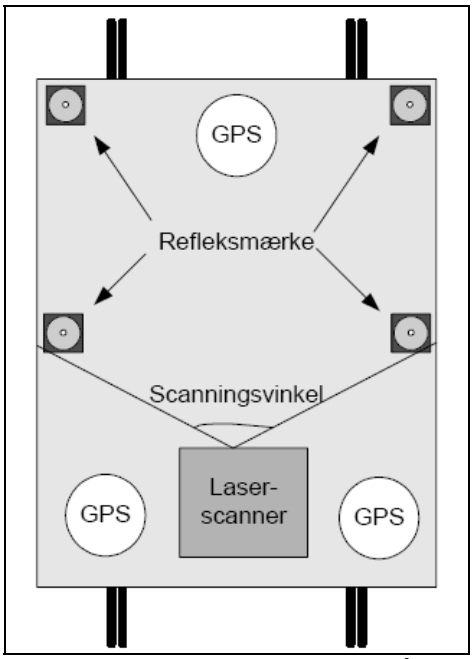
Det konkluderes ligeledes, at det, såfremt millimeternøjagtighed skal opnås, ikke blot er algoritmerne, der skal forbedres, men at der også skal anvendes andre sensorer. Disse sensorer skal anvendes, når GPS-signalet ikke er tilstrækkeligt. Tests med selvsøgende totalstation har dette vist gode resultater [Wildi & Glaus, 2002].

En mere uddybende beskrivelse af systemet foretages i Ralph Glaus' doktorafhandling fra 2006, hvor de samme sensorer integreres på en swiss trolley. Systemet ses på figur 4.3, hvor det bemærkes, at der er placeret to laserskannere forrest til højre og venstre på troljen samt en GPS-modtager forrest centralt.

Figur 4.3: Wildi & Glaus' banemålingssystem, som anvender banetrolje, GPS og to laserskannere. Laserskannerne, som er de to blå bokse, er placeret på højre og venstre side for at opmåle baneomgivelserne, og GPS-modtageren med den tallerkenformede antenne er placeret forrest centralt [Glaus, 2006].

4.2.2 Lysehøj & Nielsens laserskanning af jernbaner

Der er på Aalborg Universitet i 2003 udarbejdet et 9. semesters projekt på landinspektøruddannelsen, der omhandler laserskanning af jernbaneskinner, hvor det undersøges hvilken nøjagtighed, det er muligt at opnå på selve positioneringen af skinnerne ved anvendelse af terrestrisk laserskanning.
Til opgaven anvendtes en Cyrax 2500, som er en kameraskanner, der måler et område på 40° X 40° pr. skan. Opmålingerne blev foretaget på en nedlagt banestrækning på ca. 100 m i Aalborg Centrum, hvor et sporskifte udgjorde en del heraf. Selve skinneopmålingen blev foretaget ved at skanne fra begge sider af banelegemet for dermed at opnå opmåling af såvel inderside som yderside af skinnerne. For at orientere data anvendtes banestyrelsens fikspunkter samt fikspunkter i et lokalt net konstrueret vha. totalstation, som alle signaleres med kugleformede targets. Som kontrol af opmålingen er der kontrolleret afstande på skinner og afstande mellem skinner vha. stålmålebånd.
Resultatet af opmålingerne er en punktspredning af henholdsvis 2,5 mm og 3,8 mm ved de to skan, hvilket vurderes som tilfredsstillende for at kunne overholde kravet til baneopmålinger.



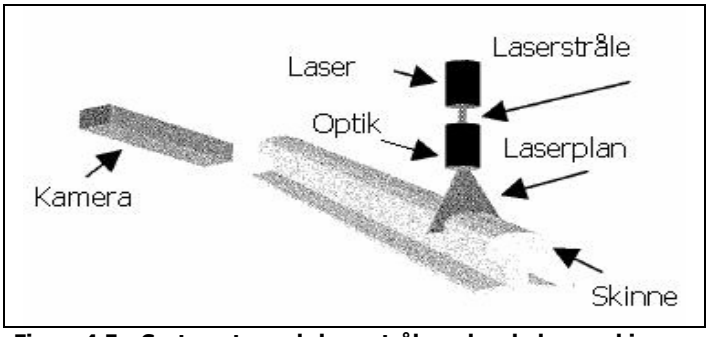
Figur 4.4: Det køretøj, der foreslås af Lysehøj og Nielsen til opmåling af banelegemer. Køretøjet består af tre GPS-modtagere, en 360° laserskanner samt fire targets [Lysehøj & Nielsen, 2003].

I perspektivering til projektet nævner Lysehøj og Nielsen, at det kunne være interessant at anvende en 360° skanner, da dette ville mindske mængden af opstillinger og dermed også datamængden. Ligeledes præsenterer Lysehøj og Nielsen et forslag med placering af skanneren på en vogn, der kører på skinnerne, hvor targets ligeledes kunne placeres på vognen for at undgå at flytte dem [Lysehøj & Nielsen, 2003]. Forslaget til vognen med påmonteret skanner og GPS-modtagere ses på figur 4.4.

4.2.3 Alippi et. al.'s fotogrammetriske opmåling af banelegmet

I 1999 udarbejdede Alippi et al. en artikel "*Composite Real-Time Image Processing for Railways Track Profile Measurement*", som omhandler et opmålingssystem for jernbaner, der er baseret på fotogrammetri og efterfølgende skanning af disse fotos. Artiklen behandler et system, der er testet i undergrundsbanen i Milano. Systemet er udviklet til at kontrollere sikkerheden i togtrafikken, hvilket er nødvendigt for at udføre en tilstrækkelig vedligeholdelse og dermed sikre togdriften samt lavest mulige omkostninger til drift og vedligehold. For at opnå dette er hyppig kontrol vigtigt, for at kunne afgøre hvor og hvornår vedligeholdelsen skal foretages. Det er også vigtigt for at kunne foretage frekvent kontrol, hensigtsmæssigt at holde overvågningen så billig som muligt og stadig overholde en tilfredsstillende nøjagtighed.

Traditionelle målemetoder er mekaniske metoder, hvor de forskellige sensorer har kontakt til skinnerne, eksempelvis ved måling af skinneafstand, højdeforskellen mm. Denne løsning giver mulighed for at måle skinneforløbet, men har også flere mangler og ulemper. Eksempelvis måles der ofte på mindre dele af skinnen, hvorfor eventuelle fejl udenfor sensorernes berøringsflader ikke observeres. Der opnås således ikke en detaljeret kontrol af skinnerne. Ligeledes skal opmålinger foretages ved lav hastighed for at overholde en tilstrækkelig nøjagtighed. En anden ulempe ved metoden er, at slid ikke observeres.



Figur 4.5: Systemet med laserstrålen der belyser skinnen, hvorefter billedet tages [Alippi et. al. , 1999].

Innovative målemetoder anvender laserskanning eller billedanalyse, hvor det nævnes at de eksperimenter, der har været med laserskanning måler få punkter på skinnerne og af en utilstrækkelig nøjagtighed. I artiklen fokuseres derfor på billedeprocessering, hvor billedet genereres ved at lyse skinnen op med en laserstråle. Denne proces sker ved, at strålen sendes gennem en optisk linse, hvormed strålen bredes ud i et plan, som oplyser skinnen. Billedet opnås derefter ved, at to 512 X 512 pixels kameraer måler skinnen. Målingerne og billedprocessioneringen foretages i realtid og hastigheden af opmålingerne begrænses kun af den tid, hvormed denne proces forløber. En illustration af systemet ses i figur 4.5. Ved at sammenligne den ideelle profil med den aktuelle er det muligt at kontrollere skinnen og det slid, som denne er påført. Efter tests i mere end et år i Milanos undergrund opnås nøjagtigheder på ca. 25 µm ved stillestående målinger. Det konkluderes, at metoden er spændende til yderligere undersøgelse, og at det forventes at kunne realiseres med samme nøjagtighed i bevægelse. For at foretage opmålinger vha. denne metode er det dog nødvendigt at foretage et mere eksakt studium af lysforhold og vibrationer samt at verificere nøjagtigheden [Alippi et.al., 1999].

4.2.4 Fararooy & Mairs opmåling af køreledninger

Fararooy & Mairs artikel "*Review of Railway Overhead Wire Geometry Measurement systems" fra 1998* omhandler forskellige former for opmåling af køreledning. Artiklen klassificerer de forskellige teknikker til bestemmelse af geometrien af køreledningen. Der omtales således forskellige metoder som passiv, semiaktiv og aktiv optagelse af data. Figur 4.6 viser hvilke sensorer, der behandles. Grundet artiklens alder er der formentlig sket en del udvikling siden publiceringen.

Sensortype	Eksempler
Passive sensorer	Infrarød, stereoskopisk matchning
Semiaktive sensorer	Tilført lys ved utilstrækkelig baggrundslys
Aktiv sensorer	Ultralyd, laser og radar

Figur 4.6: Forskellige typer sensorer, hvor typen afgøres af den mængde af energi, der afgives mod objektet, for dermed at foretage en måling.

Baggrunden for projektet er, at placeringen af køreledningen er vigtig for optimering af den elektriske overførsel til toget. Grundet skinnevedligeholdelse og slid på skinnerne ændres dennes placering til tider i forhold til køreledningen, hvorfor ledningens position overskrider tolerancen hertil. Derfor er en positionering af køreledningen vigtig. Som nævnt kategoriseres forskellige opmålingsmetoder i artiklen, og forudsætninger for de forskellige metoder nævnes.
Passive sensorer som f.eks. infrarød måling og stereoskopisk "matchning" arbejder ud fra omgivelsernes lysintensiteter og måler ikke direkte på et ønsket objekt. Denne form for opmåling er afhængig af energifordelingen i miljøet for dermed at kunne detektere objekter. Infrarøde sensorer er egnede i situationer, hvor temperaturen på objektet er forskellig fra temperaturen af omgivelserne. Ved passive sensorer udnyttes omgivelsernes lys, hvilket er nødvendigt for sensorer til stereoskopisk matchning. Dog kan denne form for opmåling kræve mere belysning, som derfor tilføres, hvilket af Fararooy og Mair defineres som semiaktive sensorer. Aktive sensorer er sensorer, som afhænger af en elektromagnetisk bølge eller ultralydsenergi. Det være sig eksempelvis laser-, ultralydssensorer eller radarer.
De forskellige typer sensorer anvendes i forskellige målesystemer, hvor et system, der anvender tre *CCD-kameraer*, opnår en nøjagtighed på køreledningens placering på 1 cm. Et andet anvender faseskanner og kan opnå en nøjagtighed på 5 mm i højden og placeringen på køreledningen. Der er dog forhold, som skal forbedres ved opmålingsmetoden, da direkte sollys samt forskel på refleksion fra køreledningen, som våde og beskidte overflader, ødelægger målingen [Fararooy & Mair, 1998].

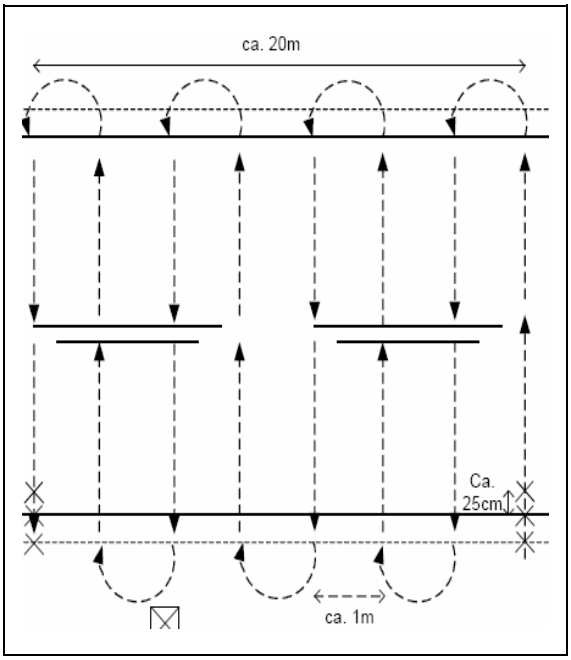
4.3 Øvrige relevante mobile kortlægningssystemer

Der er også set nærmere på øvrige artikler, der omhandler mobile kortlægningssystemer, og som er relevante for dette projekt. Disse artikler omhandler ikke direkte banemåling, men indeholder alligevel nogle af de samme problemstillinger som ved banemåling. De artikler, det er valgt at referere, er:

- Pedersen & Rasmussens forsøg med Vejdirektoratets DyRoS-målebil
- Cuskelly & McDonalds mobile kortlægningssystem
- Jansa et. al.'s mobile kortlægningssystem

4.3.1 Pedersen & Rasmussens forsøg med Vejdirektoratets DyRoS-målebil

Et afgangsprojekt fra landinspektørstudiet fra 2005 omhandler udviklingen af et mobilt kortlægningssystem (MKS). Systemet blev udviklet ved integration af en laserskanner på en af vejdirektoratets målebiler. Dette blev gjort med henblik på at undersøge, hvorledes en SICK LMS 211 laserskanner kan integreres på DyRoS-målebilen og anvendes som MKS. Målebilen er et køretøj, hvorpå der er monteret en GPS-modtager, odometer, en SmallPOS (to inklinometre, en gyro rate sensor og et digitalt kompas), tre videokameraer og en 1D laserafstandsmåler.
GPS-modtageren anvendes til positionering af køretøjet, og er placeret umiddelbart ovenpå SmallPOSen og laserafstandsmåleren, hvormed et punkt på asfalten målt med laserafstandsmåleren kan beregnes. Videokameraerne anvendes dels til at observere lasermålingerne, dels til at standse eksempelvis ud for en kantpæl. Videoobservationerne anvendes ligeledes til visuel dokumentation.
Laserskanneren, som integreres på målebilen er en SICK LMS 211 Outdoor. Denne skanner er en linieskanner, som måler vha. impulsmåling. Synsfeltet for SICK LMS 211 er 100°, og skanneren har en punktspredning på ±3,5 cm.



Figur 4.7: Testfeltet anvendt til test af det MKS, der udarbejdedes af Pedersen og Rasmussen. Testfeltet er ca. 20 m langt, og der måles med 1 m afstand mellem de tværgående målinger [Pedersen & Rasmussen, 2005].

Opmålingerne er foretaget på en teststrækning, som illustreret på figur 4.7. Testfeltet var ca. 20 m langt, og der måltes på tværs af kørebanen med ca. 1 m afstand mellem målingerne. For at sørge for frit udsyn til GPS-modtageren var der valgt et testfelt, hvor der var åbne marker mod syd og lav bymæssig bebyggelse mod nord.

Efter testudførelse og beregninger af nøjagtigheder, har Pedersen og Rasmussen opnået et resultat på middelværdien for præcisionen for laserskanneren på ca. 4 mm og ca. 9 cm for præcisionen på tre tests foretaget i projektet. I projektet blev det konkluderet, at systemet er egnet til rutiner i Vejdirektoratet [Pedersen & Rasmussen, 2005].

4.3.2 Cuskelly & McDonalds mobile kortlægningssystem

Mick Cuskelly og Ian McDonalds artikel "*Terrestrial scanning – an option for planning survey data capture"* fra 2006 omhandler opmåling af en 20 km vejstrækning, hvor formålet var at kortlægge træer langs vejen og dermed optimere forholdene for planlægning af en vejudvidelse.
Ideen til konstruktionen af køretøjet var baseret på det tidligere omtalte system Leica GRP5000. Systemet består af diverse sensorer, herunder inklinometer, et odometer, sensorer til opmåling af skinneafstand samt en Leica HDS4500 laserskanner. Idet projektet ikke omhandler skinneopmåling har sensoren til opmåling af skinneafstand ikke nogen relevans for Cuskelly & McDonald, hvorfor denne sensor ikke inkluderes i systemet. Sensorerne fra GRP5000 blev indkøbt og monteret på bilen.

Selve opmålingen foregik på 20 km landevej, hvor centerlinien af vejen var reference. Af denne årsag var der lavet markeringer herpå med en maksimal afstand på 1 km. Målingerne blev foretaget i realtid og ved en hastighed på 3,6 km/t, hvormed der blev foretaget målinger pr. 30 cm. Ligeledes blev objekter i en afstand af 35 m fra skanneren registreret. Opmålingerne varede 8 timer. Artiklen beskriver ikke hvilke nøjagtigheder, der er opnået med systemet [Cuskelly & McDonald, 2006].

4.3.3 Jansa et. al.'s mobile kortlægningssystem

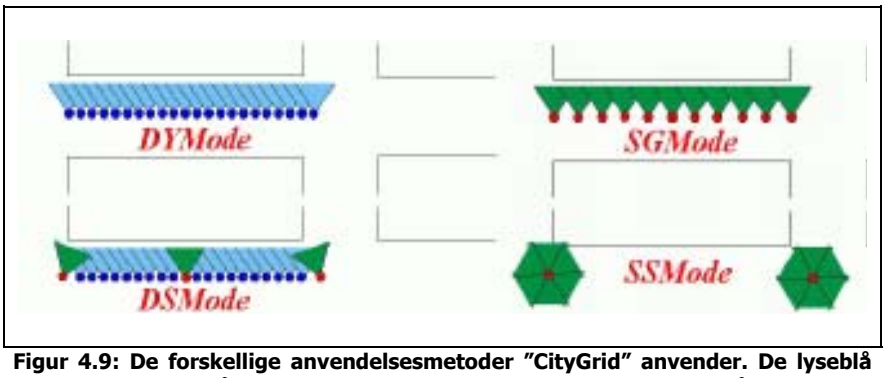
Ved projektgruppens udarbejdelse af et 8. semesters projekt, blev der anvendt en artikel, der omhandler integration mellem laserskanning og fotogrammetri, hvor den høje opløsning fra fotogrammetri kombineres med 3D målinger fra laserskanning. Denne artikel *"Terrestrial laserscaning and photogrammetry – acquisition techniques complementing one another"* er ligeledes fundet relevant for dette projekt.
Der anvendes i artiklen til 3D-byopmåling og rekonstruktion af monumenter. Ligeledes beskrives forskellige fordele og ulemper ved de to sensortyper, og det beskrives hvordan de supplerer hinanden, hvilket kan ses i figur 4.8. Det bemærkes således, at de ulemper, der er ved den ene sensor, kan suppleres med den anden for dermed at opnå et tilstrækkeligt resultat.

	Laserskanner	**Fotokameraer**
Rumlig opløsning	Høj	Meget høj
Rumlig dækning	Meget høj	Høj
Intensitet/Farve	Begrænset	Meget god
Oplysning	Aktiv	Passiv (og aktiv)
3D punkttæthed	Høj	Afhængig af tekstur
Dybde nøjagtighed	Høj	Høj
Rekvireringsprocedure	Dynamisk	Øjebliksbillede
3D rekonstruktionsarbejde	Medium	Høj
Teksturrekonstruktion	Ingen/Meget begrænset	Meget god
Instrument pris	Høj	Lav

Figur 4.8: Fordele og ulemper ved de to sensortyper, hvor det bemærkes, at en sammenkobling af de to kan være hensigtsmæssig [Jansa et. al. , 2004].

Der eksisterer to muligheder for at gennemføre en opmåling med en kombination af de to sensorer. Den ene er en uafhængig sammenkobling og den anden er en samlet, stabil og kalibreret løsning. For at bestemme den geometriske sammenhæng mellem de forskellige sensorer kalibreres systemet. Til bearbejdning af data er kombinationen ligeledes anvendelig, idet data målt med laserskanner har relativ ringe intensitet og farve samt meget begrænset tekstur. I tilfælde af komplekse objekter kan fotos derfor anvendes til konstruktionen af disse. Da artiklen beskæftiger sig med integrationen af sensorerne til 3D byopmåling, monteres disse på et køretøj, så deres indbyrdes placering og orientering er kendt.

I Jansa et. al. beskrives to systemer, som anvender kombinationen til konstruktion af 3D-bymodeller, henholdsvis et system fra Riegl Laser Measurement Systems GmbH og et fra NO Limits IT GmbH, begge fra Østrig. For Riegl-systemet beskrives, hvordan data integreres og for NO Limits-systemet "CityGrid" beskrives fire forskellige målemetoder. Disse metoder er illustreret i figur 4.9, hvor den lyseblå farve er fotos, og den grønne er laserskanning.



Figur 4.9: De forskellige anvendelsesmetoder "CityGrid" anvender. De lyseblå markeringer er målinger med fotogrammetri og de grønne målinger med laserskanning [Jansa et. al. , 2004].

"DYmode" er dynamisk og "DSmode" er dynamisk stop. "DYmode" anvender ren fotogrammetri, hvor opmåling foretages i bevægelse og med et bestemt interval, hvormed det ønskede overlap opnås. Ved "DSmode" anvendes samme princip, dog med laserskanning ved enkelte stop. De dynamiske målinger anvendes hovedsageligt ved generering af billedmosaikker af facader. Laserskanningen anvendes således til at orientere de rekvirerede fotos.
Ved "SGmode" anvendes laserskanning ved faste intervaller, hvor køretøjet stoppes ved skanning. Denne metode kan kombineres med "DYmode", således at der opnås data både med laserskanner og fotokamera. "SSmode" er opmåling af hele gadebilledet, hvor der skannes 360°. Da dette er meget tidskrævende, anvendes den kun ved specielle ønsker om grundig opmåling af gademiljøer.

Til test af kombinationen af laserskanner og fotokamera er der foretaget opmåling af en statue, hvor der er taget toogtyve billeder og foretaget tyve skan, heraf ti grovskan og ti finskan. I testfeltet placeredes niogtyve signaler til targets, hvoraf nogle var kubiske og andre cylinderformede. Resultatet af opmålingerne resulterede i, at opmåling med grovskan gav en varians, der var 50 % større end ved finskan. Nøjagtigheden af fotokoordinater vurderedes til 0,4 pixel. Ved sammenkoblingen af de to datasæt var der langt mere arbejde ved det fotogrammetriske, men resultatet var en mere nøjagtig model. Således blev nøjagtigheden forbedret med en faktor 3, hvilket medførte, at nøjagtigheden af enkeltpunkter blev forbedret fra 3.6 mm til 1.2 mm. Det konkluderes i artiklen, at kombinationen af de to sensorer er anvendelig, og at der er en række fordele ved kombinationen. Eksempler herpå er, at fotografier indeholder vigtige og detaljerede fakta om objekter til supplering af de *radiometriske* oplysninger. Dette kan yderligere anvendes i databehandlingen. Udover at forbedre nøjagtigheden optages fotos ligeledes som et øjebliksbillede, hvorfor eksempelvis vind ikke har indflydelse på den relative nøjagtighed på et objekt. Fordelen ved laserskanneren er, at der opnås en tæt punktsky, at der ikke er behov for tekstur på et objekt, og at laserskanning ikke er afhængig af dagslys [Jansa et. al., 2004].

4.4 Opsamling på eksisterende løsninger

Opsamles der på de eksisterende løsninger og kombinationer af alternativer til traditionel landmåling, kan projektgruppen konkludere, at der kan anvendes forskellige metoder. Da det ønskes at overholde banenormens krav, er det ikke muligt at overveje en løsning, som tilbydes fra Fli-map, da nøjagtigheden af målinger med dette system overskrider nøjagtighedskravet til skinnehøjden med en faktor 30. Løsningen fra Strukton kan også fravælges grundet den manglende evne til at måle sidespor. Leicas GRP5000 overskrider ligesom Fli-map nøjagtigheden på skinnen, selvom det ikke er af samme størrelsesorden, da den, ifølge specifikationerne, overholder en nøjagtighed på ±1 cm.
Der er dog dele af omtalte løsninger, der direkte kan anvendes, hvilket også bekræftes af Wildi og Glaus, som anvender banetrolje, GPS og laserskanner til opmåling, og som overholder en nøjagtighed på 1.5 cm i planen. Såfremt den absolutte positionering ikke foretages vha. GPS, men i stedet på baggrund af observationer til fikspunkter forventes det af projektgruppen, at nøjagtigheden kan forbedres signifikant. Cuskelly og McDonald konkluderer, at en integration mellem flere sensorer vil være en mulig løsning, for herved at opnå dynamisk data, og anvender derfor sensorer taget fra en GRP5000. Artiklen nævner dog ikke noget om nøjagtigheder. Møderne med COWI har bekræftet et marked for en integreret løsning med laserskanning og banetrolje, i det tilfælde at troljen har sensorer, der kan overholde de opstillede krav i banenorm.

Ifølge Jansa kan integrationen mellem laserskanning og fotogrammetri forbedre laserskanningsdata med en faktor 3, hvilket gør denne kombination interessant. Artiklen af Fararooy og Mair klassificerer forskellige typer sensorer, og det vurderes af projektgruppen, at de aktive sensorer er bedst egnede til den type opgave, der arbejdes med i dette afgangsprojekt. Dette skyldes, at systemet kan anvendes længere tid pr. døgn, da de aktive sensorer ikke er afhængige af lysforhold.
En fotogrammetrisk løsning, som den der beskrives i artiklen af Alippi er ikke at foretrække til opmåling, da løsningen udelukkende omhandler skinnen, og da illumineringen skal være ens på det opmålte for at opnå tilstrækkelige resultater. Mange opmålingsopgaver på jernbanen kan hensigtsmæssigt foregå som natarbejde, og fotogrammetrien vil derfor være en problematisk løsning.

Lysehøj og Nielsen foreslår, at der skal arbejdes med en 360° skanner, tre GPS-modtagere samt sammenknytningspunkter monteret på en trolje. I afgangsprojektet fra AAU, som omhandlende implementeringen af laserskanner på DyRoS, er der opnået nøjagtigheder på målingerne med laserskanner, som er interessante for dette projekt.

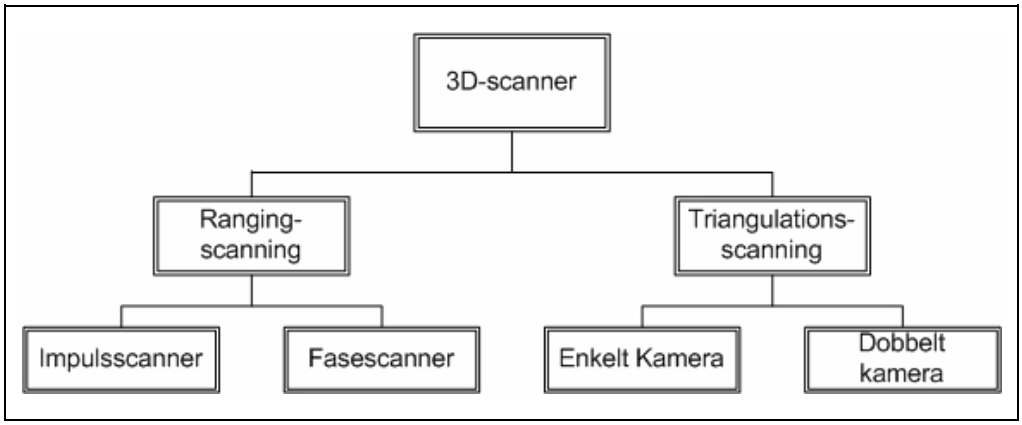
Ud fra en vurdering af de eksisterende metoder er Wildi og Glaus' metode interessant, hvorfor det vælges at anvende banetrolje og laserskanner til projektarbejdet. Anvendelse af GPS fravælges, grundet nøjagtighedskravene i banenormen, hvor det i stedet ønskes at arbejde med tilknytning til fikspunkter og sammenkobling vha. tagets. Valget begrundes yderligere med, at Fararooy og Mair beskriver et system, hvor der anvendes laserskanner, som kan måle køreledningen med en nøjagtighed af 5 mm i højde og plan. Årsagen til, at kombinationen mellem fotogrammetri og laserskanning fravælges, er, at det ønskes, at systemet skal måle uafhængigt af lysforhold, hvormed der kan arbejdes længere tid pr. døgn samt flere dage om året.

5 Teori om instrumenttyper

I afsnit 4.4 - *Opsamling på eksisterende løsninger* blev det fra projektgruppens side valgt, at der skal arbejdes frem imod den samlede løsning bestående af en banetrolje og en laserskanner, og at det i forlængelse af dette skal overvejes hvilke sensorer, der skal være på banetroljen.
Formålet med dette kapitel er at undersøge hvilke komponenttyper, der skal sammensættes for at opnå et tilfredsstillende resultat. Dermed menes, at komponenternes målenøjagtighed skal opfylde banenormen, hvorfor valget af komponenttyperne naturligvis influeres heraf. Det er projektgruppens intention, at skinnegeometrien skal opmåles vha. troljen, og at omgivelserne skal positioneres vha. laserskanning.

5.1 Laserskanning

Forskellige typer af laserskannere skal overvejes for at finde frem til den optimale laserskanner. I disse overvejelser indgår skannerens synsfelt, dvs. det område, der skannes ved hvert skan. Ligeledes skal det overvejes, hvordan laserskanneren måler og hvilke fejlbidrag, som dette medfører.
Laserskanning kan opdeles i to grupper efter opmålingsprincip. Den ene er "time of flight" - flyvetid, også kaldet "rangingscanning" – områdeskanner, og den anden er triangulationsskanning [Wehr, 2005]. Figur 5.1 viser de forskellige muligheder. Der eksisterer forskellige typer af målemetoder til de to grupper. Hvor "rangingscanning" kan opdeles i impulsskanning og faseskanning, kan triangulationsskanning foretages med et eller to kameraer.



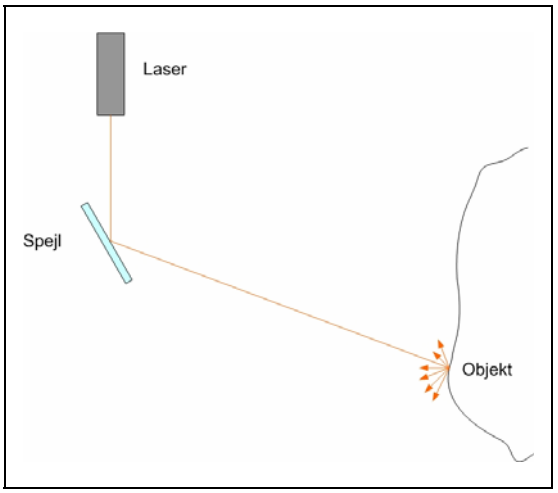
Figur 5.1: Figuren viser de forskellige typer af laserskannere. Det ses at der findes to principper for måling og herunder to typer af metoder [Kašpar, 2004].

5.1.1 Rangingskanning

Som det ses af figur 5.1, er der to former for områdeskannere: impulsskannere og faseskannere. Forskellen mellem disse to er udsendingen af laserstrålen.

Impulsskanning

Impulsskanneren udsender, som navnet indikerer, impulser af laserstråler, hvor opmålingsprincippet er som vist på figur 5.2. På figuren ses det, at laseren udsender en stråle, som afbøjes i et spejl og sendes mod et objekt. Når strålen rammer et objekt reflekteres dele af denne til instrumentet. Idet strålen modtages, beregnes punktets position ud fra den tid, der går fra strålen udsendes til den modtages. Desuden registreres en horisontal- og en vertikalvinkel for den udsendte stråle. [Kašpar, 2004].



Figuren 5.2: Princippet for "rangingscanning", hvor laseren udsender en stråle, som afbøjes i spejlet, og videresendes mod objektet. Når strålen rammer objektet, reflekteres dele heraf [Kašpar, 2004].

Impulsskanneren er den skannertype, der har den længste rækkevidde. Impulsskannere som eksempelvis Riegl Z360 og Mensi GS200 kan måle optil henholdsvis 800 m og 700 m ved en frekvens på 5-8 KHz. Disse skannere er yderligere hybridskannere, hvilket betyder, at de kan rotere om horisontalaksen. OPTECH ILRIS 3D, som ligeledes har en rækkevidde på 800 m, er en kameraskanner, hvilket betyder, at den er rigid i begge akser, hvorfor det kun er muligt at måle med et begrænset synsfelt. Med dette instrument måles med ca. 2 KHz. Den sidste type impulsskanner er en panoramaskanner, som har fri bevægelse om to akser, hvorfor synsfeltet udelukkende begrænses af instrumentets base.
Indenfor impulsskanning er HDS3000 et eksempel på en panoramaskanner. Denne skanner har en rækkevidde på mere end 100 m og en målefrekvens på 1-2 KHz [Staiger, 2003]. Der kan ved de nævnte instrumenter opnås nøjagtigheder mellem 3-6 mm ved 50-100 m [i3 Mainz, 2007].

Faseskanning

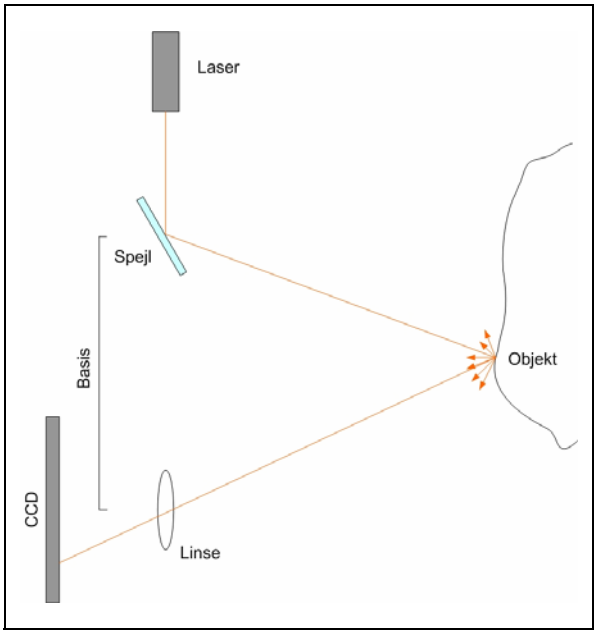
Ved faseskanning udsendes en kontinuert bølge mod objektet. Princippet med afbøjning af laserstrålen i et spejl mod objektet er det samme som ved impulsskanning. Afstanden kan findes ved at måle faseforskellen mellem den udsendte fase og den modtagne fase. Ved faseskanning er det muligt at opmåle mere end 100.000 punker/sekund [Kašpar, 2004].
En af fordelene ved faseskanningen er dens høje frekvens af målinger. Eksempelvis kan en Imager 5003 fra Zoller+Fröhlich måle med en frekvens på optil 500.000 punkter/sek. Dog måler den typisk med en frekvens mellem 125.000-240.000 punkter/sek . En ulempe ved faseskanningen er omvendt dens forholdsvise korte rækkevidde. Imager5003 har eksempelvis en rækkevidde på 53 m, men det er muligt at opnå en tilstrækkelig punktsky optil 45-50 m ved vertikale flader og ellers indenfor ca. 30 m [i3mainz, 2007].

Som ved impulsskannere, findes der også forskellige typer af faseskanner. Faseskannerne kan således ligeledes være kamera-, hybrid- eller panoramaskannere.

5.1.2 Triangulationsskanning

Ved triangulationsskanning foretages måling ved, at der udsendes en laserstråle, som afbøjes i et spejl mod objektet. Afhængig af objektets afstand fra skanneren, registreres positionen af det punkt, hvor laserstrålen rammer, i CCD-kameraerne. Metoden illustreres i figur 5.3 [Kašpar, 2004].

Opmålingsmetoden kaldes triangulationsskanning, da punktets position trekantsberegnes. Denne beregning kan foretages, idet to vinkler og en afstand er kendte. Den kendte afstand er afstanden mellem kameraet og spejlet, som laserstrålen (basis) afbøjes ved, og de målte vinkler er vinklerne mellem kameraet og basis samt mellem laserstrålen der udsendes og basis [Wikipedia2, 2007]. En af fordelene ved triangulationsskanning er den, at der ved målinger optil 5 m kan opnås en nøjagtighed på 1 mm [Kašpar, 2004]. Rækkevidden for triangulationsskanning er dog også begrænset til ca. 5 m [Fröhlich & Messenleiter, 2004].



Figur 5.3: Principskitse over triangulationsskanning, hvor det ses, at en laser udsender en stråle som afbøjes i et spejl og rettes mod objektet. Når strålen rammer objektet, oplyses dette, og det registreres i CCD'en. Herefter kan punktets position beregnes [Kašpar, 2004].

5.1.3 Valg af laserskannertype

Af ovennævnte laserskannertyper er triangulationsskanning ikke relevant til at løse projektets problemstilling grundet den begrænsede rækkevidde. Fasemåling synes umiddelbart at være den mest interessante målemetode, fordi opmålingstypen først og fremmest har den højeste målefrekvens. Derudover er opmålingstypen også interessant, fordi de nøjagtigheder, der er opgivet som værende mulige at opnå med faseskanning, ikke er ringere end for impulsskannere. Projektgruppen vælger derfor, at faseskanning bør anvendes til det videre arbejde i projektet.

Efter at have fastlagt den opmålingstype, der skal anvendes er det nødvendigt at foretage yderligere overvejelser gående på instrumenttype, da der findes forskellige typer af faseskannere.

Profilskanner

Profilskanneren måler, som navnet indikerer, profiler, hvilket udføres ved at måle én afstand og én vinkel til punktet. Det, at der kan nøjes med måling af én vinkel, skyldes, at skanneren bevæger sig fremad og skanner rundt om basen i en snegl.

Af profilskannere kan nævnes Zoller+Fröhlich 6000-300 eller Zoller+Fröhlich 5002, som eksempelvis anvendes til tunnelskanning og infrastruktur [Zoller+Fröhlich, 2007]. Disse profilskannere måler vha. faseskanning, hvor 5002 danner et profil ud fra et 310° skan ved en frekvens på 30 profiler pr. sekund, mens 6000-300 foretager 360° skan ved en frekvens af 300 profiler pr. sekund. Sidstnævnte anvendes specielt til opmåling i bevægelse, hvor det er muligt at foretage opmålinger med en hastighed på 120 km/t. Ved denne hastighed opnås profiler ca. for hver 14 cm [Fröhlich og Mettenleiter, 2004]. Zoller+Fröhlich 6000-300 skanner ved en

vertikalopløsning på 0,18°, hvilket på en afstand af 10 m betyder, at der måles punkter for hver tredje cm, og at den vertikale nøjagtighed er på ±0,18° [Zoller+Fröhlich, 2007]. Punktspredningen og opløsningen er vertikal, fordi instrumentet kun måler vertikale vinkler.

Panoramaskanner
For en panoramaskanner gælder, at skannerens synsfelt kun er begrænset af instrumentets base, herunder stativet [Staiger, 2003]. Eksempler på panoramaskannere er HDS4500 og Calidus Precision. Panoramaskannere, som anvender fasemåling, kan generelt udføre målinger med en frekvens højere end 100 KHz, hvor frekvensen afhænger af den punkttæthed, der opmåles med. Således kan HDS4500 måle med en frekvens op til 525 KHz, hvilket dog har indflydelse på punktspredningen. Panoramaskannere kan ligeledes måle med forskellig punkttæthed. Denne punkttæthed er et mål for afstanden mellem de målte punkter og afhænger også af afstanden. HDS4500 har en maksimal punkttæthed på 4.7 mm på en afstand af 15 m, hvilket influerer på de opnåede nøjagtigheder. Afstanden influerer således på nøjagtigheden af sammenknytningspunkterne [Jacobs, 2004].

For at kunne vælge den laserskanner, der skal anvendes til det system, der ønskes udarbejdet i dette projekt, er det nødvendigt at overveje instrumenternes forskellige egenskaber. En profilskanner kan således skanne optil 300 profiler pr. sekund med en punkttæthed på 3 cm. Det er svært at sammenligne hastigheden af opmålingerne med en panoramaskanner og en profilskanner, da panoramaskanneren roterer om to akser. En Imager 5003 kan dog indstilles til kun at måle profiler ligesom den omtalte Leica GRP5000, hvorfor rotationerne om den ene akse kan sammenlignes. Med denne indstilling er det muligt at måle 50 profiler i sekundet. En af fordelene ved panoramaskanneren er, at den har en større punkttæthed, hvor HDS4500 opnår en punkttæthed på ca. 3,5 mm på en afstand af 10 m. Til sammenligning opnås der punkter hver 3 cm på en afstand af 10 m med en Profiler 6000-300. Opløsningen har indflydelse på de målte punkters nøjagtighed. Yderligere er det muligt at foretage 360° skan, så objektgenkendelsen forenkles, da der opnås et "virkelighedsbillede".

Umiddelbart kan begge typer af faseskannere anvendes som komponent i et system til banemåling. Dog har det ikke været muligt for projektgruppen selv at udvælge hvilken faseskanner, der har skullet benyttes i projektet grundet begrænsede ressourcer, og da COWI Aalborg har stillet en HDS4500 til rådighed. En skanner med en længere rækkevidde ville være at foretrække, men dette skal der blot tages højde for under systemopbygningen. HDS4500 kan anvendes både som profilskanner og som panoramaskanner. Dog kræver anvendelsen af HDS4500 som profilskanner et specielt software, som ikke har været tilgængeligt for projektgruppen.

5.2 Sensorer på banetroljer

Ligesom ved valg af laserskanner er det nødvendigt at overveje hvilken type banetrolje, der skal anvendes. En banetrolje til opmåling består typisk af en sensor til opmåling af den tilbagelagte afstand, forskellige sensorer til at bestemme drejninger om de tre akser samt sensorer til bestemmelse af skinnegabet. Der kan således indgå forskellige sensorer i et troljeopmålingssystem. I sin doktorafhandling nævner Glaus forskellige muligheder for opmålingssensorer. For at bestemme den tilbagelagte rute anvendes der normalt "Inertial Navigation System" (INS) som supplement til GPS, hvorved der til startpunktet kontinuerligt adderes vektorer[Glaus, 2006].

5.2.1 "Inertial Navigation System" (INS)

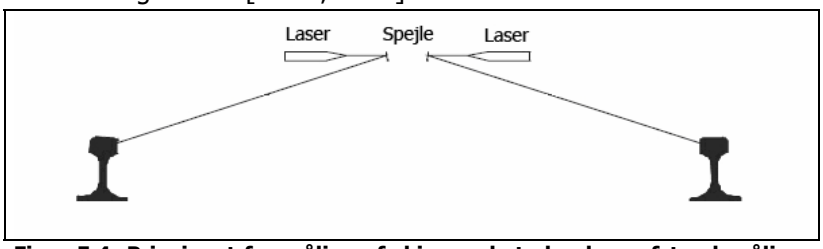
INS kan bestå af gyroer og accelerometre. Gyroerne måler vinkler, og accelerometrene måler accelerationer i de forskellige retninger i forhold til tid. Ved de faste INS-systemer holdes sensorerne fast i forhold til det bevægende objekt, således at koordinatsystemet drejes sammen med de drejninger, der er i det bevægende objekt. De faste INS-systemer er billigere i produktion end en *kardansk* ophængt gyro, men beregningerne her er også mere komplicerede, da koordinatsystemet ikke er fast. Hvis der udelukkende anvendes gyroer og accelerometre, medfører dette fejl på positioneringen som følge af drift. For nogle øges fejlene ekspotentielt med tiden. Det er da nødvendigt at lave korrektioner af positionerne f.eks. i form af GPS eller positionering i forhold til kendte punkter [Glaus, 2006].

I stedet er det også muligt at anvende inklinometre til bestemmelse af "*roll*" og "*pitch*" vinklerne for at finde ud af, om troljen har hældninger i forhold til lodlinien, og for at måle eventuelle størrelser på hældningen. Inklinometre er følsomme overfor acceleration, hvorfor det er vigtigt at bestemme sådanne ved opmålingen, så det senere er muligt at fjerne disse fejlbidrag.
Til at beregne "*yaw*" vinklen af troljen kan der anvendes odometre for dermed at foretage observationer af tilbagelagte afstande på hver side af troljen. Således kan det beregnes, hvor meget troljen drejer. Måling ved odometre kan suppleres med en primær målemetode. Længden af målingerne med et odometer bør dog ikke overstige længder af 20 m uden supplerende oplysninger om position, da fejlene på målingerne akkumuleres og at manglen på præcision på "yaw" vinklen er uhensigtsmæssig. Fejl på kurverne øges med diameteren på hjulene, hvorimod fejl på afstandene mindskes [Glaus, 2006].

5.2.2 Sensorer til mål af skinnegab

Bestemmelsen af skinnegabet kan, ligesom orienteringen af troljen, gribes forskelligt an. Således er der banetroljer, hvor målingen udføres ved, at troljen presses mod referenceskinnen, hvilket eksempelvis kan være den venstre skinne, og så måler gabet. Dette medfører, at systemet kun kan anvendes ved lav hastighed, og at der opstår problemer ved skiftespor [Glaus, 2006]. Skinnegabet kan også bestemmes ved at måle ændringer på begge skinner. Der eksisterer således både laser- og mekaniske løsninger. Ved de mekaniske løsninger presses to arme ud på skinnen vha. en fjeder eller en magnet, og afbøjningsvinklerne registreres [Glaus, 2006].

På figur 5.4 ses en laserløsning, som udsender to laserdiodeimpulser, som afbøjes i et spejl, hvorved strålen sendes ud på skinnen og reflekteres. På baggrund af den målte tid bestemmes afstanden [Glaus, 2006].



Figur 5.4: Princippet for måling af skinnegabet vha. laserafstandsmåling. En laser udsender impulser, som afbøjes i et spejl og rettes mod skinnen. Strålen reflekteres, og afstanden måles [Presle, 2000].

5.2.3 Valg af Banetrolje

En banetrolje kan bestå af mange forskellige sensorer for at kunne bestemme dennes orientering, kurver på skinnerne, skinnegab m.m.. Det skal således vælges hvilket INS system, der ønskes anvendt samt hvilke sensorer, der anvendes til bestemmelse af skinnegabet. Ved INS er der fejlbidrag, som vokser som funktion af tiden, og ved målinger vha. af en kombination af inklinometre og odometre er der fejl på kurvebestemmelser og afstand. Derfor er det nødvendigt

at justere positioner målt med INS. Som nævnt i kapitel 4 - *Eksisterende Løsninger*, anvendte Wildi og Glaus banetrolje og GPS til opmåling af skinner i Schweiz, hvorudfra de vurderede, at nøjagtigheden på den anvendte trolje var tilstrækkelig til de kan benyttes til at foretage målinger på skinnerne.

Projektgruppen har fået stillet en Abtus 4530 til rådighed af COWI. Denne trolje er opbygget af odometre og inklinometre, hvilket findes tilstrækkeligt i den banetrolje, der anvendtes af Wildi og Glaus. Skinnegabet måltes af troljen med mekaniske sensorer, hvilket Glaus finder tilfredsstillende i afhandlingen fra 2006. Selv om projektgruppen ikke har haft mulighed for selv at vælge banetrolje til projektet, finder projektgruppen, at den Abtus 4530, som er stillet til rådighed, er tilstrækkelig.

6 Problemafgrænsning og analysestruktur

Dette kapitel har til formål at opsummere den viden, der er opnået gennem foranalysen og derudfra besvare den opstillede initierende problemstilling. Den initierende problemstilling var som følger:

- Hvilke krav er der til banemåling?
- Hvordan foretager COWI terrestrisk opmåling på banen i dag?
- Hvordan har andre løst opgaverne med opmåling på banen og med hvilke sensorer?
- Hvilke sensorer er optimale til udførelse af denne type detaljeret banemåling?

Opsamlingen på foranalysen danner baggrund for opstillingen af projektets problemformulering. I forlængelse af problemformuleringen beskrives strukturen gennem analysen i projektet.

6.1 Opsamling på foranalyse

Indledningsvist blev bestemmelserne i banenormen gennemgået, og banenormens krav til opmåling blev opstillet. De krav, som er fundet relevante for projektet, findes i kapitel 3 - *Banemåling*. Yderligere er de krav, der relaterer til sikkerheden på banen ved udførelsen af sådanne målinger, blevet gennemgået. Der er flere krav, der skal opfyldes for, at et nyt system vil kunne anvendes til udførelse af måling på banen. Ud fra en analyse af banenormen konkluderes, at nøjagtighedskravene i banenormen ikke er entydigt bestemmende eller tilstrækkeligt forklarende i den nuværende banenorm. Det er projektgruppens mening, at der bør udarbejdes en ny banenorm, hvor de forskellige nøjagtighedskrav revurderes og evt. revideres, så det entydigt er beskrevet hvilke krav, der er til nøjagtigheder ved banemåling i Danmark. Projektgruppen har fundet det bemærkelsesværdigt, at kravene til banemåling i andre lande ikke er lige så høje som i Danmark.

Der er ved to lejligheder stiftet bekendtskab med den metode, som COWI anvender til baneopmåling. COWI's målinger foregår ved måling som enkeltmand eller som to personer, begge med tilknyttede banevagter. Gennem dette projekt ønsker projektgruppen at effektivisere måleprocessen i forhold til tidsforbrug og datamængde. På nuværende tidspunkt foretager COWI ligeledes en fotoregistrering langs banestrækningen i forbindelse med måleprocessen. Denne registrering ser projektgruppen som ubetydelig i forhold til måleprocessens tidsforbrug. Derfor arbejdes der ikke yderligere med dette.
COWI opmåler ca. 300-1000 m banestrækning på en 12-timers arbejdsdag. Det er derfor projektgruppens mål at udarbejde et nyt system, der skal kunne måle mere end 1000 m på 12 timer, og som samtidig skal opnå væsentligt mere data om både skinner, teknik og omgivelserne. Denne datamængde skal samtidig overholde de krav, som er fastsat i banenormen.

Foranalysens litteraturstudie af emnet viste, at der er lignende projekter i flere dele af verden. Danmark er således ikke det eneste land, hvor detaljeret opmåling af jernbaner finder sted. Der er dog ikke fundet litteratur om arbejdet med og overholdelse af de samme nøjagtighedskrav som banenormens. I opsamlingen på kapitel 4 - *Eksisterende løsninger* blev det konkluderet, at det er hensigtsmæssigt at anvende en laserskanner og en banetrolje. Selvom det igennem litteraturstudiet er konstateret, at det er muligt at overholde banenormens nøjagtigheder med fotogrammetri, fravælges denne metode alligevel. Dette skyldes, at der arbejdes frem imod en metode, der også kan anvendes ved dårlige lysforhold, dvs. om natten, hvor det er

hensigtsmæssigt at måle i forhold til togtrafikken.

Efter valget af komponenterne blev instrumenttyperne præciseret, ligesom de mest hensigtsmæssige sensorer til at indfri kravene i banenormen blev præsenteret. Den laserskanner, der er stillet til rådighed, er en faseskanner, og den er fundet brugbar til afgangsprojektet grundet den høje opmålingsfrekvens. Skanneren, som er den samme type skanner som en Zoller+Fröhlich Imager 5003, som kan måle profiler, er ikke blevet benyttet optimalt, eftersom projektgruppen ikke har kunnet få adgang til det nødvendige software, der er nødvendigt for, at skanneren kan måle profiler.

Der eksisterer forskellige løsninger til at orientere en banetrolje, bl.a. anvendelse af INS. Denne form for orientering er ikke tilstrækkelig nøjagtig til alene at kunne determinere en tilbagelagt rute. Det anbefales af Glaus ikke at måle intervaller på over 20 m med trolje før en anden type sensor supplerer til en præcis positionering. Til opmåling af skinnegabet kan der anvendes laserafstandsmåling eller opmåling med mekaniske sensorer, hvor to arme presses ud på skinnerne, og ændringer i vinklerne registreres. Sidstnævnte anvendes af Glaus, som vurderer, at denne form for måling er tilstrækkelig for at overholde kravene i banenormen. Det blev i foranalysen yderligere nævnt, at projektgruppen har fået stillet en Abtus 4530 banetrolje til rådighed. Denne banetrolje anvender to inklinometre og odometre til at beregne orienteringen (som INS) og mekaniske sensorer til opmåling af skinnegabet.

På baggrund af den gennemførte foranalyse opstilles problemformuleringen gående på det valgte/tilgængelige udstyr.

6.2 Problemformulering

Umiddelbart er projektets overordnede formål at finde frem til en løsning, der kan effektivisere banemålingen, tidsmæssigt og datamæssigt, og som samtidig kan overholde de krav, der stilles til opmålingen i banenormen. I foranalysen fandt projektgruppen frem til, at der kan anvendes en laserskanner og en banetrolje. Det har været muligt at låne begge instrumenter af COWI, som angiveligt også er den mest sandsynlige bruger af projektgruppens udviklede banemålingssystem grundet COWI's arbejdsopgaver. Der anvendes en Leica HDS4500 laserskanner og en Abtus 4530 banetrolje til integration.

På baggrund af det ovennævnte er projektets problemformulering:

Hvordan kan en Abtus 4530 banetrolje og en Leica HDS4500 laserskanner integreres for opmåling af banestrækninger under samtidig hensyntagen til nøjagtighedskravene fra banenorm BN2-94-1?

Der fokuseres gennem projektet på integrationen af de to komponenter samt bearbejdning af det datamateriale, der produceres. Dette giver anledning til en del problemstillinger, der skal løses gennem projektet. Således skal der tages højde for kravene i banenormen, hvilket kræver høj præcision fra komponenter og integrationsmetode. Yderligere bør det overvejes, hvordan datamaterialet behandles uden tab af nøjagtighed, og hvorledes data positioneres absolut.

De emner, der behandles i projektets analyse, er følgende:

- Præsentation af systemets komponenter
- Systemets opbygning, målemetode og databehandling
- Definition af objekter
- Kalibrering af system
- Test af systemet
- Analysere testresultater og finde eventuelle fejl eller mangler
- Fastlægge eventuelle forbedringer til systemet

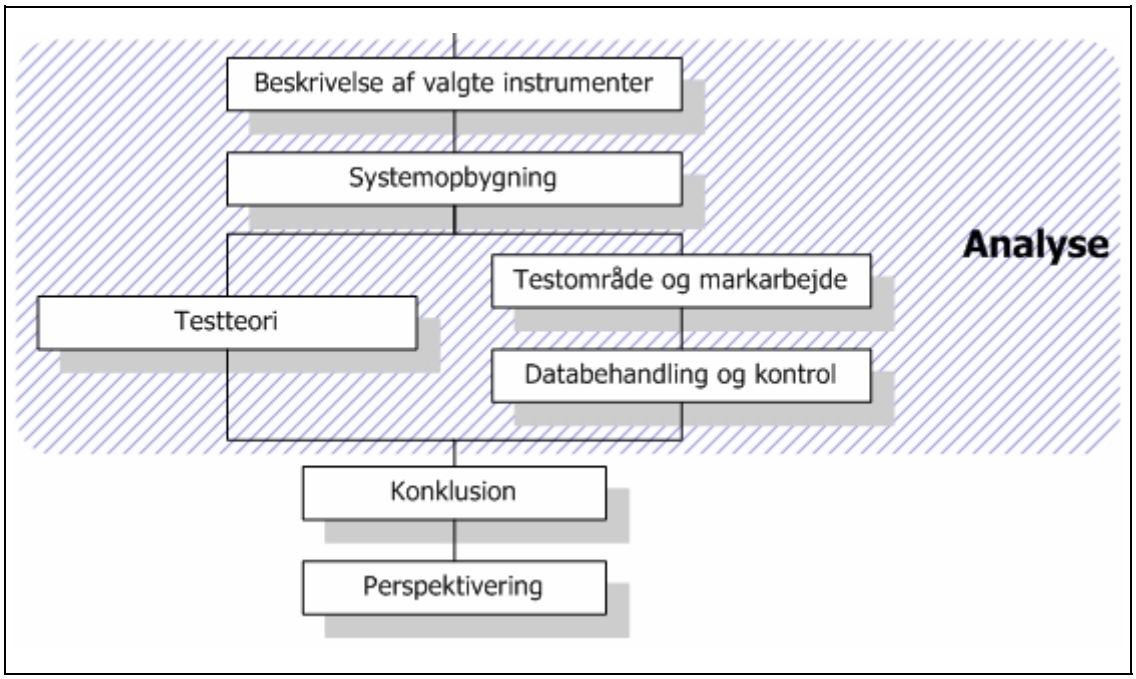
Ud fra emner herover, gives der et overblik over de emner, der skal behandles i analysedelen af dette projekt, men før analysen påbegyndes, præsenteres strukturen for projektets analyse.

6.3 Struktur over analyse

I henhold til projektets metodeafsnit, er det valgt at arbejde frem efter "throw-away - prototyping", da denne type metode åbner for muligheden for forskende og eksperimenterende arbejde. Dette gør det muligt at gennemføre teoretiske- og empiriske undersøgelser i små delprocessor, for så bagefter enten at anvende resultater eller smide den væk og prøve igen. Denne gang med ny viden.
Der er gennem analysen taget hensyn til vidensproduktionsprocessens fremgangsmåde, hvor projektet, efter at have blevet indsnævret omkring en problemformulering, udbreder sig i en teoretisk og en empirisk del. De teoretiske undersøgelser danner i dette projekt baggrund for at udføre empiriske undersøgelser i form af tests. Efter at have opnået resultater fra både teori og tests, kan der således konkluderes på resultaterne.

Ved afklaring af projekts problemformulering, bearbejdes problemstillingen først teoretisk. I dette tilfælde tænkes specielt på beskrivelsen af de valgte instrumenter. Efterfølgende analyseres der frem til, hvorledes instrumenterne kan sammenkobles, og det undersøges, hvad den forventede nøjagtighed til systemet vil være. Den teoretiske opbygning og det teoretiske grundlag er kernen i dette projekt, og det er ud fra denne analyse, det endelige produkt udformes. I systemudviklingen anvendes eksisterende software i samspil med egen programmering gennem Matlab til beregninger af data til at skabe projektets produkt.

Figur 6.1 viser strukturdiagrammet for projektets analysedel og afslutningen af projektet.



Figur 6.1: Strukturen gennem projektets analysedel, herunder de emner der er bearbejdet. Desuden vises afslutningen på projektet.

Beskrivelse af analyse

Analysen i projektet indledes med en beskrivelse af de i problemformuleringen valgte systemkomponenter: en HDS4500 laserskanner og en Abtus 4530 banetrolje, der ønskes anvendt til integration til banemålingssystemet. Ved denne præsentation af komponenterne, lægges der vægt på komponenternes funktioner, specifikationer og datastruktur, så disse faktorer kan anvendes ved konstruktionen af det samlede målesystem. Præsentation af komponenterne ledes frem mod, hvordan systemet skal opbygges, herunder hvordan komponenterne kan sammensættes med hensyntagen til kravene fra foranalysen. Herunder anvendes desuden viden opnået gennem foranalysen. Systemet kalibreres for at finde kalibreringsparametre mellem de forskellige koordinatsystemer, der optræder i det samlede system og for at danne relation mellem data. Dette gøres, efter systemets funktionalitet er præsenteret.

Når det er bestemt, hvordan systemets komponenter skal virke i samspil, er det muligt at udregne en forventet nøjagtighed for systemet. Dette gøres ud fra antagelser om målinger og kendskab til komponenternes parametre.
Sideløbende med beregningerne af den forventede nøjagtighed, udføres undersøgelser af det oprettede system, hvor der konkluderes på nøjagtigheden i praksis. Disse resultater sammenstilles med den teoretiske forventede nøjagtighed for at se, om systemet kan overholde nøjagtighederne i praksis. Afslutningsvis på projektet besvares den opstillede problemformulering gennem konklusionen og der perspektiveres over emnet.

7 Beskrivelse af valgte instrumenter

Dette kapitel beskriver de systemkomponenter, der arbejdes videre med mod den endelige integration i et samlet system. Valget af komponenter er beskrevet i foranalysen, hvor dette kapitel beskriver deres specifikationer, funktioner og datastruktur. Herunder hvilke muligheder, der er med disse data.
Komponenterne beskrives enkeltvis og omhandle de fysiske rammer af instrumenterne, deres dataindsamling og layout, samt hvilke nøjagtigheder specifikationerne foreskriver. Yderligere ses der på, hvorvidt disse specifikationer kan antages at være troværdige. Her er der fundet kilder, der har testet det valgte udstyr, og der tages derfor udgangspunkt heri.

7.1 Banetrolje Abtus 4530

Abus 4530, der er udlånt af COWI, er en engelsk produceret banetrolje. Troljen er produceret til at indsamle data langs jernbaner i alt slags vejr, hvorfor skærm og sensorer er vandtætte. Troljen vejer 25 kg, er 1,09 m høj, 1,69 m bred og 1,67 m lang, når den er samlet til måling på banen, se figur 7.1. Dette gør, at troljen kan håndteres af én person på banen og gør den anvendelig på både større og mindre jernbaner, herunder *sidespor* [Abtus, 2007].
Troljen er god til løsning af en opgave som den, der er stillet i dette projekt, da den er håndterbar og kan flyttes af og på sporet uden større besvær.

Figur 7.1: Illustration af banetrolje ABTUS 4530 [Abtus, 2007].

Det følgende afsnit omhandler banetroljens funktioner er skrevet ud fra manualen til troljen [Abtus, 2007] samt et "datasheet" [Abtus2, 2007] og en "glossary" [Abtus3, 2007] fra ABTUS' hjemmeside. Desuden er nogle af funktionerne specificeret i en mail fra Chris Loveday, som arbejder for Abtus. Brugermanual og øvrigt fra hjemmesiden samt mail fra Abtus kan findes på bilag C - CD.

7.1.1 Målinger med troljen

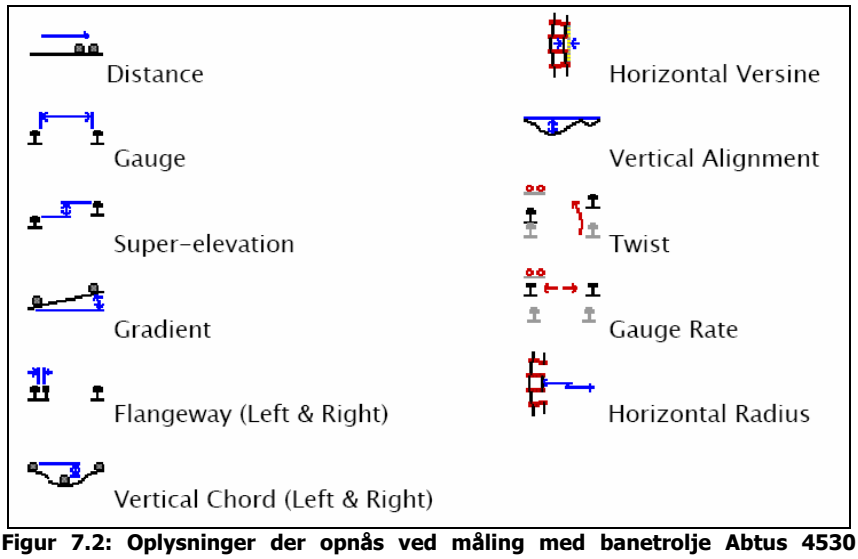
ABTUS 4530 indsamler data af mange forskellige størrelser, og i det følgende præsenteres disse, for at give et indblik i, hvad troljen kan. Først gives en beskrivelse af troljens sensorer.

Banetroljen er bygget med forskellige sensorer for at måle på banelegemet. I kontakt med troljens forhjul er placeret odometre, der måler den tilbagelagte afstand på hvert hjul. Dette gør det muligt at bestemme den afstand, troljen har kørt samt en radius, hvis banen buer horisontalt. Radius bestemmes ud fra forskellen i afstanden målt på de to hjul.
Yderligere har banetroljen fire roterende sensorer, som fungerer mekanisk. Ved hjælp af fjederfunktioner presses to sensorer mod indersiden af skinnen for at måle gabet mellem

skinnerne, og to presses modsat for at måle afstanden til skiftespor når et sådant passeres på strækningen.
Til bestemmelse af højdeforskellen mellem den højre og den venstre skinne og gradienten (højdeforskellen mellem for- og baghjul i venstre side) anvendes inklinometre placeret i hver side af troljen. Disse bestemmer også, om der er et vrid i troljen.

Inden måling med troljen påbegyndes, kalibreres den i marken, ved først at placere den modsat den retning, der ønskes målt, og bagefter placere den i den ønskede køreretning. Denne kalibrering fastlægger parametre for troljen, men projektgruppen har ikke videre kendskab til, hvordan og hvad der gemmes. Dette har ikke været muligt at få oplyst af producenten.

Ved målingerne fra troljens sensorer opnås rå elektriske værdier, der kan konverteres til de relevante enheder, som eksempelvis mm.
Med troljen er det således muligt at få informationer om følgende, jf. figur 7.2. Projektgruppen har ikke kunne få oplysninger om, hvordan troljen beregner disse størrelser ud fra oplysningerne fra sensorerne, da dette af Abtus antages for værende en forretningshemmelighed.



Figur 7.2: Oplysninger der opnås ved måling med banetrolje Abtus 4530 [Abtus, 2007].

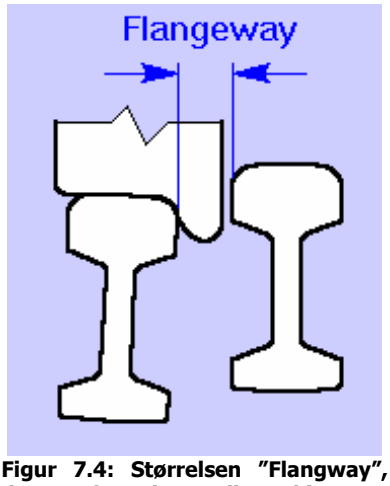
"Distance", "Horizontal Versine", "Horizontal Radius"

"Distance" er troljens tilbagelagte afstand. Afstanden bliver målt på troljens venstre- og højre forhjul. Den tilbagelagte distance opgives som centerlinjens afstand, hvis der i kurver er målt forskellige distancer på de to hjul. Distancen opgives altså som den tilbagelagte afstand på centerlinjen mellem de to skinner, som sensorerne hviler på.
Den horisontale radius beregnes ud fra den tilbagelagte afstand, hvor hjulenes individuelle målinger anvendes til beregning af radiussen i den cirkelbue, sporet drejer i. Med hvilke intervaller denne måling skal indtræffe, kan indstilles i troljens software.
"Horizontal Versine" måler pilhøjden, og denne måles ligeledes ved hjælp af den tilbagelagte afstand. Det kan indstilles i troljens software, i hvilke intervaller pilhøjden ønskes målt. Ifølge brugermanualen til troljen kræver denne størrelse yderligere målinger end troljens for at kunne anvendes, og derfor vælges det ikke at anvende denne måling.

"Gauge", "Flangeway", "Gauge Rate"

På troljen sidder der fire mekaniske sensorer, der måler henholdsvis gabet mellem skinnerne samt indsnævringer ved skiftespor og lignende. Når troljen er placeret på sporet, udløses sensorer, og med en fjederfunktion "læner" de sig mod skinnernes inderside og kan derved måle på skinneforløbet, se figur 7.3. To sensorer træder på skinnens inderside ved at svinge ud mod sporet, og to sensorer svinger ind mod sporets midte, og kommer dermed i funktion, når der passeres f.eks. *skiftespor*. Projektgruppen antager, at størrelserne beregnes ud fra kendskab til sensorernes placering og måling af de vinkler, sensorerne drejer. "Flangeway" målingen er illustreret i figur 7.4. "Gauge Rate" er afvigelsen mellem den første måling af gabet og de øvrige i et givet interval. Intervallet kan indstilles i troljens software.

Figur 7.3: Figuren viser, hvordan de fire mekaniske sensorer aktiveres samt deres placering. I den gule cirkel ses det håndtag, der aktiverer sensorerne og de røde cirkler angiver sensorernes placering [Abtus, 2007]. (Cirklerne er tilføjet i billedet)

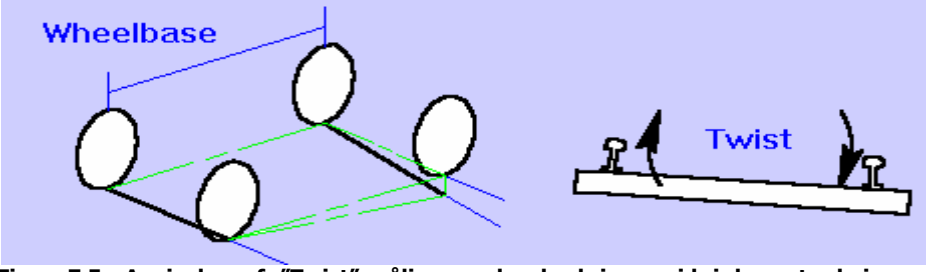


Figur 7.4: Størrelsen "Flangway", der er afstanden mellem skinnerne ved skiftespor [Abtus3, 2007].

"Super-elevation", "Gradient"

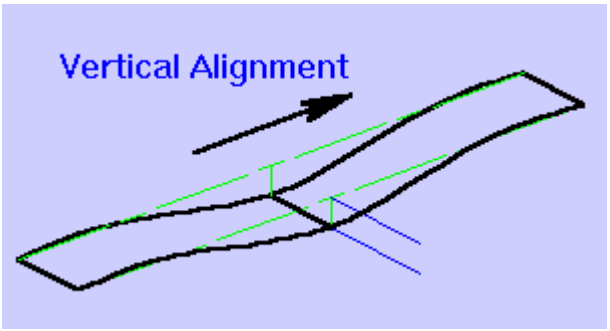
Højdeforskellen og den vertikale hældning af troljen måles af inklinometre, der sidder placeret samme sted som de sensorer, der måler det førnævnte "Gauge" og "Flangeway", se evt. figur 7.3. "Super-elevation" er højdeforskellen mellem skinnerne. Gradienten, måles i venstre side af troljen, og er den vertikale hældning, målt mellem baghjul og forhjul på troljen. Hvis troljens forhjul er placeret højere end baghjulene, er der tale om en stigning, og omvendt er det et fald.

"Twist"
Registreringen af twist er det vrid, der sker på banen, idet skinnerne går fra en lige strækning til en kurve, se figur 7.5. Er dette twist for stort sammenlignet med hastigheden, vil toget og troljen ved målingen risikere, at et hjul slipper sporet, idet alle hjul således ikke kan berøre banen på én gang. Dette måles ligeledes med inklinometrene og regnes ud fra kendskab til længden af troljen. Det er således det skift, der sker i højdeforskellen mellem skinner over en angiven afstand.



Figur 7.5: Angivelse af "Twist"-målingen, der beskriver vrid i banestrækningen. Vriddet angives som skift i højdeforskellen over en angivet afstand [Abtus3, 2007].

"Vertical Alignment", "Vertical Chord"
"Vertical Alignment" måles med de integrerede inklinometre og angiver samme størrelse som "Versine", som er pilhøjden vertikalt. Der er i troljen opstillet værdier for, hvad der betegnes som problematiske vertikale pilhøjder, som er markante udslag i pilhøjden inden for et interval på 5 – 15 meter, som kan give problemer for togdriften. Er der udslag inden for en afstand på 40 – 100 meter er problemet mindre, fordi det strækkes over en længere afstand. Dette vil dog stadig have indflydelse på komforten for de togrejsende, da det vil give fornemmelsen af at køre i en rutsjebane. "Vertical alignment" er illustreret i figur 7.6. "Vertical Chord" er længden, som "Vertical Alignment" har indflydelse over, altså den grønne streg i figuren.



Figur 7.6: Målingen af 'Vertical Alignment' og 'Vertical Chord' [Abtus3, 2007].

Oplysningerne om de enkelte sensorer, og hvorledes de virker, har ABTUS kun til dels været behjælpelige med. F.eks. kunne det ikke oplyses, hvilke type inklinometre, der sidder på troljen, så det var ikke muligt at undersøge, hvad de egentlig gør, og hvordan de måler.
Firmaet bag troljen (Abtus) anser yderligere oplysninger end angivet i mail eller vejledninger som forretningshemmeligheder og vil derfor ikke oplyse yderligere om troljens funktioner.

7.1.2 Nyttige funktioner

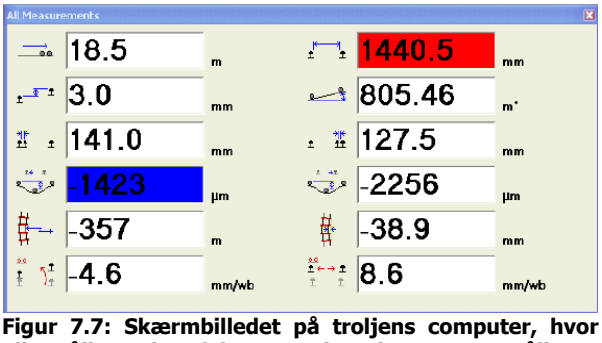
Ud over de parametre, der måles, indeholder troljen ligeledes andre nyttige funktioner. Disse funktioner præsenteres i det følgende.

"Event Logging"
"Event logging" er en funktion, der kan tilføje informationer til troljens data. Når der måles på banen, er der således mulighed for at indsætte et stykke tekst el. lign. i den datastreng, der

gemmes med data. Dette kan f.eks. ske, når troljen måler på banen og passerer et objekt. Her giver funktionen mulighed for at tilføre data information om, hvilket objekt, der ligger placeret her langs med banen. I stedet for, at der blot kan ses udsving i data, og der efterfølgende skal analyseres frem til årsagen hertil, kan operatøren altså selv indtaste en given event i data.

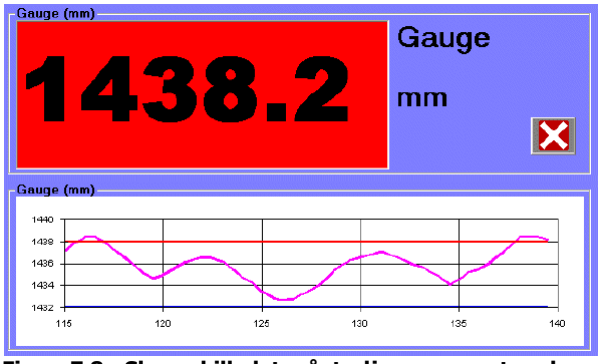
Display funktioner

På displayet kan de forskellige målinger, der foretages, følges samtidig med, at der arbejdes med troljen. Figur 7.7 viser et billede af displayet, hvis man ønsker at følge alle målingerne på samme tid. Som det også ses af figuren, er der en rød og en blå rubrik på figuren. Dette er et resultat af en funktion, der kan anvendes under hver målingstype, hvor der indtastes en øvre og nedre grænse for hver af målingerne. F.eks. ved man, at sporvidden altså "Gauge" skal ligge i et givent interval, hvis der måles på klasse A spor. Ved at indtaste dette før målingen, kan operatøren "on location" (på stedet, mens der arbejdes langs sporet) holde øje med, hvor et interval overskrides, og eventuelt markere i marken, hvor sporet ikke overholder de foreskrevne grænser.



Figur 7.7: Skærmbilledet på troljens computer, hvor alle målinger kan følges. Her kan det ses, om målinger ligger over eller under et, af brugeren, givent interval [Abtus, 2007].

Hvis der ønskes at holde øje med eksempelvis gabet mellem skinnerne, kan displayet skiftes fra at vise alle målingerne til den enkelte måling, der ønskes analyseret. Herved fås et displaybillede, hvor øvre og nedre grænse er illustreret som funktion af den kørte afstand som lige streger, da de er faste, og de direkte målinger ses som en kurve. Skærmbilledet er vist på figur 7.8.



Figur 7.8: Skærmbilledet på troljens computer, hvor målinger illustreres grafisk i forhold til det, af brugeren, givne interval [Abtus, 2007].

"Data-logging"

Der er forskellige metoder at indsamle data på gennem troljen. Således er følgende tre funktioner, der bestemmer, hvor ofte troljen skal samle data ind fra sensorerne: Et tidsinterval og to forskellige distancebestemte intervaller.

"Rapid Data-log Trigger" indsamler data i et fast interval af distance, og denne funktion er derfor ikke hastighedsfølsom, og troljen kan transporteres i eget valg af tempo langs banen.

'Detail data-log Trigger' er, som navnet antyder den funktion, der anvendes, hvis der skal samles mere detaljeret data inden for mindre intervaller på ned til 1-2 cm pr. observation af sensorerne. Anvendes denne til indsamling af data, må hastigheden langs banen begrænses til max. 2-5 km. i timen.

"Time Trigger" kan anvendes til at få troljen til at fortage målinger med et givent tidsinterval, og dermed kan der opnås data, på trods af at troljen næsten ikke flytter sig afstandsmæssigt.

7.1.3 Filformater og datastruktur

Der findes forskellige funktioner i troljen til at gemme det indsamlede data på. Datatyperne beskrives i det følgende afsnit. Det har ikke været muligt at få kendskab til, hvordan disse filer skal oversættes til brugbart data, og derfor anvendes kun "Result File Format", der er en kommasepareret fil.

"Secure File Format"(.sec)
Når data lagres i dette format, gemmes rådata fra observationerne sammen med kalibreringsparametrene, der er bestemt, inden målingen udføres. Dette medfører, at observationerne korrigeres med de parametre, der optages gennem kalibreringen. Denne måde at gemme data på gemmer i én meter intervaller og fylder 10 KB pr. kilometer.

"Results File Format" (.cvs)
Dette filformat gemmer data i kommaseparerede filer samt grafiske fremstillinger af data altså kurvetegninger af det indhentede data. Disse data kan læses af Abtus' eget software og indhentes i et Excel regneark. Denne filtype gemmes ligeledes i én meter intervaller, men fylder 70 KB pr. kilometer.

"Exceptions Report Format" (.txt)
Dette format gemmer en fil, der indeholder distancen, der er kørt, og de informationer om målinger, der falder uden for tolerancegrænser, der indtastes før opmålingen. Dette er altså en rapport over fejl på skinneforløbet i forhold til de foreskrevne intervaller. Denne filtype gemmer kun data i tilfælde af fejl og er derfor af varierende størrelse efter fejlrate.

"Continuous Data-log" (.cdl)
Denne form for lagring af data er det format, der fylder mest af de mulige måder. Her lagres data løbende fra alle sensorer sammen med kalibreringsparametre, der er bestemt inden påbegyndt måling. Denne type filer anvendes mest på kortere distancer, da dette format fylder 12 MB pr. kilometer og giver meget store og til dels uoverskuelige datamængder. Denne fil ville være interessant for projektgruppen at se nærmere på, men det har, som sagt, desværre ikke været muligt at få oplysninger fra Abtus.

"Legacy Files" (.tab)
Dette er en type datafiler produceret af ældre Abtus-produkter. Denne kan åbnes og konverteres til en af de ovenstående filtyper. En "Legacy File" vil kunne konverteres, og derved er det muligt, at se resultater fra tidligere målinger i samme struktur, som de ovennævnte filtyper.

7.1.4 Specifikationer

På Abtus' hjemmeside kan specifikationerne til troljen hentes. Det angives i specifikationerne, at en Abtus 4530 kan overholde de, i figur 7.9, angivne nøjagtigheder. Nøjagtighederne er kun et uddrag fra specifikationerne. Den fulde liste med specifikationer kan ses i bilag C - CD.

	Måleinterval [mm]	Nominel nøjagtighed [mm]	Størst tilladte fejl [mm]
Højdeforskel	±160	±0.6	±1.5
Skinneafstand	1425-1485	±0.5	±0.8
Sporskifte	25-120	±0.9	±1.2

Figur 7.9: Uddrag af nøjagtighederne på målinger fra troljen [Abtus2, 2007]. Specifikationerne kan findes i bilag C - CD.

Nøjagtigheder i figur 7.9, er fastlagt ud fra det, Abtus kalder en "On-Track test". Sensorernes nøjagtigheder er fastlagt ud fra fire eller seks målinger med troljen i et kontrolleret testfelt. Der er her kørt 250 meter, fire eller seks gange i begge retninger, og herudfra er nøjagtighederne fastlagt med kendskab til testfeltets geometri.

Da der blev taget kontakt til COWI Lyngby for at låne troljen, var det ikke muligt at få troljen ved projektets opstart, fordi troljen var sendt til England til kalibrering hos Abtus. Denne kalibrering af troljens sensorer indbyrdes anses som troværdig, selvom det ikke har været muligt at skaffe dokumentation, og der tages derfor udgangspunkt i specifikationerne for troljens måling.

7.2 Laserskanner Leica HDS 4500

Leica HDS4500, der er udlånt af COWI, er en af de nyeste laserskannere på markedet. Så vidt projektgruppen er bekendt, er det den eneste af sin slags i brug i Danmark. Laserskanneren er produceret til industriel skanning, hvilket vil sige, at den er meget hurtig til at indsamle meget store datamængder, men rækkevidden er begrænset i forhold til tidligere modeller. Dette er typisk fordelagtigt i forbindelse med opgaver med skanning af rørsystemer på kort afstand. Selve skanner og stativ til opstilling af den HDS4500, der er valgt at arbejde med, vejer 16 kg, hvortil der skal lægges vægten af batterierne, der ligeledes vejer 16 kg. [Leica, 2007]. Laserskanneren er vist i figur 7.10.
Laserskanneren har sin fordel ved opgaver, som de der arbejdes med i dette projekt, da den er meget hurtig til at udføre skanning, men det ville dog have været hensigtsmæssigt med en længere rækkevidde.

Figur 7.10: Laserskanneren HDS4500, som er anvendt i projektet. [Leica, 2007]

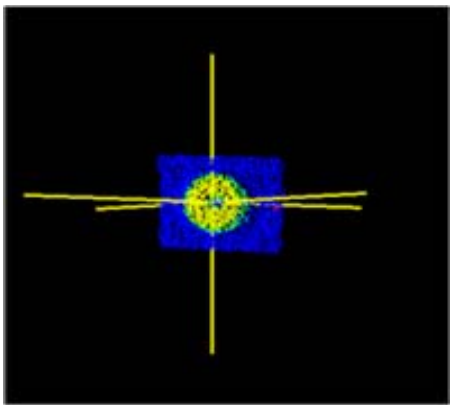
Det følgende afsnit om laserskannerens funktioner er skrevet ud fra et "datasheet" [Leica2, 2007] fra Leicas hjemmeside. Desuden er nogle af funktionerne specificeret i en mail fra Rikke Pedersen, som arbejder for Leica. "Datasheet" samt mail fra Leica kan findes på bilag C - CD.

7.2.1 Måling med laserskanneren

Ved en beskrivelse af egenskaberne for en HDS4500 skal målingsfrekvensen fremhæves. Som det er beskrevet i afsnit 5.1.3 - *Valg af laserskannertype*, anvendes en faseskanner, der måler op til 500.000 punkter/sek. Rækkevidden ved denne skanner er mellem 0,1 m - 53,5 m. Hertil skal tilføjes, at strålens punktstørrelse (footprint) forøges med afstanden, hvilket medfører, at skanneren har en optimal måleafstand på maksimalt 25 m. Da lasersignalet er afstandsafhængigt, skal det planlægges, så objekter, hvortil der er krav om høj nøjagtighed, skannes på relativ kort afstand. Skannernes kan dreje 360° horisontalt og 310° vertikal, hvilket vil sige, at der indsamles data i alle retninger på nær det område, skanneren stilles op over. Skanneren har et fastholdt koordinatsystem med origo i laserens udbredelsespunkt. Origo ligger, hvor den horisontale og den vertikale akse er sammenfaldende.
Stilles laserskanneren på samme måde, hver gang den bruges, har den samme udgangsretning. Det betyder, at skanneren altid starter med at skanne i samme retning.

Når der måles med laserskanneren, opnås der data i form af punktskyer ud fra opstillingspunktet. Disse punkter kan således anvendes til at konstruere flader og objekter eller 3D-modeller. Al databehandling foregår i det medfølgende databehandlingsprogram Cyclone, der på nuværende tidspunkt findes i version 5.6.
Ved større måleopgaver kan flere punktskyer fra forskellige opstillinger sættes sammen. Det gøres enten ved hjælp af veldefinerede punkter, der kan dannes i begge punktskyer eller ved at opstille "targets" sammenknytningspunkter, der kan observeres fra begge opstillinger. Med "targets" opnås en høj præcision af sammenknytningspunktet, jf. specifikationerne.

"Targets"
Med skanneren følger ni cirkulære grå/hvide targets. Disse targets kan anvendes til at signalere fikspunkter, objekter eller til at sammenknytte skan. Når der anvendes "targets", er der er funktion i Cyclone til at finskanne disse, da dette resulterer i, at centrum kan udpeges mere præcist. Centrum i et "target" fundet ved finskanning er illustreret i figur 7.11. "Targets" kan anvendes på et stativ med centreringsfod, så de herved kan stilles op over kendte punkter eller påmonteres magnetiske fødder, der medfølger, til montering på elementer af jern.



Figur 7.11: Illustration fra Cyclone af hvordan der er fundet centrum i et "target" ved finskan [Leica, 2007].

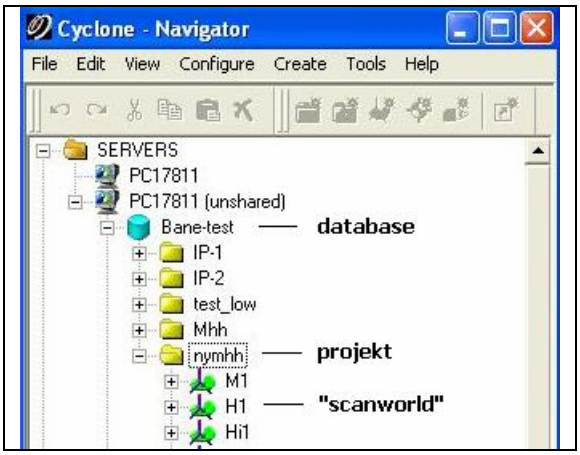
Udformningen af "targets" er cirkulær og kan rotere om egen akse. Dette medfører, at vendes et "target" rundt, centreres der over samme punkt. "Targets" findes i mange forskellige former og farvekonstellationer, og der er ligeledes udviklet mange forskellige monteringsdele til disse targets. Figur 7.12 viser nogle af de forskellige targets og udstyr hertil, der findes hos Leica. De grå/hvide targets samt den magnetiske monteringsdel længst til højre på figuren anvendes i dette projekt.

Figur 7.12: Forskellige typer af "targets" og forskellig anvendes [Leica, 2007]. Nederst til højre ses den type, der anvendes i dette projekt. og ovenover de magnetiske holdere, der ligeledes anvendes.

7.2.2 Filformater og datastruktur

Ved skanning med en HDS4500 gemmes data som en IMP-fil. Denne fil indeholder de skannede punktskyer samt en recovery-fil, der altid, uafhængigt af hvad der er modelleret i de forskellige punktskyer, vil kunne gendanne det rådata, der er indhentet med skanneren.

Når der skal udføres Laserskanning åbnes Cyclone Navigator, og der oprettes en database. Under denne database oprettes de projekter, operatøren ønsker. Inden der skannes, åbnes det projekt, der ønskes arbejdet i, og ved kontakt til skanneren dannes et "scanworld". Dette "scanworld" indeholder så de data der indsamles, indtil kontakten afbrydes. Skal der dannes flere "scanworlds" under samme projekt, idet skanneren flyttes til en ny position, er der en genvej i Cyclone, der hedder "new position". Trykkes der på denne funktion, dannes der automatisk et nyt "scanworld" under det samme projekt, som der blev skannet i tidligere, og der kan nu skannes på ny. Opdelingen i database, projekt og "scanworld", kan ses i figur 7.13.



Figur 7.13: Figuren giver et overblik, hvad der oprettes inden der skannes. Her vises niveauerne database, projekt og "scanworld".

Efter udført skanning er der flere muligheder i Cyclone til at vise data. Hver enkelt "scanworld" kan ses enkeltvis, eller der kan udføres en såkaldt "registration". En "registration" kan ske, når der er skannet "targets" i flere "scanworlds" eller fundet objekter der går igen i flere punkskyer og derved anvende disse til sammenknytning. Herved kan flere "scanworlds" transformeres sammen ved brug af disse targets eller dannede punkter i punkskyerne som fællespunkter. Dette sker ved en 3D transformation med skala 1, jf. mailkorrespondance med Rikke Pedersen fra Leica. Der skal ved sammenknytningen være tre fællespunkter, at transformere over. Oftest anvendes der dog flere i tilfælde af, at der sker en grov fejl i placeringen af "targets". Sættes flere "scanworlds" sammen, kan det vælges, hvilket der skal fastholdes ved transformationen. Det betyder, at de andre "scanworlds" transformeres til dette. Typisk vælges et "scanworld", der indeholder skan af fikspunkter. En anden mulighed er at lave en sammenknytning eller en "registration" med det "scanworld", der indeholder flest targets, og efterfølgende transformere den samlede model over en koordinatfil, der indeholder fikspunkter.

Ved de transformationer, der sker i Cyclone udregnes residualerne på de enkelte sammenknytningspunkter. Figur 7.14 viser et eksempel på disse residualer.

Constraint ID	ScanWorld	ScanWorld	Weight	Error	Error Vector
TargetID: 200	M1	M2	1.0000	0.002 m	(0.000, 0.000, 0.002) m
TargetID: 201	M1	M2	1.0000	0.004 m	(0.002, -0.001, -0.004) m
TargetID: 202	M1	M2	1.0000	0.003 m	(-0.001, 0.003, 0.001) m
TargetID: 203	M1	M2	1.0000	0.002 m	(-0.001, -0.002, 0.000) m

Figur 7.14: Figuren viser residualerne ved en transformation mellem første og anden skanning over sammenknytningspunkterne. Som det ses er punktnumrene her 200-203.

Når transformationerne er udført tilfredsstillende, kan der modelleres objekter, flader, rørføringer eller lignende i enkelte "scanworlds" eller i en samlet model. Når data er modelleret eller stadig

fremstår som punktsky, kan data herfra eksporteres i flere anvendelige formater og til andet programmel.

Eksport
ASCII point data (XYZ, SVY, PTS, PTX, TXT), DXF, COE (Cyclone Object Exchange), AutoCAD, MicroStation, BMP, JPEG, TIFF og Zoller+Fröhlich ZFS

Import
ASCII point data (XYZ, SVY, PTS, PTX, TXT), Zoller+Fröhlich ZFS, ZFC, RIEGL 3DD, COE AutoCAD, MicroStation, BMP, JPEG, TIFF og CGP

De mange eksportmuligheder gør Cyclone-data anvendeligt i mange programmer. Der kan eksporteres og importeres punkter, modellerede flader og koordinatfiler, som kan anvendes til videre programmering i andre sammenhænge.

7.2.3 Specifikationer

Der er fundet mange tests og sammenligninger af laserskannere. Dog har det været problematisk at finde en test, der direkte konkluderer, at alle specifikationer overholdes. I3Mainz er et anerkendt institut for rumlig information og måleteknik, og der er her udført tests af skannere i et kontrolcenter i Tyskland. Leica HDS4500 er testet hos I3Mainz, dog under navnet Zoller+Fröhlich Imager 5003. Laserskanneren HDS4500 nævnes i flere artikler, som værende identisk med Zoller+Fröhlich Imager 5003 [Hesse et. al., 2007], som har gennemgået en godkendt test hos i3mains. Testen omhandler bl.a. en test af specifikationerne, hvor disse testes til at holde [i3mainz, 2007]. På baggrund af ovennævnte test, anses specifikationerne for Leica HDS4500 som troværdige, da disse er kontrolleret af en tredje part. Uddrag af specifikationer kan ses figur 7.15. Det ses her, hvilke nøjagtigheder, der kan forventes på forskellige afstande.

	Position [mm]		Afstand [mm]	Vinkel [µrad]	Modelleret flade [mm]	
	10 m	25 m			10 m	25 m
Model optil 25 m						
Enkeltpunkt (20%)	≤6	≤13,5	≤3 + 360 ppm	350		
Enkeltpunkt (100%)	≤6	≤12,8	≤3 + 120 ppm	350		
Flade (20%)					≤1,6	≤4,4
Flade (100%)					≤1,0	≤1,8
Target nøjagtighed	≤2	≤3,5				
Model optil 53 m						
Enkeltpunkt (20%)	≤7.6	≤16,1	≤5 + 360 ppm	350		
Enkeltpunkt (100%)	≤7.2	≤13,7	≤5 + 120 ppm	350		
Flade (20%)					≤1,6	≤4,4
Flade (100%)					≤1,0	≤1,8
Target nøjagtighed	≤2	≤3,5				

Figur 7.15: Figuren viser et uddrag af specifikationerne for HDS4500 [Leica2,2007]. I angivelserne af nøjagtigheder tages højde for både afstand og refleksion, der angives i procent. Som det kan ses findes der to modeller af HDS4500: En med rækkevidde på 25 m og en med rækkevidde på 53 m.

Specifikationerne for HDS4500 samlet i et "datasheet" fra Leicas hjemmeside kan ses i Bilag C - CD. Der findes ifølge Rikke Pedersen fra Leica to typer HDS4500: En med rækkevidde på 25 m og en med rækkevidde på 53 m, som det kan ses i "datasheetet". Den laserskanner, der er lånt af COWI, er en HDS4500 med rækkevidde på 53 m, og der tages udgangspunkt i disse specifikationer.

8 Systemopbygning

I det følgende kapitel beskrives først de indledende overvejelser om banemålingssystemet, og herefter hvordan systemet til banemåling er opbygget, og hvad data fra henholdsvis laserskanner og trolje skal anvendes til ved opmåling. I de indledede overvejelser beskrives tankerne bag integrationen, hvorimod der igennem resten af kapitlet argumenteres for valg og redegøres for metoder og beregninger. Efterfølgende redegøres der for, hvordan laserskanner og trolje skal virke i samspil.
I forlængelse af præsentation af systemets opbygning og sammenkobling redegøres der for, hvorledes systemet er kalibreret. Kalibreringen er foretaget med henblik på at finde frem til banetroljens placering i laserskannerens koordinatsystem.
Afslutningsvist beskrives det, hvordan troljedata og data fra laserskanneren sammenkobles.

8.1 Indledende overvejelser

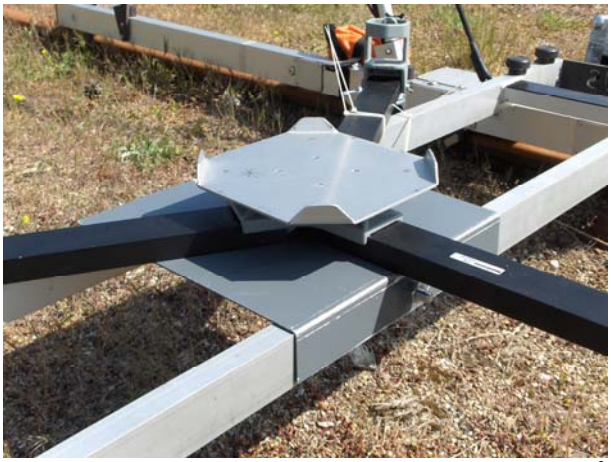
Projektgruppen har gennem kapitel 7 – *Beskrivelse af valgte instrumenter* opnået kendskab til, hvordan komponenterne virker hver for sig, hvorefter opgaven er at finde frem til, hvordan de integreres og anvendes i et samlet system til banemåling.
Umiddelbart er det idéen, at data fra banetroljen skal anvendes til opmåling af skinner og data fra laserskanneren til opmåling af omgivelser og teknik. Det er således opgaven at kombinere data fra trolje og skanner til ét samlet produkt. Dette gøres ved at kalibrere instrumenterne sammen i ét system og dermed klarlægge forholdet mellem de forskellige koordinatsystemer, der optræder.

For at undgå at skulle synkronisere komponenternes målinger og dermed behandle fejlene herved, vælges at måle med en kombination af statisk og dynamisk måling. Med dette menes, at troljen foretager sine målinger dynamisk, mens der køres hen over skinnerne. Undervejs standses der på banelegemet, og laserskanneren indsamler data vedrørende omgivelserne. Herved opnås en sammenhængende kronologisk datastreng med målingerne fra troljen og en skanning for hver gang, der er kørt en given afstand. Ved bestemmelsen af afstanden mellem skanningerne, er det vigtigt at tage højde for skannerens specifikation, for at kunne overholde nøjagtighedskravene i banenormen.
De skanninger, der foretages, skal sammenknyttes til en samlet model, hvilket sker ved hjælp af "targets". Disse placeres imellem skanningerne, og punkterne skannes således fra to opstillinger. På denne måde kan to modeller sammenknyttes ved hjælp af disse fællespunkter. Som sammenknytningspunkter kan også anvendes veldefinerede punkter, der kan udpeges i to skan, der ønskes sammensat.

Efter at have sammenknyttet de forskellige skan og dermed have opnået en model over det målte forløb, importeres data fra troljen i modellen og angiver placeringen af skinnerne. Dermed opnås en samlet relativ positioneret model over skinneforløb, omgivelser og teknik. Denne model kan yderligere positioneres absolut ved at signalere fikspunkter langs banenettet og inddrage disse fra de skanneropstillinger, hvor de er synlige og indenfor skannerens rækkevidde.

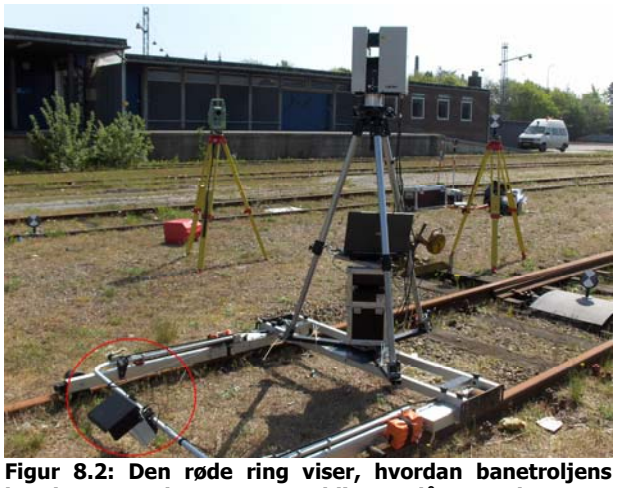
8.2 Opbygning af system

For at kunne anvende laserskanner HDS4500 i samspil med banetrolje Abtus 4530, skal instrumenterne placeres i et samlet målesystem. Projektgruppen har haft mange overvejelser omkring, hvordan laserskanneren anbringes på troljen, og systemet kan drage nytte af dataindsamling fra begge instrumenter. Efter at have overvejet placeringsmuligheder, fandt projektgruppen det mest optimalt med anbringelse af laserskanneren på troljens tværbom ved forhjulene, se figur 8.1.



Figur 8.1: Laserskannerens stativs placering på banetroljens tværbom ved forhjulene.

Til troljens tværbom er konstrueret en plade, hvorpå laserskannerens tilhørende fod og stativ placeres og fastspændes, så der ikke kan ske rystelser eller svingninger i forhold troljens placering. Udformningen af pladen og en tværgående bolt sikrer således, at systemet er rigidt og kan anvendes til opmåling. Under måling med laserskanneren kræves det blot, at kørebommen på troljen slås ned, så den ikke er i vejen for skanningen, se figur 8.2.

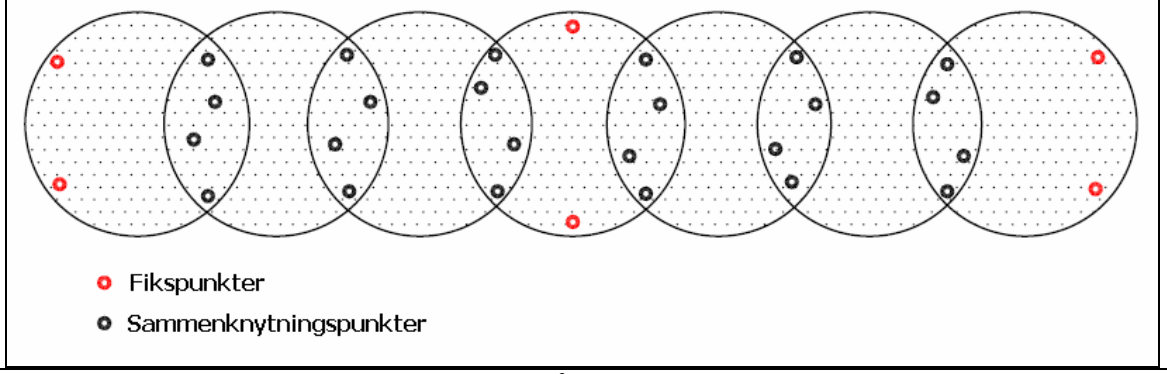


Figur 8.2: Den røde ring viser, hvordan banetroljens kørebom med computer bliver slået ned, mens laserskanneren indsamler data.

8.2.1 Opmålingsproces

Selve opmålingen med systemet foretages ved at placere troljen på banelegemet og herpå fastspænde laserskannerens stativ med skanneren påmonteret. Herefter skannes så 360°x310° med henblik på at indsamle data om teknik og omgivelser. I den første skanning indgår eventuelle fikspunkter i landskoordinatsystem og ligeledes sammenknytningspunkter placeret i kørselsretningen for målesystemet. Begge punkttyper signaliseres med ”targets” og finskannes for en præcis angivelse af punktet.

Når skanningen er gennemført, føres troljen til næste skanningspunkt, mens der indsamles data. Her skannes igen 360°x310°, og skanningspunktet markeres "SCANNING" i troljens datafil med funktionen "event logging". I denne nye placering findes de samme targets i retning af skannerens tidligere placering samt længere fremme i baneforløbet. Måleforløbet med systemet er illustreret i figur 8.3.



Figur 8.3: Principskitse, der viser resultatet af syv på hinanden følgende skanninger, hvor der ind imellem er sammenknytningspunkter. Undervejs skannes ligeledes fikspunkter. De prikkede cirkler indikerer en skanning.

Denne fremgangsmåde fortsættes, og undervejs skannes signaliserede fikspunkter i landskoordinatsystem, så alle punkter kan positioneres absolut.

Sammenknytningspunkternes antal, afstand og geometri
I laserskannerens software Cyclone udføres sammenknytning af skan, jf. Rikke Pedersen fra Leica, ved en 3D-transformation med skala 1. For at udføre transformationen kræves minimum tre sammenknytningspunkter.

I så fald gælder følgende:

$m = n$ **modellen er akkurat bestemt**

hvor, ***m*** **er antallet af observationer**
n **er antallet af variable nødvendige for at bestemme modellen**

[Cederholm, 2000]

Tre sammenknytningspunkter resulterer dermed i, at modellen lige akkurat kan bestemmes. I målingssituationer er det dog hensigtsmæssigt med overbestemmelser for at kunne vurdere målingerne og finde eventuelle fejl. Derfor vælger projektgruppen at anvende fire sammenknytningspunkter i stedet for tre. Valget begrundes yderligere gennem projektgruppens erfaringer fra et tidligere semester, hvor der forekom tilfælde, hvor skannerens placering af "targets" gennem finskan, var forkert.

Med valget af fire sammenknytningspunkter gælder følgende:

$$u = m - n$$

hvor, ***u*** **er antal overbestemmelser (også kaldet frihedsgrader)**
m **er antallet af observationer**
n **er antallet af variable nødvendige for at bestemme modellen**

[Cederholm, 2000]

Afstanden til sammenknytningspunkterne vælger projektgruppen til 15 m, hvilket medfører, at målesystemet skal standses i intervaller på 30 m. Ifølge specifikationerne kan skannede "targets" overholde en nøjagtighed på 3,5 mm på op til 25 m, hvilket dermed kunne være afstanden til sammenknytningspunkterne. Igennem projektgruppens litteraturstudie i foranalysen er det dog blevet klart for projektgruppen, at punktspredningen for "targets" på 15 m er 4,7 mm [Jacobs, 2004], hvilket resulterer i valg af en kortere afstand end angivet i specifikationerne.

Sammenknytningspunkter placeres i afstande svingende fra 14-16 m, for dermed at opnå bedre geometri og bedre sammenknytning. Ligeledes placeres punkter i forskellige højder, hvor to punkter placeres på stativ i ca. 1,5 m højde, og to andre placeres i terrænniveau. Forskel i højden vælges også for at opnå god geometri og sammenknytning.

8.2.2 Laserskannerens data

Ved at foretage skanninger med HDS4500 langs banen opnås punktskyer ud fra stationerne langs banen. Punktskyerne rækker ud på hver side af jernbanen og giver informationer omkring omgivelserne. Med laserskannerens data bestemmes teknik langs banen, der ikke kræver samme høje nøjagtighed, som det er tilfældet med selve sporets beliggenhed, jf. banenormen. Desuden gør punktskyerne det muligt at definere større flader som terræn, perron og broer langs med banestrækningen, samt at modellering af alt anden information end selve sporet.

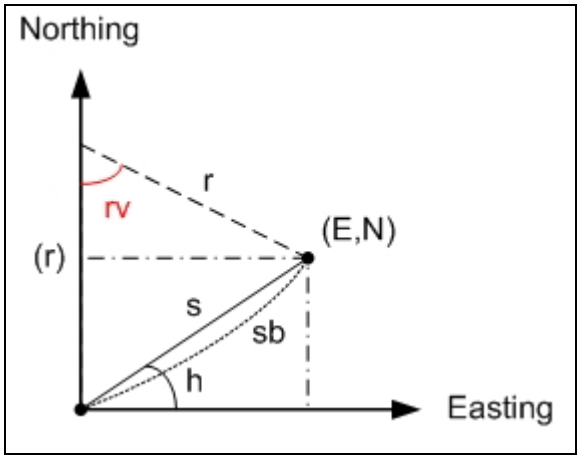
Ved at skanne targets mellem opstillingerne kan punktskyerne sammenknyttes ved transformation til én samlet model over forløbet. Skanning af fikspunkter langs med banenettet, kan anvendes til at positionere modellen absolut eksempelvis i KP2000.

8.2.3 Troljens data

Ud fra opmåling med Abtus 4530 opnås data omkring sporets beliggenhed. Tidligere er beskrevet hvilke data, der opnås ved en sådan måling, men ikke alle disse data anvendes i det samlede system til at fastlægge sporets forløb. Hensigten med troljens data er at kunne konstruere to strenge af koordinater, der tilkendegiver skinnernes placering og forløb gennem den opmålte banestrækning.
Omregningen af troljens data kræver informationer fra banetroljen for at bestemme koordinater til de punkter på skinnerne, der måles. Der kræves således informationer om, hvordan troljen bevæger sig fremad i plan og højde, og hvad afstanden er mellem skinnerne.

Bestemmelse i planen

Til bestemmelse af punkterne på skinnerne i planen anvendes troljens målinger af den kørte afstand sammen med målingerne af den horisontale radius. Den kørte afstand måles i troljen som en bueafstand (sb). Dog ikke i de tilfælde, hvor den horisontale radius er 0 og dermed en vandret strækning.
Ud fra bueafstanden kan den direkte afstand (s) beregnes, og ud fra den horisontale radius (r) kan den plane retning (h) beregnes. Herved kan det beregnes, hvordan troljen flytter sig i planen, se figur 8.4.



Figur 8.4: Figuren viser, hvordan troljens data regnes om til koordinater i planen. Her anvendes troljen målinger af den kørte afstand og radius.

Vinklen ved radiusserne (rv) kan beregnes ud fra følgende, se figur 8.4:

$$rv = \frac{sb}{r}$$

hvor,
rv **er vinklen i radianer**
sb **er buelængden**
r **er radius**

Størrelserne (s) og (h) beregnes ved hjælp af følgende, se figur 8.4:

$$s = \frac{r \cdot \sin(rv)}{\sin\left(\frac{\pi - rv}{2}\right)} \quad , \quad h = \frac{\pi}{2} - \left(\frac{\pi - rv}{2}\right)$$

hvor,
s **er den direkte afstand**
h **er retningsvinklen i planen**
r **er radius**
rv **er vinklen ved radiusserne i radianer**

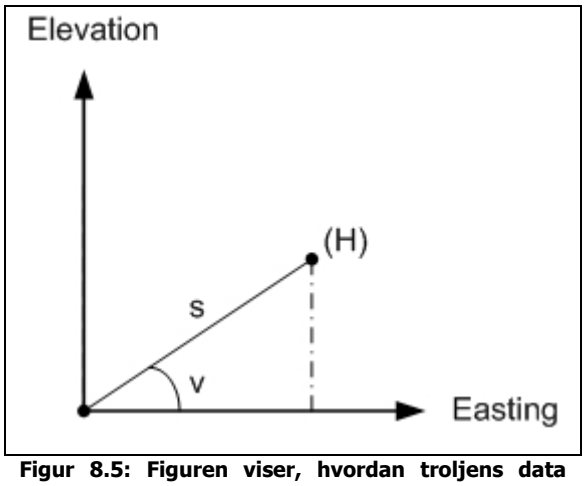
Herudfra kan det beregnes, hvordan troljen har flyttet sig i planen ud fra følgende:

$$\Delta E = s \cdot \cos(h) \quad , \quad \Delta N = s \cdot \sin(h)$$

hvor,
ΔE **er den afstand, troljen flytter sig ad E-aksen**
ΔN **er den afstand, troljen flytter sig ad N-aksen**
s **er den direkte afstand**
h **er retningsvinklen i planen**

Bestemmelse i højden

På samme måde som ved bestemmelsen i planen anvendes den direkte afstand (s) og data fra troljen gradienten (v) til at bestemme højden, jf. figur 8.5. Gradienten er et mål for, hvordan troljen hælder på målepunktet, dvs. hvad hældningen er af den linje, der går gennem baghjul til forhjul. Dette tilkendegiver, hvordan troljen bevæger sig frem i højden, og således arbejdes der frem i data højdemæssigt.



Figur 8.5: Figuren viser, hvordan troljens data regnes om til koordinater i højden. Her anvendes troljens målinger af afstand og gradient.

Den afstand troljen har flyttet sig i højden, beregnes derfor ud fra følgende:

$$\Delta H = s \cdot \sin(v)$$

hvor, ***ΔH*** **er den afstand, troljen flytter sig i højden**
s **er den direkte afstand**
v **er hældningen af troljen**

Afstanden og forskel i højde mellem skinnerne

Efter at have beregnet skinneforløbet for den ene side af troljen, er det nødvendigt at kende afstanden til punktet, hvor der måles i den modsatte side af troljen. Dette punkt bestemmes under kalibreringen, se afsnit 8.3 – *Kalibrering af system*. Med kendskab til afstanden mellem disse to punkter kan skinneforløbet i den modsatte side af troljen beregnes. Her anvendes "superelevation"-målingen dog til at bestemme højden.
Ovennævnte beregninger resulterer to strenge af koordinater, der beskriver skinneforløbet, men målt med den samme afstand mellem venstre og højre skinne hele vejen. Således kan "gauge"-målingen, som angiver afstanden mellem skinnerne, anvendes til at korrigere koordinatstrengene. Dette gøres ved hjælp af vektorberegning.

De ovennævnte beregninger foretages i Matlab "script" 'trolje_data.m', som er vedlagt på bilag C – CD.

Igennem troljens data fastlægges sporet med højere præcision, end det er muligt gennem modellering af punktskyerne ved skanningerne, jf. banetroljens specifikationer. Data fra troljen skal herefter sammenkobles med data fra laserskanneren til et samlet produkt. For at dette er muligt, skal trolje og skanner kalibreres.

8.3 Kalibrering af system

For at finde frem til banetroljens position i laserskannerens koordinatsystem, kræves der en kalibrering af de sammensatte instrumenter. Kalibrering sker ved, at der udføres målinger i et testfelt, hvor begge komponenterne er placeret, under forudsætning af kendskab til testfeltets geometri. Projektgruppen er interesserede i at finde troljen position i skannerens koordinatsystem og transformationsformlerne mellem deres to koordinatsystemer. Alle filerne fra TMK og Excel vedrørende troljens position og udledning af transformationsformler er placeret på bilag C - CD sammen med en tilhørende læsevejledning for overskueliggørelse af filernes sammenhæng.

8.3.1 Koordinatsystemer

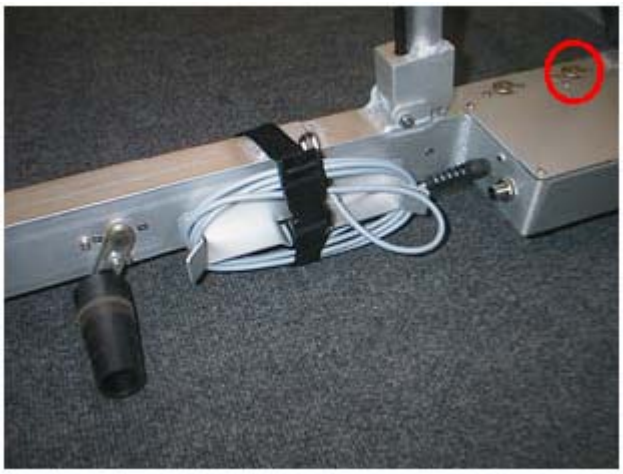
Umiddelbart er der to koordinatsystemer, der skal kalibreres i målesystemet: Et fra banetroljen og et fra laserskanneren. Her anvendes laserskannerens system som "body system", og derfor skal der findes frem til, hvordan koordinater i troljens koordinatsystem skal transformeres hertil. Det primære formål med kalibreringen er at finde frem til transformationsformler, der kan gøre det muligt at transformere fra det ene system til det andet. Det sekundære formål er at finde troljens position i laserskannerens koordinatsystem.

Laserskannerens koordinatsystem

Laserskanneren starter altid skanninger med samme udgangsretning. Med dette menes, at hvis laserskannerens stativ holdes fast, og skanneren altid placeres og fastspændes ens på stativet, vil skanneren altid have den samme orientering. Dette betyder, at når banetrolje og laserskanner kombineres i målesystemet og kalibreres, må der ikke ændres på stativet og på skannerens placering. Her ville det være hensigtsmæssigt med et fast stativ, hvor skanneren placeres ens hver gang, men dette beskæftiger projektgruppen sig ikke videre med og anvender derfor det originale stativ, hvor stativet dog holdes fast under måling. Laserskannerens koordinatsystem er et højrehåndssystem med origo i laserens udbredelsespunkt og "Easting" (X-aksen) sammenfaldende med udgangsretningen.

Troljens koordinatsystem

Projektgruppen har kontaktet Abtus for at få kendskab til, hvor sensorerne på troljen måler, og hvad projektgruppen dermed kan opfatte som troljens nulpunkt. Ud fra mailkorrespondancen med Chris Loveday er det oplyst, at troljens nulpunkt kan bestemmes ved den venstre af de mekaniske sensorer, der måler gabet mellem skinnerne. Projektgruppen har ikke kunnet skaffe yderligere oplysninger om nulpunktet og troljens koordinatsystem, og derfor vælges det at placere punktet i den bolt, der holder den mekaniske sensor fast på troljen, jf. figur 8.6. Mailkorrespondance med Chris Loveday fra Abtus kan ses i bilag C-CD.

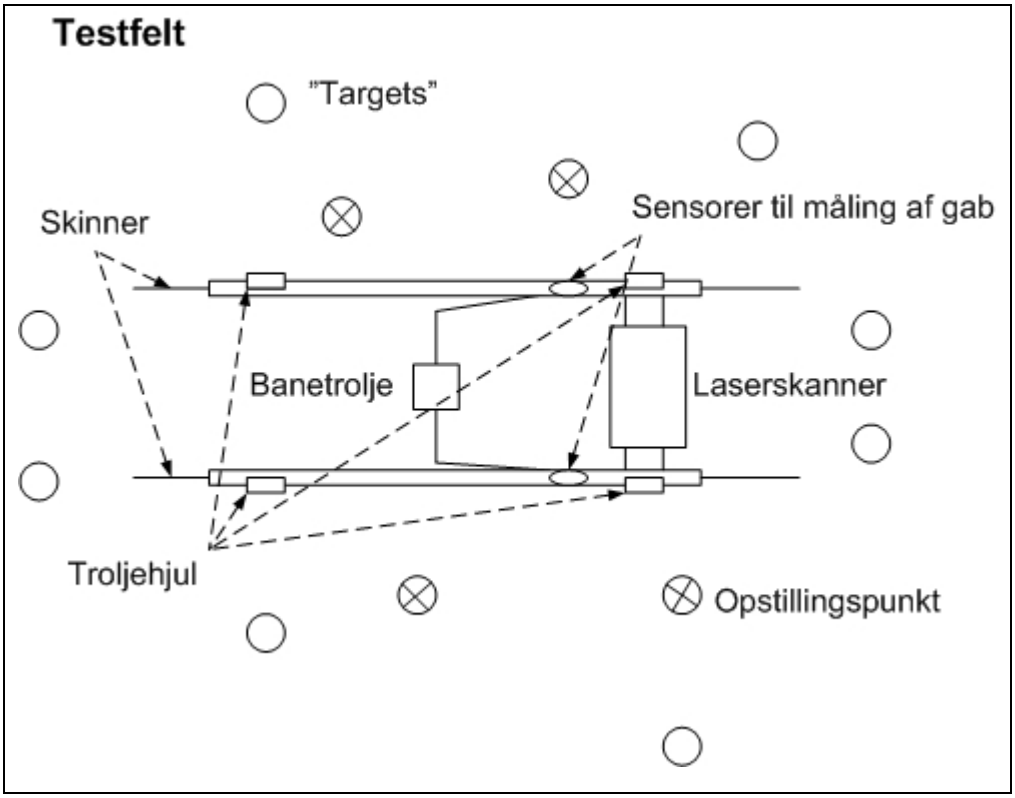


Figur 8.6: Placeringen af den sensor, der bestemmer gabet mellem skinnerne på den ene side af troljen. Sensoren har centrum i bolten markeret med den røde cirkel. (Her vises højre side af troljen, men af mangel på billeder anvendes denne, da troljen er ens i højre og venstre side, bare spejlvendt.)

Da det ikke har været muligt at fremskaffe materiale om troljens koordinatsystem, har projekt selv valgt at definere et lokalt system til beregning af målinger. Dette koordinatsystem har som sagt origo i den venstre side af troljen ved den mekaniske sensor, der måler gabet. Som akseretninger har projektgruppen valgt at lade "Easting" (X-aksen) være sammenfaldende med kørselsretninger i troljens startpunkt. Med dette menes retningsvektorer fra baghjul til forhjul af troljen i startpunktet. "Northing" (Y-aksen) er sammenfaldende med den retningsvektor, der går fra nulpunkt til modstående sensor til mål af gabet, dog modsatrettet. Dette gør, at koordinatsystemet defineres som et højrehåndssystem.

8.4.2 Testfeltet og målinger

Kalibreringen af målesystemet forgår i et testfelt, hvor der er placeret targets i forskellige afstande og højder rundt om systemet. Her vælges det at bruge otte "targets" til målingerne. Troljen med påført laserskanner placeres således på banestrækningen og imellem "targets". Placeringen af troljen markeres på skinnerne, så de evt. senere kan anvendes ved eventuel genmåling. I figur 8.7 er en principskitse af testfeltet illustreret.



Figur 8.7: Principskitse med trolje og laserskanners placering i testfeltet samt placeringen af de fire opstillingerne med totalstation.

Alle "targets" måles med laserskanneren, og i Cyclone tildeles "target" et "*vertex*", hvilket betyder, at der opnås koordinater i skannerens koordinatsystem. Denne målemetode gentages fire gange, da laserskanneren altid har samme udgangsretning, og målesystemet er rigid, kan dette senere anvendes til at danne middel af koordinaterne.

Efter endt skanning flyttes troljen ca. en meter frem, hvorefter samme procedure gentages, med samme formål. Dette gøres med henblik på at finde ud af, om skannerens position i forhold til troljen ændres under bevægelse.

Sideløbende med, at der skannes, måles de otte "targets" ind fra fire opstillinger med totalstation, jf. figur 8.7. Her måles yderligere til troljens fire hjul samt til det valgte nulpunkt i troljen ved sensorerne til måling af gab, i de to skannerpositioner. Dermed er det muligt at positionere troljen i skannerens koordinatsystem. Valget at anvende fire opstillinger gør angivelsen af punkterne mere nøjagtig ved at danne middel. Ligeledes måles der med gennemslag for at eliminere fejl.

Ved måleprocessen opnås koordinater til "targets" i laserskannerens koordinatsystem fra hver af de to skanningspositioner og observationsfiler til placeringen af troljens hjul og nulpunkt i hvert af skanningspunkterne.

8.4.3 Beregning af troljens position

Projektgruppen er interesseret i at anvende målingerne i testfeltet til at bestemme troljens position i laserskannerens koordinatsystem og kontrollere systemets stabilitet. Dette indledes med at eksportere koordinatfiler til de otte "targets" i Cyclone fra hver opstilling med skanneren i testfeltet. Dermed opnås otte koordinatfiler, hvor fire hører til første skannerposition og fire til anden skannerposition. Ud fra koordinatfilerne oprettes regnearket 'skanning.xls', hvor der for hver af skannerpositionerne dannes middelkoordinater og beregnes spredninger. Spredningerne beregnes efter følgende:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum \Delta X^2}{n}} \qquad RMSE = \sqrt{\frac{\sum \Delta Y^2}{n}} \qquad RMSE = \sqrt{\frac{\sum \Delta Z^2}{n}}$$

hvor, ***ΔX*** **er forskellen på X-koordinaten i forhold til middelværdien**
ΔY **er forskellen på Y-koordinaten i forhold til middelværdien**
ΔZ **er forskellen på Z-koordinaten i forhold til middelværdien**

Efter beregninger af spredninger undersøges afvigelser fra middelkoordinaten i hver af målingerne og overskrider afvigelsen med over tre gange spredningen, fjernes punktet fra beregning af middelkoordinaten.
Med denne fremgangsmåde opnås ét sæt koordinater til de otte "targets" fra hver af skannerpositionerne.

De oprettede koordinatfiler anvendes til beregning af troljehjulenes placering ved hjælp af landmålingsprogrammet TMK, hvor koordinatfiler og observationsfiler, kan importeres for at foretage detailpunktsberegning. Først er observationerne imidlertid midlet, da der er målt med gennemslag. Dette er gjort i regnearket 'totalstation.xls'. Herefter er observationerne igen samlet i én observationsfil.
Til at udføre detailpunktsberegningen i landmålingsprogrammet TMK anvendes normalt en 2D-transformation og efterfølgende 1D-translation. Da "targets" er koordineret med laserskanner, anses koordinaterne hertil at være lige gode i plan og højde, og derfor ønskes der anvendt en 3D-transformation med fast målestok. Detailpunktsberegningerne udføres derfor ved først at beregne koordinater til troljens hjul og "targets" i et lokalt system ud fra observationsfilerne og derefter at

udføre en transformation for at få koordinater til troljens hjul positioneret i skannerens koordinatsystem. 3D-transformationen udføres således med otte fællespunkter.
Ved transformationerne beregnes spredningen på vægtenheden og residualer. Ingen af disse ved nogen af transformationerne ligger højere end 3 mm, hvilket findes acceptabelt. Dokumentationsfiler vedrørende transformationerne findes på bilag C - CD.

Efter udførte transformationer opnår projektgruppen fire koordinatfiler med placeringen af troljens hjul, fra hver af skanningspositionerne. Disse koordinater samles i et regneark, og som nævnt beregnes spredning, afvigelser og middelkoordinater. Dette er gjort i regnearket 'skan_total.xls'. Således beregnes koordinater til troljens "otte" hjul (fire i første position og fire i anden position) i to forskellige koordinatsystemer. For at kontrollere punkterne på troljen i laserskannerens koordinatsystem for hver gang, der måles, transformeres de otte punkter fra hver af de to skannerpositioner sammen, hvilket skulle give ingen eller minimale residualer. Ved transformationen fremkommer få residualer på 1 mm, og spredningen på vægtenheden er 0 mm i både plan og højde. Dokumentationsfiler vedrørende transformationerne findes på bilag C - CD.

For afslutningsvist at finde et entydigt koordinatsæt til troljens hjul er de fire første punkter fra første skannerposition og de fire sidste punkter fra anden skannerposition, transformeret sammen for dermed at midle koordinaterne. Disse punkter indikerer troljehjulenes placering i forhold til skanneren ved henholdsvis første og anden skannerposition. Transformationens resultat bliver, at spredningen på vægtenheden bliver 3 mm i plan og 1 mm i højden, hvilket findes acceptabelt. Dokumentationsfiler vedrørende transformationerne kan findes på bilag C- CD.

Endelig positionering
Første gang projektgruppen foretog opmåling i testfeltet, blev kun troljens hjul positioneret, da projektgruppen på daværende tidspunkt ikke havde kendskab til troljens nulpunkt. Derfor blev der foretaget genmåling, hvor sensorpunkterne ved gab-målingen blev målt ind i forhold til troljens hjul (disse punkter var markeret på skinnerne og troljen kunne derfor placeres på samme sted). Fremgangsmåden til beregning af disse punkter var den samme som for beregning af troljens hjul, hvor der også blev foretaget fire målinger af punkterne med gennemslag. Regnearket 'middel_gab.xls' er en midling af observationerne, og 'gab_endeligt.xls' er en midling af de koordinater, der beregnes ved detailpunktsberegning. Dokumentationsfiler vedrørende detailpunktsberegningerne er vedlagt på bilag C - CD.

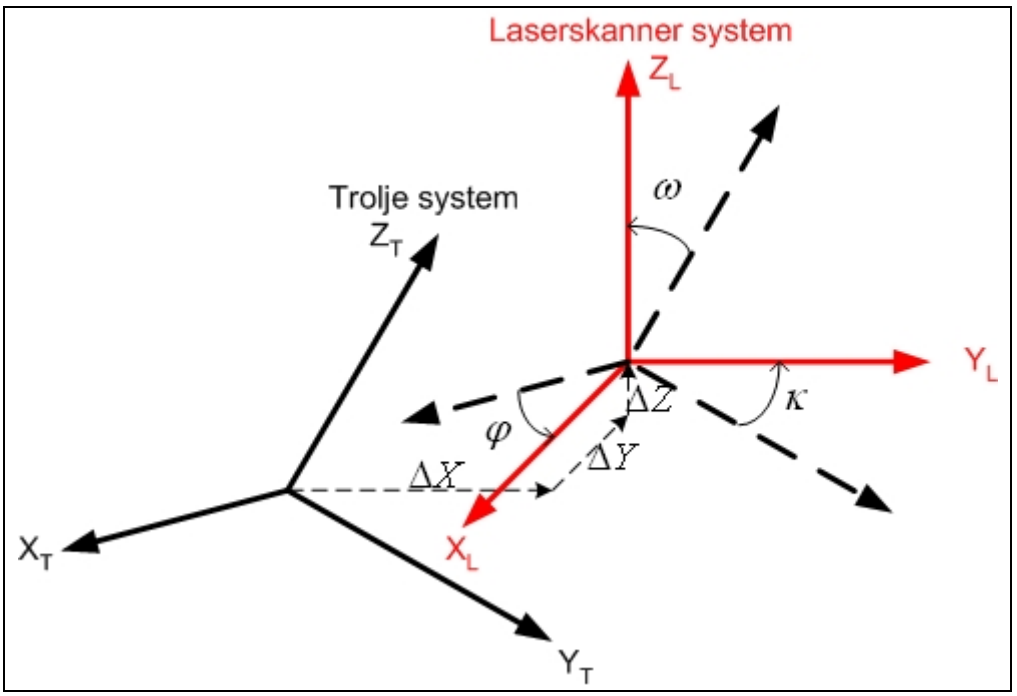
Kontrol af stabilitet
For at kontrollere om banemålingssystemet med de to komponenter er rigidt, har projektgruppen beregnet afstande mellem laserskannerens nulpunkt og troljens hjul. Disse afstande skulle være ens uafhængigt af, hvor på skinnerne laserskanneren er placeret, og derfor er det kontrolleret i testfeltet.
Kontrollen kan udføres, idet der skannes fra to positioner, og da troljens hjul positioneres i disse to. Ved at tage de første fire koordinatsæt fra første opstilling med skanneren og tage de sidste fire koordinatsæt fra anden skanneropstilling, kan der beregnes længder herfra og til (0,0,0), som kan sammenlignes. Ved sammenligningen ses, at de to forreste hjul ligger i samme afstand, og at venstre og højre baghjul har henholdsvis 2 og 3 mm i afvigelse. Dette forventes at være små vrid i troljen, men projektgruppen anser stadig målesystemet som rigidt. Afstande og afvigelser beregnes i regnearket 'afstand_skanner_troljehjul.xls', vedlagt på bilag C - CD.

8.4.4 Udledning af transformationsformler

Foruden en bestemmelse af troljens position i laserskannerens koordinatsystem, er hensigten med kalibreringen ligeledes at finde frem til de parametre, der medvirker til, at der kan transformeres fra det ene system til det andet. Der skal derfor findes transformationsformler for at positionere punkter målt med troljen i laserskannerens koordinatsystem.
For at udlede transformationsformlerne er det nødvendigt at beregne følgende:

- Rotation om X-aksen (ω)
- Rotation om Y-aksen (φ)
- Rotation om Z-aksen (κ)
- Flytning i X (ΔX)
- Flytning i Y (ΔY)
- Flytning i Z (ΔZ)
- Målestoksfaktor (*k*)

Dermed skal syv ubekendte bestemmes. De nødvendige parametre er yderligere illustreret i figur 8.8.



Figur 8.8: Figuren viser de to koordinatsystemer: Laserskanner system og Trolje system, samt de parametre, der skal findes for at udlede transformationsformler. Der skal således findes flytning i X, Y og Z og tre drejninger, for at koordinatsystemerne er sammenfaldende. Med rød er markeret laserskannerens koordinatsystem, med fuldoptrukket sort troljens koordinatsystem og det stiplede sorte koordinatsystem er troljens koordinatsystem efter flytningerne og drejningerne er foretaget.

Ved en 3D-transformation uden målestoksændring, ser transformationsformlerne ud som følger:

$$Y_L = k \cdot \left((r_{11}) \cdot Y_T + (r_{12}) \cdot X_T + (r_{13}) \cdot Z_T \right) + (\Delta Y)$$
$$X_L = k \cdot \left((r_{21}) \cdot Y_T + (r_{22}) \cdot X_T + (r_{23}) \cdot Z_T \right) + (\Delta X)$$
$$Z_L = k \cdot \left((r_{31}) \cdot Y_T + (r_{32}) \cdot X_T + (r_{33}) \cdot Z_T \right) + (\Delta Z)$$

hvor, ***Y_L, X_L, Z_L*** **er koordinater i laserskannerens koordinatsystem**
Y_T, X_T, Z_T **er koordinater i troljens koordinatsystem**
r **er elementer i rotationsmatricen R**
ΔY, ΔX, ΔZ **er flytningerne i de tre koordinatretninger**
k **er målstoksændringer (er fast og dermed 1)**

[Jensen, 2003]

Rotationsmatricen R er givet ved følgende:

$$R = R(\varphi) \cdot R(\omega) \cdot R(\kappa) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \cos\omega \cdot \cos\kappa & -\cos\omega \cdot \sin\kappa & \sin\omega \\ \sin\varphi \cdot \sin\omega \cdot \cos\kappa + \cos\varphi \cdot \sin\kappa & -\sin\varphi \cdot \sin\omega \cdot \sin\kappa + \cos\varphi \cdot \cos\kappa & -\sin\varphi\cos\omega \\ -\cos\varphi \cdot \sin\omega \cdot \cos\kappa + \sin\varphi \cdot \sin\kappa & \cos\varphi \cdot \sin\omega \cdot \sin\kappa + \sin\varphi \cdot \cos\kappa & \cos\varphi \cdot \cos\omega \end{bmatrix}$$

hvor, ***ω, φ, κ*** **er drejningerne omkring de tre akser (X, Y, Z)**

[Jensen, 2003]

Rotationsmatricen beregnes ud fra drejningerne om henholdsvis X, Y og Z akserne, der er givet ved følgende:

$$R(\varphi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & -\sin\varphi \\ 0 & \sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix} \quad R(\omega) = \begin{bmatrix} \cos\omega & 0 & \sin\omega \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\omega & 0 & \cos\omega \end{bmatrix} \quad R(\kappa) = \begin{bmatrix} \cos\kappa & -\sin\kappa & 0 \\ \sin\kappa & \cos\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

[Jensen, 2003]

De ovennævnte transformationsformler kan beregnes ved hjælp landmålingsprogrammet TMK. Her kræves kendskab til minimum tre punkter givet i laserskannerens system og samme tre punkter givet i troljens system. Projektgruppen anvender dog fire punkter for dermed at opnå en overbestemmelse.

Fra start har projektgruppen kendskab til to punkter, der både optræder i trolje system og laserskanner system. Dette er troljens nulpunkt og den modstående sensor til måling af gabet. En vektor mellem disse to punkter er retningsvektor for troljens "Northing" (Y-akse). For at finde yderligere punkter anvendes en retningsvektor mellem troljens for- og baghjul, da denne er en retningsvektor for "Easting" (X-aksen). Dermed har projektgruppen tre koordinater, der både findes i trolje system og laserskanner system. Det sidste punkt findes ved at beregne en normalvektor til de to øvrige retningsvektorer og dermed findes en retningsvektor sammenfaldende med "Elevation" (Z-aksen).

Efter transformation af de fire punkter vurderes spredningen på vægtenheden, der er 3 mm i plan og 1 mm i højde, hvilket accepteres. I dokumentationsfilen fra transformationen oplyses således formlerne til at positionere troljens data i laserskannerens koordinatsystem samt vinkler og flytninger. Dokumentationsfilen vedrørende transformationen kan findes på bilag C - CD.
Vinkler og flytninger er givet ved følgende:

- $\omega = 0{,}4409\,\text{gon}$
- $\varphi = -0{,}3361\,\text{gon}$
- $\kappa = 41{,}1325\,\text{gon}$
- $\Delta X = -0{,}220\,\text{m}$
- $\Delta Y = -0{,}699\,\text{m}$
- $\Delta Z = -1{,}905\,\text{m}$

Yderligere er transformationsformlerne givet ved:

$$Y_L = 1 \cdot \left(\left(-0{,}79839246 \right) \cdot Y_T + \left(0{,}60209760 \right) \cdot X_T + \left(-0{,}00692484 \right) \cdot Z_T \right) + \left(-0.699 \right)$$

$$X_L = 1 \cdot \left(\left(-0{,}60207446 \right) \cdot Y_T + \left(-0{,}79842249 \right) \cdot X_T + \left(-0{,}00527864 \right) \cdot Z_T \right) + \left(-0{,}220 \right)$$

$$Z_L = 1 \cdot \left(\left(-0{,}00870721 \right) \cdot Y_T + \left(-0{,}00004516 \right) \cdot X_T + \left(0{,}99996209 \right) \cdot Z_T \right) + \left(-1{,}905 \right)$$

Dermed kan troljens målinger (Y_T,X_T,Z_T) overføres til laserskannerens koordinatsystem (Y_L,X_L,Z_L).

8.4 Sammenkobling af data fra laserskanner og trolje

Når der er opnået koordinater til troljens målepunkter i forhold til laserskannerens koordinatsystem, kan disse opstilles og importeres i Cyclone. Herved kendes troljens position altid i forhold til skannerens centrum, som ved skanning i et nyt punkt altid vil være (0, 0, 0) med samme udgangsretning.
Fremgangmåden er, at troljens position først importeres i hver af de skanninger, der er foretaget langs banestrækninger. Derefter sammenknyttes de enkelte skanninger, og der er således kendskab til troljens placering, hver gang en skanning forekommer. Troljens målinger kan derfor beregnes i eget lokale koordinatsystem og derefter importeres i Cyclone ved at transformere over de disse punkter.

Foruden troljens position, er der ligeledes fundet transformationsparametre til at positionere troljens data i laserskannerens koordinatsystem. Dermed er det muligt at omregne data fra troljen, før det importeres i Cyclone.
Til import af punkter i Cyclone anvendes en almindelig tekstfil (.txt), som er opbygget med punktnummer, "Northing", "Easting", "Elevation" og "Comments". Sidstnævnte bliver et punktnummer ved import i Cyclone.

Opstilling af troljens beregnede koordinater til skinneforløb og transformationspunkter i en fil, der kan importeres i Cyclone, er indbygget i Matlab "script" 'trojledata.m'. Her kan transformationsformler ligeledes indsættes, så der transformere inden import.

9 Testteori

Da der i kapitel 5 – *Teori om instrumenttyper* vælges instrumenter og i kapitel 8 - *Systemopbygning* beskrives, hvorledes systemet ønskes opbygget, er det hensigtsmæssigt at kontrollere, om det teoretisk kan forventes at kunne overholde de nøjagtigheder, som søges, eller hvis dette ikke er tilfældet, undersøge hvorledes det muliggøres at overholde kravene fra banenormen.
For at opnå viden om de nøjagtigheder, der teoretisk kan forventes at kunne opnå, udarbejdes en test af forventede nøjagtigheder for opmålingerne. Der udarbejdes en test for opstillingspunkter og sammenknytninger. Ideen bag testen er, at dette udføres inden markarbejdet. Dette har dog ikke været muligt i dette projekt, da projektgruppen kun havde mulighed for at låne trolje og laserskanner i en begrænset periode, hvorfor testen blev foretaget efterfølgende. Dette er ikke hensigtsmæssigt, da målingerne ikke vil kunne ændres. Til tests er der udarbejdet et "script" i Matlab, som beregner konfidensellipser i 2D for YX-planet. Til udarbejdelsen af dette "script" anvendes [Cederholm, 2000] og [Jensen, 2003] som kilde.

9.1 Beregninger

For at udarbejde ovennævnte test er der som nævnt udarbejdet et Matlab "script", hvori der opstilles matricer, og udtegnes konfidensellipser.

Testnet baseres på følgende:

"-koordinatspredninger og konfidensellipser beregnes på grundlag af kovariansmatrixen for de ubekendte: $\sum_{\hat{x}} = \hat{\sigma}_0^2 (A^T C A)^{-1}$
-kovariansmatrixen kan opstilles blot vi kender A-matrixen og C-matrixen"

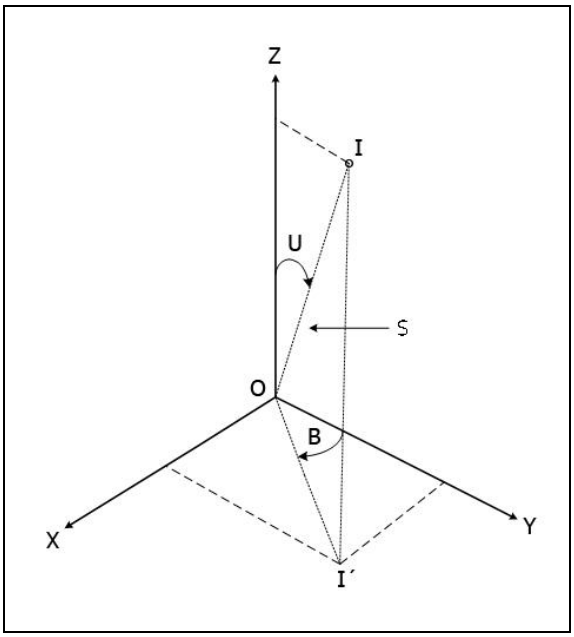
[Jensen, 2003]

"Hvis $\hat{\sigma}_0^2$ ***udskiftes med a priori værdien*** $\sigma_0^2 = 1$***, kan udtrykket bruges til planlægning af net. Ligningen er nu reduceret til*** $\sum_x = (A^T C A)^{-1}$ ***"***

[Cederholm, P., 2000]

For at kunne opstille kovariansmatricen er det således nødvendigt at kende A-matricen og C-matricen, hvor A-matricen indeholder de partielt afledede til de forventede observationer, og C-matricen er vægtmatricen. For at opstille disse matricer er det nødvendigt at have et vist kendskab til de opmålinger, der ønskes foretaget. Dette kendskab omhandler geometrien af opmålingerne, herunder fikspunkternes placering i forhold til de ukendte punkters placering. En anden faktor af betydning er opmålingsmetoden, hvor der i dette projekt anvendes laserskanning og banetrolje. Der tages i dette kapitel udgangspunkt i laserskanneren, da denne anvendes til positionering i forhold til fikspunkterne. Yderligere anvendes punkter opmålt med laserskanneren som sammenknytningspunkter. Da integrationen af banetroljens data foretages på baggrund af opstillingspunkterne, er punktspredningen på disse punkter derfor relevant.

Opmåling vha. laserskanning er baseret på vinkel- og afstandsmåling, hvor henholdsvis to vinkler og én afstand måles. Princippet er illustreret på figur 9.1, hvor O indikerer origo til koordinatsystemet, og P er punktet, hvortil der måles. Ligeledes illustreres vinklerne B og U, som er henholdsvis vinklen i XY-planet i forhold til Y og vinklen mellem $\overline{OP}$ og Z-aksen. S er afstanden mellem origo og punktet. Disse elementer skal således indgå i A- og C-matricen.



Figur 9.1: Princippet for typer af observationer ved laserskanning. I indikerer det punkt, der opmåles og O er laserskannerens opmålingscentrum. B, U og S angiver de målte størrelser, henholdsvis to vinkler og en afstand [Jensen, 2003].

Matlab "script"

Til at gennemføre testnet er der udarbejdet et Matlab "script", hvori A- og C-matricen opstilles på baggrund af en punktfil indeholdende punktnumre, koordinater i 2D, et opstillingsnummer samt en nummerkode for punkttypen. Ved typen menes om punktet er et fikspunkt, et sammenknytningspunkt eller et opstillingspunkt. Årsagen til at typen har indflydelse for beregningerne er, at punktets vægt er afhængigt heraf. Udover disse oplysninger anvendes oplysninger om antallet af opstillinger og antallet af punkter. Matlab "scriptet" er placeret på bilag C - CD, hvor punktfilen ligeledes findes.

9.1.1 A-matricen

For at kunne opstille en A-matrice for opmålingerne, er det nødvendigt at kende de anvendte fikspunkters koordinater samt et bud på koordinater til nye punkter. Sidstnævnte er et groft bud på koordinaten, da denne reelt set ikke kendes. Matricen er opdelt i forskellige dele, hvor den første del omhandler de partielt afledte til koordinaterne i forhold til koordinatobservationerne. Disse led har alle værdien 1.
Anden del består af de afledte til de "observerede" koordinater i forhold til retningerne. Disse led beregnes vha. af formlen:

$$\frac{\partial b_{Ri}}{\partial Y_i} = -\frac{X_i - X_o}{S_i^2} \qquad \frac{\partial b_{Ri}}{\partial X_i} = \frac{Y_i - Y_o}{S_i^2} \qquad \frac{\partial b_{Ri}}{\partial Z_o} = -1$$

hvor, X_i **er det "observerede" punkts X-koordinat**
Y_i **er det "observerede" punkts Y-koordinat**
X_o **er det opstillingspunktets X-koordinat**
Y_o **er det opstillingspunktets Y-koordinat**
S_i **er afstanden (2D) mellem det "observerede" punkt og opstillingspunktet**
Z_o **er kredselementet**

[Jensen, 2003]

Til matricen beregnes ligeledes de afledte til opstillingspunktet i forhold til retningerne, hvilket er den modsatte negative størrelse af leddene for retningerne til de "observerede" X- og Y-koordinater.

Det tredje led består af de afledte til koordinaterne i forhold til afstandene og beregnes jf. formlen:

$$\frac{\partial b_{Si}}{\partial Y_i} = \frac{Y_i - Y_o}{S_i} \qquad \frac{\partial b_{Si}}{\partial X_i} = \frac{X_i - X_o}{S_i}$$

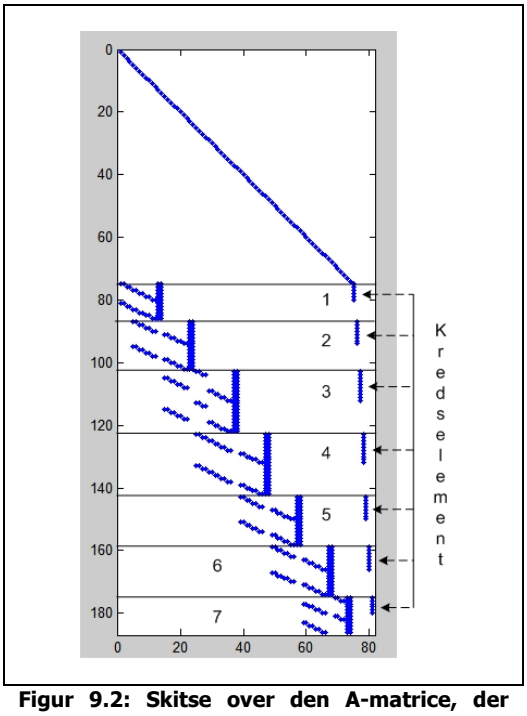
hvor, X_i **er det "observerede" punkts X-koordinat**
Y_i **er det "observerede" punkts Y-koordinat**
X_o **er det opstillingspunktets X-koordinat**
Y_o **er det opstillingspunktets Y-koordinat**
S_i **er afstanden (2D) mellem det "observerede" punkt og opstillingspunktet**

[Cederholm, 2000]

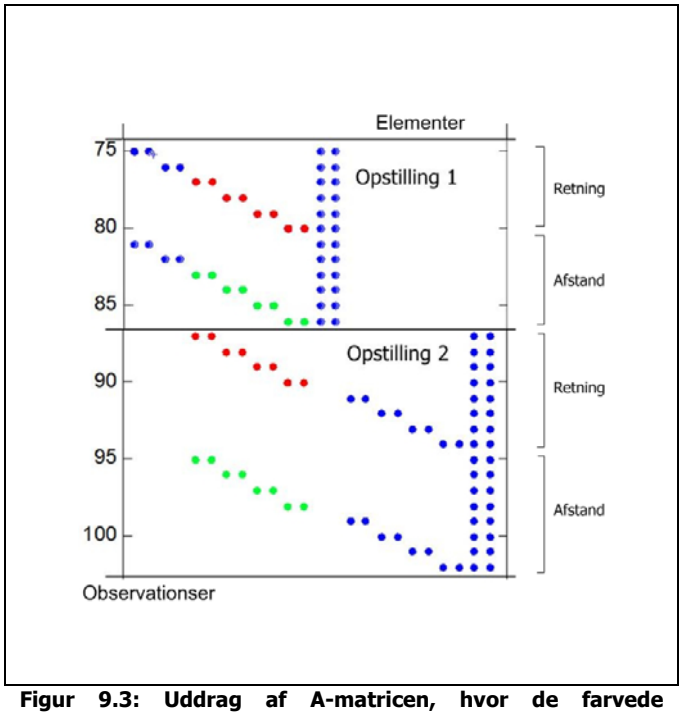
Som det var gældende for retningerne, beregnes også de afledte til opstillingspunktet i forhold til afstanden. Denne størrelse er den negative værdi for de afledte til koordinaterne.

Opstilling af A-matrice

Der oprettes én A- og én C-matrice, hvori værdierne til de respektive punkter placeres. Dette gøres, for at de spredninger, der opnås til sammenknytningspunkter, får indflydelse på spredningen på opstillinger, der orienteres efter disse sammenknytningspunkter. For at beregne punkterne i forhold til deres respektive opstillingspunkt beregnes opstillingerne separat i forhold hertil og placeres efterfølgende i matricen. Matlab "scriptet" ses i bilag C - CD.



Figur 9.2: Skitse over den A-matrice, der opstilles for dette projekt. Figuren er opdelt i forskellige felter, hvor felter markeret med nummer er opstillinger, og nummeret indikerer opstillingsnummeret. Koordinat indikerer, hvor de partielt afledede i forhold til koordinaterne findes.



Figur 9.3: Uddrag af A-matricen, hvor de farvede markeringer illustrerer, elementer i matricen, der har relation til opstillingerne 1 og 2. De røde markeringer er elementer, som er relateret til retningen for punkter, som indgår i begge opstillinger. De grønne er elementer, som er relateret til afstanden for punkter, som indgår i begge opstillinger.

For at konstruere A-matricen så der tages højde for, at målingerne har forskellige opstillingspunkter, er matricen opbygget som på figur 9.2, som er en skitse over, hvor værdierne i A-matricen er forskellig fra 0. Matricen er opdelt i forskellige dele, hvor delen i hvilken de partielt afledte i forhold til koordinaterne er placeret, er øverst. Delene af matricen, hvori de forskellige opstillinger er placeret, markeres med opstillingens nummer. Det bemærkes, at elementer til de forskellige opstillinger holdes sammenknyttet.

Figur 9.3 er et uddrag af matricen, som viser, hvordan punkter, som indgår i begge opstillinger, er placeret i A-matricen. Punkter markeret med rødt, er placeringerne af de partielt afledte for koordinaterne i forhold til retninger for sammenknytningspunkter, som anvendes mellem de to opstillinger. Markeringerne med grønt er placeringer af de partielt afledte i forhold til afstande. Som det nævnes, holdes hver enkelt opstilling samlet rækkevis, således at både elementer omhandlende retninger og afstande placeres, før en ny opstilling inkluderes. De blå markeringer er partielt afledede til punkter, som kun indgår i én af de to opstillinger.

9.1.2 C-matricen

I C-matricen er vægtene til punkterne placeret på diagonalen. Disse vægte er a priori variansen divideret med variansen til punktet med det tilsvarende rækkenummer i A-matricen. Således er elementerne i den første del af C-matricen a priori variansen divideret med variansen til punkterne, herunder fiks-, ukendte- og opstillingspunkter. Anden del omhandler retninger og tredje del afstande.
Spredningen på retningen på et punkt beregnes jf. formlen:

$$\textbf{(1)}\ \sigma_{Ri} = \sqrt{\frac{\sigma_r^2}{n_{sh}} + \left(\frac{\sigma_{ch}}{S_i}\right)^2}\ , \qquad \textbf{(2)}\ \sigma_{Si} = \sqrt{\frac{\sigma_g^2 + (\sigma_a S_i 10^{-3})^2 + \sigma_{ca}^2}{n_a}}$$

hvor (1), σ_r er spredningen på retningen målt med én sats. Enheden er radianer
σ_{ch} er centreringsspredningen i meter
n_{sh} er antallet af satser
S_i er afstanden fra opstillingspunkt til det 'observerede' punkt i meter
hvor (2), σ_q er grundfejlen i meter
σ_a er den afstandsafhængige fejl skrevet i meter
σ_{ca} er centreringsspredningen i meter
n_a er antallet af afstandsmålinger
S_i er afstanden fra opstillingspunkt til det 'observerede' punkt i meter

[Jensen, 2003]

Opstilling af C-matrice
Efter at have opstillet A-matricen opstilles C-matricen. Der opstilles således en diagonalmatrice, hvor positionen af vægten svarer til den tilhørende række i A-matricen. Efter opstillingen af A-matricen er opstillingen af C-matricen ikke kompliceret.

Da der i dette projekt arbejdes med en Leica 4500 anvendes specifikationerne hertil for at opstille C-matricen. Således beregnes σ_{Ri} og σ_{Si} som følger:

$$\sigma_{Ri} = \sqrt{\frac{0{,}00035^2}{0.5} + \left(\frac{0{,}002}{S_i}\right)^2}$$

$$\sigma_{Si} = \sqrt{\frac{0{,}005^2 + (0{,}120 * S_i * 10^{-3})^2 + 0{,}002^2}{1}}$$

S_i er afstanden fra opstillingspunkt til det 'observerede' punkt i meter og er derfor afhængig af det enkelte punkt.

9.1.3 Kovariansmatrice

Efter at have opstillet A- og C-matricen beregnes kovariansmatricen (Σ_x). Dette gøres ved at sætte a priori spredningen til værdien 1, hvilket medfører, at matricen beregnes vha. formlen:

$$\sum_x = (A^T CA)^{-1}$$

hvor, A^T **er A-matricen transponeret**
C **er C-matricen**
A **er A-matricen**

[Cederholm, 2000]

For at tegne konfidensellipser anvendes oplysninger fra kovariansmatricen, hvor variansen til punkterne findes i diagonalen, som illustreret på figur 9.4. Figuren viser, at varianserne i henholdsvis X og Y findes i diagonalen. På pladserne i umiddelbart tilknytning til varianserne findes kovarianserne mellem X og Y, hvilket ses i figur 9.4, hvor variansen til X(σ^2_{X1}) og Y(σ^2_{Y1}) til et punkt er angivet. Kovariansen er σ_{Y1X1}. I kovariansmatricen er der således varianser og kovarianser til de punkter, som inkluderes i beregningerne. Udover kendte -, ukendte - og opstillingspunkter findes der ligeledes en varians til kredselementet.

$$\sum_x = (A^T CA)^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma^2_{Y1} & \sigma^2_{Y1X1} & & & & & \\ \sigma^2_{Y1X1} & \sigma^2_{X1} & & & & & \\ & & \sigma^2_{Y2} & \sigma^2_{Y2X2} & & & \\ & & \sigma^2_{Y2X2} & \sigma^2_{X2} & & & \\ & & & & \ddots & & \\ & & & & & \ddots & \\ & & & & & & \ddots \\ & & & & & & \sigma^2_Z \end{bmatrix}$$

Figur 9.4: Figuren skitserer elementer i en kovariansmatrice. Varianserne til Y og X findes i diagonalen, og kovariansene mellem de to koordinater findes udenfor diagonalen i tilknytning til de to. Sidste element er kredselementet.

Kovariansmatrice i dette projekt
Efter at have beregnet A- og C-matricen, beregnes kovariansmatricen i Matlab "scriptet". I dette tilfælde er der således varianser og kovarianser til alle punkter og syv kredselementer. De syv kredselementer skyldes, at der er syv opstillinger. Kredselementet anvendes ikke til beregning af konfidensellipsernes storakser og lilleakser, hvorfor disse ikke behandles nærmere.

9.1.4 Konfidensellipser

På baggrund af kovariansmatricen er det yderligere muligt at konstruere konfidensellipser. For at kunne konstruere disse er det nødvendigt at kende størrelsen på konfidensellipsens storakse a og lilleakse b. For at orientere ellipsen anvendes vinklen theta, som angiver vinklen mellem storaksen og koordinatsystemets X-akse. Ved at tegne konfidensellipser er det muligt visuelt at vurdere, målingernes punktspredninger i de forskellige akser.
På baggrund af dette ønskes et testnet opstillet for dermed at beregne kovariansmatricen for opmålingerne samt efterfølgende at konstruere konfidensellipser herfor.

Beregning af konfidensellipser

I det udarbejdede "script" beregnes varianserne og kovarianserne til hvert punkt, hvorefter der anvendes et "script" udarbejdet af Peter Cederholm, lektor ved Aalborg Universitet, til beregning af a, b og theta. Resultatet heraf køres igennem et andet "script" udarbejdet af samme til udtegning af konfidensellipser. Beregningerne af a- og b-værdierne samt theta baseres på følgende formler.

$$\sigma_{X'} = a = \sqrt{\frac{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2}{2} + \sqrt{\frac{(\sigma_X^2 - \sigma_Y^2)^2}{4} + \sigma_{YX}^2}} \qquad \sigma_{Y'} = b = \sqrt{\frac{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2}{2} - \sqrt{\frac{(\sigma_X^2 - \sigma_Y^2)^2}{4} + \sigma_{YX}^2}}$$

$$tan\, 2\theta = \frac{2\sigma_{YX}}{\sigma_X^2 - \sigma_Y^2}$$

hvor, σ_X^2 **,** σ_Y^2 **og** σ_{YX} **er værdierne fra kovariansmatricen**

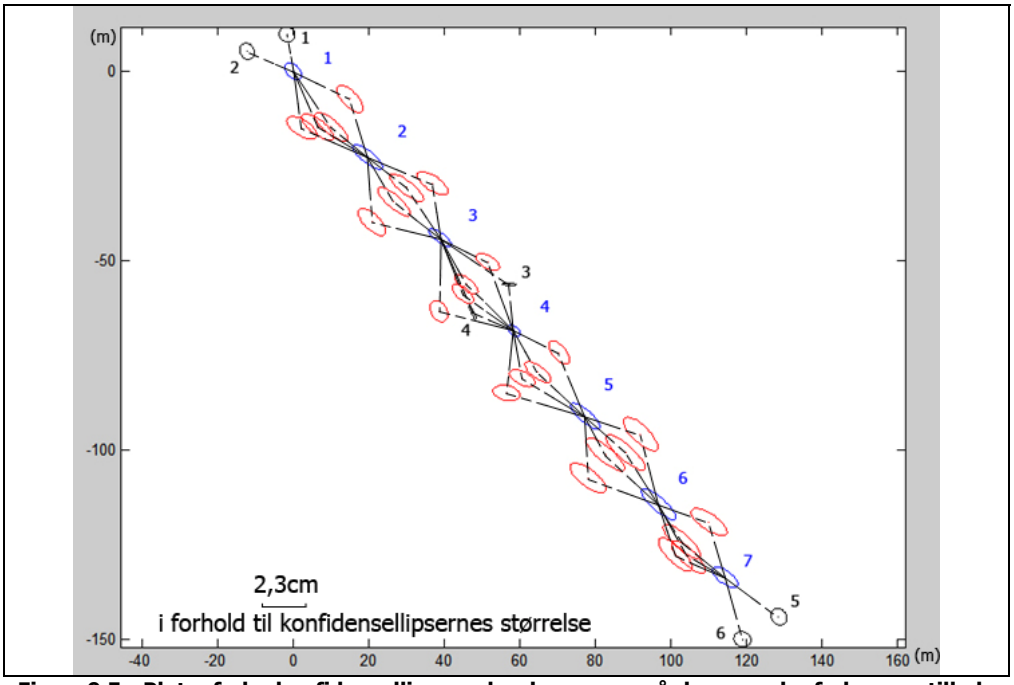
[Cederholm, 2000]

9.2 Vurdering

I dette afsnit vurderes på resultaterne opnået gennem testberegningen. Vurderingerne foretages på baggrund af de udarbejdede testberegninger. Plot af de opstillingerne ses i bilag C - CD.

9.2.1 Plot af konfidensellipse

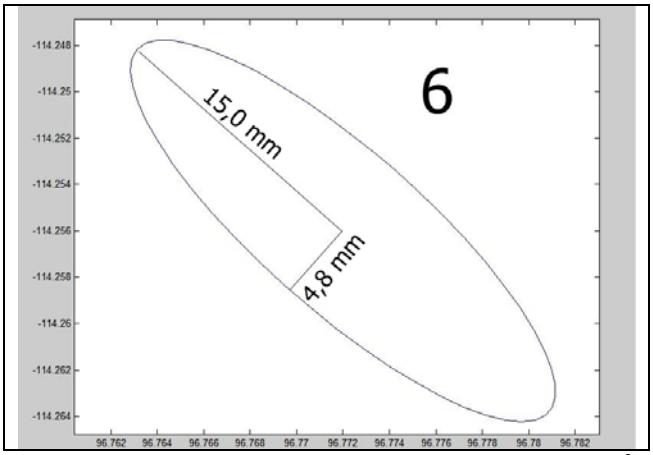
Resultatet i XY-planet er som vist i figur 9.5, hvor figuren er et plot af hele strækningen. A- og b-værdierne til beregningerne er forstørret med en faktor 500. Det bemærkes, at opstillingerne 1 og 4 har de laveste $\sigma_{Y'}$ og $\sigma_{X'}$, på 4,1 mm og 6,6 mm for opstilling 1 og 3,3 mm og 6,1 mm på opstilling 4. Disse er punkter som er direkte tilknyttet fikspunkter. Ligeledes observeres opstillingspunkterne 2, 5 og 6 som værende de mindst præcise. Disse har værdier for $\sigma_{Y'}$ og $\sigma_{X'}$, optil 4,8 mm og 15,0 mm. Opstillingen, hvor $\sigma_{X'}$ er 15,0 mm, er opstilling 6, hvor der er henholdsvis en og to sammenknytninger i forhold til fikspunkter.



Figur 9.5: Plot af de konfidensellipser, der beregnes på baggrund af den opstillede kovariansmatrice. De sorte ellipser er fikspunkter markeret med et sort tal. Opstillingspunkterne er markeret med blåt efter samme princip, og de røde ellipser er sammenknytningspunkter. Aksernes intervaller er angivet i meter, og værdierne a og b er skaleret med en faktor 500.

Plottet viser, at $\sigma_{X'}$, for opstillinger, hvor der ikke er direkte tilknytning til fikspunkter, er betydelig større end opstillinger med direkte tilknytning. Konfidensellipserne er orienteret således, at $\sigma_{X'}$ gennemgående følger skinnernes længderetning, og størrelsen på $\sigma_{X'}$ på de mindst præcise opstillinger er ca. 3 gange så stor som for $\sigma_{Y'}$. Observeres sammenknytningspunkterne, er det muligt at konstatere, at størrelsen på $\sigma_{X'}$ stiger ved sammenknytning uden fikspunkter. Dette medfører, at det er nødvendigt at have korte afstande mellem fikspunkter. Det bemærkes, at opstilling 6 er den opstilling, der har den højeste punktspredning, hvorfor denne behandles

nærmere. Figur 9.6 er et zoom i konfidensellipseplottet, hvor $\sigma_{Y'}$ og $\sigma_{X'}$, er påskrevet i ellipsen. Plottet viser, at opstillingspunktet har en langstrakt konfidensellipse, hvor størrelsen på $\sigma_{X'}$ er ca. 3 gange størrelsen på $\sigma_{Y'}$. For at undersøge størrelsen på konfidensellipsen er der lavet et plot uden skala, hvor der er zoomet helt ind på punktet. Det ekstra zoom er nødvendigt, da ellipserne er for små til at kunne visualisere størrelsen i større plot.



Figur 9.6: Plot over opstillingspunkt 6, hvor størrelsen på $\sigma_{Y'}$ og $\sigma_{X'}$ er anvist.

På figur 9.6 illustreres konfidensellipsen for opstillingspunkt 6, hvor det ses, at ellipsens $\sigma_{X'}$ på 15,0 mm og $\sigma_{Y'}$ 4,8 mm, hvilket skyldes sammenknytningspunkternes placering samt antallet af fikspunkter. Fikspunkternes placering har ligeledes en indflydelse, idet opstillingspunktet er placeret i forholdsvis kort afstand hertil, samt at fikspunkterne, hvortil de enkelte opstilling er knyttet, er placeret i kortafstand af hinanden.

9.2.2 Vurdering af test

Efter at have plottet konfidensellipserne er det muligt at vurdere, om disse er tilstrækkelige til at overholde banenormens krav. Resultaterne af testene viser, at konfidensellipserne for opstilling 6 er af en sådan størrelse, at det ikke vurderes, at præcisionen for opstillingspunktet er tilstrækkelige. Undersøges andre opstillinger, ses det, at punktspredningen til opstillingspunkterne forbedres markant, og ved opstillinger som tilknyttes fikspunkter, vurderes præcisionen at være tilstrækkelig til, at disse kan anvendes til opmålingerne og samtidig opnå et tilstrækkeligt resultat til at overholde banenormen. Det var inden opstillingen af testen forventet, at $\sigma_{X'}$ ville være større end $\sigma_{Y'}$, hvilket gennem testen er bekræftet. Det antages, at dette skyldes fikspunkternes placering samt mangel på overlap på sammenknytningspunkter. Præcisionen af opstillingerne kunne således forbedres, såfremt der tilføjes sammenknytningspunkter i form af veldefinerede objekter i en større afstand fra opstillingspunktet.
Det kan efter samme princip kontrolleres, hvorledes præcisionen af højden kan forventes at være, men da testen for XY-planet viser, at der er målinger, som ikke overholder den krævede præcision, kan det forventes, at en kontrol af højden giver samme resultat. Dette skyldes, at spredningen på den vertikale vinkel er den samme som spredningen på den horisontale. Det samme gælder for centreringsspredningen til "targets".

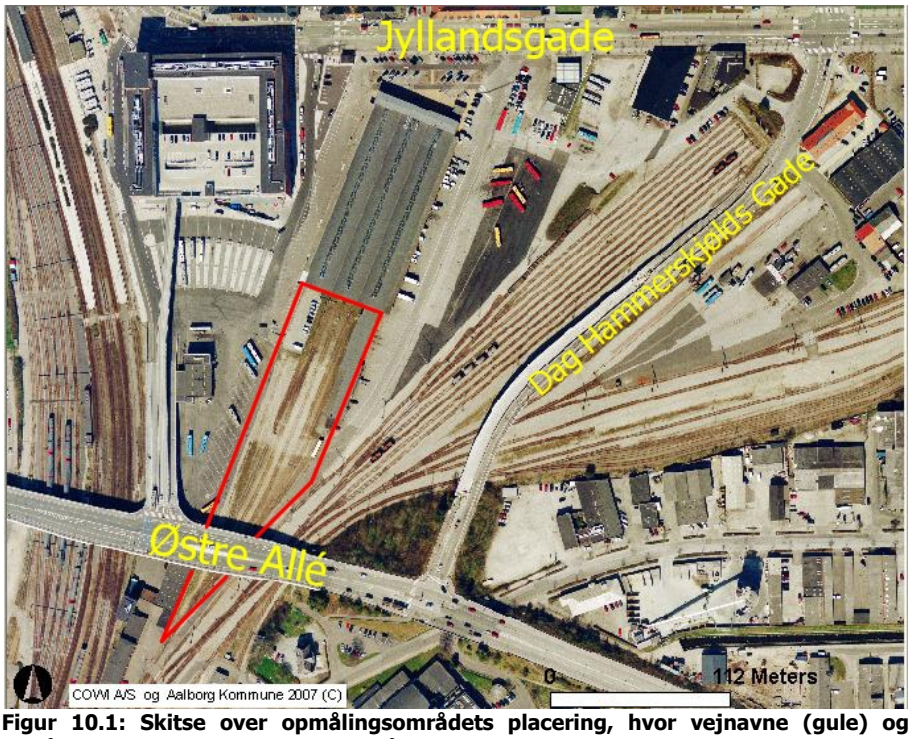
Testen er som nævnt udført samtidig med databehandling, hvilket ikke er hensigtsmæssigt, da det ikke er muligt at ændre målingerne, selvom testen viser, at der er opstillinger, som ikke defineres præcist nok til, at målinger derfra vil kunne anvendes med tilfredsstillende resultat.

10 Testområde og markarbejde

Dette kapitel har til formål at beskrive det testområde, der er stillet til rådighed, og det udførte markarbejde. Kapitlet beskriver opmålingsområdets placering og de objekter af interesse, der findes i området. Efterfølgende beskrives, hvordan opmålingerne er udført herunder hvilke problemer, der er opstået og de beslutninger, der er truffet gennem processen.

10.1 Opmålingsområde

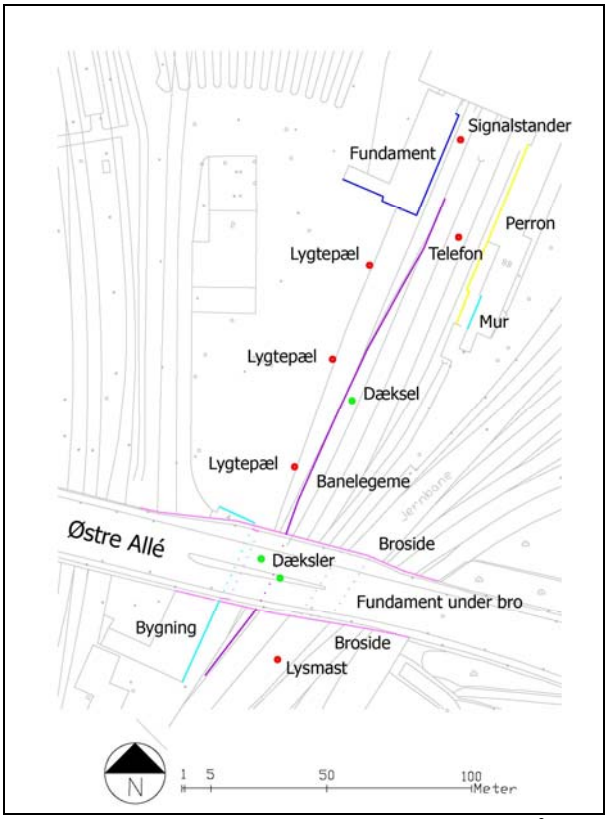
Projektgruppen har fået tildelt et nedlagt baneområde til udførelse af opmålinger. Det har derfor ikke været nødvendigt, med banevagter under opmålingerne, ligesom at projektgruppen har kunnet udføre opmålinger uden yderligere aftale.
Opmålingsområdet er lokaliseret ved den nedlagte godsbanegård i Aalborg og er skitseret på figur 10.1. Det tildelte område er omkredset af en rød linie, og de nærtliggende vejnavne er påført.
Der er fem spor i området, hvoraf de fire er uegnede til opmåling med banetrolje grundet ukrudt, sanddynger m.m.. Den femte banestrækning er ca. 175 m lang og er egnet til opmålingen. Området, hvor banen er placeret, er fladt, og der er ikke grøfter eller skråninger.
På den tildelte strækning er der ingen kurver men i stedet sving i form af sporskifter. I det tildelte område er der objekttyper som indgår i banenormen, men de er med enkelte undtagelser placeret i en afstand længere end 10 m fra banelegemet.



Figur 10.1: Skitse over opmålingsområdets placering, hvor vejnavne (gule) og områdets omkreds (rød linie) fremgår.

10.1.1 Objekter

Områdets forskellige objekter, som enten indgår i banenormen, eller som det er muligt at anvende som erstatninger herfor, beskrives i de følgende afsnit. Det beskrives ligeledes, hvordan objekterne måles og med hvilken nøjagtighed de skal måles, jf. banenormen. Objekterne er illustreret i figur 10.2.



Figur 10.2: Testobjekternes placering i området. Fundamentet (blå), perronforkant (gul), bygningsstrækninger (cyan), mast, telefon og lygtepæle (rød), broelementer (pink) og sporforløbet (lilla).

Skinner
Baneforløbet i opmålingsområdet er 175 m langt og passerer tre skiftespor. Skinnerne skal måles med en punktspredning på 5 mm i plan og 5 mm i højden.

Perron forkant
I den nordlige ende af området er der placeret en perron på den østlige side af sporet, hvorfor det har været muligt at måle denne med ved skanningerne. Perronen er af beton, og overfladen er derfor forholdsvis ru. Perronen er placeret i en afstand af ca. 23 m fra sporet. Ifølge banenormen skal perronens forkant positioneres med en punktspredning på 1 cm i planen og 1 cm i højden.

Lysmast
Øst for sporet er der placeret en lysmast, som er et eksempel på den mastetype, der typisk anvendes langs jernbanespor i Danmark, specielt i områder hvor der er køreledninger placeret over banen. Masten er firkantet og udarbejdet i metal, hvorfor overfladen er glat, hvilket kan give problemer ved opmåling med laserskanning. Afstanden mellem banestykket og masten ca. 20 m. Master til køreledninger skal positioneres med en nøjagtighed på 2 cm i planen og 1 cm i højden, mens fundamentet hertil skal positioneres med en nøjagtighed på 1 cm i planen og 1 cm i højden.

Brønddæksler
Der er placeret tre brønddæksler inden for testområdet. Det ene brønddæksel er beliggende mellem skinnerne og er forhøjet i forhold til terræn, mens de andre to brønddæksler er placeret i højde med terræn. De to sidstnævnte er placeret henholdsvis ca. 8 m og ca. 1,5 m fra banelegemet. Dækslet mellem skinnerne er af beton, og de to andre er af jern. Dækslerne skal måles med en nøjagtighed af 2 cm i planen og 1 cm i højden.

Bro (underføring) og støttefundamenter
I den sydlige ende af opmålingsområdet er der en underføring, hvor banestrækningen krydses af Østre Allé. Dette objekt skal jf. banenormen positioneres med en punktspredning på 2 cm i planen

og 1 cm i højden. Dog skal fundamentet positioneres med 1 cm i planen. Væsentligst for sådanne objekter er definitionen af broforløbet nærmest den målte banestrækning, selvom broens overkant ligeledes skal defineres.

Bygning
Ved perronen er der en bygning. Den er placeret ca. 25 m fra banelegemet. For at måle en bygning, som er tættere på banen, anvendes en mur situeret i det syd-vestlige hjørne af området. Muren er situeret 11 m fra banen. Bygningerne skal positioneres med en punktspredning på 2 cm i planen og 1 cm i højden.

Lygtepæle, signalstander og telefon
Vest for banelegemet er placeret tre lygtepæle. Disse objekter eksisterer under normale omstændigheder ikke langs banelegemerne, men anvendes af projektgruppen som substitution for skilte eller signaler for dermed at vurdere nøjagtigheden på sådanne. Lygtepælene er placeret ca. 14 m fra banen og er af metal.
Udover lygtepælene er der i den nordlige del af området en signalstander. Signalstandere skal normalt positioneres ved at positionere den nederste lygte, hvilket skal gøres med en punktspredning på 2 cm i planen og 1 cm i højden.
Yderligere er der en stander med en telefon i områdets nordlige del øst for skinnestrækningen. Denne ønskes positioneret som et signal. Standeren er af metal og skal positioneres med en punktspredning på 2 cm i planen og 1 cm i højden.

Fundament
Et fritliggende fundament er placeret i testområdets nordvestlige hjørne. Dette er placeret ca. 5 m fra skinnerne og er konstrueret i beton. Fundamentet skal positioneres med en punktspredning på 2 cm i plan og 1 cm i højden.

Rumper
I området eksisterer der tre rumper, som er krumme metalplader til afdækning af mekanik i skiftespor. Rumperne skal måles med en punktspredning på 2 cm i planen og 1 cm i højden. Rumperne er jævnt fordelt på banelegemet.

Skiftespor
Der er tre skiftespor i området. Projektgruppen har fravalgt yderligere at beskæftige sig med måling af skiftespor, da fokus er lagt på integration af målesystemet og de øvrige objekter i området.

10.1.2 Vurdering af opmålingsområde

For at gennemføre opmålinger med målesystemet bestående af laserskanner og banetrolje er det nødvendigt at arbejde i et område, hvor der eksisterer et banelegeme og tilhørende signaler. Det er samtidig nødvendigt, at banelegemet ikke er en lige strækning, da troljens forskellige sensorer gerne skulle testes. Signalerne skal have en afstand, der ligner den afstand, som objekterne har på banestrækninger, hvor systemet forventes anvendt.
Der er ingen kurver i det tildelte område, men den anvendte sporstrækning passerer tre skiftespor, hvorfor det er muligt at kontrollere, om troljen er i stand til at måle kurver tilstrækkeligt præcist. Banestrækningens længde på 175 m vurderes af projektgruppen til at være tilstrækkeligt til at vurdere systemet og kontrollere om nøjagtighederne fra banenormen kan overholdes.

Området indeholder objekter, som indgår eller som kan substituere objekter i banenormen. Af disse objekter er der nogle, som har en længere afstand til sporet end det kan forventes ved banemåling af et reelt banelegeme i brug, jf. kapitel 3 - *Banemåling*. Det er således størstedelen af objekterne, der er placeret mere end 4 m fra spormidten. Det vurderes dog, at det også er muligt at definere disse ved kortere afstand, såfremt disse objekter kan defineres i den aktuelle afstand. Det var ønsket at kontrollere opmålingen af køreledninger, men da der ikke eksisterer køreledninger i denne del af Jylland, har dette ikke været muligt. Ligeledes er der ingen eksisterende fikspunkter i testområdet, hvorfor det er nødvendigt at etablere disse ved hjælp af netmåling. Det have været interessant at kontrollere troljen på en strækning med grøfter, men da det ikke har været muligt at udføre opmålingerne på en banestrækning under anvendelse, vurderer projektgruppen, at testområdet har været tilfredsstillende til kontrol af banemålingssystemet.

10.2 Indledende overvejelser

Før opmålingerne påbegyndes, er det nødvendigt at tage stilling til følgende problemstillinger for dermed at foretage kvalitative målinger. Punkters definitionsnøjagtigheder skal behandles for at kunne vurdere, om det reelt er muligt at foretage opmålinger, der overholder banenormen. For at overholde banenormens krav er det ligeledes nødvendigt at foretage overvejelser omkring de objekter, der skal måles. Dette skyldes, at laserskanneren er afhængig af refleksion fra de forskellige objekter. Ligeledes skal projektgruppen overveje hvilke punkttætheder, der skal anvendes og på hvilke afstande, der måles, da dette har indflydelse på, om objekter kan defineres i punktskyen, og herved hvor nøjagtigt positioneringen kan udføres. Dette gælder for detailpunkter og sammenknytningspunkter. Da der er objekter, som er placeret i terræn, er der en sandsynlighed for, at disse ikke genkendes i punktskyen. Dette medfører, at det er nødvendigt at overveje succeskriteriet for fuldstændigheden af modellen.

10.2.1 Definitionsnøjagtigheder

For at vurdere, om det er realistisk at overholde banenormens krav, vurderes der på objekterne for at bestemme definitionsnøjagtigheden. Forkanten på perronen er en veldefineret flade med en højde på ca. 1 m. Det forventes derfor, at fladen kan defineres jf. de i banenormen opstillede krav, da der måles punkter såvel op siden af fladen som ovenpå. Lysmasten er ligeledes en veldefineret flade, som har en bredde på 40 cm. De brønddæksler, som eksisterer i området, er veldefinerede. Der er dog tvivl om, hvorvidt disse kan opmåles med laserskanner, da to af dækslerne er placeret i niveau med terrænet. Underføringen er ligeledes et veldefineret objekt, hvor det er muligt at observere broens fra dennes underside og fra siden. Dette medfører, at det er muligt at konstruere en fladeskæring til definition af hjørnet. Det samme er gældende for broens fundament samt de i området placerede bygninger. De eneste punkter, der ikke vurderes til at være veldefinerede, er rumperne. En illustration af en rumpe ses i figur 10.3, hvor det ses, at rumpens midtpunkt ikke er veldefineret, men et skøn. Det vurderes dog, at rumpens centrum kan skønnes indenfor banenormens krav til nøjagtigheder, der er 2 cm i plan og 1 cm i højde.

Figur 10.3: En rumpe, hvor det ses, at objektet ikke er veldefineret. Punktet måles i centrum efter skøn.

10.2.2 Refleksion af laserstråle

Udover definitionsnøjagtigheder har et givent objekts overflade en indflydelse på de målinger, der foretages med laserskanner. Disse faktorer er objektets ruhed og farve. Ved ruhed forstås, om et objekt har struktur, eller om det har glatte overflader. Objekter som rumper og lygtepæle har en glat overflade, hvilket kan influere på refleksionen af laserstrålen. De betonflader er i området har meget struktur på overfladen og er derfor ru og giver bedre refleksion end ved glat beton.

10.2.3 Overvejelser omkring punkttætheder

For at kunne måle punkter vha. laserskanning er det nødvendigt, at der reflekteres flere punkter fra samme objekt. Det er derfor vigtigt at overveje hvilke punkttætheder, der minimalt skal anvendes for at opnå definition af objekterne. De mindste objekter i testområdet er lygtepælene, som er runde metalpæle med en diameter på 10 cm. Da pælene er placeret i en afstand af ca. 14 m fra banen, og da det skal sikres, at der skal foretages mindst tre målinger til objektet, vurderes punkttætheden at skulle være 2,5 mm på 14 m.
Vinklen mellem to målinger skal derfor være maksimalt:

$$\alpha = tan^{-1}\left(\frac{2,5}{1400}\right) = 0,102°$$

hvor, α er vinklen mellem to målinger

For at kunne definere lygtepælene antages det af projektgruppen for værende nødvendigt at måle med en punkttæthed på 0,102°. Dette svarer til, at der måles 3519 punkter pr. rotation.
En tilsvarende vurdering er det nødvendigt at foretage for sammenknytningspunkter og fikspunkter. Disse opmåles vha. specialfremstillede "targets" som efterfølgende positioneres vha. en bestemt algoritme i Cyclone. De anvendte "targets" er cirkulære med en diameter på 15,24 cm. Da det ikke er oplyst hvor mange punkter, der skal måles på et "target" for, at algoritmen fungerer, henvises der til at targets, jf. specifikationerne, kan måles med en punktspredning på 3,5 mm på 25 m. Dette skyldes, at der anvendes finskan på alle targets. Laserskanneren har fire standardpunkttætheder, henholdsvis lav, medium, høj og højest. I figur 10.4 ses hvilke punkttætheder disse indstillinger er tildelt.

Punkttætheder	Lav	Middel	Høj	Højest
Horisontal	1.250	5.000	10.000	20.000
Vertikal	538	2.152	4.305	8.611

Figur 10.4: Antallet af punkter, der opmåles horisontalt og vertikalt ved laserskannerens standardindstillinger.

Ved gennemgang af punkttætheder konkluderes, at standardindstillingen 'Lav' ikke er anvendelig til at definere de objekter, der ønskes defineret på baggrund af opmålingerne. Det fremgår af figuren, at både 'Middel', 'Høj' og 'Højest' alle kan forventes at være egnede til opgaven.

10.2.4 "Footprint"

Definitionen af objekter afhænger ikke udelukkende af punkttætheden men også af laserstrålens "footprint". Det beskrives i specifikationerne, at "footprintet" er 5 mm på en afstand af 10 m og 8,5 mm på en afstand af 25 m. Da "footprintet" antages som værende en lineær stigende størrelse, vil "footprintets" størrelse på en afstand af 14 m være 5,9 mm. Det vurderes at være tilfredsstillende til at gennemføre målingerne.

10.3 Markarbejde

I dette afsnit beskrives, hvorledes opmålingerne er udført. Ud over målingen med banemålingssystemet er der yderligere udført netmåling af 'fiktive' fikspunkter og en detailopmåling. Fikspunkter er målt for at kunne positionere målinger fra systemet absolut og detailopmålingen er foretaget for at være i stand til at vurdere målingerne med banemålingssystemet.

10.3.1 Netmåling

Opmålingen af oprettede 'fikspunkter' i området blev udført som netmåling for derved at skabe et stærkt net og nøjagtige koordinater til fikspunkter vha. udjævning. Med netmålingen opnås koordinater med en lav punktspredning i et lokalt system. Dette foretages med henblik på fiktivt at præsentere, hvordan banemålingssystemet positioneres absolut. Fikspunktsopmålingen foretages ved at måle nettet med totalstation, hvor der stilles op i alle seks punkter og sigtes til de øvrige fem. Disse målinger er udført med gennemslag for derved at eliminere kollimationsfejl og fejl på vertikalaksens indeksfejl. Det net, der konstrueres, fungerer som en simulering af fikspunkter ved banestrækninger, hvorfor der på et senere tidspunkt skal foretages en transformation herover for at opnå koordinater i et landsdækkende koordinatsystem.

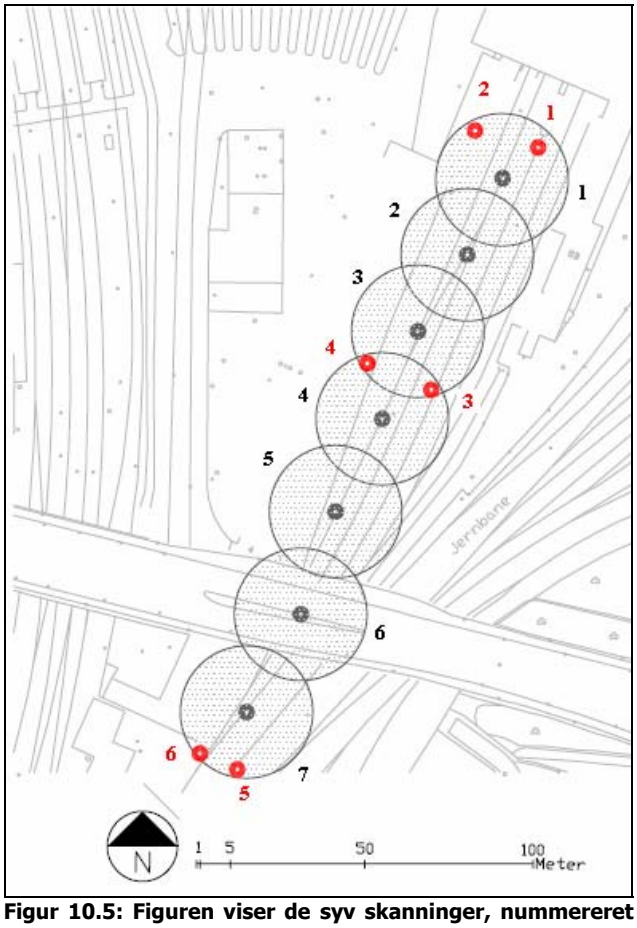
10.3.2 Detailopmåling

For at kontrollere resultatet at målingerne med trolje og laserskanner, er der udført detailopmåling. Denne detailopmåling er udført med totalstation og er ligeledes målt med en sats. For at minimere fejl, som skyldes, at prismet ikke er placeret eksakt over punktet, anvendes et miniprisme til alle målingerne. Detailopmålingen blev udført af to opstillinger med ca. lige lange sigter til fikspunkterne. De objekter, som er nævnt i afsnit 10.1.1 - *Objekter*, opmåles, og desuden måles punkter på terræn. Punkterne måles som foreskrevet i banenormen, hvilket generelt er i det punkt, hvor objektet er nærmest banelegemet.
Detailopmålingen udføres med det formål at kunne kontrollere målingerne udført med det samlede system. Dette gøres ved at sammenholde koordinater fra de konstruerede objekter med koordinater fra detailopmålingen, og der kan derved vurderes på koordinatdifferencen.
For at kontrollere skinnerne måles skinnernes øverste kant og skinnens inderside med intervaller på ca. 5 m. Dette medfører, at det er muligt at kontrollere data målt med troljen.
For at måle de utilgængelige punkter på broen anvendes reflektorløs måling med totalstation. Instrumentets trådkors placeres der, hvor operatøren observerer kanten af elementerne.

10.3.3 Opmåling med samlet system

Før opmålingerne påbegyndes, udføres en "on location" kalibrering af troljen. Denne kalibrering foretages ved, at troljen placeres på skinnerne, modsat den kørselsretning opmålingerne foretages, hvor sensorerne kalibreres internt i troljen. Efterfølgende vendes troljen og sensorerne kalibreres igen. Herefter er kalibreringen udført. De ønskede intervaller sættes til 10 cm og det vælges at udskrive data som kommasepareret fil.

Opmålingerne med det samlede system indledes med en skanning, hvor fikspunkt 1 og 2 samt sammenknytningspunkterne mellem opstilling 1 og 2 indgår, og der udføres skan af omgivelserne. Opmålingerne foretages med punkttæthederne middel, høj og højest for at finde ud af hvilken en af dem, der findes mest hensigtsmæssig i forhold til effektivitet og nøjagtighed. Efter endt skanning måles ca. 30 m med troljen for derved at stoppe denne og der skannes sammenknytningspunkter mellem opstilling 1 og 2, sammenknytningspunkter mellem opstilling 2 og 3 samt omgivelser. Dette gøres ligeledes med de tre nævnte punkttætheder. Denne procedure anvendes til og med sidste opstilling. For at få den bedst mulige bestemmelse af opstillingspunkterne og for at positionere modellen absolut, måles der til fikspunkter, hvor dette er muligt. Fra opstilling 1 måles til fikspunkt 1 og 2. Fikspunkterne 3 og 4 måles både fra opstilling 3 og 4 og fikspunkterne 5 og 6 måles fra opstilling 7, se figur 10.5.



Figur 10.5: Figuren viser de syv skanninger, nummereret med sort langs med banestrækningen og fikspunkterne, nummereret med rød, der skannes fra de opstillinger, hvor det er muligt.

Alle sammenknytningspunkter og fikspunkter signaliseres med "targets" for dermed at opmåle disse med høj præcision. For at placere de udpegede targets foretages et skan af omgivelserne, hvorefter det manuelt vælges, hvor i punktskyen targets er placeret. Der foretages opmålinger til "targets" i hver skanning, hvormed targets måles i både Middel, Høj og Højeste punkttæthed. Dette medfører, at det er muligt at sammenligne midle koordinater og derefter vurdere, om der er grove fejl i opmålingerne heraf.

Opmålingerne forløb ikke problemfrit, idet der opstod problemer med laserskanneren. Ved finskanning af sammenknytningspunkter og fikspunkter opstod der en fejl i skannerens software, som resulterede i, at der skulle opmåles forfra. Dette resulterede i, at opmålingerne varede to dage for et banestykke på 175 m. Problemerne vurderes, at skyldes fejl i softwaren, hvorfor det ikke vurderes at have indflydelse på det færdige resultat. Såfremt der tages udgangspunkt i de skanninger, der forløb som planlagt, varede et forløb indeholdende en skanning og 30 m måling med troljen ca. 20-30 minutter.

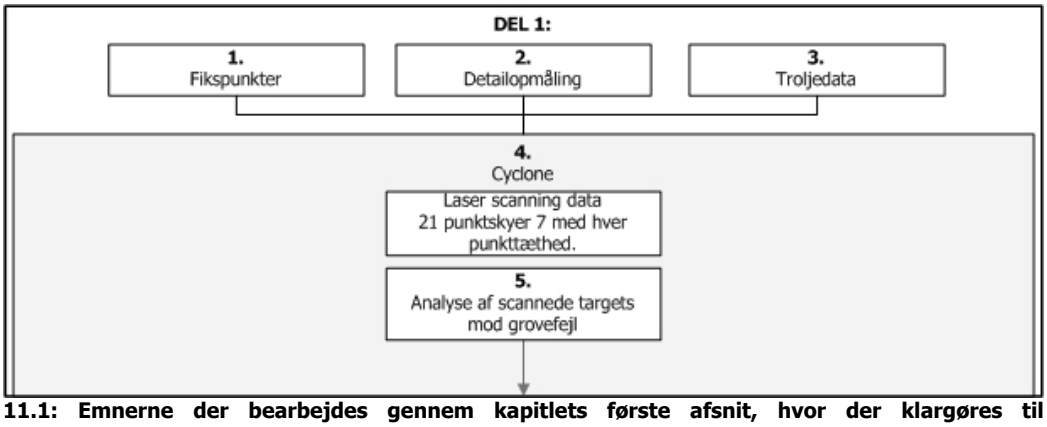
11 Databehandling og test

Dette kapitel omhandler den databearbejdning, der er foretaget efter det udførte markarbejdet. Kapitlet er delt op i fem afsnit, som behandler de syv kronologiske dele, arbejdsprocessen er forløbet i.
Data, herunder resultatfiler, fotografier, Matlab "scripts" osv. er at finde på bilag C – *CD* i mappen Data. Der er i alle undermapper placeret en tilhørende "læs_mig.txt" fil under hver af de respektive overskrifter. For at give et overblik gennem dette kapitel er der i starten af hvert afsnit placeret en figur der viser hvad der foretages af databehandling i dette afsnit. For et større overblik over hele databehandlingen er der i bilag D – *Struktur gennem databehandling* vedlagt et strukturdiagram, der viser hvordan databehandlingen udføres opdelt.

11.1 Klargøring af data

Dette afsnit omhandler databehandlingen af opmålingerne foretaget til positionering af de etablerede fikspunkter samt af den detailopmåling, der er udført i området. Efterfølgende omregnes troljedata således at der opnås koordinater til de opnåede målinger i et lokalt koordinatsystem, som beskrevet i kapitel 8 - *Systemopbygning*. Til beregning af disse data er der udarbejdet et "script" i Matlab, hvor resultatet eksporteres som koordinater der kan importeres i Cyclone. Inden påbegyndelse af sammenknytninger af punktskyer i Cyclone, kontrolleres skanningerne af "targets" for grove fejl i sammenknytnings- og fikspunkter.

Strukturen gennem afsnit 11.1 er illustreret i figur 11.1.



11.1: Emnerne der bearbejdes gennem kapitlets første afsnit, hvor der klargøres til databehandling.

11.1.1 Fikspunkter

Efter opmåling af fikspunktsnettet, er data fra de seks opstillinger udjævnet i Leica Geo-office. Herudfra udskrives en resultatfil, der beskriver udjævningen og de opnåede koordinaters nøjagtigheder. Det første der vurderes, er spredningen på vægtenheden, der er angivet som F-test i resultatfilen. Denne værdi skal helst ligge tæt på 1 og ligger i dette tilfælde på ca. 1,5, hvilket kan skyldes at punkterne antages bedre defineret end de egentlige er. Foruden spredningen på vægtenheden, vurderes de normaliserede residualer, som muliggør lokaliseringen af eventuelle grove fejl. Værdierne på de normaliserede residualer bør ikke overskride 3, da der dermed kan være tale om en grov fejl, hvilket er tilfældet med alle målinger i fikspunktsnettet. Det største normaliserede residual er på 2,59. De normaliserede residualer er angivet under W-test i

resultatfilen. Afslutningsvis vurderes de konfidensellipsoider, der udskrives i resultatfilen. Ellipsoiderne er udelukkende beskrevet ved værdier, herunder a, b og z. Disse er alle fundet acceptable, da den største z-halvakse har en værdi på 3 mm og den højeste værdi i planen er 1,7 mm. For yderligere oplysninger i resultatfilen angående udjævning af fikspunkter, se bilag C – CD.
Efter beregning af nettet og vurdering på resultaterne oprettes en koordinatfil, udledt heraf, til indlæsning i Cyclone.

11.1.2 Detailopmåling

Gennem klargøringen af data beregnes detailopmålingerne. Dette gennemføres ved anvendelse af TMK. Data anvendes til kontrol af de objekter, der modelleres i på baggrund af punktskyerne målt med laserskanning og de koordinater, der beregnes på baggrund af data fra troljen. Detailopmålingen er beregnet ved fastholdelse af koordinater til fikspunkterne opnået gennem Geo-office. Residualerne ved denne detailpunktsberegning ligger mellem 0 og 4 mm, hvilket er fundet acceptabelt. Resultatfiler af den udførte detailpunktsberegning fra TMK kan ses bilag C - CD

11.1.3 Troljedata

Som forklaret tidligere er der udarbejdet et "script" i Matlab hvori data målt med troljen omregnes til koordinater i to strenge, en streng pr. skinne.
Dette data udskrives af Matlab i en koordinatfil til indlæsning i Cyclone. I filen er der tilskrevet punktnumre til positionen af "Gauting"-sensorerne, for hver skanner position disse ligeledes er etableret i punkskyerne. Herigennem vil troljedata kunne transformeres ind i de samlede punktskyer for hver punktæthed over to punkter for hver skannerposition, i alt 14 transformationspunkter de to datasæt i mellem.

11.1.4 Laserskanning

Da der er udført tre skanninger fra hver position, hvor systemet har holdt stille, er det muligt at udføre en kontrol at de skannede "targets". Denne analyse viser, hvilke fejl der er opstået under skanning af disse, og gør det muligt at undersøge, hvor mange "targets" det ved lignende projekter kan rådes at anvende, når der er kendskab til fejlbidragene ved denne test. Der er skannet i alt 24 sammenknytningspunkter. Der kan midles koordinater hertil og udregnes spredninger for disse. Resultatet af midling og udregning af spredninger findes i bilag C - CD. Spredningerne, i vedlagte regneark, beregnes ved brug af følgende formel:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum \Delta X^2}{n}} \qquad RMSE = \sqrt{\frac{\sum \Delta Y^2}{n}} \qquad RMSE = \sqrt{\frac{\sum \Delta Z^2}{n}}$$

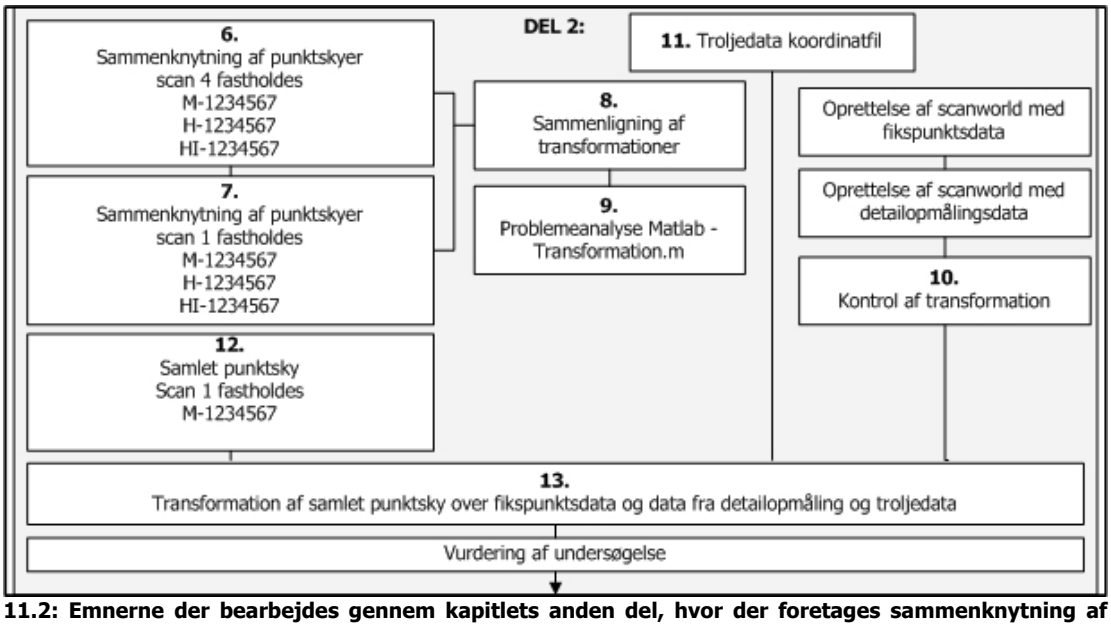
hvor, ΔX er forskellen på X-koordinaten i forhold til middelværdien
ΔY er forskellen på Y-koordinaten i forhold til middelværdien
ΔZ er forskellen på Z-koordinaten i forhold til middelværdien

Resultatet indikerer, om der er sket grove fejl ved skanningen, hvor der tages udgangspunkt i de nøjagtigheder der angives i specifikationerne, hvor σ_P sættes til 3,5 mm. Af resultater af beregningerne bemærkes, at én af opmålingerne af sammenknytningspunkt 213 overskrider tre gange spredningen og kategoriseres derfor som værende en grov fejl. Derfor anvendes punkt 213 ikke til sammenknytning af punktskyer i Cyclone. Yderligere undersøgelse af beregningerne ses i bilag C - CD.

11.2 Sammenknytning af punkskyer

I dette afsnit påbegyndes arbejdet i Cyclone, hvor skan med samme punkttæthed sammenknyttes til samlede modeller, der dækker hele banestykket i testområdet.

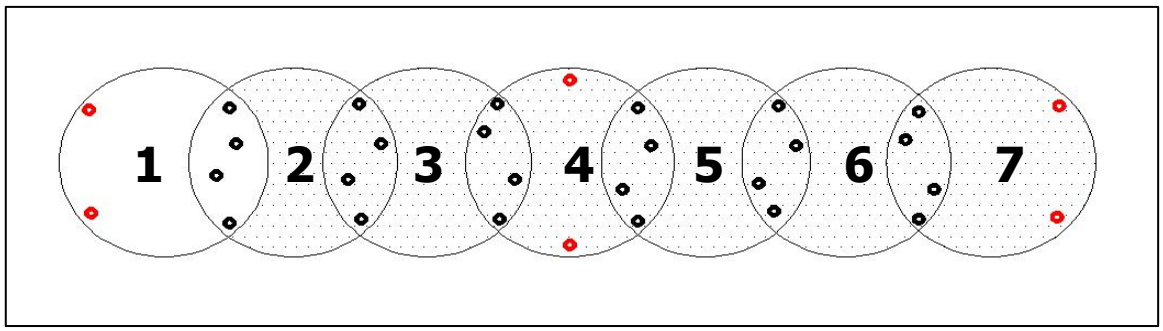
Strukturen gennem afsnit 11.2 er illustreret i figur 11.2.



11.2: Emnerne der bearbejdes gennem kapitlets anden del, hvor der foretages sammenknytning af punktskyer.

De skan, der sammenknyttes, indlæses og der vælges et primært skan, hvis koordinatværdier fastholdes ved transformationen. Således er der syv mulige kombinationer af sammenknytninger. Det findes interessant at analysere, hvilken kombination der resulterer i mindste fejlbidrag, eller om kombinationsrækkefølgen er ubetydelig. For at analysere dette, tages udgangspunkt i to situationer, hvor det i den første vælges at fastholde skan 1 og det i den anden vælges at fastholde skan 4. De to situationer vælges på baggrund af antagelsen om at et skan fastholdt i begyndelsen eller slutningen af modellen resulterer i en større fejlophobning end hvis det midterste skan fastholdes.

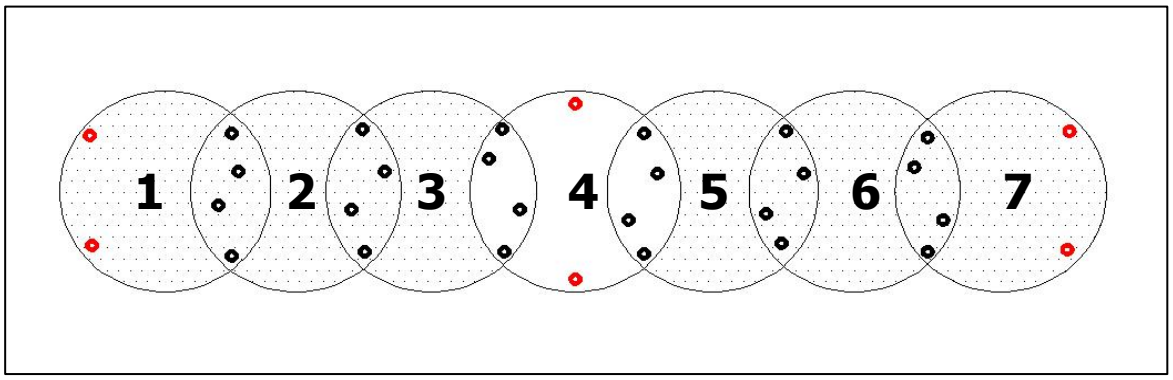
Fastholdelse af skan 1.
Skan 1 fastholdes, hvorefter de resterende seks skan transformeres ind over dette. Dette udføres for hver af de tre anvendte punkttætheder. Figur 11.3 viser en principskitse af situationen. Det ses af figuren at skan 1 fastholdes og at de andre skan knyttes hertil.



Figur 11.3: Principskitse af de syv udførte skanninger. Sammenknytningen er foretaget med skan 1 som primært skan, hvilket illustreres ved, at dette skan ikke er markeret med prikker. De sorte punkter er sammenknytningspunkter, og de røde cirkler illustrerer fikspunkter.

Ved udførelsen af disse sammenknytninger angives i Cyclone, hvilke residualer der er på de anvendte sammenknytningspunkter. Resultatet af denne kombination findes på bilag C - CD under "Situation 1".

Fastholdelse af skan 4.
Efterfølgende fastholdes skan 4, og de seks resterende skan transformeres ind over dette. Således transformeres tre skan i hver retning ind over skan 4. Dette udføres ligeledes i alle tre punkttætheder. Figur 11.4 viser en principskitse af denne situation.



Figur 11.4: Principskitse af de syv udførte skan. Sammenknytningen foretages med skan 4 som primært skan, hvilket illustreres ved, at dette skan ikke markeres med prikker. De sorte punkter er sammenknytningspunkter, og de røde punkter illustrerer fikspunkter.

Ved udførelsen af disse sammenknytninger angives i Cyclone, hvilke residualer der er på de anvendte sammenknytningspunkter. Resultatet af denne kombination findes på bilag C - CD under navnet "Situation 2".

For at vurdere hvilken betydning rækkefølgen af sammenknytninger har, transformeres de to kombinationerne sammen. På baggrund af transformationerne beregnes residualer til de enkelte punkter. Såfremt disse residualer alle er 0 indikerer dette at rækkefølgen er uden betydning. Hvis

residualerne ikke er 0, kan de to modeller transformeres ind over fikspunkterne, for dermed at kontrollere, hvilken der har bedst overensstemmelse med fikspunkterne. Dette arbejde udføres på de tre punkttætheder, for dermed at have tre sammenligningssituationer til vurdering. På figur 11.5 ses et af resultaterne af transformationen mellem modellerne. Hvis der observeres på søjlen 'Error' og 'Error Vector' bemærkes at alle værdier har værdien 0, hvilket betyder at valget af rækkefølgen til sammenknytning er uden betydning.

Constraint ID	ScanWorld	ScanWorld	Weight	Error	Error Vector
TargetID: 1	M1-ny-------...	M4-ny	1.0000	0.000 m	(0.000, 0.000, 0.000) m
TargetID: 2	M1-ny-------...	M4-ny	1.0000	0.000 m	(0.000, 0.000, 0.000) m
TargetID: 3	M1-ny-------...	M4-ny	1.0000	0.000 m	(0.000, 0.000, 0.000) m
TargetID: 4	M1-ny-------...	M4-ny	1.0000	0.000 m	(0.000, 0.000, 0.000) m
TargetID: 5	M1-ny-------...	M4-ny	1.0000	0.000 m	(0.000, 0.000, 0.000) m
TargetID: 6	M1-ny-------...	M4-ny	1.0000	0.000 m	(0.000, 0.000, 0.000) m

Figur 11.5: Skærmbillede fra Cyclone, der viser resultatet af transformationen mellem en model konstrueret med skan 1 fastholdt og en model af samme punkttæthed med skan 4 fastholdt. Det bemærkes at alle residualer er 0, hvorfor valget af skan som fastholdes til sammenknytning er ligegyldigt.

11.2.1 Transformation af troljedata

Når de forskellige skan er samlet i én model har projektgruppen forsøgt at transformere troljens koordinater ind over de 14 punkter, der findes i modellen (to for hver skannerposition). Dette gøres for at vurdere troljens målinger og for visuelt at se troljens placering af skinnerne. Ved transformationerne kommer følgende resultat, jf. figur 11.6.

Constraint ID	ScanWorld	ScanWorld	Type	Status	Weight	Error	Error Vector
TargetID: 7001	SamlingHI1	troljedata	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.671 m	(0.343, 0.576, -0.036) m
TargetID: 7002	SamlingHI1	troljedata	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.666 m	(0.373, 0.552, -0.020) m
TargetID: 7003	SamlingHI1	troljedata	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.039 m	(0.016, 0.006, 0.035) m
TargetID: 7004	SamlingHI1	troljedata	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.119 m	(-0.070, 0.084, 0.047) m
TargetID: 7005	SamlingHI1	troljedata	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.750 m	(-0.498, -0.560, 0.028) m
TargetID: 7006	SamlingHI1	troljedata	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.750 m	(-0.466, -0.587, 0.040) m
TargetID: 7007	SamlingHI1	troljedata	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.345 m	(-0.224, -0.258, -0.045) m
TargetID: 7008	SamlingHI1	troljedata	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.345 m	(-0.232, -0.252, -0.036) m
TargetID: 7009	SamlingHI1	troljedata	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.222 m	(-0.084, -0.202, -0.037) m
TargetID: 7010	SamlingHI1	troljedata	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.219 m	(-0.090, -0.198, -0.027) m
TargetID: 7011	SamlingHI1	troljedata	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.396 m	(0.312, 0.244, 0.010) m
TargetID: 7012	SamlingHI1	troljedata	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.397 m	(0.316, 0.240, 0.016) m
TargetID: 7014	SamlingHI1	troljedata	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.469 m	(0.305, 0.356, 0.025) m

Figur 11.6: Resultatet af transformationen af troljedata ind i skannermodellen med de 14 punkter. Det bemærkes at transformationen resulterer i høje residualer.

Som det kan ses i figur 11.6 opnås høje residualer på alle punkter der transformeres over, hvor dog residualerne på højden, holder sig på maksimalt 4,7 cm. Yderligere har projektgruppen bemærket at troljens datastreng ikke drejer nok horisontalt i modellen, når der transformeres. Med dette menes at koordinatstrengen er for lige. Dermed ligger koordinatstrengen længere fra sporet i visse punkter end det er angivet ved transformationen. Dette giver allerede på nuværende tidspunkt i processen en indikation af at troljens målinger ikke er gode i horisontalretningen, men dette behandles videre senere i kapitlet.

11.2.2 Transformation over fikspunkter

Efter at have kontrolleret betydningen af rækkefølgen af sammenknytningen transformeres modellen ind over fikspunkterne for dermed at analysere på nøjagtigheden af modellen. Undersøges residualerne for sammenknytningerne, bemærkes at residualerne er acceptable. Der er dog fem punkter, hvor residualerne er mellem 9-11 mm. Resultaterne af sammenknytningen af modellen hvor skan 1 fastholdes i punktæthed Middel ses i figur 11.7. Nummeret på de sammenknytningspunkter angives i søjle 1. Søjlerne 2 og 3 angiver henholdsvis det skan som transformeres over og det skan som transformeres. Søjlen 'Weight' angiver den vægt punktet er tildelt. Punkterne er alle vægtet lige, da det vurderes, at punkterne har samme nøjagtighed, da alle punkter er opmålt ved finskan. Søjlerne 'Error' og 'Error Vector' angiver residualerne samt residualernes orientering. Det ses af figuren at transformationen af M6 over M5 resulterer i residualer på 6-11 mm. Denne sammenknytning er den, der har størst residualer. Resultatfiler fra de resterende sammenknytninger er at finde i bilag C- CD.

Constraint ID	ScanWorld	ScanWorld	Type	Status	Weight	Error	Error Vector
TargetID: 200	M1	M2	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002 m	(0.000, 0.000, 0.002) m
TargetID: 201	M1	M2	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.004 m	(0.002, -0.001, -0.004) m
TargetID: 202	M1	M2	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.003 m	(-0.001, 0.003, 0.001) m
TargetID: 203	M1	M2	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002 m	(-0.001, -0.002, 0.000) m
TargetID: 204	M2	M3	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.005 m	(0.002, 0.001, -0.004) m
TargetID: 205	M2	M3	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.010 m	(-0.001, 0.001, 0.010) m
TargetID: 206	M2	M3	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.005 m	(-0.002, 0.001, -0.004) m
TargetID: 207	M2	M3	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.004 m	(0.000, -0.003, -0.002) m
TargetID: 208	M3	M4	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.003 m	(0.002, 0.003, -0.001) m
TargetID: 209	M3	M4	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.009 m	(0.005, -0.004, 0.007) m
TargetID: 210	M3	M4	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.009 m	(-0.006, 0.003, -0.006) m
TargetID: 211	M3	M4	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002 m	(-0.001, -0.002, 0.000) m
TargetID: 212	M4	M5	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002 m	(0.001, 0.001, -0.001) m
TargetID: 214	M4	M5	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002 m	(-0.002, -0.001, 0.001) m
TargetID: 215	M4	M5	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.001 m	(0.000, -0.001, -0.001) m
TargetID: 216	M5	M6	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.007 m	(-0.001, 0.001, 0.007) m
TargetID: 217	M5	M6	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.006 m	(0.002, -0.003, -0.005) m
TargetID: 218	M5	M6	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.011 m	(0.000, 0.002, -0.011) m
TargetID: 219	M5	M6	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.009 m	(-0.001, 0.000, 0.009) m
TargetID: 220	M6	M7	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.004 m	(0.001, 0.000, 0.004) m
TargetID: 221	M6	M7	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.002 m	(-0.001, 0.000, -0.002) m
TargetID: 222	M6	M7	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.004 m	(0.001, 0.002, -0.003) m
TargetID: 223	M6	M7	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.003 m	(-0.002, -0.003, 0.001) m

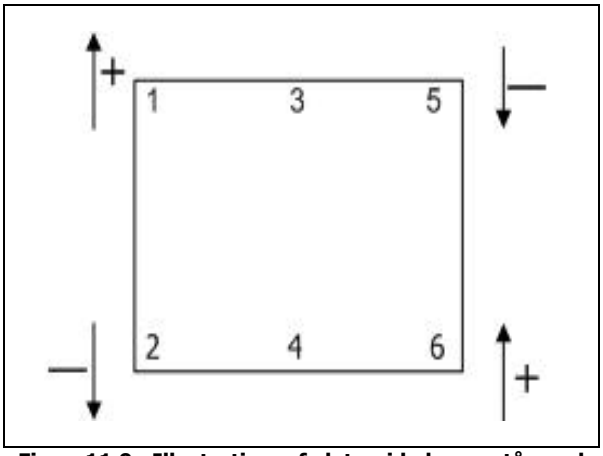
Figur 11.7: Residualerne på den udførte registrations af punkttætheder, hvor første søjle er nummeret på sammenknytningspunktet. Anden og tredje søjle indikerer, hvilke skan, der sammenknyttes. De sidste tre søjler er henholdsvis vægt af punktet, residualer og orientering af residualer.

Et umiddelbart overblik over resultatet indikerer at sammenknytningerne er forløbet tilfredsstillende, hvorfor modellen transformeres ind over fikspunkter. Denne transformation foretages over fikspunkterne 1, 2, 5 og 6, for dermed at orientere modellen absolut i forhold til de afstande, der ifølge banenormen kan forventes mellem fikspunkter. Resultatet af transformationen ses i figur 11.8, hvor det bemærkes at 'error' og 'error vector' er residualerne samt orienteringen af residualerne.

Constraint ID	ScanWorld	ScanWorld	Type	Status	Weight	Error	Error Vector
TargetID: 1	fri-fix	M1-ny---------...	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.027 m	(-0.001, -0.001, 0.027) m
TargetID: 2	fri-fix	M1-ny---------...	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.029 m	(0.001, -0.011, -0.027) m
TargetID: 5	fri-fix	M1-ny---------...	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.027 m	(-0.003, 0.006, -0.026) m
TargetID: 6	fri-fix	M1-ny---------...	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.027 m	(0.003, 0.005, 0.026) m

Figur 11.8: Skærmbillede af resultatet fra transformationen af modellen over fikspunkterne 1,2,5 og 6. Første søjle angiver punktnummeret. Søjlerne 'Scanworld' angiver henholdsvis hvilken fil der er transformeret over og hvilket fil der er transformeret. 'Weight' viser at alle punkter er vægtet ens. Søjlen 'Error' samt 'Error Vector' illustrerer de residualer der er på punkterne efter transformation og i hvilken retning disse er orienteret.

Ved at vurdere residualerne bemærkes, at residualerne har en værdi på ca. 2,7 cm, hvilket ikke er tilfredsstillende til at målingerne vil kunne overholde nøjagtighedskravene i banenormen. Ved at studere fejlvektoren 'Error Vector' bemærkes at der er 2,6-2,7 cm residualer i højden på alle punkterne. Yderligere bemærkes at der er et vrid i modellen. Dette observeres da residualerne for punkterne er modsatrettede.
Med modsatrettede menes, som det illustreres på figur 11.9, at punkt 1 og 6 har positive residualer og 2 og 5 har negative af samme størrelse. Punkt 2 i forhold til punkt 1 og punkt 5 i forhold til punkt 6.



Figur 11.9: Illustration af det vrid der opstår ved transformation af modellen over fikspunkter. Pilene indikerer hvor residualerne er positive og negative.

For at undersøge om vriddet opstår i den ene ende af modellen eller den anden, splittes modellen op i to dele ved at anvende de to fikspunkter etableret midt på strækningen. Den ene del er en model mellem skan 1-4, den anden mellem skan 4-7. Resultatet af transformationerne ses i figur 11.10, hvor resultaterne fra transformationen af skan '1-

Sammenknytning 1-2-3-4

Constraint ID	ScanWorld	ScanWorld	Weight	Error	Error Vector
TargetID: 1	fri-fix	M1-2-3-4	1.0000	0.013 m	(-0.001, 0.005, 0.012) m
TargetID: 2	fri-fix	M1-2-3-4	1.0000	0.015 m	(0.002, -0.009, -0.012) m
TargetID: 3	fri-fix	M1-2-3-4	1.0000	0.011 m	(0.004, -0.001, -0.010) m
TargetID: 4	fri-fix	M1-2-3-4	1.0000	0.013 m	(-0.004, 0.005, 0.011) m

Sammenknytning 4-5-6-7

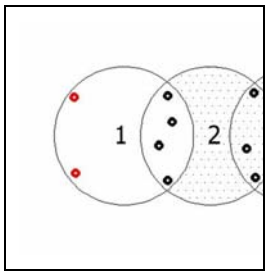
Constraint ID	ScanWorld	ScanWorld	Weight	Error	Error Vector
TargetID: 3	fri-fix	trans-M4567	1.0000	0.023 m	(0.004, 0.001, 0.023) m
TargetID: 4	fri-fix	trans-M4567	1.0000	0.023 m	(-0.004, 0.001, -0.023) m
TargetID: 5	fri-fix	trans-M4567	1.0000	0.025 m	(-0.003, -0.002, -0.025) m
TargetID: 6	fri-fix	trans-M4567	1.0000	0.025 m	(0.003, -0.001, 0.025) m

Figur 11.10 Skærmbillede med resultatet af transformationerne af de to modeller fra skan 1-4 og 4-7, hvor resultaterne fra model 1-4 er placeret øverst og model 4-7 er placeret nederst.

4' er placeret øverst og resultaterne fra skan '4-7' er placeret nederst i figuren. Som ved figur 11.9 er 'error' og 'error vector' residualerne samt orienteringen af residualerne på de enkelte punkter.

Observeres resultaterne, jf. figur 11.10, noteres at i der på fikspunkterne i model 1-4 stadig er et vrid. Dette er dog reduceret til ca. +/-1 cm i højden, hvorimod der mellem fikspunkterne i skan 4-7 er et vrid på ca. +/-2 cm. Disse vrid er ikke tilfredsstillende, hvorfor det undersøges, hvilken indflydelse de relativt små residualer i starten får på de efterfølgende sammenknytninger. Det vil sige om der sker en fejlforplantning ved udførelsen. Det er ikke muligt, i Cyclone, at foretage sådanne undersøgelser, hvorfor disse foretages i Matlab, i et "script" udarbejdet af Peter Cederholm. Dette "script" gør det muligt at undersøge denne fejlforplantning nærmere.

Som det ses af figur 11.7, er det relative små residualer, der fremkommer gennem den udførte sammenknytning, hvorfor det er interessant at undersøge, hvilken indflydelse residualerne mellem den første sammenknytning har, når en fejlforplantning sker over yderligere fem sammenknytninger, hvor hvert skan har en længde af ca. 30 meter. Således undersøges situationen, hvor der konstrueres en model vha. alle skan. I eksemplet fastholdes skan 1 og de fejlophobningen på sammenknytningspunkter fra skan 2-3 beregnes. En skitse over situationen ses på figur 11.11, hvor skan 2 er markeret med prikker og sammenknytningspunkterne til skan 3, og resultatet som ses højre side af skitsen. De opnåede resultater ses i figur 11.12, hvor punktnumrene på sammenknytningspunkterne er angivet i første søjle, og koordinaten samt spredningen på koordinaten angives i henholdsvis anden, tredje og fjerde søjle.



Figur 11.11: Skitse over de implicerede punkter og resultatet af transformation, der er sket mellem skan 1 og 2.

TIL system (XYZ)

Punktnummer	1.koor(X) [m]	Spred [m]	2.koor(Y) [m]	Spred [m]	3.koor(Z) [m]	Spred [m]
200	2.274	0.001	-14.870	0.002	-1.706	0.002
201	6.529	0.001	-14.728	0.001	-0.409	0.001
202	10.071	0.001	-14.677	0.001	-1.705	0.002
203	15.062	0.002	-7.266	0.002	-0.252	0.003
204	20.877	0.006	-39.763	0.003	-1.627	0.022
206	26.722	0.005	-34.446	0.004	-1.665	0.021
206	30.068	0.004	-30.747	0.005	-1.601	0.020
207	36.909	0.004	-29.561	0.007	-0.216	0.022

Figur 11.12: Uddrag af resultatfil "Type2_12.txt" fra undersøgelsen i Matlab. Det fremgår at de relativt små residualer, der opstår ved sammenknytningen mellem skan 1 og skan 2 på millimeterniveau forplanter sig gennem sammenknytningen til at være på centimeterniveau ved næste sammenknytning.

Observeres spredningen på koordinaten for punkterne 200-203, som er de sammenknytningspunkter, der anvendes mellem skan 1 og 2, konstateres at spredningen på disse punkter er af størrelser på 1-3 mm i plan og højde. Samme størrelser fremgår af transformationen gennem Cyclone. Observeres spredningerne for punkterne 204-207 som er punkterne til sammenknytning mellem skan 2 og 3 bemærkes, at spredningen på de 4 punkter, får betydelig større spredninger på højden. Spredningerne er ca. 2 cm. Da et skan er *konform* forplantes residualerne gennem dette og det konkluderes, at de små fejlbidrag, der er på de første sammenknytningspunkter, forplanter sig gennem transformationen. Dette resulterer i fejlbidrag af en sådan størrelsesorden, at der ved sammenknytninger af flere skan uden fikspunkter opstår spredninger af en sådan størrelse, at det ikke er muligt at overholde nøjagtighedskravene i banenormen. Det vurderes at det, såfremt disse krav skal overholdes, er det nødvendigt, at der foretages en tilknytning til fikspunkter i hvert andet skan eller at sammenknytningspunkterne skal placeres således at geometrien forbedres. Ved denne forbedring skal der opnås større overlap

mellem skan. Eksemplet er taget mellem skan 1 og 2, men har samme resultat ved de resterende transformationer. Matlab "scriptet" 'transformation.m' og resultatfilerne af alle de foretagne transformationer findes på bilag C - CD.

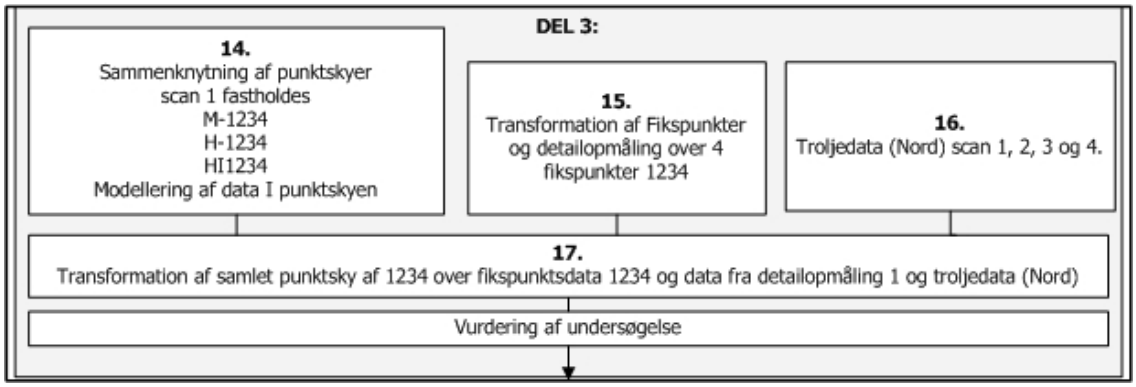
11.2.3 Vurdering

Det vurderes, at det vrid, der sker af modellen, kan forekomme gennem denne fejlophobning. Det vurderes, at disse fejlbidrag er af en sådan størrelse, at en vurdering af nøjagtigheder af objekter modelleret i Cyclone i forhold til detailmålingen ikke er relevant. Dette skyldes at de modellerede objekter i Cyclone får koordinater, der er beregnet på baggrund af punkter behæftet med disse fejl. Derfor transformeres over fikspunkt 1, 2, 3 og 4, for dermed kun at kontrollere testobjekter i den nordlige ende af testområdet. Der tilskrives stadig fejl op til +/- 1,5 cm i højden, men det forventes at objekterne modelleret i Cyclone, stadig giver et billede af, hvor godt der kan modelleres i forhold til detailopmålingen. Dette skyldes at fejlene på 1,5 cm er i de yderste hjørner af sammenknytningen.

11.3 Sammenknytning af fire skan

Grundet problemer opstået gennem sammenknytningen af skan, undersøges hvilke nøjagtigheder, der kan opnås ved udelukkende at arbejde med en model fra skan 1-4. Dette udføres på baggrund af undersøgelserne i foregående afsnit, hvor det konkluderes at der ved sammenknytning af skan 1-4 resulterer i et vrid i modellen på ±1 cm. Det undersøges derfor, hvorledes sammenknytningen er forløbet, samt hvilke nøjagtigheder der opnås på de modellerede objekter der kan vurderes i forhold til detailmålingerne.

Strukturen gennem afsnit 11.3 er illustreret i figur 11.13.



11.13 Emnerne der bearbejdes gennem kapitlets tredje afsnit, hvor der laves forsøg med sammenknytning af fire skan.

Sammenknytning af skan 1-4

For at undersøge hvorledes sammenknytningen af modellen er foregået, undersøges residualerne til sammenknytningspunkterne mellem skan 1-4. Resultatet viser, som ved tidligere tests, at der tilskrives små residualer til de enkelte sammenknytningspunkter, hvor det med den tidligere undersøgelse in mente opstår et vrid af modellen, dog af mindre karakter end ved sammenknytning af 7 skan. Figur 11.14 viser residualerne på denne transformation, hvor første søjle er nummeret på sammenknytningspunktet. Anden og tredje søjle indikerer, hvilke skan der sammenknyttes. De sidste tre søjler er henholdsvis vægt af punktet, residualer og orientering af

residualer. Der er ingen punkter der overstiger 1 cm i residualer, hvorfor sammenknytningen vurderes for værende tilfredsstillende.

Constraint ID	ScanWorld	ScanWorld	Weight	Error	Error Vector
TargetID: 200	M1	M2	1.0000	0.002 m	(0.000, 0.000, 0.002) m
TargetID: 201	M1	M2	1.0000	0.004 m	(0.002, -0.001, -0.004) m
TargetID: 202	M1	M2	1.0000	0.003 m	(-0.001, 0.003, 0.001) m
TargetID: 203	M1	M2	1.0000	0.002 m	(-0.001, -0.002, 0.000) m
TargetID: 204	M2	M3	1.0000	0.005 m	(0.002, 0.001, -0.004) m
TargetID: 205	M2	M3	1.0000	0.010 m	(-0.001, 0.001, 0.010) m
TargetID: 206	M2	M3	1.0000	0.005 m	(-0.002, 0.001, -0.004) m
TargetID: 207	M2	M3	1.0000	0.004 m	(0.000, -0.003, -0.002) m
TargetID: 208	M3	M4	1.0000	0.003 m	(0.002, 0.003, -0.001) m
TargetID: 209	M3	M4	1.0000	0.009 m	(0.005, -0.004, 0.007) m
TargetID: 210	M3	M4	1.0000	0.009 m	(-0.006, 0.003, -0.006) m
TargetID: 211	M3	M4	1.0000	0.002 m	(-0.001, -0.002, 0.000) m

Figur 11.14: Uddrag af figur 11.8, resultatet af den udførte sammenknytning af Skanningerne Middel 1-2-3-4, hvor første søjle er nummeret på sammenknytningspunktet. Anden og tredje søjle indikerer, hvilke skan der sammenknyttes. De sidste tre søjler er henholdsvis vægt af punktet, residualer og orientering af residualer.

Transformation af ny model over fikspunktsnettet

Som vist i afsnit 11.2.2 – *Transformation over fikspunkter* er resultatet af transformationen, at modellen stadig indeholder et vrid på tværs, men nu af mindre karakter. Figur 11.15 viser resultatet af den udførte transformation.

Constraint ID	ScanWorld	ScanWorld	Type	Status	Weight	Error	Error Vector
TargetID: 1	fri-fix	M1-2-3-4	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.013 m	(-0.001, 0.005, 0.012) m
TargetID: 2	fri-fix	M1-2-3-4	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.015 m	(0.002, -0.009, -0.012) m
TargetID: 3	fri-fix	M1-2-3-4	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.011 m	(0.004, -0.001, -0.010) m
TargetID: 4	fri-fix	M1-2-3-4	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.013 m	(-0.004, 0.005, 0.011) m

Figur 11.15: Resultatet af transformationen af modellen over fikspunktsnettets punkt 1, 2, 3 og 4. Første søjle er fikspunktsnummeret. Anden er fikspunkterne og tredje søjle den model der transformeres herover. De sidste tre søjler er henholdsvis vægt af punktet, residualer og orientering af residualer.

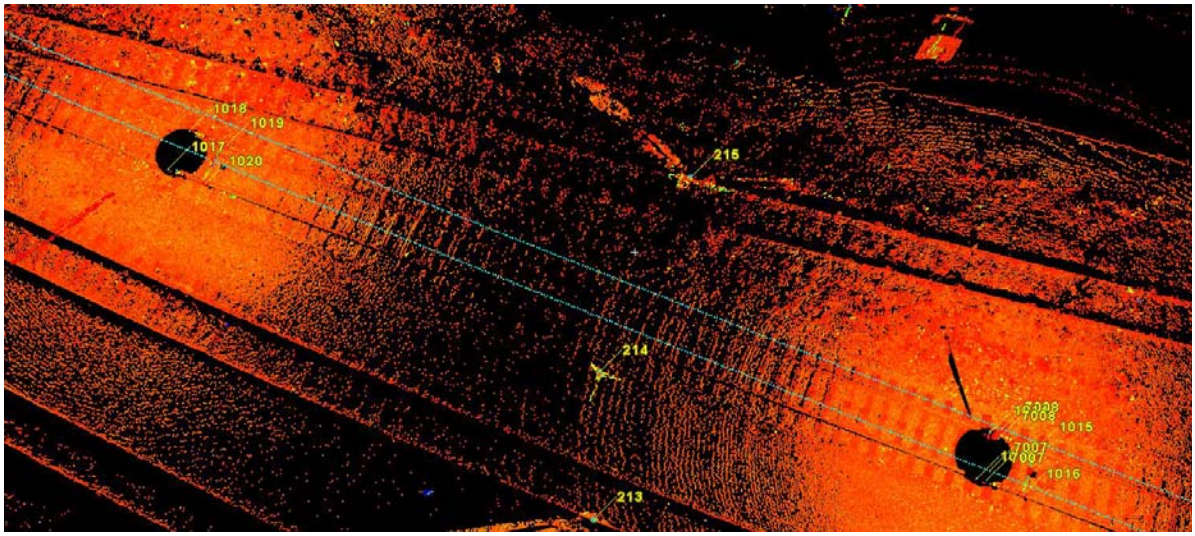
Transformation af troljedata over Model skan 1-4

For at integrere troljedata i modellen transformeres data ind over punkterne for "Gauging"-armenes position ved skanning. Denne transformation foretages vha. transformationsparametrene fra kalibreringen, der er beskrevet tidligere. Resultatet af transformationen ses i figur 11.16, hvor punkterne for armene er angivet i første søjle og residualerne i de to sidste søjler.

Constraint ID	ScanWorld	ScanWorld	Type	Status	Weight	Error	Error Vector
TargetID: 7001	troljedata	M4-ny	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.220 m	(-0.060, -0.212, 0.007) m
TargetID: 7002	troljedata	M4-ny	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.208 m	(-0.106, -0.179, 0.002) m
TargetID: 7003	troljedata	M4-ny	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.077 m	(0.009, 0.075, -0.018) m
TargetID: 7004	troljedata	M4-ny	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.088 m	(0.085, 0.012, -0.021) m
TargetID: 7005	troljedata	M4-ny	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.470 m	(0.273, 0.382, 0.026) m
TargetID: 7006	troljedata	M4-ny	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.475 m	(0.225, 0.417, 0.023) m
TargetID: 7007	troljedata	M4-ny	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.326 m	(-0.210, -0.250, -0.008) m
TargetID: 7008	troljedata	M4-ny	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.327 m	(-0.215, -0.245, -0.010) m

Figur 11.16: Nøjagtighederne ved den udførte transformation af troljedata. Punkterne for "Gauging"-armene er angivet i første søjle og residualerne i de to sidste søjler.

Det bemærkes at residualerne varierer mellem 7,7-47,5 cm. For at kontrollere hvor fejlene er lokaliseret undersøges sidste søjle. Fejlene på højden, som er sidste værdi i parentesen, varierer fra 2-26 mm, hvorfor det konkluderes at det ikke er i højden at problemet for denne transformation opstår. Derimod konstateres at der er store fejl i både X og Y, hvorfor det, i Cyclone, undersøges visuelt, hvordan de udarbejdede strenge forløber i forhold til målingerne fra laserskanning. I data fra laserskanning er der fejlbidrag fra tværgående vrid der er i modellen mellem fikspunkterne. Dette vurderes dog som værende af en ikke signifikant størrelse sammenlignes med det opnåede resultat. Figur 11.17 er et skærmbillede af en del af modellen, hvor det observeres at troljedata ikke er sammenfaldende med data fra laserskanneren. Efter denne visuelle vurdering i Cyclone konkluderes, at der i data fra måling med troljen ikke opnås en registrering af ændringer i kørselsretningen med et tilstrækkeligt resultat. Af transformationsresultatet fremgår graden af uoverensstemmelse mellem forløbet af troljedata og punkterne for troljens position ved skanning. Andre steder på strækningen, hvor banen svinger i et sporskifte, passer data endnu dårligere overens med baneforløbet end figuren fra transformationen viser.



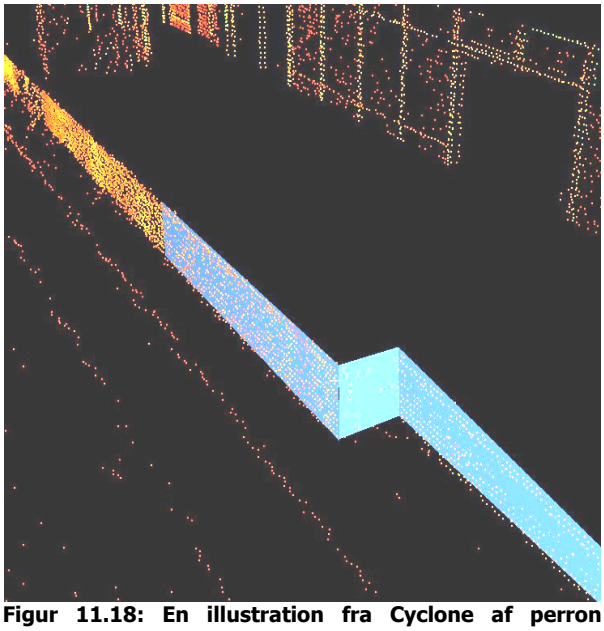
11.17: Troljens data i laserskannerens punktsky. Som det ses af figuren er troljens data, markeret med cyan, ikke sammen faldende med skinnernes egentlige placering.

11.3.1 Modellering

Efter at have sammenknyttet punktskyerne og transformeret disse i forhold til fikspunktsnettet, modelleres testobjekterne, for derefter at kunne vurdere punkter opnået vha. denne modellering i forhold til punkterne fra detailmålingen.

Perron forkant, Bygning og Fundament

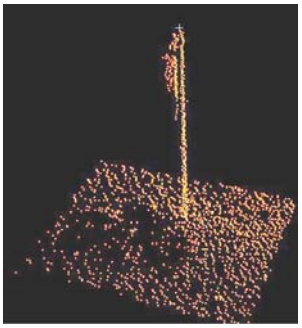
Modelleringen af objekter bestående af flader, herunder forkant af perron, bygning og fundament foregår ved, at fladerne dannes af punkterne i punktskyen. Til dette formål konstrueres det bedst mulige plan for et givent antal punkter i punktskyen vha. mindste kvadraters princip. Efter at have udpeget punkter der med sikkerhed er placeret på fladen anvendes funktionen "region grow", hvorved der sættes en grænse for, i hvilken afstand fra de udvalgte punkter, yderligere punkter skal inkluderes. Disse punkter inkluderes i planet og der dannes herved en flade. For at danne den bedste flade anvendes den, i specifikationerne, angivne punktspredning. Fladerne konstrueres på siderne af perronen, og forlænges indtil der opnås fladeskæring med de tilgrænsende flader. Herved dannes hjørner på perronens forkant. Det er projektgruppens erfaring gennem et projektarbejde på 7. semester, omhandlende kantbestemmelse ved laserskanning, at der ved denne metode til modellering af hjørner, opnås det bedste resultat. Samme metode anvendes til modellering af bygningshjørner og fundamenter i området. Figur 11.18 viser situationen, hvor fladerne dannes på perron forkant. De cyane markeringer er flader, som er dannet vha. "region grow".



Figur 11.18: En illustration fra Cyclone af perron forkant, der er dannet ved hjælp af funktion "region grow". Perronen er markeret med cyan.

Lygtepæle, signalstander og telefon

Lygtepælene, signalstanderen samt telefonstanderen er objekter med en cylinderformet base, hvilket betyder, at det er cylindriske objekter, der skal dannes af punktskyen. I Cyclone eksisterer en funktion, der danner den bedst mulige cylinder på baggrund af data i punktskyen. For at realisere dette kopieres en del af punktskyen til et nyt "modelspace" modelleringsvindue, hvorefter det er muligt at konstruere cylinderen ud fra disse punkter. Figur 11.19 illustrerer



Figur 11.19: Figuren er et uddrag af punktskyen, hvor telefonen skal modelleres.

Figur 11.20: Figuren er telefonen efter modellering. Det vigtige objekt i forhold til banenormen er den cylindriske stander.

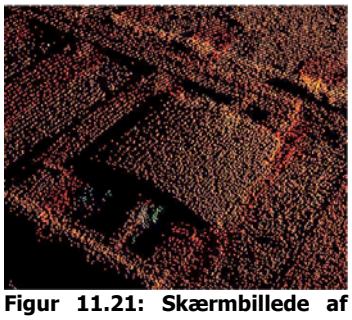
punktskyen, som danner baggrund for modelleringen, hvor punkterne kopieres ind et det ny "modelspace", hvorefter standeren dannes. Efterfølgende kopieres de modellerede objekter tilbage i det originale skan. Figur 11.20 illustrerer en fritstående nødtelefon i området efter modellering. I henhold til banenormen er det standeren, der skal positioneres.

Brønddæksler

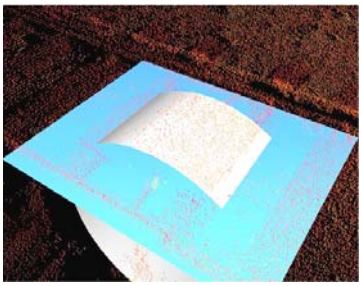
Brønddæksler kan give problemer i modellering, hvilket skyldes at disse er placeret i terræn. Dette medfører at rekognosceringen heraf besværliggøres. I testområdet findes tre brønddæksler, hvoraf kun ét er lokaliseret i den nordlige ende. Dette er dog ikke placeret i terræn, hvorfor en konstruktion heraf var mulig. Objekter som disse må forud for skanningen signaleres i marken, hvis de som i dette tilfælde ligger direkte i terræn. Dækslet modelleres vha. funktionen "region grow", for dermed at undgå at inddrage punkter fra det omkringliggende terræn.

Rumpe

For at modellere rumper, der er en krum metalplade, anvendes cylinderfunktionen, som beskrevet ved modellering af telefonen. I Cyclone beregnes den bedste cylinder på baggrund af punkterne i punktskyen. Dette resulterer i at det er nødvendigt at skære en del af cylinderen, hvortil planet for det omkringliggende terræn anvendes. Figur 11.21 og 11.22 illustrerer, hvorledes rumperne er modelleret i testområdet.



Figur 11.21: Skærmbillede af den del af punktskyen der anvendes til at modellere rumpen.



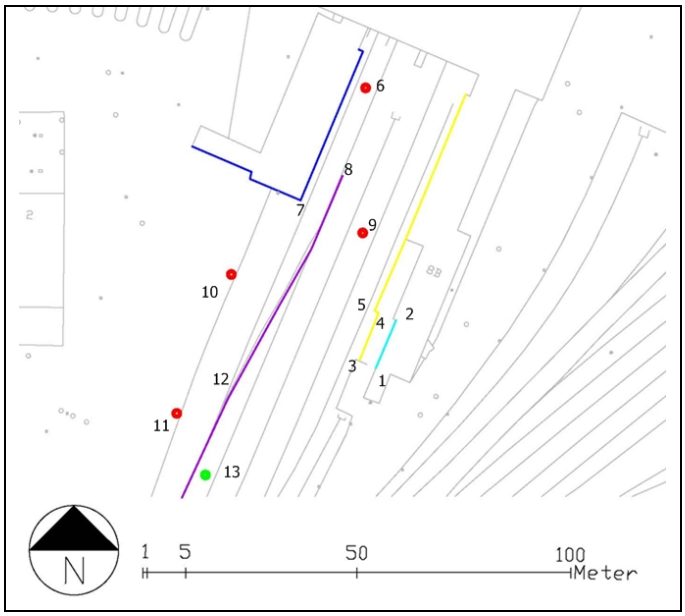
Figur 11.22: Skærmbillede af resultatet efter modelleringen af rumpe, hvor cylinderen er dannet, og beskæres af planet for det omkringliggende terræn. Planet for terræn er markeret med cyan.

Terræn

Terrænet er dannet ud fra de punkter, det i punktskyen er muligt, med sikkerhed, at definere som terrænpunkter. Det er i testområdet problematisk at definere, hvad der er terræn, og hvad der i visse tilfælde er jernbanesveller, der ligger placeret ved sideløbende spor. Dette anses dog ikke som værende et problem, da terræn ifølge banenormen skal defineres med en nøjagtighed på 5 cm i plan og højde. I punktskyen slettes alle punkter som ikke anses for værende terræn. Datamængden reduceres yderligere således at punkter der udgør terræn af et "grid" på 0,5 * 0,5 meter, efterfølgende anvendes en "*Delauney-triangulation*". Den udførte reduktionen af punktmængden omfatter mange tusinde punkter. Havde alle punkter været inkluderet, ville dette ikke resultere i et mere naturligt forløb end ved det valgte "grid", da mange punkter langs jorden sandsynligvis er støj fra vegetation. Havde området været mere kuperet skal tætheden af reduktionen af data tilpasses forholdene, eller det kan vælges at anvende alle tilgængelige punkter.

11.3.2 Kontrol af model

For at kontrollere modellens nøjagtighed, er der udvalgt et antal punkter som er målt ved detailmålingen og som kan defineres i modellen. Figur 11.23 er en skitse over punkternes placering, hvor det bemærkes at der vælges punkter fra forskellige steder, for dermed at kontrollere de forskellige områder i modellen. Punkterne er nummereret og det angives i figur 11.24, hvilket objekt det givne nummer angiver. Figur 11.24 er en tabel over de kontrolpunkter der anvendes gennem kontrollen. I figuren findes koordinatdifferencen mellem koordinaten fra detailopmålingen og det opnåede koordinatsæt gennem modellering i Cyclone. Differencerne er målt i modeller konstrueret i de tre punkttætheder.



Figur 11.23: Testobjekternes placering i den nordlige ende af området, der udføres test på

Objekttype og punktnummer	Middel Δ(Y, X, Z)	Høj Δ(Y, X, Z)	Højeste Δ(Y, X, Z)
1 Hushjørne	(0.037,0.002,0.009)	(0.030,0.000,0.001)	(0.009,0.012,0.005)
2 Hushjørne	(0.064,0.016,0.059)	(0.032,0.012,0.025)	(0.009,0.003,0.001)
3 Perron forkant	(0.300,0.208,0.153)	(0.008,0.020,0.056)	(0.009,0.012,0.014)
4 Perron forkant	(0.010,0.026,0.114)	(0.022,0.023,0.041)	(0.008,0.008,0.200)
5 Perron forkant	(0.003,0.037,0.110)	(0.001,0.024,0.022)	(0.002,0.010,0.220)
6 Signalstander	(0.069,0.008,0.093)	(0.007,0.017,0.019)	(0.003,0.010,0.010)
7 Fundament	(0.059,0.040,0.024)	(0.014,0.018,0.015)	(0.080,0.036,0.063)
8 Rumpe	(0.000,0.027,0.004)	(0.009,0.027,0.016)	(0.004,0.009,0.008)
9 Telefon	(0.011,0.028,0.028)	(0.005,0.030,0.022)	(0.004,0.016,0.036)
10 Lygtepæl	(0.020,0.053,0.036)	(0.020,0.029,0.006)	(0.004,0.003,0.006)
11 Lygtepæl	(0.016,0.005,0.043)	(0.008,0.001,0.036)	(0.006,0.006,0.046)
12 Rumpe	(0.005,0.006,0.032)	(0.004,0.012,0.021)	(0.006,0.009,0.019)
13 Brønddæksel	(0.016,0.004,0.002)	(0.006,0.007,0.002)	(0.009,0.006,0.003)

Figur 11.24: Differensen mellem de modellerede objekters koordinatsæt og de opmålte detailpunkter efter transformation over fikspunkterne.

11.3.2 Vurdering

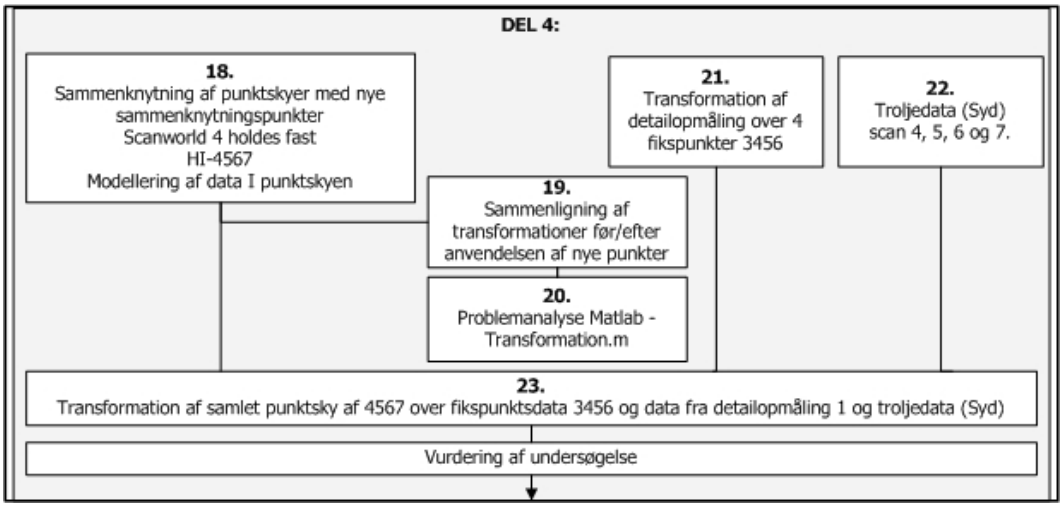
Testen vurderes til ikke at være tilfredsstillende. Når der udføres en sammenknytning mellem flere skan, resulterer dette i at der i den samlede punktsky opstår et vrid på tværs af modellen, dog i mindre grad end ved sammenknytning af skan 1-7. Dette vrid medfører fejl på de opmålte punkter, hvilket udtrykkes i de fejlstørrelser, der opnås på objekterne modelleret i Cyclone.
Nøjagtighederne i figur 11.24 skal således studeres med resultatet af transformationen af modellen over fikspukterne in mente. Det vrid der opstår ved denne transformation er på ca. 1,5 cm. Derfor er nøjagtighederne af de modellerede objekter ligeledes berørt af dette fejlbidrag. Det ses af figuren, at objekterne har den ringeste præcision i modellen konstrueret af punktætheden Middel. Dette var forventet ved undersøgelsens start, da der her er færrest punkter til objektmodellering, hvorfor der opstår problemer ved modelleringen af objekter på længere afstande. Kanter som bygningshjørner og perronforkant er sværere at definere, da der ikke nødvendigvis måles punkter tæt på kanten. Dette giver udslag på højdebestemmelsen af eksempelvis forkanten på perronen, da der her ikke er tilstrækkelige punkter til at afslutte fladen i den rette højde.
Kontrolleres afstandene i figur 11.24 ved kontrollen af punkttætheden Høj, ses det, at nøjagtigheden forbedres væsentlig specielt på højden, ved objekter, der er dannet ved fladeskæring. Grunden hertil er, at der i punktskyer målt med højere punkttæthed er punkter tættere på kanten af en flade, og at fladens afgrænsning bestemmes bedre. Dette medfører at der en mere præcis definition af objektet.
Undersøges resultaterne fra højeste punktæthed, bemærkes det, at 10 af de 13 punkter overholder banenormens krav i forhold til plane nøjagtigheder. Problemet med modelleringen er højden, hvilket skyldes flere årsager. Der er som nævnt opstået et vrid i modellen ved sammenknytningen, hvilket medfører, at størrelsen af fejlen på målinger på længere afstande ophobes. En anden årsag kan være beplantning. Eksempelvis er der beplantning på fundamentet i den nordøstlige del af området. Dette influerer fladeskæringen og definitionen af hjørnet forringes. Efter modellering af objekter i de forskellige punkttætheder er det projektgruppens opfattelse, at såfremt transformationen kan ske uden tilførsel af fejlbidrag vil en skanning med høj eller højeste punkttæthed være at foretrække. Punkttætheden Middel er ikke tilstrækkelig på længere afstande.

De foregående analyser viser, at problemerne opstår ved de fejlbidrag, der opstår ved sammenknytning af skan. Det vurderes, at fejlene kan forklares ud fra at dybde- og højdeforskellene på de opstillede sammenknytningspunkter er for små. Sammenknytningen kan derfor forbedres ved at øge disse dybde- og højdeforskelle, og derved skabe et større areal mellem sammenknytningspunkterne og et større overlap mellem de enkelte skan. Herved er det muligt at det vrid, der opstår gennem transformationen, kan undgås.
De udførte tests og opsamling af data ville kunne være udført i marken igen med større overlap mellem skan, men da udstyret kun har været til låns i 3 uger, og ikke har været mulig at låne igen, er denne løsning desværre ikke en mulighed. En anden mulig løsning er at forsøge at genfinde punkter i de allerede eksisterende punktskyer, og identificere punkter, der er at finde i flere skan, for derved at anvende disse til sammenknytning.

11.4 Forbedring af sammenknytning

Da ovennævnte resultater ikke er tilfredsstillende i forhold til kravene i banenormen, foretages ændringer i sammenknytningerne, for dermed at kontrollere, om det er muligt at sammenknytte skan med et bedre resultat. Til dette formål anvendes punkter, som er veldefineret i to skan. Disse punkter har en længere afstand til opstillingspunktet end sammenknytningspunkterne og forbedrer dermed den rumlige indbinding af skan. Det er derfor nødvendigt at anvende punkter defineret ved fladeskæring. Dette skyldes at det ikke er muligt at udpege veldefinerede punkter i punktskyen på afstande længere end 15-20 m.

Strukturen gennem afsnit 11.4 er illustreret i figur 11.25.



11.25: Emnerne der bearbejdes gennem kapitlets fjerde afsnit, hvor sammenknytningerne forbedres ved hjælp af definerbare punkter i punktskyerne.

Det er ikke muligt at danne alternative fikspunkter i modellen for skan 1-4, da der ikke findes punkter heri, som kan defineres i to skan.
I modellen konstrueret på baggrund af skan 4-7 er det muligt at anvende punkter på broen som krydser opmålingsområdet som alternative punkter til sammenknytning. Således anvendes modellen for skan 4-7 til undersøgelse af hvorledes modellen forbedres ved anvendelse af alternative fikspunkter.
For at opnå den højest mulige præcision af alternative sammenknytningspunkter anvendes skanningerne foretaget med højeste opløsning, da der her opnås størst mulig detaljeringsgrad af objekter i punktskyen.

11.4.1 Sammenknytning af model skan 4-7

Ved anvendelse af de alternative sammenknytningspunkter er højdeforskellen på sammenknytningspunkter ca. 5 m sammenlignet med de tidligere 1,70 m. Dybden og bredden er forskellig fra skan til skan, men generelt har de alternative sammenknytningspunkter en dybde på ca. 10-15 m, hvor dybden på sammenknytningspunkterne før var ca. 2-3 m. Herved har modellen nu ca. 40-50 % overlap mellem de udførte skanninger på 30 meter.

Figur 11.26 viser resultat af sammenknytning mellem skan 4-7 før forøgelsen af sammenknytningspunkter. Figuren viser at residualerne i højden til fikspunkterne er på ca. 2 cm og danner det føromtalte vrid.

Constraint ID	ScanWorld	ScanWorld	Type	Status	Weight	Error	Error Vector
TargetID: 3	fri-fix	M1-ny----------	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.022 m	(0.005, -0.006, 0.020) m
TargetID: 4	fri-fix	M1-ny----------	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.021 m	(-0.005, 0.000, -0.020) m
TargetID: 5	fri-fix	M1-ny----------	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.022 m	(-0.003, 0.003, -0.022) m
TargetID: 6	fri-fix	M1-ny----------	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.022 m	(0.003, 0.004, 0.022) m

Figur 11.26: Residualerne ved transformationen over fikspunkterne før de nye sammenknytningspunkter er anvendt.

De punkter, der vælges som alternative sammenknytningspunkter er:

- Top af en skorsten på bygning
- Bund af lygtepæl
- Punkter på broelementerne
- Punkt på parkeret godsvogn

Et punkt som kan defineres er toppen af en skorsten på bygning, der ligger tæt på skinnelegemet i den sydlige ende af området. Fordelen ved punktet er at der opnås en større højdeforskel imellem sammenknytningspunkterne. Punktet anvendes mellem skan 6 og 7. Bunden af lygtepælen anvendes, da det gennem modelleringen af objekterne kunne konstateres, at disse punkter er nogle af de bedst definerede i forhold til detailopmålingen. Bunden på den konstruerede lygtepæl anvendes ved skanning 4 og 5, hvor der opnås et punkt af en længere afstand end ved de oprindelige sammenknytningspunkter. Det har ligeledes været muligt at anvende punkter på broelementerne samt et punkt på en parkeret godsvogn, der var parkeret på et sideløbende spor.

Ved anvendelse af disse alternative sammenknytningspunkter, opnås residualer i punkterne der karakteriseres som værende grove fejl. Disse punkter fjernes og sammenknytningen beregnes igen. Resultatet ses i figur 11.27. Det bemærkes af figuren at der stadig er en grov fejl, ved "target" 221, hvorfor denne fjernes før sammenknytningen fuldendes.

Constraint ID	ScanWorld	ScanWorld	Weight	Error	Error Vector
TargetID: 212	Hi5	Hi4	1.0000	0.002 m	(-0.001, 0.000, -0.002) m
TargetID: 214	Hi5	Hi4	1.0000	0.011 m	(0.006, -0.004, -0.008) m
TargetID: 213	Hi5	Hi4	1.0000	0.008 m	(-0.002, 0.002, 0.008) m
TargetID: 215	Hi5	Hi4	1.0000	0.004 m	(-0.003, 0.001, 0.002) m
TargetID: 217	Hi6	Hi5	1.0000	0.014 m	(-0.008, 0.007, -0.010) m
TargetID: test2	Hi6	Hi7	1.0000	0.014 m	(-0.006, 0.006, -0.010) m
TargetID: 218	Hi6	Hi5	1.0000	0.013 m	(0.009, -0.005, -0.008) m
TargetID: 219	Hi6	Hi5	1.0000	0.013 m	(-0.002, 0.000, 0.013) m
TargetID: 221	Hi6	Hi7	1.0000	0.022 m	(0.004, -0.010, 0.019) m
TargetID: 223	Hi6	Hi7	1.0000	0.009 m	(-0.004, 0.004, -0.007) m
TargetID: 222	Hi6	Hi7	1.0000	0.007 m	(0.007, -0.001, -0.002) m
TargetID: test4	Hi6	Hi5	1.0000	0.005 m	(0.001, -0.002, 0.005) m

Figur 11.27: Sammenknytningen af skan 5 og 6, hvor der anvendes alternative sammenknytningspunkter. Disse punkter benævnes 'test2' og 'test4' i første søjle. De sidste tre søjler angiver vægt og residualer.

Transformation af model over fikspunktsnet

For at kontrollere om der stadig opstår vrid i modellen efter sammenknytningen, transformeres den nye model ind over fikspunkterne 3, 4, 5 og 6. Resultatet ses i figur 11.29

Constraint ID	ScanWorld	ScanWorld	Type	Status	Weight	Error	Error Vector
TargetID: 3	fri-fix	Ny-HI4-5-6-7	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.006 m	(0.004, 0.004, 0.002) m
TargetID: 4	fri-fix	Ny-HI4-5-6-7	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.005 m	(-0.004, -0.003, -0.002) m
TargetID: 5	fri-fix	Ny-HI4-5-6-7	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.008 m	(-0.001, -0.008, -0.002) m
TargetID: 6	fri-fix	Ny-HI4-5-6-7	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.007 m	(0.001, 0.006, 0.002) m

Figur 11.28: Opnåede residualer ved transformation af modellen over fikspunkterne 3, 4, 5 og 6. Residualerne er af acceptabel størrelse og der er acceptable residualer i højden.

Det fremgår af figur 11.28, at det residualerne i højden nu er så små at disse er tilfredsstillende. Der er nu kun 2 mm i forhold til fikspunkterne.

Transformationerne ved anvendelse af de nye sammenknytningspunkter med større dybde og højdeforskel udføres, som i afsnit 11.2.2 – *Transformation over fikspunkter*, yderligere ved beregning i Matlab "scriptet" 'Transformation.m' for dermed at bekræfte at der sker en mindre fejlophobning. Gennem forsøg med mange kombinationer af nye og eksisterende sammenknytningspunkter konstateres, at det bedste resultat opnås ved anvendelse af de eksisterende og to nye punkter til sammenknytningen, hvor punkt 221 frasorteres. Resultatfilerne og Matlab "scriptet" er at finde bilag C - CD. Det fremgår af figurerne at fejlophobning som opstod i afsnit 11.2.2 - *Transformation over fikspunkter* mindskes, ved anvendelsen af de nye sammenknytningspunkter. Forbedringen ses ved at sammenligne figur 11.29 og 11.30, som er resultatet på højden ved sammenknytninger. De første fire punkter er sammenknytningspunkter mellem primært og sekundært skan og der sidste fire er mellem sekundært og tertiært skan. Det bemærkes at højden, på sammenknytningspunkterne mellem sekundært og tertiært skan, forbedres ved den nyeste transformation over fikspunktsnettet. Det fremgår af figur 11.30 at fejlophobninger mindskes med ca. 3 cm i højden, hvilket indvirker positivt på det vrid der opstod i modellen. Således opnås en bedre transformation af den samlede punktsky over fikspunktsnettet.

3.koor(Z) [m]	Spred [m]
−1.438	0.006
−0.102	0.006
−1.379	0.005
0.002	0.006
−1.338	0.088
−1.301	0.096
−1.307	0.083
0.154	0.084

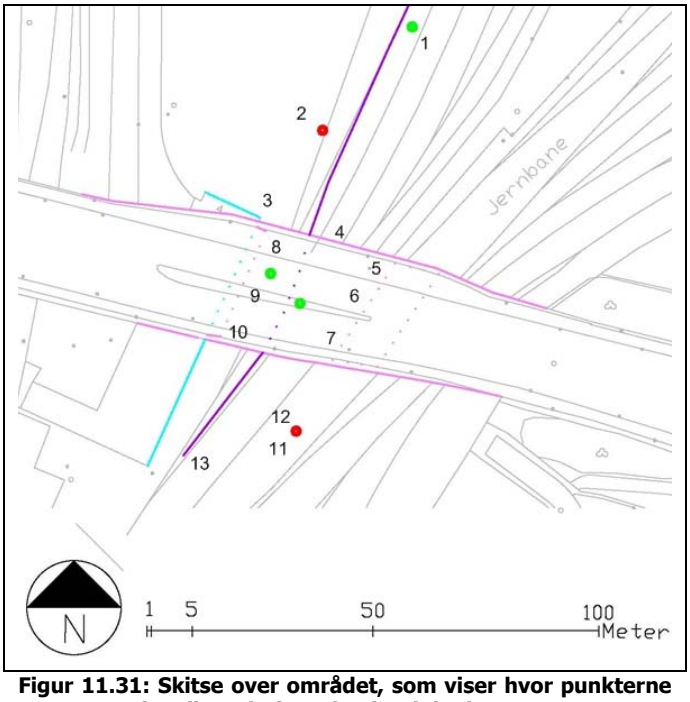
Figur 11.29: Figuren viser indflydelsen som residualerne mellem primært skan og sekundært skan har på sammenknytningen med tertiært skan, ved modellen med vrid på ca. 1,5 cm.

3.koor(Z) [m]	Spred [m]
1.029	0.066
1.282	0.005
−0.184	0.004
−1.430	0.004
−0.048	0.004
−1.117	0.064
−1.154	0.056
0.328	0.058

Figur 11.30: Figuren viser indflydelsen som residualerne mellem primært skan og sekundært skan har på sammenknytningen med tertiært skan, ved modellen hvor der anvendes alternative fikspunkter.

11.4.2 Vurdering af ny test

For at vurdere nøjagtigheden af modellen modelleres objekter igen heri. Placeringen af objekter som modelleres til vurderingen ses på figur 11.31. Nummereringen af punkterne angives ligeledes med objektbeskrivelse i figur 11.32.
Vurderingen foretages som ved tidligere undersøgelse ved at sammenligne punkter målt med detailopmåling med punkter på objekter modelleret i Cyclone. Således beregnes punktet på objektets afvigelse i forhold til detailopmålingen.
Da der i denne del af modellen ikke er veldefinerede punkter på objekter anvendes kanter på objekterne, hvilket indebærer, at det reelt set kun er muligt at kontrollere XY-værdierne. Dette skyldes at visse punkter i detailopmålingen er punkter som bygningshjørner, hvorfor det ikke er muligt at vurdere eksakt, hvor på objektet punktet er målt.



Figur 11.31: Skitse over området, som viser hvor punkterne som anvendes til vurdering af nøjagtigheden.

Af figur 11.32 ses at differensen på punkt 4 er på 17 mm i højden. Dette punkt er et punkt på det tværgående broelement over banen, der er målt med reflektorløs måling med totalstation. Det fremgår af punktskyen at denne måling defineres bedre i punktskyen end ved den udførte detailmåling, da det observeres i punktskyen at punktet ikke er placeret på hjørnet, der er målt til i marken, angiveligt pga. en dårlig punktdefinition i marken eller dårlig reflektorløs måling. De resterende punkter er nu alle under de i banenormen opstillede krav. Det konkluderes derfor at vriddet i den første model skyldes en ikke tilstrækkelig geometri af sammenknytningspunkter.

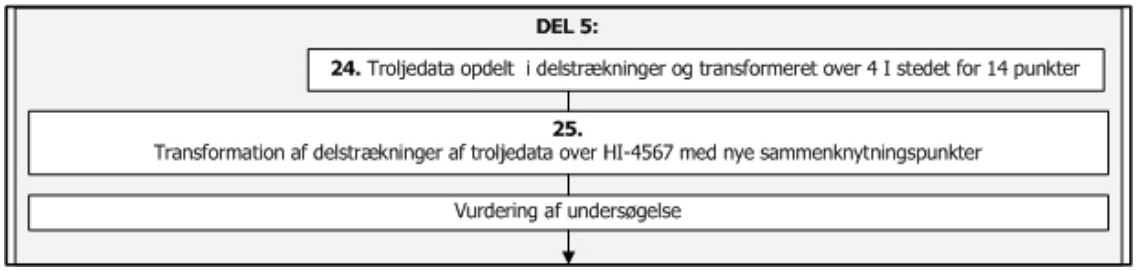
Objekt type	**Højeste** **Δ(Y, X, Z)**
1 Brønddæksel	(0.002,0.007,0.003)
2 Lygtepæl	(0.009,0.001,0.005)
3 Hushjørne	(0.006,0.002,0.004)
4 Punkt på bro overkant	(0.007,0.001,0.017)
5 Punkt på brofundament (SD)	(0.010.0010,0.004)
6 Punkt på brofundament (SD)	(0.003,0.004,0.000)
7 Punkt på brofundament (SD)	(0.006,0.006,0.003)
8 Punkt på brofundament (SD)	(0.004,0.009,0.008)
9 Punkt på brofundament (SD)	(0.004,0.007,0.006)
10 Punkt på brofundament (SD)	(0.004,0.003,0.006)
11 Lysmast	(0.000,0.003,0.004)
12 Lysmast	(0.006,0.009,0.003)
13 Rumpe	(0.009,0.005,0.003)

Figur 11.32: Differensen mellem de modellerede objekters koordinatsæt og de opmålte detailpunkter i højeste punkttæthed med alternative sammenknytningspunkter. (Punkter markeret med (SD) er svært definerbare i højden og derfor er ignoreres afvigelser i højden på disse punkter.

11.5 Transformation af troljedata

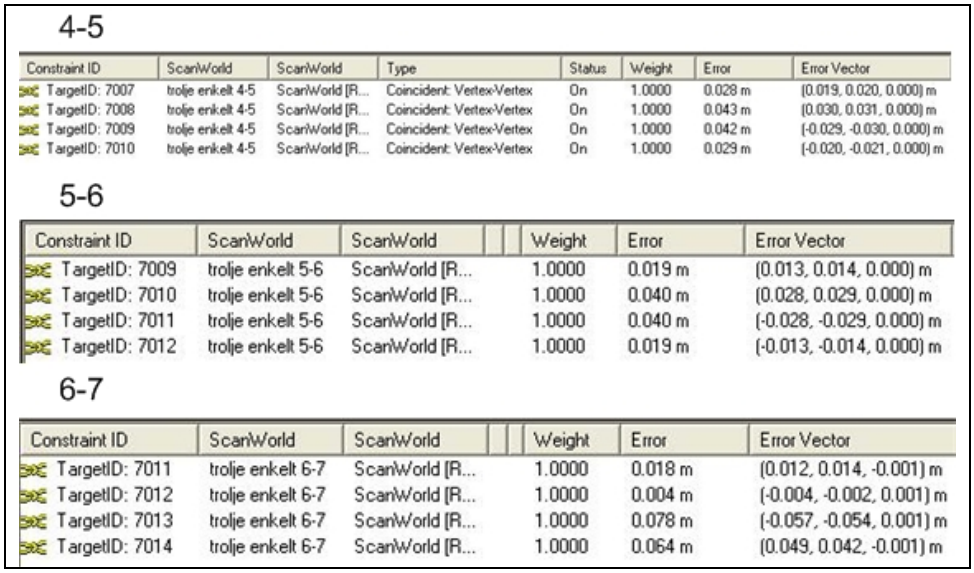
For at undersøge om integrationen af troljedata kan foretages mere hensigtsmæssigt end tidligere, hvor troljedata er bearbejdet som strenge, der strækker sig over hele testområdet, undersøges det nu om troljedata med fordel kan integreres som delstrækninger i den forbedrede model.

Strukturen gennem afsnit 11.5 er illustreret i figur 11.33



11.33: Emnerne der bearbejdes gennem kapitlets femte del, hvor det forsøges at sammenkoble data fra laserskanner og banetrolje. I første forsøg lægges skan ind i bidder mellem skannerpositionerne.

Da der nu er opnået en acceptabel transformation model 4-7 over fikspunkter, samt acceptable differencer på koordinater i forhold til kontrolmålingen, forsøges det at dele strengene op i stykker svarende til strækningen mellem de enkelte skan gennem beregningerne. Disse delstrækninger transformeres efterfølgende ind i den samlede punktsky. Det forsøges at transformere delstrækningerne 4 til 5, 5 til 6 og 6 til 7 ind i modellen, hvor der er anvendt alternative sammenknytningspunkter. Resultaterne af transformationen ses i figur 11.34.



4-5

Constraint ID	ScanWorld	ScanWorld	Type	Status	Weight	Error	Error Vector
TargetID: 7007	trolje enkelt 4-5	ScanWorld [R...	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.028 m	(0.019, 0.020, 0.000) m
TargetID: 7008	trolje enkelt 4-5	ScanWorld [R...	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.043 m	(0.030, 0.031, 0.000) m
TargetID: 7009	trolje enkelt 4-5	ScanWorld [R...	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.042 m	(-0.029, -0.030, 0.000) m
TargetID: 7010	trolje enkelt 4-5	ScanWorld [R...	Coincident: Vertex-Vertex	On	1.0000	0.029 m	(-0.020, -0.021, 0.000) m

5-6

Constraint ID	ScanWorld	ScanWorld	Weight	Error	Error Vector
TargetID: 7009	trolje enkelt 5-6	ScanWorld [R...	1.0000	0.019 m	(0.013, 0.014, 0.000) m
TargetID: 7010	trolje enkelt 5-6	ScanWorld [R...	1.0000	0.040 m	(0.028, 0.029, 0.000) m
TargetID: 7011	trolje enkelt 5-6	ScanWorld [R...	1.0000	0.040 m	(-0.028, -0.029, 0.000) m
TargetID: 7012	trolje enkelt 5-6	ScanWorld [R...	1.0000	0.019 m	(-0.013, -0.014, 0.000) m

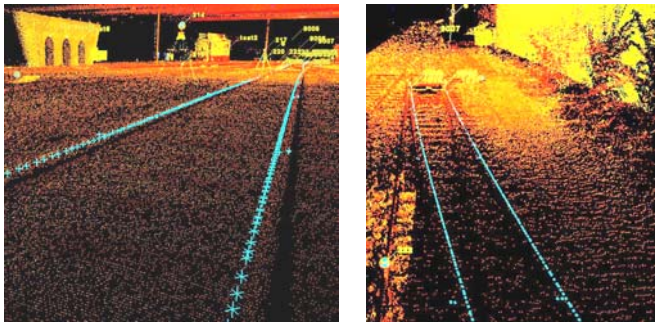
6-7

Constraint ID	ScanWorld	ScanWorld	Weight	Error	Error Vector
TargetID: 7011	trolje enkelt 6-7	ScanWorld [R...	1.0000	0.018 m	(0.012, 0.014, -0.001) m
TargetID: 7012	trolje enkelt 6-7	ScanWorld [R...	1.0000	0.004 m	(-0.004, -0.002, 0.001) m
TargetID: 7013	trolje enkelt 6-7	ScanWorld [R...	1.0000	0.078 m	(-0.057, -0.054, 0.001) m
TargetID: 7014	trolje enkelt 6-7	ScanWorld [R...	1.0000	0.064 m	(0.049, 0.042, -0.001) m

Figur 11.34: Resultatet af transformation af troljedata som brudstykker mellem skan 4-7. Tallene over figurerne indikerer de strækninger, hvor data er transformeret ind.

Som det fremgår af figuren er resultatet at transformationerne i højden over punkterne acceptabelt. Der er således kun residualer på 1 mm, hvilket er at forvente da data er transformeres ind over fire punkter. Det interessante er hvorledes strengene passer overens med detailmålingen af skinnerne.

Ved at transformere delstrækningerne hver for sig, i stedet for en samlet streng der strækker sig over hele baneforløbet, er resultatet væsentligt forbedret ved transformationspunkterne og der er længere strækninger langs banen, hvor nøjagtighedskravene i banenormen nu overholdes.
Det konkluderes dog stadig at troljens målinger af den horisontale vinkel, når banen drejer, er for dårlige til den ønskede anvendelse. Dette illustreres på figur 11.35.
Som det ses af figuren viser første billede, at baneforløbet regnet fra troljedata på lige strækninger placeres langs skinnens inderside som ønsket. Differencerne er målt i Cyclone og ligger mellem 3-5 mm, i forhold til den udførte detailopmåling i både plan og højde.



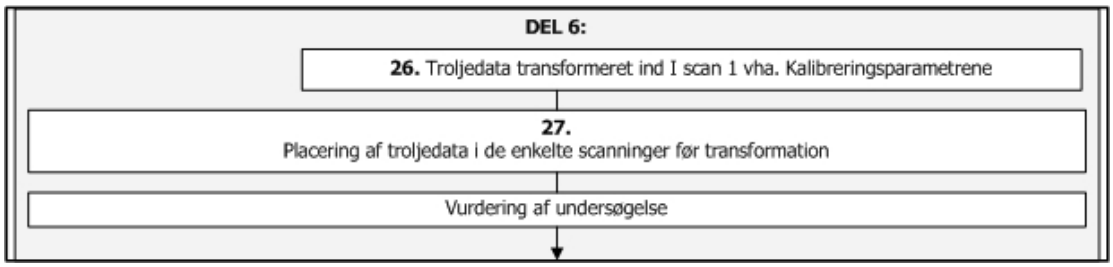
Figur 11.35: Visualiseringer af uoverensstemmelserne mellem troljedata og detailopmåling. Det ses at den cyan koordinatstreng fra troljen afviger fra de cyan punkter fra detailopmålingen.

Andet billede viser derimod at fejlen i troljedata opstår idet banen begynder at dreje kraftigt. Her ses detailopmålingspunkterne sideløbende med de indlagte strenge. Differencen er målt i Cyclone til at være, hvor der er størst uoverensstemmelse mellem data, op til 18 cm i planen 9 cm i højden. Herved kan det konkluderes at resultatet er bedre end ved foregående eksempel, men stadig ikke acceptabelt i forhold til kravene i banenormen.

11.5.1 Import af troljedata med interval 10 cm

Da resultaterne omkring troljedata ved integration af delstrækninger stadig ikke findes tilfredsstillende, undersøges om data med fordel kan integreres i de enkelte punktskyer vha. transformationsparametrene før sammenknytning.

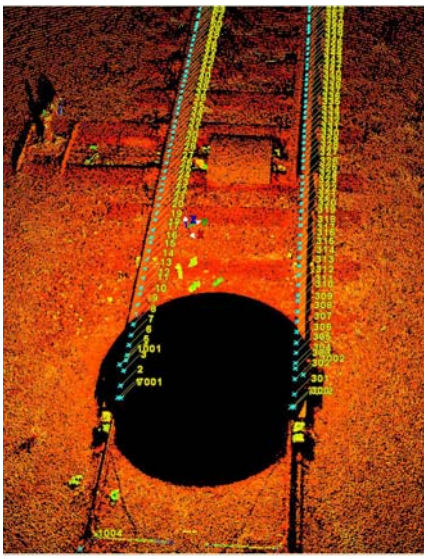
Strukturen gennem afsnit 11.5.1 er illustreret i figur 11.36.



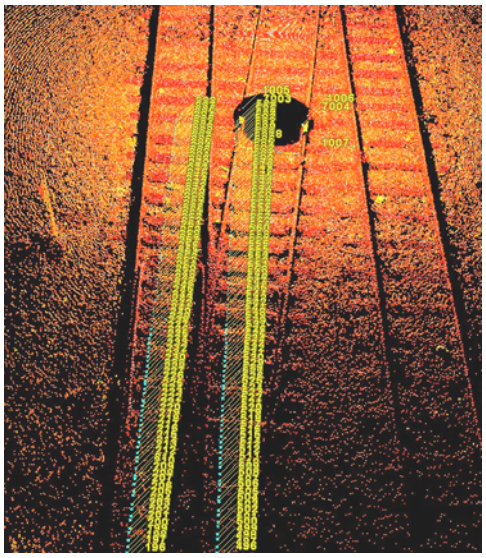
11.36: Emnerne der bearbejdes gennem kapitlets femte del, hvor det forsøges at sammenkoble data fra laserskanner og banetrolje. I anden forsøg anvendes transformationsparametrene til at udrenge data fra troljen inden det importeres i Cyclone.

Da der med de foregående forsøg endnu ikke er opnået tilfredsstillende resultater i forhold til kravene i banenormen kontrolleres om data influeres via transformationen over punkter i

punktskyen. Det er således forsøgt at anvende transformationsparametrene fra den udførte kalibrering til at regne punkterne fra troljen mellem de enkelte strækninger. Troljedata kan derved indlæses direkte i de enkelte skan, før der udføres en sammenknytning af skan. Figur 11.37 og 11.38 visualiserer resultatet af denne indlæsning af data i skan 1.



Figur 11.37: Troljens data fra start, hvor punkterne er placeret på skinnen. Målingernes tæthed er her 10 cm.



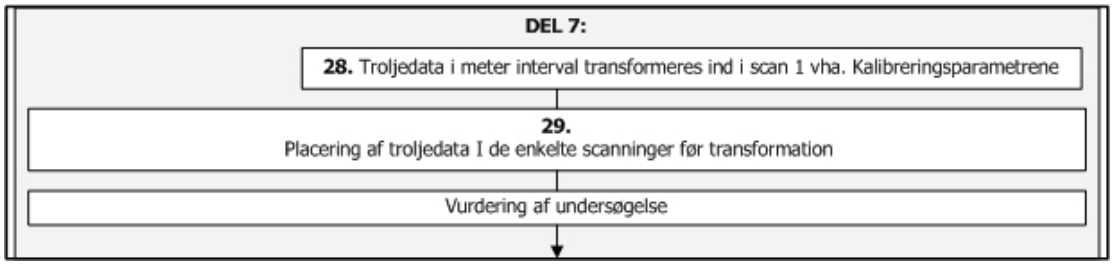
Figur 11.38: Troljens data ved troljens næste position. Udviklingen af troljens data ender forkert. Målingernes tæthed er her 10 cm.

Som det fremgår af figur 11.37 passer troljedata i starten fint med skinnens inderside, som håbet. Det konstateres dog at samme problemer som tidligere forekommer 30 meter længere fremme, hvilket visualiseres på figur 11.38. Efter ca. 8 meter begynder strengen at slippe sporet, grundet skinnernes drejning. Dette resulterer i en fejl på ca. 1,5 meter over en 30 meter strækning. Det konstateres at de første 8 meters placeres bedre gennem denne metode end når der, som ved foregående tilfælde transformeres over punkterne i den samlede punktsky. Resultatet er dog meget dårligere 30 meter længere fremme. Da der i dette tilfælde ikke anvendes transformationspunkter som ved tidligere tilfælde tvinges de beregnede strenge ikke på plads over transformationspunkterne.
Det konstateres ved hvert forsøg med integration af troljedata at disse strenge ikke drejer tilstrækkeligt i forhold til forløbet af skinnerne. Derfor ønskes det at udføre endnu et forsøg, hvor data der er optaget ved de første troljemålinger, målt hvor projektgruppen blev introduceret til troljen, anvendes. På daværende tidspunkt var troljen indstillet til standardindstillinger, hvor der opsamles data pr. tilbagelagte meter. Dette gøres i håb om at troljen måler svingninger bedre over større intervaller.

11.5.2 Import af troljedata med interval 1 m

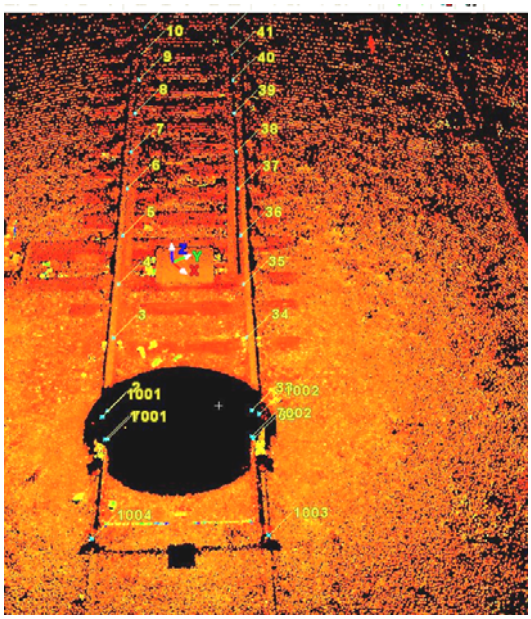
For at undersøge om det er muligt at forbedre vinklerne ved drejninger, anvendes transformationsparametrene sammen med målingerne i 1 meter intervaller. Denne undersøgelse belyser om de korte intervaller forringer de vinkler der måles med troljen.

Strukturen gennem afsnit 11.5.2 er illustreret i figur 11.39.

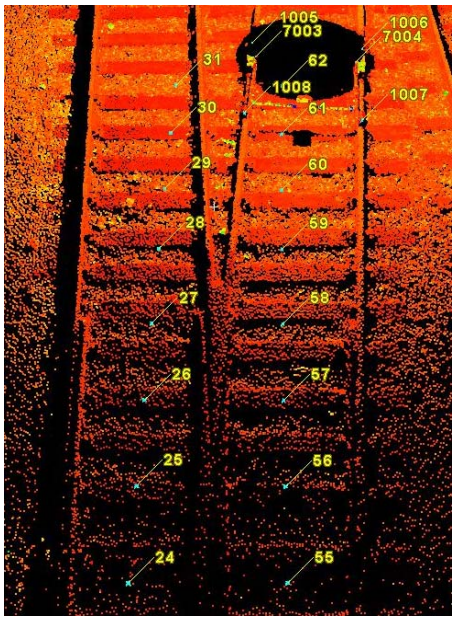


11.39: Emnerne der bearbejdes gennem kapitlets femte del, hvor det forsøges at sammenkoble data fra laserskanner og banetrolje. I tredje forsøg anvendes også transformationsparametre, men her er der målt i 1 m intervaller med troljen.

Det forsøges at indlægge troljedata i de enkelte punktskyer, hvor der nu er opsamlet data med troljen i intervaller af 1 m. Resultatet af denne undersøgelse forbedrede vinklerne dog ikke i tilfredsstillende grad. Situationen er illustreret figur 11.40 og 11.41. Figur 11.40 visualiserer begyndelsen af strækningen mellem skan 1 og 2 og figur 11.41 illustrerer, hvorledes fejlen vokset ca. 30 meter længere fremme af banelegemet, hvor skan 2 er foretaget.



Figur 11.40: Troljens data fra start, hvor punkterne er placeret på skinnen. Målingernes tæthed er her 1 m.



Figur 11.41: Troljens data ved troljens næste position. Udviklingen af troljens data ender forkert. Målingernes tæthed er her 1 m.

Figuren viser som ved de foregående tilfælde at punkterne stemmer overens med banens forløb i begyndelse af skannet. 30 meter længere fremme er fejlen dog stadig i dette tilfælde målt til at være på ca. 60 cm. Ved at have afprøvet forskellige muligheder ved indhentning af data ved transformation eller ved anvendelsen af data i forskellige intervaller gennem

transformationsparametrene fra kalibreringen, konkluderes at troljen ikke måler drejninger i planen tilstrækkeligt til at dette data kan anvendes til det ønskede formål.

11.6 Opsamling på databehandling

De udførte opmålinger af fikspunktsnet og detailopmålingerne til kontrol af de udførte målinger med skanner og trolje forløb uden problemer. Ved beregning af fikspunktsnettet beregnes punktspredningen til 3 mm, hvilket overholder kravene i banenormen.
For at sammenknytte skan har projektgruppen placeret sammenknytningspunkter således at der er størst mulig afstand mellem skannerpositionerne, samtidig med at punkterne placeres i forskellig dybde og højde. Det har grundet skannerens korte rækkevidde ikke været muligt at placere sammenknytningspunkter i en større afstand end ca. 15 m fra skanneren, hvorfor dybde i disse punkter har været begrænset til få meter. Ligeledes har det ikke været muligt at placere disse med en større højdeforskel end 1,7 m. Behovet for højdeforskel skyldes at koordinatsystemet defineres bedre hermed gennem en bedre rumlig indbinding.

Da hele modellen er en sammenknytning af flere skan, hvor det i Cyclone ikke er muligt at fastholde alle fikspunkter for derefter at udjævne sammenknytningspunkter i hele modellen, men kun at sammenknytte vha. sammenknytningspunkter, og derefter udjævne på fikspunkterne, er forskellige løsningsmodeller udarbejdet. Dette udføres for dermed at kontrollere hvorvidt sammenknytningen af skan influeres af valget af rækkefølgen hvorpå der sammenknyttes. De udarbejdede modeller transformeres efter konstruktion sammen til vurdering. Det konkluderes på baggrund af transformationerne, at rækkefølgen ikke har indflydelse på resultatet.
Efterfølgende er modellen transformeret ind over fikspunkterne, hvilket resulterer i et vrid i modellen. Således har modellens nordvestlige og sydøstlige hjørner residualer på ca. -2,7cm og nordøstlige og sydvestlige hjørner residualer på 2,7 cm.
Forklaringen på problemet vurderes at skyldes problemstillingen, hvor sammenknytningspunkterne og ikke fikspunkterne i modellen fastholdes, samt at der ikke er tilstrækkelig god geometri ved sammenknytningerne.
Efter diskussion med vejledere af løsninger på problemet besluttes at anvende alternative sammenknytningspunkter. Hermed menes at punkter, der konstrueres i begge punktskyer fra to sammenhængende skan, anvendes til sammenknytning. For at opnå en forbedring at sammenknytningen søges at anvende punkter af større afstand til skannerens positioner end de oprindelige sammenknytningspunkter. Dette foretages for at minimere fejlene, som ophobes over afstand. Punkter der anvendes til sammenknytning skal være veldefinerede, for dermed at kunne opnå bedst mulig sammenknytning.
Det har været problematisk at finde veldefinerede punkter i testområdet, men der er anvendt punkter til sammenknytning, som medfører, at der til fikspunkterne opnås residualer på 5-8 mm.

Efter udarbejdelsen af modellen og beregning af punktspredninger og sammenknytninger er det projektgruppens forslag, at der anvendes regler fra fotogrammetrien, hvad angår sammenknytning. Ligeledes foreslås til fremtidig arbejde, at foretage skan med større overlap og større højdeforskelle på sammenknytningspunkterne. Det konkluderes, at den begrænsede rækkevidde, der er på en HDS4500 gør, at der med denne laserskanner skal foretages skan efter korte intervaller, hvorfor der ikke spares tid ved metoden.
De opnåede nøjagtigheder med troljen er ikke tilfredsstillende. Det har været en besværlig proces at bearbejde data, da Abtus' egne teknikere enten ikke har ønsket eller har kunnet hjælpe med oplysninger om troljen. Det er projektgruppens opfattelse, at det er manglende viden, der gør at det ikke har været muligt at få besvaret vores spørgsmål. Resultatmæssigt har det ligeledes været

svært, at konkludere konkret på resultatet, men det kan dog med konkluderes at vinkel målingerne er for dårlige til at kunne regne frem efter, og oplysninger omkring troljens sensorer er ikke tilgængelige.
Problematikken omkring måling på skinnelegemet har resulteret i at projektgruppen foreslår at punktskyerne fra skanningerne anvendes til at konstrueres skinneforløbet og herefter udnyttes troljens afstandsmåling, da denne findes brugbar. Ud fra den kørte afstand, kan det bestemmes hvor på skinnen en måling har fundet sted og troljens målinger af gab og højdeforskel, kan således påføres skinnerne i de rigtige afstande. Projektgruppen har ikke udført disse beregninger eller konstrueret resultater herudfra, men det konkluderes at denne mulighed forekommer.

Arbejdet i Cyclone er forløbet som planlagt. Modellering har ikke givet større problemer og programmet er fundet anvendeligt til denne opgave. Det skal dog nævnes at de residualer, der opgives ved en endt transformation skal læses under hensyntagen til at der sker fejlforplantning flere skan i mellem. Det er således ønskeligt at programmet kan fastholde fikspunkter og lave en *anblock-transformation*.
De udførte test har vist svingende resultater. Med den opnåede rumlige indbinding skanningerne imellem og de modellerede flader i 'High' og 'Highest' punktætheder er det projektgruppens konklusion at det er muligt at overholde de foreskrivende nøjagtighedskrav i banenormen.

12 Konklusion

Metodevalget "throw away prototyping" er anvendeligt til arbejde, hvor der søges konstrueret et nyt målesystem. Således er det en anvendelig fremgangsmetode i et projekt af karakter som dette. Dette skyldes eksempelvis at der gennem er projektarbejdet opstået flere uforudsete problemer, som derfor forkastes, og der arbejdes videre med den opnåede viden. Ønsket om at arbejde videre med emner der har været berørt på tidligere semestre er ligeledes opnået. Dog har dette projekt vist flere sider af emnerne, der ikke har været bearbejdet tidligere. At starte fra bunden med et integrationsprojekt, hvor der kun er stiftet kendskab med én af de benyttede sensorer er en kompliceret proces, da der så først skal opnås kendskab til hvordan instrumenterne virker. Der har yderligere været flere dele gennem projektet, hvor det kunne ønskes at fordybe sig endnu mere end opnået, eksempelvis i form af en indsnævring af problemformuleringen.
Efter at have studeret banenormen og de nøjagtigheder der forventes til banemåling konkluderes at den nuværende banenorm ikke indeholder entydige bestemmelser omkring nøjagtighedskrav, hvilket også er blevet bekræftet af Carsten Jørgensen fra COWI Lyngby, der har udarbejdet denne banenorm for Banedanmark. Det vurderes derfor at det er nødvendigt at præcisere denne for dermed at opnå entydige krav. Ligeledes er projektgruppen blevet opmærksom på at det forventes, at der ved opstillinger over fikspunkter ikke opnås fejlbehæftede målinger. Dette er projektgruppen ikke enig i, og det foreslås at nøjagtighedskravene i banenormen revideres, da der kan stilles spørgsmålstegn til om den banemåling der udføres i dag rent faktisk overholder de fastlagte krav.

Gennem den udførte foranalyse har det været spændende at stifte bekendtskab med andre projekter af lignende art, hvilket viser at banemåling er et felt, hvor der stadig kan udvikles nye løsninger. Der kunne således have været foretaget andre valg af sensorer og undersøgt flere forskellige kombinationer. Projektgruppen valgte at anvende en faseskanner til opmåling af omgivelser og en banetrolje, baseret på mekaniske sensorer, til opmåling af skinnerne. Dette valg foretages da projektgruppen havde fået stillet disse til rådighed samt at dette udstyr kunne forventes at overholde den opstillede problemstilling.

For at kalibrere systemet opstilles et testfelt, hvor der med kendskab til de to komponenters koordinatsystemer udledes transformationsformler til anvendelse herimellem. Derudover findes troljens position i laserskanneren koordinatsystem, hvilket anvendes ved sammenkobling af data. Kalibreringen af systemet er endt op med et tilfredsstillende resultat, der gør projektgruppen i stand til at positionere troljens data i laserskannerens koordinatsystem.
Mangel på kendskab til instrumenter i systemet har resulteret i at projektgruppen har foretaget genmålinger i testfeltet, men det har kun været en byrde tidsmæssigt, da alle placeringer var markeret i marken.

Før opmåling i marken kan der beregnes et testnet, for dermed at kontrollere om opstillingspunkterne er bestemt med tilstrækkelig præcision. Fordelen ved testnet er, at det ikke er nødvendigt at foretage målinger, for at kontrollere om resultatet af opmålingerne kan forventes at være af tilstrækkelig nøjagtighed. Der er i dette projekt udarbejdet et testnet, dog først efter dataindsamling, hvilket ikke er hensigtsmæssigt. Det opnåede resultat af testen som foretages i planen, er at geometrien ikke er tilstrækkelig til at definere opstillingspunkterne som ikke knyttes direkte til fikspunkter med tilstrækkelig præcision. Det kunne have været interessant at have udført testnet i 3D, men da nøjagtigheden i planen ikke er defineret tilstrækkeligt, forventes at

højden heller ikke vil kunne defineres tilstrækkeligt præcist, da fejlene på måling heraf er af samme størrelsesorden som ved plane målinger samt at geometrien for opmålinger i højden er dårligere end målinger i planen. Disse resultater kunne have været anvendelige under opmålingen, da det således ville have været muligt at foretage ændringer i geometrien for at opnå forbedringer. Baggrunden for at testnettet ikke blev beregnet før markarbejdet, var at projektgruppen havde instrumenterne til rådighed i en begrænset periode, og at det ikke var muligt at låne disse på et senere tidspunkt.

Det opmålte fikspunktsnet blev konstrueret vha. netmåling, hvor totalstationen blev opstillet over hvert af punkterne, for derved at foretage målinger til de resterende. Resultatet var et stærkt net, med en punktspredning på 3 mm på punkterne. En konklusion der kan drages er at en fikspunktsfortætning langs banen er en nødvendighed, ved anvendes af et banemålingssystem som dette, da det gennem dette projekt ikke været muligt at kontrollere sammenknytning af skan over 200 meter med et acceptabelt resultat.
Den tilhørende detailmåling af objekter til kontrol af modellerne, blev ligeledes foretaget tilfredsstillende.

Det oplyses i specifikationerne for en HDS4500 at punktspredningen på positionering af "targets" i en afstand af 25 m er 3,5 mm. Projektgruppen har dog under litteraturstudiet undersøgt en kilde, hvor punktspredningen på målinger til "targets" ved en afstand af 15 m hævdes at være 4,7 mm grundet skannerens maksimale punkttæthed. Projektgruppen anvender derfor en afstand på 14-16 m når der placeres "targets". Af samme årsag samt at projektgruppen ønsker at måle med så lange intervaller som muligt, er det valgt at anvende 30 m intervaller til opmåling.
De foretagne skan sammenknyttes til modeller, hvor det undersøges om rækkefølgen af sammenknytninger er af relevans for modellens relative nøjagtighed. Dette resulterede i en undersøgelse hvor to modeller af samme punkttæthed, men sammenknyttet ud fra forskellige valg til primær skan, transformeredes sammen. Alle residualer i transformationen havde en værdi på 0, hvorfor det konkluderes at rækkefølgen af sammenknytning ikke er af betydning.
For at kontrollere modellens absolutte nøjagtighed er modellen transformeret over fikspunkter. Dette resulterer i at der konstateres et vrid i modellen på ca. 2,7 cm. Dette er ikke tilfredsstillende da det dermed ikke er muligt at overholde banenormens krav. For at undersøge om vriddet opstår i den en bestemt ende af modellen splittes denne op i to mindre modeller, som efterfølgende transformeres over fikspunkter. Resultatet viser at vriddet er størst i den sydlige del af opmålingsområdet, hvorfor objekter modelleres i den nordlige del. Disse objekter sammenlignes med detailmålingerne, og der konstateres differencer der resulterer i at det ikke er muligt at overholde banenormen. Det var således nødvendigt at introducere alternative sammenknytningspunkter, i form af objekter som kunne defineres i to eller flere skan. Dette er dog kun muligt i den sydlige del af området, da der i den nordlige del ikke eksisterer objekter som er defineret i to skan. Introduktionen af alternative punkter resulterede i en forbedring af modellens absolutte nøjagtighed, og det konstateredes at størstedelen af de kontrollerede objekter var defineret indenfor de i banenormen opstillede krav.
Da modellen fra laserskanningen var tilfredsstillende transformeres troljedata ind i denne. Disse data var beregnet som strenge for hele strækningen. Dette resulterede i at der konstateredes fejl på meterniveau. Dette blev forsøgt forbedret ved at dele troljedata ind i respektive intervaller mellem skanningerne. Dette forbedrede resultatet, men det kunne stadig konstateres at der ikke opnåedes data af tilstrækkelig kvalitet med troljen. Herefter anvendes transformationsparametrene til at give troljen "frit løb" fra startpunkterne, men også her viste visualiseringer at troljens data ikke var sammenfaldende med skinner i punktskyen.

For at kontrollere om måleintervallerne var for små og dermed resulterede i dårlig vinkelmåling, forsøgte projektgruppen at anvende data som var målt med meterintervaller, som er troljens standardindstilling. Dette var udelukkende en kontrol af vinkelmålingen med troljen. Da resultatet af denne undersøgelse heller ikke var tilfredsstillende konkluderes at målingen af kurver på baggrund af de anvendte odometre ikke har en tilfredsstillende nøjagtighed.

Som svar på problemformuleringen anser projektgruppen det for muligt at anvende samme metode som gennem dette projekt. Dermed vurderes det at ved anvendelse af veldefinerede punkter til sammenknytning, kan der opnås nøjagtighed at tilstrækkelig karakter på sammenknytninger og efterfølgende positioneres absolut. Skinnerne kan ikke måles med tilstrækkelig nøjagtighed i planen med troljen og derfor vurderes det, at skinnerne i stedet skal konstrueres med laserskannerens punktsky. Herefter kan troljens afstandsmåling, der findes god nok, anvendes til at påføre skinnerne målingerne fra troljen i de rigtige afstande. Således vil der kunne opnås en 3D-model, hvor omgivelserne er positioneret med laserskanneren og skinnerne konstrueres ved en kombination laserskanner og trolje.
Alternativt vil en GPS kunne rette målingerne fra troljen på plads undervejs på banen, som Glaus har anvendt i sit banemålingssystem. Her nævnes at troljens målinger skal justeres i intervaller på maksimalt 20 m ad gangen. Anvendelsen af GPS vil dog resultere i at kravene fra banenormen som de er i dag, ikke kan overholdes.
En anden af de problemstillinger der ønskedes undersøgt var tidsforbruget. Det ønskedes at konstruere et system, som ville kunne måle hurtigere end den traditionelle landmåling. Dette kunne dog ikke realiseres, da et skan med punktspredningen Høj tog 20-30 minutter samt at det med HDS4500 er nødvendigt at foretage skan pr. 30 m. Dette resulterer i, at der på en arbejdsdag på 12 timer opnås maksimalt 1080 m. Opmålingen med denne skanner kan derfor ikke gøre arbejdet hurtigere.

13 Perspektivering

Ovenpå projektarbejdet og konklusionerne herpå, mener projektgruppen stadig at idéen med integration mellem laserskanner og banetrolje er interessant. På nuværende tidspunkt eksisterer allerede mange forskellige systemer til opmåling af jernbaner, men ingen af dem projektgruppen har skiftet bekendtskab med, kan overholde de nøjagtighedskrav, der stilles i banenormen. Ligeledes har projektgruppen ikke fundet nogen løsninger, der kan foretage opmåling på alle typer af spor, eksempelvis både hovedspor og sidespor.

Den store interesse for banemåling i øjeblikket gør udviklingen af nye opmålingssystem mere interessant, da det i virksomhederne handler om at levere det rigtige produkt til en højeste pris. Med et system, som bearbejdet i dette projekt, vil datamængden stige i produktet og dermed må det vurderes at der kan kræves en højere pris for produktet. Hvis så opmålingen samtidig effektiviseres, vil dette gøre opmålingssystem eftertragtet og en god forretning. Dette underbygges af at der er vedtaget et lovforslag, som påbyder at alle veje der krydser jernbaner i samme niveau, enten skal overføres eller underføres. For at give gode visualiseringer af disse over- og underføringer kan en laserskanner anvendes med fordel. En visualisering af situationen vil kunne anvendes som informationsmateriale til lokalbefolkningen da en model i 3D oftest er nemmere at forstå for personer, der ikke er vant til at se på tegninger eller omlægningsplaner for et sådan projekt.

Umiddelbart findes banemålingssystemet i projektet ikke brugbart, grundet de instrumenter som systemet består af. Projektgruppen vil derfor anbefale at der anvendes andre til integrationen og dermed kan der opnås bedre resultater.
Laserskanneren, der skal anvendes til systemet vurderer projektgruppen til at have længere rækkevidde med samme eller bedre nøjagtighed. Dette vil effektivisere processen og et vil være muligt at måle mere jernbane end det er tilfældet i dette projekt. Den længere rækkevidde vil også skabe grundlag for et bedre overlap mellem de skan, der udføres. Her skal også tages hensyn til højdeforskellene i overlappet og det findes ikke tilstrækkeligt med forskellen mellem terræn og stativer på ca. 1,5 m. Derfor må omgivelserne tages i brug for at opnå bedre geometri. Eventuelt kan udvikles et højere stativ til "targets". Projektgruppen læner sig op af regler fra fotogrammeri om overlap mellem modeller, der her skal være 20 %.
Banetroljen skal ifølge projektgruppen have bedre målinger af den horisontale vinkel. Dette vil gøre det muligt at bestemme de rigtige drejninger således vil data kunne integreres i laserskannerens 3D-model. En mulighed for at forbedre troljens målinger vil være en anvendelse af GPS, men hermed vil det ikke være muligt overholde banenormens krav. Et alternativ vil være anvendelse af flere referencepunkter mellem laserskanner og trolje, så det muligt at postpositionere troljens data og stadig opnå nøjagtigheder, der overholder banenormen.

Når data skal behandles i Cyclone, ønsker projektgruppen muligheden for at anvende en *anblock-transformation* ved sammenknytningen af skan og tilkobling til fikspunkter. Dette vil gøre det muligt at vægte punkter i en stor samlet transformation, hvor fikspunkterne holdes fast og sammenknytningspunkterne gives større frihed. Dette vil efter projektgruppens overbevisning resultere i en bedre transformation og det antages at banetroljens målinger herved forbedres, disse vil efterfølgende kunne importeres i modellen efter transformationsparametrene fra kalibreringen.

Da der er konstateret problemer angående opmåling af eksempelvis dæksler vurderes emnet Fuldstændighed som værende en spændende problemstilling til fremtidig undersøgelse.

Problemerne opstår primært hvor objekter er placeret under eller i terræn, hvorfor opmåling med laserskanning kompliceres. Det vil derfor være nødvendigt at opstille signaler over disse objekter, hvor "targets" kunne placeres på små stativer med kendt højde, hvormed disse kunne udpeges i punktskyen og dermed positioneres.

14 Litteraturliste

14.1 Artikler

[Alippi et.al., 1999]
Alippi, Cesare, Casagrande, Ettore, Scotti, Fabio, Piuri, Vincenzo, *Composite Real-Time Image Processing for Railways Track Profile Measurement*, artikel fra http://ieeexplore.ieee.org, alippi.pdf under mappen 'kilder' på vedlagt CD, 2000

[Cuskelly & McDonald, 2006]
Cuskelly, Mick, McDonald, Ian, *Terrestrial Scanning – An Option for Planning Survey Data Capture*, artikel fra http://www.mainroads.qld.gov.au, cuskellymcdonald.pdf under mappen 'kilder' på vedlagt CD, 2000

[Fararooy & Mair, 1998]
Fararooy, Dr Saeed, Mair, Clemens, *Review of Railway Overhead Wire Geometry Measurement systems*, artikel fra http://ieeexplore.ieee.org, faraooymair.pdf under mappen 'kilder' på vedlagt CD, 1998

[Fröhlich & Messenleiter, 2004]
Fröhlich, C., Messenleiter, M., *TERRESTRIAL LASER SCANNING – NEW PERSPECTIVES IN 3D SURVEYING*, artikel fra http://www.isprs.org, frohlichmessenleiter.pdf under mappen 'kilder' på vedlagt CD, 2004

[Glaus, 2006]
Glaus, Ralph, *Kinematic Track Surveying by Means of a Multi-Sensor Platform*, artikel fra http://www.geometh.ethz.ch, glaus.pdf under mappen 'kilder' på vedlagt CD, 2006

[Hesse et. al., 2007]
Hesse, Christian, Neuner, Hans, Kutterer, Hansjörg, *STATISTICAL ANALYSIS OF KINEMATIC LASER SCANS*, artikel fra http://www.zf-laser.com, hesse.pdf under mappen 'kilder' på vedlagt CD, hentet 2007

[Jansa et. al., 2004]
Jansa, J., Stiudnicka, N., Forkert, G., Haring, A., Kager, H., *Terrestrial laserscanning and photogrammetry – Acquisition techniques completing one another*, artikel fra http://www.isprs.org, jansa.pdf under mappen 'kilder' på vedlagt CD, 2004

[Presle, 2000]
Presle, G., *The EM250 high-speed track recording coach and the EM-SAT120 track survey car, as networked track diagnosis and therapy system*, Rail Engineering International, 2000

[Prototyping, 2004]
Prototyping, *Software Prototyping*, artikel fra http://www.but.aau.dk, prototyping.pdf under mappen 'kilder' på vedlagt CD, hentet 2007

[Staiger, 2003]
Staiger, Rudolf, *Terrestrial Laser Scanning Technology, Systems and Applications*, artikel fra http://www.fig.net, staiger.pdf under mappen 'kilder' på vedlagt CD, 2003

[Wehr, 2005]
Wehr, A., *LASER SCANNING AND ITS POTENTIAL TO SUPPORT 3D PANORAMIC RECORDING*, artikel fra http://www2.informatik.hu-berlin.de, wehr.pdf under mappen 'kilder' på vedlagt CD, 2005

[Wildi & Glaus, 2002]
Wildi, Thomas, Glaus, Ralph, *A Multisensor Platform for Kinematic Track Surveying*, artikel fra http://www.geometh.ethz.ch, wildiglaus.pdf under mappen 'kilder' på vedlagt CD, 2002

14.2 Bøger

[Aunsborg, 1997]
Aunsborg, Christian, *Projektarbejdets teori og metode – Kompendium til Landinspektøruddannelsen, 7. semester*, Aalborg Universitet, 1997, mindre ændringer i 2001

[Reenberg et. al., 2005]
Reenberg, Palle, Jørgensen, Carsten, Tursø-Finnich, Lene, *Landmåling på banen – Banenorm BN2-94-1*, Banedanmark, 2005

[Cederholm, 2000]
Cederholm, Peter, *Udjævning*, Aalborg Universitet, 2000

[Jensen, 2003]
Jensen, Karsten, *Landmåling i Teori og Praksis*, Laboratoriet for Geoinformatik, Institut for Samfundsudvikling og Planlægning, Aalborg Universitet, 2003

[Jepsen et. al., 2003]
Jepsen, Rie, Nordestgaard, Allan, Petersen, Jens Emil, Lassen, Morten, *IT udvikling*, Dafolo A/S, Frederikshavn, 2003

[Kašpar et. al., 2004]
Kaspar, Milan, Pospisil, Jiri, Stroner, Martin, Kremen, Tomas, Tejkel, Milos, *LASER SCANNING – In civil engineering and land surveying*, Stavebni geologie, Prague, Czech Republic, 2004

[Reeve & Petch, 1999]
Reeve, Derek, Petch, James, *GIS Organisations and People*, Taylor and Francis, 1999

14.3 Vejledninger og infomateriale

[Abtus, 2007]
Abtuslimited, *Abtus Horizontal Alignment Trolley – Abt4530 – Operating Manual*, brugervejledning fra http://www.abtus.com, abtus.pdf under mappen 'kilder' på vedlagt CD, hentet 24/6 2007

[Abtus2, 2007]
Abtuslimited, *ABT 4530 – ALIGNMENT TROLLEY*, brugervejledning fra http://www.abtus.com, abtus2.pdf under mappen 'kilder' på vedlagt CD, hentet 24/6 2007

[Amberg, 2007]
AMBERG TECHNOLOGIES, *GRP5000 – The mobile scanner solution for infrastructure analyses*, infomateriale fra http://www.amberg.ch, amberg.pdf under mappen 'kilder' på vedlagt CD, hentet 24/6 2007

[Banedanmark, 2005]
Banedanmark, *Arbejde i spor*, informateriale fra http://www.banedanmark.dk, banedanmark.pdf under mappen 'kilder' på vedlagt CD, hentet 24/6 2007

[Leica2, 2007]
Leica, *Leica HDS4500 Product Specifikations*, informateriale fra http://www.leica.dk, leica2.pdf under mappen 'kilder' på vedlagt CD, hentet 24/6 2007

[Zoller+Fröhlich, 2007]
Zoller+Fröhlich, *Technical data PROFILER* , informateriale fra http://www.zf-laser.com, zollerfrohlich.pdf under mappen 'kilder' på vedlagt CD, hentet 24/6 2007

14.4 Internetsider

[Abtus3, 2007]
Abtuslimited, *http://www.abtus.com/Rail/Glossary/glossary.htm*, abtus3.pdf under mappen 'kilder' på vedlagt CD, hentet 24/6 2007

[Fli-map, 2007]
Fli-map, *http://www.flimap.com/site15.php*, fli-map.pdf under mappen 'kilder' på vedlagt CD, hentet 24/6 2007

[i3mainz, 2007]
i3mainz, *http://www.scanning.fh-mainz.de/survey_data/Hardware.pdf*, i3mainz.pdf under mappen 'kilder' på vedlagt CD, hentet 24/6 2007

[Jacobs, 2004]
Jacobs, Geoff, *http://www.profsurv.com/archive.php?issue=94&article=1327*, 2004 jacobs.pdf under mappen 'kilder' på vedlagt CD, hentet 24/6 2007

[Leica, 2007]
Leica, *http://www.leica-geosystems.com/se/sv/lgs_51792.htm*, leica.pdf under mappen 'kilder' på vedlagt CD, hentet 24/6 2007

[Modelbaneteknik, 2007]
Modelbaneteknik, *http://www.modelbaneteknik.dk*, besøgt 14/4 2007

[Stage, 2003]
Stage, Jan, *http://www.cs.auc.dk/~jans/courses/hci-courses/db-2003/ppt/Lektion06.ppt*, stage.ppt under mappen 'kilder' på vedlagt CD, hentet 24/6 2007

[Strukton, 2007]

Strukton, *http://www.eurailscout.com/EN_ufm120.shtml*, strukton.pdf under mappen 'kilder' på vedlagt CD, hentet 24/6 2007

[Wikipedia, 2007]
Wikipedia, *http://da.wikipedia.org/wiki/K%C3%B8reledning*, wikipedia.pdf under mappen 'kilder' på vedlagt CD, hentet 24/6 2007

[Wikipedia2, 2007]
Wikipedia, *http://en.wikipedia.org/wiki/3D_scanner#triangulation*, wikipedia2.pdf under mappen 'kilder' på vedlagt CD, hentet 24/6 2007

14.5 Projekter fra Aalborg Universitet

[Lysehøj & Nielsen, 2003]
Lysehøj, Gitte, Nielsen, Eskil Kjærshøj, *Terrestrisk laserscanning – Kortlægning af togskinner*, Landinspektørstudiet, 9. semester, Aalborg Universitet, 2003

[Pedersen & Rasmussen, 2005]
Pedersen, Lau Valentin, Rasmussen, Morten Pugholm, *Mobil kortlægning – integration af linie laserskanner på DyRoS*, Landinspektørstudiet, 10. semester, Aalborg Universitet, 2005

Bilag

Bilag A - Ordliste

Bilag B - Interview med Cowi Vejle

Bilag C - CD

- Banenorm BN2-94-1
- Specifikationer for Abtus 4530
- Specifikationer for HDS 4500
- Mailkorrespondancer
- Kilder
- Data
- Projektet

Bilag D - Struktur gennem databehandling

Ordliste

Tungestød: Er et fagudtryk inden for sporteknik, et tungestød er del af mekanikken der gør det muligt at dreje et skiftespor fra et spor til et andet.

Tungespids: Er et fagudtryk inden for sporteknik, et tungestød er hvor der køres på et skiftespor, der leder til et andet spor.

Nedstik: Dette foretages ved at et jernspyd bankes gennem skærver til betondækket ved opmåling af underføringer. Efterfølgende måles til miniprisme for enden af spydet, hvorpå længden kendes og herved opnås der måling af kote til betondækket.

CCD kameraer: Et CCD-kamera er et elektronisk kamera, som man kender bl.a. fra videokameraer og digitalkameraer. CCD betyder Charged-Coupled Device (Ladnings-koblet enhed). Kameraet bygger på halvlederteknik, som kendes fra computer-chips

Radiometriske: En bred vifte af målemetoder der anvender udstråling, eksempler er røntgen og radiobølger

Kardansk: At holde en genstand vandret, selv om den er fæstnet til en anden genstand, der er i uregelmæssig bevægelse, f.eks. kompasset i et skib. Ophængningen tillader genstanden at vippe om to aksler, der står vinkelret på hinanden.

Sidespor: I dette projekt skal sidespor forstås som spor der er mindre en de hovedespor der anvendes af IC3 togene i dag tværs gennem Danmark. Sidespor eller spor af klasse b. kan være mindre strækninger af banedanmarks net eller mindre privatbane strækninger.

Skiftespor: Et skiftespor er den mekaniske del på sporet hvor et spor ledes til et andet.

Vertex: Er et koordinatkryds der automatisk tildeles finscannede targets i Cyclone, disse punkter kan efterfølgende bruget til sammenknytning af punkskyer.

Postpositionering af GPS: Beregningerne af positionerne sker efter målingerne er foretaget.

Roll: Drejning om Y-aksen.

Pitch: Drejning om X-aksen.

Yaw: Drejning om Z-aksen.

Konform: Vinkeltro.

Delaunay triangulation: En triangulation der opdeler polygoner i trekanter. Hvert af polygonens hjørnnepunkter forbindes ved linier, med de hjørnepunkter der ligger indenfor kortest afstand.

INTERVIEW MED COWI VEJLE

Referat af besøg hos COWI Vejle

Tirsdag d. 6/3 2007 drog projektgruppen til Vejle for at afholde et møde med deres medarbejder Niels H. Kjær.

På forhånd ønskede projektgruppen at får svar på en del spørgsmål angående COWI´s måletrolje, som skal anvendes til afgangsprojektet. I forbindelse med mødet ønskede projektgruppen at få beskrevet, hvorledes måletrojlen anvendes i firmaet og hvilke opgavetyper troljen anvendes til. Desuden var det essentielt at finde frem til hvordan måletroljen kalibreres og om COWI har foretaget nogen form for kontrol af nøjagtighederne angivet i specifikationerne fra producenten.

Måletroljen måler sporets relative beliggenhed. Formålet med målingerne er at fastlægge sporets kvalitet. Kvaliteten er beskrevet i banenormen BN1-38-2. (kan rekvireres hos Jan Falster-Hansen). Under mødet blev specifikationerne for måletroljen diskuteret, og det blev gjort klart at ikke alle opgaver, som det er angivet i manualen, kan måles med den angivne nøjagtighed. Bl.a. kunne troljen ikke anvendes til at måle kurver med tilstrækkelig nøjagtighed. Disse fejl vil fremgå af den kalibreringsrapport som projektgruppen efter mødet har fået lovning på.
Med hensyn til COWI´s ønsker for et nyt målesystem, fremlagde projektgruppen de foreløbige ideer, hvortil Niels H. kom med forslag. Her ønskedes yderligere en videooptagelse af banestrækningen. Ikke nødvendigvis til opmåling, men mere til orientering. Dette kunne dog nok ikke automatisere arbejdsopgaver som linjesyn, som normalt foretages i forbindelse med måling med trojlen. Et linjesyn er en visuel inspektion af banestrækningen og foretages p.t. ved at COWI yder denne service for rekvirenten, sideløbende med opmålingen af banelegemet. Efter inspektion beskrives legemets stand. Liniesynet er et krav fra Banenormerne.
Derudover mente Niels H. at området der var interessant for opmålingen var fra midten af jernbanen og så ca. 4 m på hver side. Dette var ikke endegyldigt for alle strækninger, men var der mest normale, hvorfor vi skulle koncentrere os om god nøjagtighed indenfor dette område.
Samtidig foreslog Niels H. at måletroljen evt. kunne suppleres med GPS-udstyr til positionering og verifikation af kurveradier.

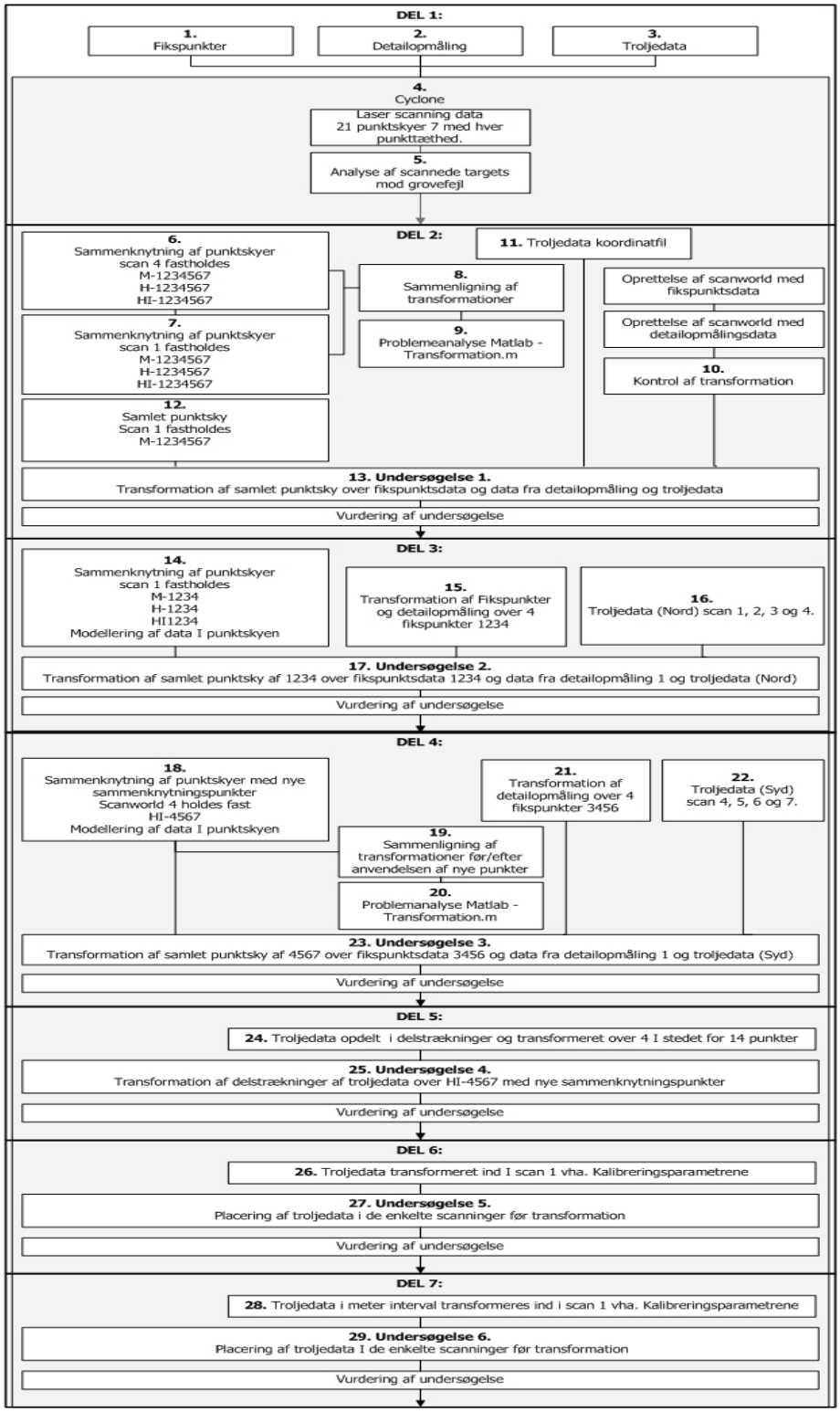
Foruden svar på projektgruppens spørgsmål, introducerede Niels H. ligeledes to nuværende systemer, hvor Strix målevognen fra Sverige kunne foretage begrænset opmåling på banen og Strukton fra Holland har fået tildelt en opgave på opmåling af 3500 km bane i Danmark med en målevogn der kan måle de samme objekter mv., som projektgruppen ønsker at systemet opbygget gennem afgangsprojektet kan klare. Den eneste forskel ville være at Struktons vogn kun kan køre på hovedspor, grundet størrelse og hastighed, samt at det er en motoriseret togvogn, hvor projektgruppens målesystem skulle være mere håndterlig og desuden skulle kunne klare alle typer bane, pga. den justerbare måletrolje.
Der er forskel på opmåling på belastet og ubelastet spor. Måles på ubelastet spor tillader banenormen at der korrigeres så resultaterne bliver sammenlignelige med målinger på belastet spor.

På mødet blev det desuden aftalt at Niels H. skulle sørge for følgende:

- Sørge for kontakt, så måletrojlen kan komme til Aalborg
- Sørge for kontakt til Jan Falster-Hansen, som er sporspecialist og sidder i COWI Lyngby
- Fremskaffe kalibreringsrapport til måletroljen og sende kopi

CD

Struktur gennem databehandlingen



Dette afgangsprojekt er udarbejdet i periode fra d. 1. februar til d. 26. juni 2007.

Gennem dette afgangsprojekt forsøges at udvikle en ny og effektiv prototype til jernbanemåling gennem en integration mellem en laserskanner og en jernbanetrolje, der indeholder flere sensorer, da den traditionelle målemetode ved anvendelse af totalstation, benyttes i dag, er en meget tidskrævende proces. Projektets foranalyse indeholder en analyse af kravene til banemåling i Danmark og et litteraturstudie af eksisterende løsninger og allerede undersøgte metoder til banemåling. Projektets instrumentvalg og egentlige problemformulering opstilles på baggrund af foranalysen og besvarelsen af den initierende problemstilling.

De valgte instrumenter til opgaven undersøges (Leica HDS4500 Laser skanner og Abtus 4530 banetrolje), og der bliver designet et integreret system til jernbanemåling, som efterfølgende kalibreres. Der er blevet udført testmålinger af det integrerede system på en nedlagt banestrækning ved Aalborg, hvorefter der bliver udført diverse undersøgelser af de opnåede nøjagtigheder for at se, om denne integration fremover vil være en mulig løsningsmodel til jernbanemåling i Danmark. Den integrede løsning er testet i både teori og praksis.

Til databearbearbejdningen gennem projektet anvender projektgruppen programmerne Geooffice, Matlab, TMK og Cyclone.

Der rettes en tak til COWI for lån af udstyr og support gennem projektarbejdet.

Jesper Rønbøg Nørnberg, Uffe Ravn-Christensen & Lau Jensen