

Thomas Svensson, Håkan Larsson, Lena Klasén, Markus Henriksson, Tomas Carlsson, Ingvar Nedgårds, Dietmar Letalick, Magnus Elmquist, Göran Carlsson, och Staffan Cronström

Prov i Kvarn med passiva och aktiva optroniska sensorsystem



Thomas Svensson, Håkan Larsson, Lena Klasén, Markus Henriksson, Tomas Carlsson, Ingvar Nedgårds, Dietmar Letalick, Magnus Elmquist, Göran Carlsson, Staffan Cronström

Prov i Kvarn med passiva och aktiva optroniska sensorsystem

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Avdelningen för Sensorteknik 581 11 Linköping	Rapportnummer, ISRN FOI-R--0740--SE	Klassificering Teknisk rapport
	Forskningsområde 4. Spaning och ledning	
	Månad, år December 2002	Projektnummer E3036
	Verksamhetsgren 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	Delområde 42 Spaningssensorer	
Författare/redaktör Thomas Svensson Dietmar Letalick Håkan Larsson Magnus Elmquist Lena Klasén Göran Carlsson Markus Henriksson Staffan Cronström Tomas Carlsson Ingvar Nedgårds	Projektledare Lena Klasén	
	Godkänd av Lena Klasén	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning FM	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig	
Rapportens titel Prov i Kvarn med passiva och aktiva optroniska sensorsystem		
Sammanfattning (högst 200 ord) I det nätverksbaserade försvaret (NBF) kommer snabbt och effektivt utnyttjande av information att vara centralt. För att kunna klara algoritmutveckling krävs datainsamling i realistiska scenarier. Insamling av sådana data skedde i Kvarnområdet utanför Linköping den 2 – 3 maj år 2002, då en samregistrering mot en stridsvagn T72 med aktiva och passiva system genomfördes. Insamlade data kommer att användas för utvärdering av multisensorsystem och avser att visa den ökade förmåga som kan erhållas genom att kombinera multi/hyperspektrala system och laserradarsystem mot dolda och kamouflerade mål. Mätningen utgör underlag för att värdera aktiva och passiva systems förmåga att under varierade betingelser registrera mål och bakgrund i en scen. Parametrar som varierades var avståndet (150 m – 1905 m), aspektvinkel, driftstatus (kall, varm, varm med motor igång) och ljusförhållande (registrering dag, kväll eller natt). Även vädret kom att ingå som en parameter eftersom det under de två mätdagarna skiftade mellan soligt och klart väder till regn och dålig sikt. Medverkande system var en multispektral IR-kamera, en QWIP-kamera, Optech ILRIS-3D laserradar, ett vibrometri-system och ett försökssystem för grindad avbildning. Dessutom ingick system för positioneringsuppmätning (GPS och avståndsmätare), en väderstation för registrering av väderparametrar samt en scintillometer för registrering av atmosfärisk turbulens. Tidssynkronisering gjordes av samtliga ingående mätsystem. Turbulensnivån modellerades utifrån insamlade väderparametrar. Överensstämmelsen mellan modellerad turbulensnivå och med scintillometer uppmätt turbulensnivå var god.		
Nyckelord Multisensor, multispektral avbildning, grindad avbildning, laser radar, vibrometri, väderparametrar, turbulensmodellering		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 98 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Sensor Technology SE-581 11 Linköping SWEDEN	Report number, ISRN FOI-R--0740--SE	Report type Technical report
	Research area code 4. C4ISR	
	Month year December 2002	Project no. E3036
	Customers code 5. Commissioned Research	
	Sub area code 42 Surveillance Sensors	
Author/s (editor/s) Thomas Svensson Dietmar Letalick Håkan Larsson Magnus Elmquist Lena Klasén Göran Carlsson Markus Henriksson Staffan Cronström Tomas Carlsson Ingvar Nedgårds	Project manager Lena Klasén	
	Approved by Lena Klasén	
	Sponsoring agency Swedish Armed Forces	
	Scientifically and technically responsible	
Report title (In translation) Trials with passive and active sensors at Kvarn trial site		
Abstract (not more than 200 words) Fast and efficient use of information is a key issue in a net centric defence. In order to develop algorithms, data collection in realistic scenes is required. Such data was collected during trials with passive and active sensors at Kvarn trial site in May 2 – 3, 2002. Several passive and active sensors were used in order to register a T72 tank that was chosen as target. The measurements will be used in the process of evaluating multisensor systems. The intention is to show enhanced sensor ability by the use of multi/hyperspectral system and laser radar system against occluded or camouflaged targets and background scenery at varying conditions. Furthermore, the purpose was to obtain information from multidimensional sensor system to be used for development and evaluation of algorithms based on signal- and image processing for detection and recognition. The parameters that were varied are the distance (150 m – 1905 m), aspect angle, status of the engine of the tank (cold, hot, hot with the engine running) and lighting conditions (day, evening and night time registrations). The weather came to contribute as one parameter that is varies as the weather conditions shifted from sunny with clear sky, to rain and limited visual sight. The sensors that were used are a multispectral IR-camera, a QWIP-camera, an Optech ILRIS-3D laser radar, a vibrometry system and a system for gated viewing. Beside this, instruments for positioning of the sensors and the target, a weather station to register weather data and a scintillometer to measure the turbulence in the atmosphere, were used. The turbulence was modelled from collected weather parameters, which agreed well with the measured turbulence.		
Keywords Multisensor, multispectral imaging, gated viewing, laser radar, vibrometry, atmosphere, turbulence modelling,		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 98 p.	
	Price acc. to pricelist	

1. Inledning	6
2. Provens genomförande	6
2.1. Provprogram.....	7
2.2 Provplatsens lokalisering	7
2.3. Bilder från mätplats och målområde.....	8
2.4 Målområdet.....	11
2.5 Målet.....	12
3. Provutrustning	12
3.1 Multispektral IR-sensor (MULTIMIR)	12
3.2 QWIP-kamera ”ThermaCAM™ SC3000”	13
3.3 System för grindad avbildning (GV)	14
3.4 Scintillometer BLS900.....	14
3.5 Väderstation.....	16
3.6 Tredimensionell laserradar	17
3.6.1 Principen för laserradmätningar.....	17
3.6.2 Laserskanner Optech ILRIS-3D	17
3.6.3 Mätförfarande ILRIS-3D	19
4. Utvärdering av sensordata och resultat.....	22
4.1 MULTIMIR	22
4.1.2 Fusionering av bilddata.....	24
4.2 QWIP-kamera	26
4.3 GV-kameran	27
4.4 Utvärderingsmetoder för registrerade data från Optech ILRIS-3D	28
4.4.1 Generering av geometriska modeller	28
4.4.2 Beräkning av lasermålarea och generering av skalade intensitetsbilder	34
<i>Kalibrering av Optech ILRIS-3D i samband med lasersignaturmätningar</i>	<i>37</i>
4.4.3 Mätningar med Laserradar i Kvarn.....	38
4.4.4 Felanalys vid mätning med ILRIS-3D.....	42
4.4.5 Multipla vyer (mätningar vid FOI i Linköping).....	43
4.4.6 Sammanfattning 3D laserradar	44
4.5 Vibrometri.....	46
4.5.1 Kvarn 2-3 maj 2002.....	46
4.5.2 Skövde 12-13 juni 2002.....	47
4.5.2 Analys av vibrometridata.....	48
4.5.3 Sammanfattning Vibrometri	54
5. Atmosfärsegenskaper	56
5.1 Scintillometer	56
5.2 Väderstation.....	59
5.2 Resultat och diskussion	69
6. Diskussion	73
7 Referenser	73

Bilaga 1. Driftsprofil	75
Bilaga 2. Genomförda mätningar vid fältförsök.....	76
Bilaga 3. Insamlade mätdata.....	79
Bilaga 4. Felanalys Optech 3D	94
Bilaga 5. Polärplottar T72 – Kvarn och Skövde	97

1. Inledning

Avsikten med proven var att registrera bilder av mål med aktiva/passiva system inom projektet Optroniska Sensorsystem (OSS) E3036 samt även att registrera bilder med FOIs grindade system som underlag för studie av ett system verksamt vid 1.5 μm inom projektet Fördjupad studie av Grindad Avbildning (GV) E3889.

För OSS skulle mätningar av mål med aktiva/passiva system under rådande väder- och bakgrundsbetingelser genomföras. Avsikten var att använda dessa inledande mätningar av mål- och bakgrundskontraster för att studera nya spektraloptimeringar, inverkan av atmosfärsdämpning och turbulens på strålningens koherensegenskaper och resulterande signalfluktuationer. Mätdata användes också för att utforma och värdera algoritmer för bild- och signalbehandling av data från multidimensionella sensorsystem och för inledning av arbetet med värdering av prestanda hos aktiva och passiva system.

Denna rapport avser också utgöra en dokumentation av provens genomförande för fortsatt utvärdering av insamlade data från mätkampanjen.

2. Provens genomförande

Proven genomfördes i Kvarn den 2 – 3 maj år 2002. Följande system användes vid mätningarna:

- Multispektral IR-kamera (1.5 – 5.2 μm)
- QWIP-kamera (8 – 9 μm)
- Försökssystem för GV (laservåglängd 532 nm)
- OPTECH ILRIS-3D laserradar (laservåglängd 1.5 μm)
- Vibrometri-system (laservåglängd 1.55 μm)
- Scintillometer med räckvidd 3 km, lånad från FGAN
- Väderstation för registrering av väderdata
- CCD-kamera och ljusförstärkare för visuella bilder av målområdet
- Avståndsmätare för mätning av avstånd till målet
- GPS för uppmätning av mätplatsen och målpositionerna

Beskrivningar av mätutrustningen finns i **3. Provutrustning**. Den gemensamma mätplatsen var förlagd till Bondeby, se **2.2 Provplatsens lokalisering**. Målet, en stridsvagn T72, flyttades i sydlig riktning från Bondeby till avstånd som var lämpliga för registrering med bildsensorerna och övriga mätsystem. Positioner på Kvarns skjutfält mättes upp under proven med Garmin's GPS i Rikets nät angivet i 10-tal meter.

T72an varmkördes enligt Bilaga 1. Under den tid då motorn var igång under mätningarna kördes motorn med ett och samma varvtal och utan pådrag för likartad utblåsstatus. Den sida där utblåset var placerat vändes från kamerorna när det var möjligt. De bildalstrande sensorerna placerades bredvid varandra för samma aspektvinkel mot målet. Optech laserradar var placerad i nära anslutning till T72an. Scintillometern placerades i anslutning till GV systemet, med sändarenheten på ca 2 km avstånd.

2.1. Provprogram

Innehållet i provprogrammet återfinns i Bilaga 2, där också filnamnen finns som referens till insamlade data. En kort sammanfattning av provprogrammet ges i Tabell 2.1 nedan.

Tabell 2.1. Sammanfattning av provprogrammet (Bilaga 2) i Kvarn. Förutom avståndet varierades också aspektvinkeln och T72s driftmod (igång, varm, kall m.m.)

2002-05-02		
Moment		Tid (ca)
1	Riggning av försöksutrustning Tidssynkning av försöksutrustning	
2	Utplacering av T72 på 150 m	
3	Registrering av T72, 150 m	18.50 – 20.30
4	Utplacering av T72 på 650 m	
5	Registrering av T72, 650 m	20.55 – 21.40
6	Utplacering av T72 på 1905 m	
7	Registrering av T72, 1905 m	21.55 – 00.00
8	Utplacering av T72, 150 m	
9	Registrering av T72, 150 m	23.45 – 12.15
2002-05-03		
Moment		Tid (ca)
1	Registrering av kall T72, 150 m	08.30 – 09.00
2	Maskering av T72	
3	Registrering av kall maskerad T72, 150 m	09.15 – 09.45
4	Borttagning av maskering, placering av T72 närhåll	
5	Registrering av T72 närhåll	10.30 – 11.30
6	Utplacering av T72 på 1905 m	
7	Registrering av T72, 1905 m	12.40 – 13.20

Ljushöjningarna under mätningarna i Kvarn kan den första dagen (mycket) schematiskt delas in enligt följande:

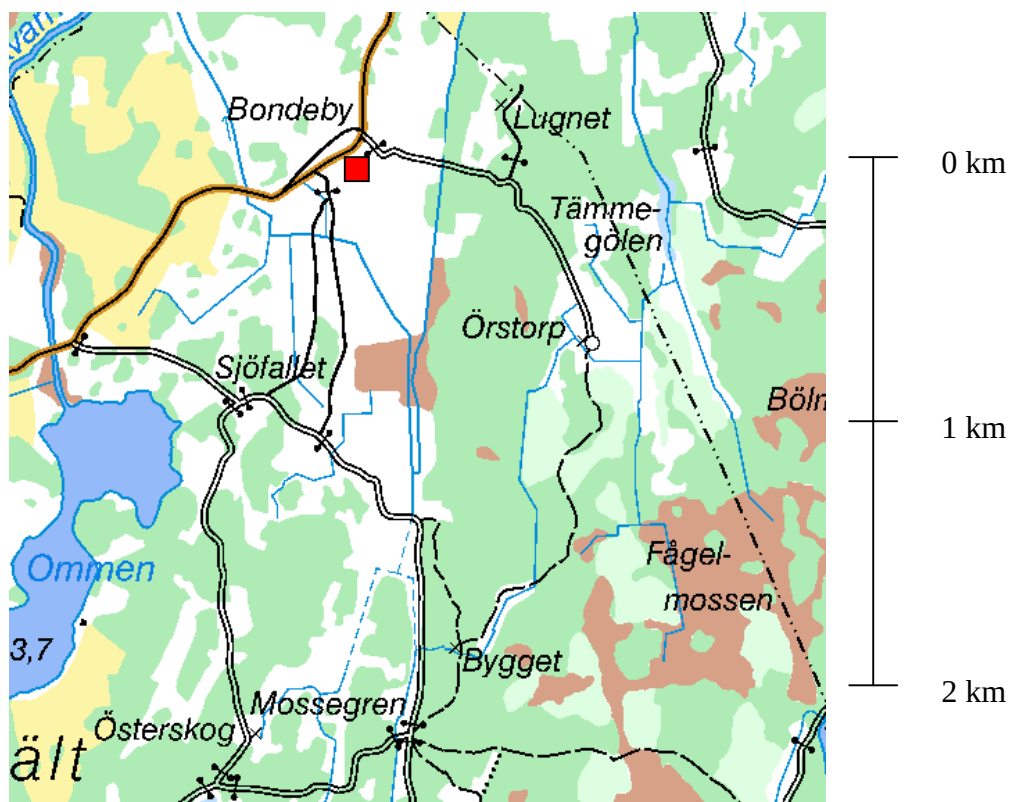
Kl.14.30 – 19.30	Dagsljus
Kl.19.30 – 21.00	Skymning
Kl.21.00 – 00.30	Natt

Under mätningarna den andra dagen (kl.08.30-13.30) var det dagsljus hela tiden. Dock var det skiftande sikt- och väderförhållanden med klart väder på morgonen som övergick i regn framåt 12-tiden.

Av ovan framgår att tidssynkningen var en viktig del vid sammätningen i Kvarn.

2.2 Provplatsens lokalisering

Provplatsen var belägen i Bondeby med målområdet i sydlig riktning (Figur 2.1).



Figur 2.1. Karta över Bondeby. Den röda rutan visar den gemensamma uppställningsplatsens läge. Till höger syns en approximativ längdskala.

2.3. Bilder från mätplats och målområde

Provutrustningen var samlad på en gemensam uppställningsplats i Bondeby (Figur 2.2 – 2.5). Scintillometerns optiska sändare var placerad i ett skogsbryn ca 1900 m från den gemensamma mätplatsen (Figur 2.6).



Figur 2.2. 2002-05-03, ca kl. 09.16. Den gemensamma uppställningsplatsen. Väderstationens syns streckinramad på bilden. Den svarta rutan visar sensorernas placering inomhus (se Figur 2.3 nedan). Den vita skåpbilen inklusive partytält (utmärkt med en pil) var vibrometriustrutningens uppställningsplats



Figur 2.3. (från Figur 2.2) Sensorernas placering inomhus. Vänstra fönstret: scintillometerns mottagarenhet; mittfönstret: GV-enheten; högra fönstret : MULTIMIR och (knappt synlig) QWIP-kamera.



Figur 2.4. Den gemensamma uppställningsplatsen inomhus. Inramad längst till vänster syns MULTIMIR. Längst till höger syns scintillometerns optiska mottagare. De två instrumenten placerade framför mittfönstret är GV-enhet (vänster) och avståndsmätare (höger)

Figur 2.5. Den gemensamma uppställningsplatsen inomhus. Bilden visar MULTIMIR och QWIP-kameran med tillhörande svart respektive vit skärm.



2.4 Målområdet

Figur 2.6 – 2.7 visar målområdet med riktning mot syd från Bondeby.



Figur 2.6. 2002-05-02, ca kl.17.30. Målområdet sett från den gemensamma mätplatsen. Den svarta rutan visar placeringen av scintillometers optiska sändare. Avståndet mellan mottagare och sändare var ca 1905 m.



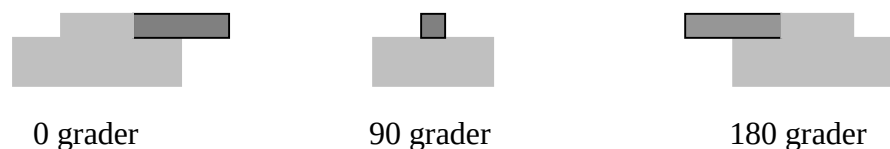
Figur 2.7. 2002-05-03, ca kl.13.11. Målområde (och mål) sett från den gemensamma uppställningsplatsen. Sikt och solinstrålning varierade; bilden visar siktförhållanden efter att det hade börjat regna vid lunchtid.

2.5 Målet

Målet utgjordes av den ryska stridsvagnen "T72" (Figur 2.8) som registrerades på 150 m, 650 m och 1900 m under olika aspektvinklar, under olika ljusförhållanden (dag, kväll, natt) och under varierade driftförhållanden (motor kall/varm/igång).



Figur 2.8. Målet, stridsvagn "T72", här i position 0 grader (positionsangivelse, se Figur 2.9).



Figur 2.9. Målets position gavs dels i form av avståndet [m] mellan sensorerna och målet och dels i form av aspektvinkeln [grader]. Figuren visar T72 under aspektvinklarna 0, 90 och 180 grader.

3. Provutrustning

3.1 Multispektral IR-sensor (MULTIMIR)

En utförlig beskrivning av den multispektrala IR-sensorn MULTIMIR (MULTIspectral Mid wave IR) finns i en tidigare FOI-rapport.¹ Kamerans parametrar kan ändras genom val av optik, integrationstid, bildtakt och bildstorlek (subframes). Även spektralt kan systemet varieras genom att montera bort filterhjulet. En kortfattad presentation av det system som användes i Kvarn återfinns i Tabell 3.1 nedan.

Tabell 3.1. MULTIMIR

Tillverkare	AIM (AEG Infrarot-Module)
Detektormaterial	HgCdTe (MCT)
Känslighetsområde	1,5-5,2 μm
FPA storlek	384×288 pixlar (110 592 st)
Pixelstorlek (μm)	20×20
Pixelavstånd (μm)	24
F-tal	f/2,0
Arbetstemperatur	79 K
Kylning	Linear Stirling cooler
Nedkylningstid	<7 min från 21 °C
Bildtakt (frame rate)	100 Hz med filterhjul och hela FPA:n
Integrationstid	2,6 ms
NETD	<25 mK specificerat vid T=300 K, $t_i=2,5$ ms
Strömförsörjning	12 V, ca 10 A under nedkylning, 6 A annars
Optik	100 mm f/2,0 optimerad för $\lambda=1,2-5,0$ μm
FOV (field of view)	5,3°×4,0°
IFOV (instantaneous field of view)	0,20 mrad
Filterhjul	Filter 1 1.55 – 1.75 μm Filter 2 2.05 – 2.45 μm Filter 3 3.45 – 4.15 μm Filter 4 4.55 – 5.2 μm
Dynamik	14 bit

Med filter 1 och filter 2 registreras huvudsakligen reflekterad strålning och med filter 3 och 4 huvudsakligen emitterad strålning. Ett problem är att optimalt fokus bara kan erhållas för ett band i sänder. Om fokus exempelvis optimeras för filter 1 medför det att bilden blir mer eller mindre suddig i filter 4 och, i detta fall, i mindre grad i filter 3 och 2. Effekten blir mer uttalad på längre avstånd. Vid registrering görs ofta en kompromiss så att fokus läggs mellan två filter – vilka filter som väljs beror av scenen.

3.2 QWIP-kamera ”ThermaCAM™ SC3000”

Om inte annat anges är data om QWIP-kameran, ”ThermaCAM™ SC3000”, i Tabell 3.2 nedan hämtade ur referens².

Tabell 3.2. QWIP-kameran ”ThermaCAM™ SC3000”

Tillverkare	FLIR Systems
Detektormaterial	GaAs
Våglängdsområde	8-9 μm
FPA storlek	320×240 pixlar
Pixelstorlek (μm)	25×25 ¹⁾
F-tal	?
Arbetstemperatur	70 K
Kylning	Linear Stirling cooler
Nedkylningstid	<6 min från 21 °C
Bildtakt (frame rate)	50/60 Hz
NETD	30 mK specificerat vid T=303 K

Strömförsörjning	12 V, ca 1.8 A
Optik	45 mm ²⁾
FOV	10°×7.5°
IFOV	0,55 mrad
Dynamik	14 bit

¹⁾ Uppgifter om detektorstorlek saknas i manual. Storleken har ansatts med ledning av uppgifter i datablad över QWIP-detektorer (Everett infrared)

²⁾ Uppgifter om fokallängd saknas i manual. En uppskattning har gjorts genom pixelräkning över mål och jämförelse med MULTIMIR.

3.3 System för grindad avbildning (GV)

Systemet för grindad avbildning (GV) finns beskrivet i en FOI rapport³. Vid detta försök användes dock en annan laser. Skillnaden mot tidigare mätningar är att denna laser har betydligt lägre energi per puls ~1/500 men högre pulsrepetitionsfrekvens (prf), 3 kHz. Istället för en puls per bild användes 30 pulser per bild.

Tabell 3.3. Laser

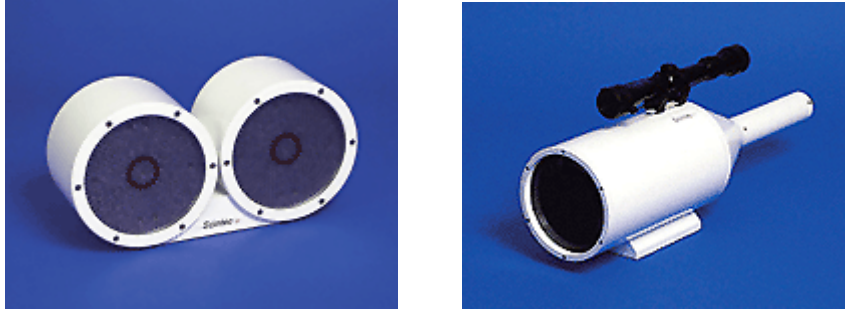
Tillverkare	Continuum
Pulsrepetitionsfrekvens (prf)	3 kHz
Pulslängd	3 ns
Energi per puls	0.1 mJ
Optik, strålexpander	10x

Tabell 3.4. Xybion-kameran, ISG-750

Tillverkare	Xybion Electronic Systems
Bidförstärkare	Generation III
Våglängdsområde	450-900 nm
FPA storlek	756x581
Bildtakt (frame rate)	25 Hz
Optik	Celestron 2000 mm f/10

3.4 Scintillometer BLS900

Turbulensdata registrerades med en scintillometer, BLS 900⁴, tillverkad av Scintec AG. Denna scintillometer mäter det avståndsviktade medelvärde över avstånd mellan 500 m – 3000 m. Den består av en optisk sändare och en optisk mottagare samt signalprocessningsenhet och mjukvara. Sändaren består i sin tur av två enheter, vardera med 450 ljusdioder i när-IR (880 nm) och 18 röda i det visuella området (Figur 3.1).



Figur 3.1. Scintillometer BLS900. Vänstra bilden visar sändarenheten; den högra figuren visar mottagaren

De 18 röda ljusdiодerna fungerar som funktionsindikatorer och visar pulsfrekvensen. Ljusdiодerna kan arbeta i fyra olika pulsmoder, 1 Hz, 5 Hz, 25 Hz och 125 Hz. 125 Hz pulsmod, vilken användes i Kvarn, ger maximal noggrannhet och medger också beräkning av värden på den tvärgående vindhastigheten. Mottagaren har två detektorer (kiselfotodiодer), där den ena detektorn används vid inriktning av mottagaren. Mottagarens optik har en fokallängd = 450 mm och en FOV = 8 mrad, vilket medför att inriktningen av mottagaren är ett kritiskt moment. Inriktning görs med stöd av tre signalvärden betecknade X, Y och Z. X och Y är signalintensiteten från respektive sändarenhet efter demodulering och Z är signalintensiteten före demodulering (sändarens två enheter frekvensmoduleras med 500 Hz respektive 1500 Hz). Efter signalprocessning av insamlade data presenterar mjukvaran 1 gång/min värden på bl.a. brytningsindex strukturparameter C_n^2 [m^{-2/3}], Frieds parameter r_0 [m], det medelvärdesbildade scintillationsindex, beta [-], för kanalerna X och Y samt vindhastigheten [m/s]. C_n^2 kallas också turbulenskonstant eller turbulensstyrka. r_0 betecknar den aperturdiameter som begränsar upplösningen till följd av turbulens. C_n^2 ger tillsammans med r_0 information om de optiska effekterna av atmosfärsturbulens.

Kort om mätprincipen för BLS900

Scintillometer BLS900 beräknar C_n^2 ur uppmätta signalfluktuationer (scintillationsindex). Principen är att medelvärdesbilda $\langle I_1 \rangle$ och $\langle I_2 \rangle$ samt variansberäkna σ_{11} och σ_{22} signalerna från sändarens två enheter. Resultaten omvandlas sedan till log-amplitudvarianser enligt (3.1) och (3.2)

$$B_{11} = \frac{1}{4} \log \left[1 + \frac{\sigma_{11}}{\langle I_1 \rangle^2} \right] \quad (3.1)$$

$$B_{22} = \frac{1}{4} \log \left[1 + \frac{\sigma_{22}}{\langle I_2 \rangle^2} \right] \quad (3.2)$$

Värden på C_n^2 erhålls sedan genom (3.3)

$$C_n^2 = \alpha_r B_{11} D_t^{7/3} L^{-3} = \alpha_r B_{22} D_t^{7/3} L^{-3} \quad (3.3)$$

och r_0 genom (3.4)

$$r_0 = \left[0.423 (2\pi/\lambda)^2 L C_n^2 \right]^{3/5} \quad (3.4)$$

där faktorn α_t beror av förhållandet mellan sändarens och mottagarens apertur (= 4.2 för BLS900), D_t [m] är diametern på sändarens enheter, λ är våglängden [m] och L är vägsträckan [m]. Ovan ((3.1) – (3.4)) gäller för ett förhållande med svag turbulens som kännetecknas av att intensitetsvariansen (B_{11} , B_{22}) är proportionell mot turbulensstyrkan C_n^2 . Situationen blir mer komplicerad vid en (svag) turbulensnivå där hänsyn även måste tas till absorptionsfluktuationerna som annars kan förväxlas med turbulens. Likaså kompliceras situationen vid förhållanden med stark turbulens, då proportionalitet inte längre råder mellan intensitetsvariens och turbulensstyrka och mätningseffekter inträder. Teorin för dessa fall finns beskriven i ref. 4. BLS900 använder en numerisk look-up-tabell för att korrigera resultaten för mätningseffekter. I look-up-tabellen finns även definierat ett max-värde för log-amplitudvariansen, över vilken C_n^2 inte går att definiera. Större värden än detta max-värde resulterar i felmeddelanden.

Scintillationsindex ”beta” är stråltvärsnittets varians som beräknas enligt

$$beta = \frac{\langle (I - \bar{I})^2 \rangle}{\bar{I}^2} = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} - 1 \quad (3.5)$$

3.5 Väderstation

Insamling av väderdata gjordes med en väderstation, GroWeather, som registrerar temperatur [°C], lufttryck [mbar], vindhastighet [m/s], vindriktning [°], solinstrålning [W/m²], luftfuktighet [%], sikt (1 min) [m] och sikt (10 min) [m]. Sensorernas mätområden, upplösning och noggrannhet framgår av Tabell 3.5.

Tabell 3.5. Vädersensorer – mätområde, upplösning, noggrannhet

Sensor	Mätområde	Upplösning	Noggrannhet, ±
Temperatur/ °C	0 – 60	0.1	0.5 °C
Lufttryck / mbar	880 – 1080	0.1	1.7 mbar
Vindhastighet / (m/s)	0.9 – 78	0.1	5 %
Solinstrålning/ (W/m ²)	0 – 1500	1	5 %
Luftfuktighet/ %	0 – 100	1	3 %
Vindriktning/ °	0 – 360	1	7 °

Fyra av väderparametrarna (temperatur, lufttryck, vindhastighet och solinstrålning) användes i turbulensmodelleringen (Atmosfärsegenskaper). Mätosäkerheten i väderparametrarna inverkar på precisionen i modelleringen men normalt kan bortses från den eftersom osäkerheten i andra modellparametrar är större. Att notera är dock att den nedre gränsen för vindmätarens område är 0.9 m/s. Periodvis var det en vindstyrka i den storleksordningen, eller lägre, under mätningarna i Kvarn.

3.6 Tredimensionell laserradar

3.6.1 Principen för laserradmätningar

Med en avbildande skannande laserradar kan x-, y-, och z-koordinater (3-D) samt intensitet registreras i varje mätpunkt. En bild består typiskt av flera hundratusen punkter. Flera bilder används för att kunna sätta ihop geometriska modeller. Dessa modeller används för fortsatt arbete med simuleringar. Eftersom ett intensitetsvärde samlas in för varje punkt går det också att beräkna ett objekts lasermålarea utifrån inskannade data. Våglängden på den skanner som användes i Kvarn, Optech ILRIS-3D, är intressant eftersom våglängden 1,5 μm är en ögonsäker våglängd. Den använda utrustningen är långsam, men framtida teknik med fokalplansmatriser (matrisdetektorer) kan simuleras med hjälp av ett skannande system, om än i ett långsammare förlopp. Ett framtida system kommer att kunna leverera 3-D- och intensitetsdata i videotakt (25 bilder/s), vilket innebär att detektion och klassificering kommer att kunna ske sekundsabbt. Mätningar med multipla vyer och modellering i Tönnersjö (se nedan) visar möjligheten med framtida 3-D-system.

3.6.2 Laserskanner Optech ILRIS-3D

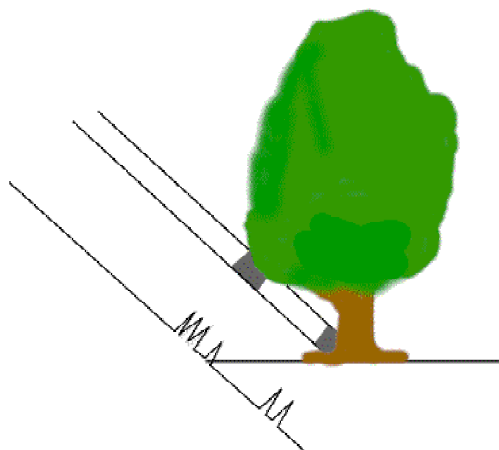
Laserskannern Optech ILRIS-3D, se Figur 3.2, är ett integrerat, laserbaserat sensorsystem för kommersiell mätning, med inbyggd digitalkamera och mjukvaruverktyg. Instrumentet tar emot operatörens kommandon via en Palm pilot, skannar av scenen, samlar in data och lagrar uppmätta punkter innehållande position i x-, y- och z-koordinater samt intensitet på ett flashkort.



Figur 3.2. Laserskanner Optech ILRIS-3D

För att beräkna avståndet till mätobjektet, mäts tiden från det att en laserpuls sänds ut till dess att den kommer tillbaka ("time of flight"). Det finns möjlighet att välja om första eller sista eko skall sparas, skillnaden åskådliggörs i Figur 3.3. Tiden mäts med en högprecisionsräknare, och räknas sedan om till ett avstånd med hjälp av en mikroprocessor. Den smala laserstrålen visar små detaljer (ner till en centimeter) på stora avstånd och enligt Optech producerar utrustningen inte några falska ekon. Vi ska senare se att centimeternoggrannheten finns, men också att skannern faktiskt producerar falska ekon ibland. Strålen kan reflekteras mot en diffus yta med vilken vinkel som helst och återvända till ILRIS-3D för att producera en avståndsmätning. Skannern opererar både i mörker och i dagsljus utan retroreflektorer eller speglar. På vilket avstånd skannern klarar av att mäta beror på reflektansen på den yta som laserstrålen träffar. Databladet säger att reflektionsfaktorn måste vara minst 4 % på 350 meters avstånd samt 20 % på 800 meter.

På grund av att militära objekt har en ganska låg reflektans (ibland någon enstaka procent) är signaturmätning lämpligast att utföra på mellan 30-50 meters avstånd.



Figur 3.3. Det är möjligt att mäta antingen första ekot (trädgrenarna) eller sista ekot (marken).

Tabell 3.6 Tekniska data för Optech ILRIS-3D

Prestanda	
Maximalt avstånd	350 m (4 % reflektans) 800 m (20 % reflektans)
Mätnoggrannhet	X-Y vid 50 m ± 7 mm X-Y vid 100 m ± 10 mm Z vid 50 m ± 10 mm Z vid 100 m ± 10 mm
Mätupplösning	Laserns punktstorlek vid 50 m 15 mm, 100 m 20 mm Avstånd mellan punkter vid 50 m < 10 mm, 100m < 20 mm
Mäthastighet	2000 punkter per sekund
Laservåglängd	1.5 μ m (NIR)
Stråldivergens	0,2 mrad
Skannområde (Field of view)	40° ($\pm 20^\circ$)
Ögonsäkerhet	Klass 1 för den skannande strålen, ögonsäker
Operatörens gränssnitt	
Integrerad kamera	640x480 pixlar, färg
Visningsfönster	17cm VGA
Kontrollgränssnitt	Handhållen Palm dator
Fysiska data:	
Mått (LxBxH)	300x300x200 mm

Vikt	approx. 11,4 kg
Spänningsmatning	24 V DC batteri eller AC omvandlare
Effekt	75 W nominellt

Miljödata:

Operativ temperatur	0°C till +40°C
Lagringstemperatur	-20°C till +50°C
Väderskydd	NEMA 4X, vatten- och dammskyddad

3.6.3 Mätförfarande ILRIS-3D

Skannern ger data för både avstånd och intensitet i reflekterad stråle, ett punktmoln med x-, y- och z-koordinater och intensitet skapas. Data för hela skanningen sparas, tillsammans med andra loggdata, i en binärfil på flashkortet. Vidare är skannern utrustad med en digital kamera vars bild också sparas till flashkortet. Bilden uppdateras kontinuerligt på skannerns baksida, se Figur 3.4.



Figur 3.4. Digitalt foto av hel scen med exempel på skannerområde. Objektet är T72:an på Kvarns skjutfält

Vid mätning med Optech ILRIS-3D erhålls en binärfil (I3D) från varje skannad vy. Dessa filer kan omvandlas i Optechs s.k. "parserprogram" till en standardiserad textfil (x-, y-, z-koordinat samt intensitet) för varje vy (RAW), en bitmap vilken är en bild av scenen tagen med ILRIS-3D's digitalkamera, samt en loggfil en textfil innehållande bildinformation (avstånd, bredd mellan laserskotten på ett givet avstånd, antalet punkter i höjd och sida etc.) Parserprogrammet kan leverera en rad olika format beroende på vilken tillämpning data ska användas till.

3.7 Vibrometri

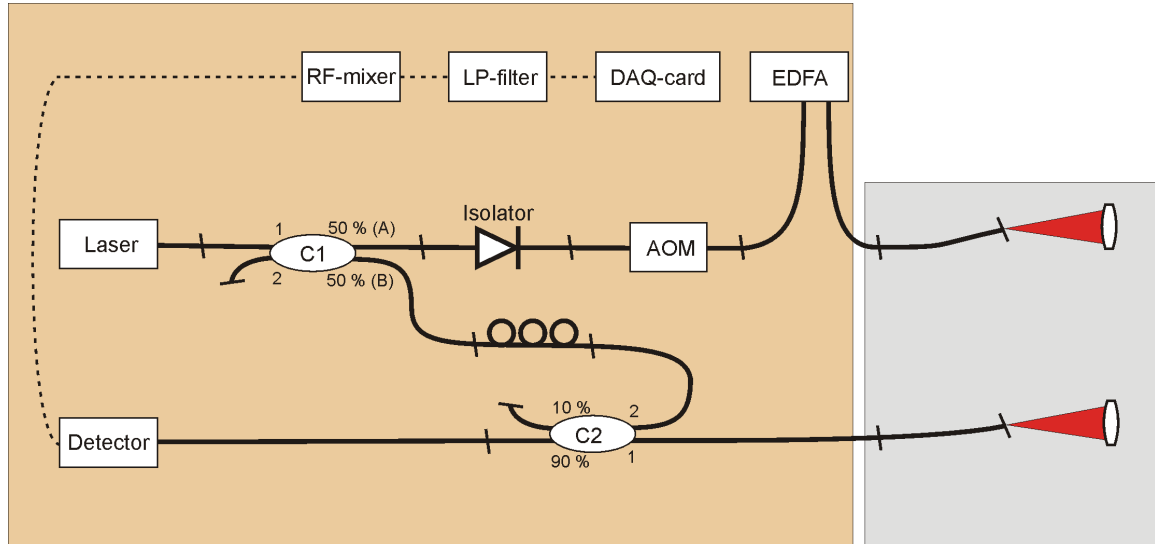
Vibrometrisystemet är ett egenutvecklat koherent laserradarsystem för mätningar av vibrationsspektrum på ett mål⁵. Systemet arbetar vid våglängden 1.55 µm och har

uteffekten 2 W. Sändar- och mottagarteleskop är placerade i en bistatisk konfiguration med 5 cm centrumavstånd. Teleskoplinserna har diameter 30 mm och fokallängd 101 mm. Systemuppbyggnaden visas schematiskt i Figur 3.5. Genom att på akustooptisk väg införa ett frekvensskift på 25 MHz i den ena interferometer-armen flyttar vi signalen från basbandet upp till ett högre frekvensband, en så kallad självheterodyn konfiguration. Frekvensmodulationen på laserradarsignalen motsvarar då målets vibrationsrörelse.

Tekniken bygger på att man har en laser med en lång koherenslängd, i vårt fall en externkavitets diodlaser. Ljuset från denna delas upp i två delar med en fiberkopplare. Den ena delen skickas via en akustooptisk frekvensskiftare som ändrar ljusets frekvens med 25 MHz, en liten förändring då våglängden 1550 nm motsvarar en frekvens på $1.9 \cdot 10^{14}$ Hz. Ljuset förstärks sedan med en erbiumdopad fiberförstärkare (EDFA) till en effekt på 2 W. Ljuset går från EDFA:n till ett teleskop där det lämnar fibern och fokuseras mot en punkt på målet. Efter att ljuset har reflekterats från målet samlas en liten del av den diffusa reflexen in av mottagarteleskopet, vilket är placerat intill sändarteleskopet. Enligt laserradarekvationen är den mottagna effekten

$$P_{mot} = P_{uts} \frac{\pi^2}{4\pi R^2} \rho T_a^2 \eta_t \eta_r \quad (3.6)$$

där P_{uts} är den utsända effekten, π^2 mottagarteleskopets apertur, R avståndet från målet till mottagaren, ρ reflektansen från målet i riktning mot mottagaren, T_a transmissionen i atmosfären på sträckan mellan mätsystem och mål och η_t respektive η_r effektiviteten hos sändar- och mottagarteleskop.



Figur 3.5. Schema över systemet, heldragen linje betyder optisk och streckad linje elektrisk signal.

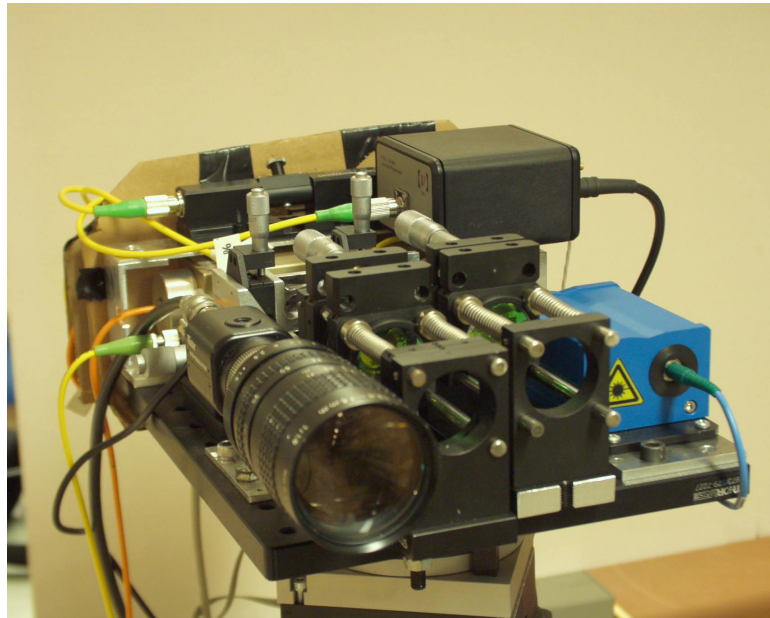
Det mottagna ljuset kombineras sedan med det laserljus som avleddes i början, den så kallade lokaloscillatorn (LO), i en andra fiberkopplare så att en interferometer skapas. Denna teknik när signalen interfererar med ljus från samma laser som har frekvensskiftats kallas en självheterodyn konfiguration. När det kombinerade ljuset träffar detektorn interfererar fälten från de båda interferometerarmarna och bildar en signal enligt

$$i \propto P_{LO} + P_{\text{mod}} + \sqrt{P_{LO} P_{\text{mod}}} \cos(\omega_{AO} t + \theta) \quad (3.7)$$

där P_{LO} är lokaloscillatoreffekten, P_{mod} den mottagna effekten, ω_{AO} frekvenskiftet från den akustooptiska modulatore, t tiden och θ fasskillnaden mellan de båda interferometerarmarna. Fasskillnaden är direkt kopplad till skillnader i optisk våglängd och kommer att variera när målet rör sig. En hastighet hos målet kommer på så sätt att överföras till en frekvensskillnad i signalen från detektorn och en vibration blir på samma sätt en frekvensmodulation på detektorsignalen.

Signalen från detektorn förstärks med en AC-kopplad transimpedansförstärkare så att vi sedan får en spänningssignal med en bärvåg på 25 MHz. Då frekvenskiftet bara är 1.3 MHz/(m/s) vid våglängden 1.55 μm har signalen oftast bara en bandbredd på några hundra kHz och därför mixar vi elektriskt ned signalen i frekvens för att kunna sampla den långsammare och minska mängden data. För att undvika spöksignaler har vi också ett antivikningsfilter före samplingskortet. Avkodningen av frekvensmodulationen från bärvågen sker sedan mjukvarumässigt i en pc. En noggrannare beskrivning av alla ingående komponenter och en analys av systemets prestanda finns i en FOI rapport⁵.

Systemet är uppdelat i en instrumentrack och ett mät huvud. Mät huvudet är placerat på ett stativ, se Figur 3.6, och kan riktas om i sid- och höjdlid med hjälp av stegmotorer. Ljuset skickas ut och tas emot med separata teleskop, en så kallad bistatisk konfiguration. Teleskopens fokusering måste justeras när avståndet ändras för att bibehålla överlappet mellan LO och det ljus som reflekteras från målet. För att få tillräcklig signalamplitud förstärks den utsända laserstrålningen i en erbiumdopad fiberförstärkare (EDFA). Mätningarna dokumenteras med en videokamera monterad parallellt med teleskopen på mät huvudet.



Figur 3.6. Mät huvudet som det såg ut i Kvarn och i Skövde.

Vårt system har flera fördelar jämfört med många andra system. Att våglängden 1.55 μm används gör att ljuset inte är ögonfarligt och gör även att vi kan använda många standardkomponenter från telekommunikationsindustrin. Att bygga upp systemet med fiberkopplade komponenter och inte bulkoptik gör att ingen upplinjerings krävs för att ljuset ska ta rätt väg igenom systemet. Det gör även att vi kan sätta laser och EDFA i

elektronikracket och ha ett litet och smidigt mät huvud som kopplas till racket med två fibrer.

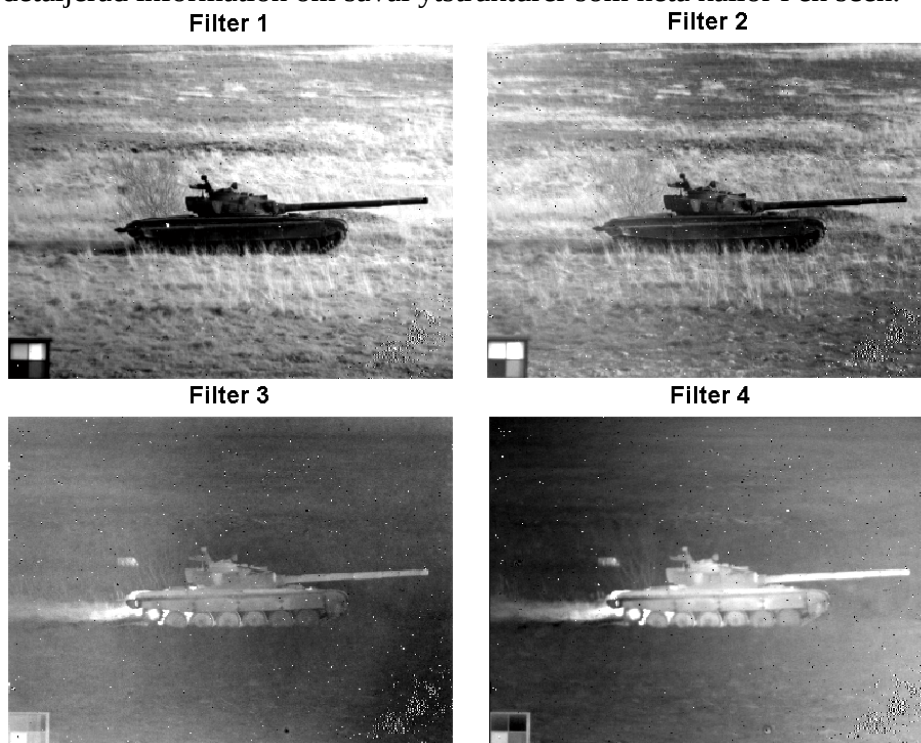
4. Utvärdering av sensordata och resultat

4.1 MULTIMIR

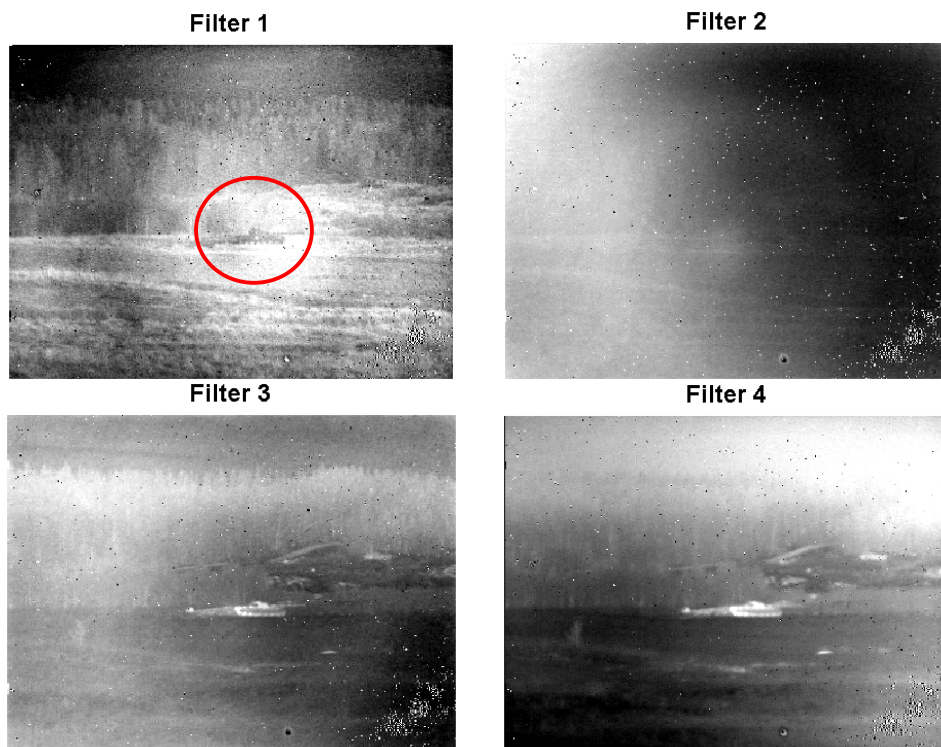
En sammanställning av registreringar med MULTIMIR finns i provprogrammet, Bilaga 2. Två av MULTIMIRs spektralband, filter 1 ($1.55\ \mu\text{m} - 1.75\ \mu\text{m}$) och filter 2 ($2.05\ \mu\text{m} - 2.45\ \mu\text{m}$), finns i det kortvågiga IR-området som förkortas SWIR (Short Wave IR, $1\ \mu\text{m} - 3\ \mu\text{m}$). De två andra banden, filter 3 ($3.45\ \mu\text{m} - 4.15\ \mu\text{m}$) och filter 4 ($4.55\ \mu\text{m} - 5.2\ \mu\text{m}$) finns i det mellanvågiga IR som förkortas MWIR (Middle Wave IR, $3\ \mu\text{m} - 5\ \mu\text{m}$). Representationen av MULTIMIR-registreringar nedan i svartvit färgskala gjorde det enklare att jämföra filterbanden och i några fall också enklare att se "T72".

2002-05-02

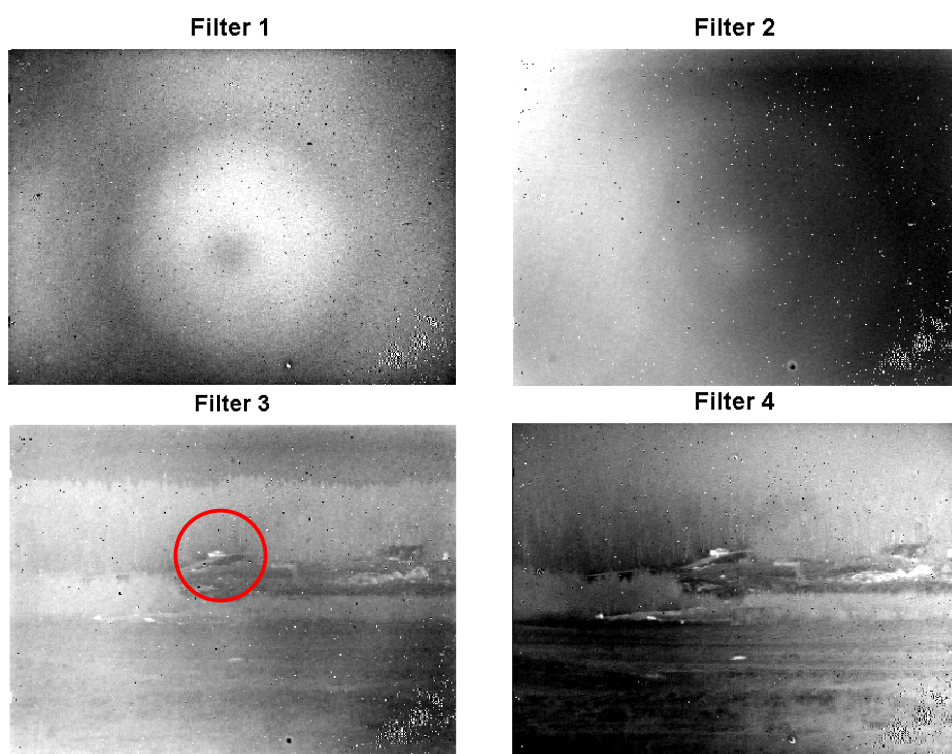
Figur 4.1 – 4.4 visar registreringar av T72 på 150 m, 650 m och 1905 m från den första dagen. Skillnaden mellan filter 1 – 2 och filter 3 – 4 är tydlig vid jämförelse av registreringar under dagförhållande med solljus (Figur 4.1) och registreringar nattetid med obetydlig instrålning (Figur 4.4). Vid förhållanden med solljus ger registreringar i filter 1 – 2 god mål/bakgrundskontrast och mest information om detaljer i scenen. Under nattförhållanden är mål-/bakgrundskontrasten bäst i filter 3 – 4 (och obefintlig i filter 1 – 2). I dagsljus med klart väder ger en kombination av MULTIMIRs fyra filterband detaljerad information om såväl ytstrukturer som heta källor i en scen.



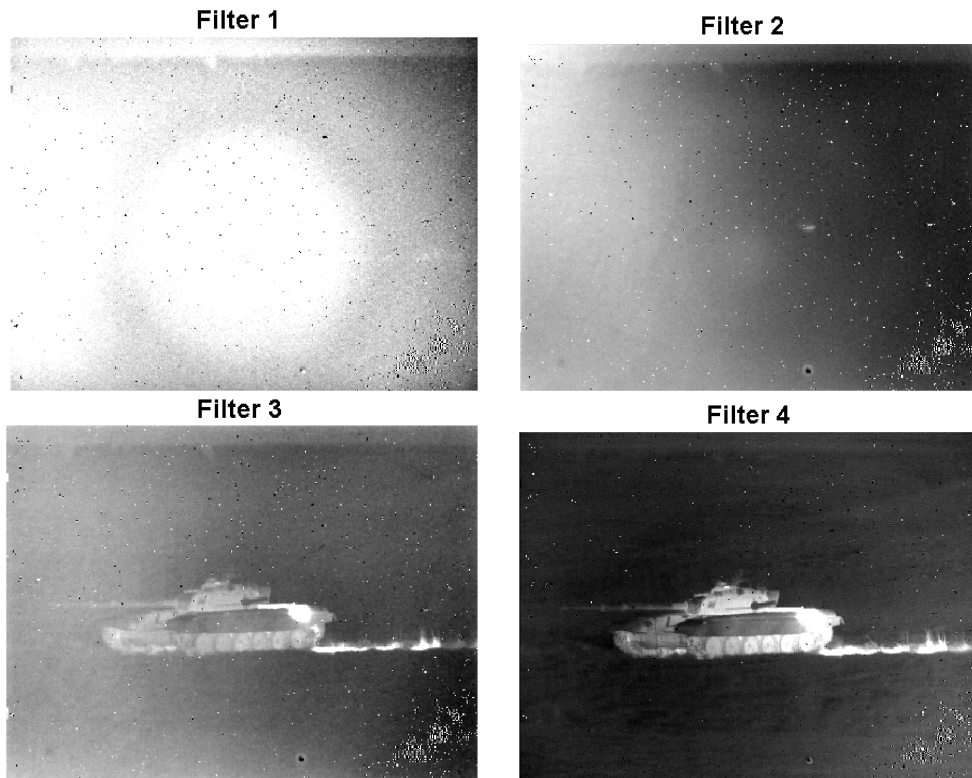
Figur 4.1. 2002-05-02 ca kl.18.49. Registrering i filter 1 ($1.55 - 1.75\ \mu\text{m}$), filter 2 ($2.05\ \mu\text{m} - 2.45\ \mu\text{m}$), filter 3 ($3.45 - 4.15\ \mu\text{m}$) och filter 4 ($4.55\ \mu\text{m} - 5.2\ \mu\text{m}$). Avståndet till T72 var 150 m; position 0 grader. Registreringar i SWIR (filter 1 – 2) ger här mycket god mål/bakgrundskontrast.



Figur 4.2. 2002-05-02 ca kl. 20.56. Registrering i filter 1 ($1.55 - 1.75 \mu\text{m}$), filter 2 ($2.05 \mu\text{m} - 2.45 \mu\text{m}$), filter 3 ($3.45 - 4.15 \mu\text{m}$) och filter 4 ($4.55 \mu\text{m} - 5.2 \mu\text{m}$). Avståndet till T72 var 650 m; position 0 grader.



Figur 4.3. 2002-05-02 ca kl. 21.57. Registrering i filter 1 ($1.55 - 1.75 \mu\text{m}$), filter 2 ($2.05 \mu\text{m} - 2.45 \mu\text{m}$), filter 3 ($3.45 - 4.15 \mu\text{m}$) och filter 4 ($4.55 \mu\text{m} - 5.2 \mu\text{m}$). Avståndet till T72 var 1905 m; position 0 grader.



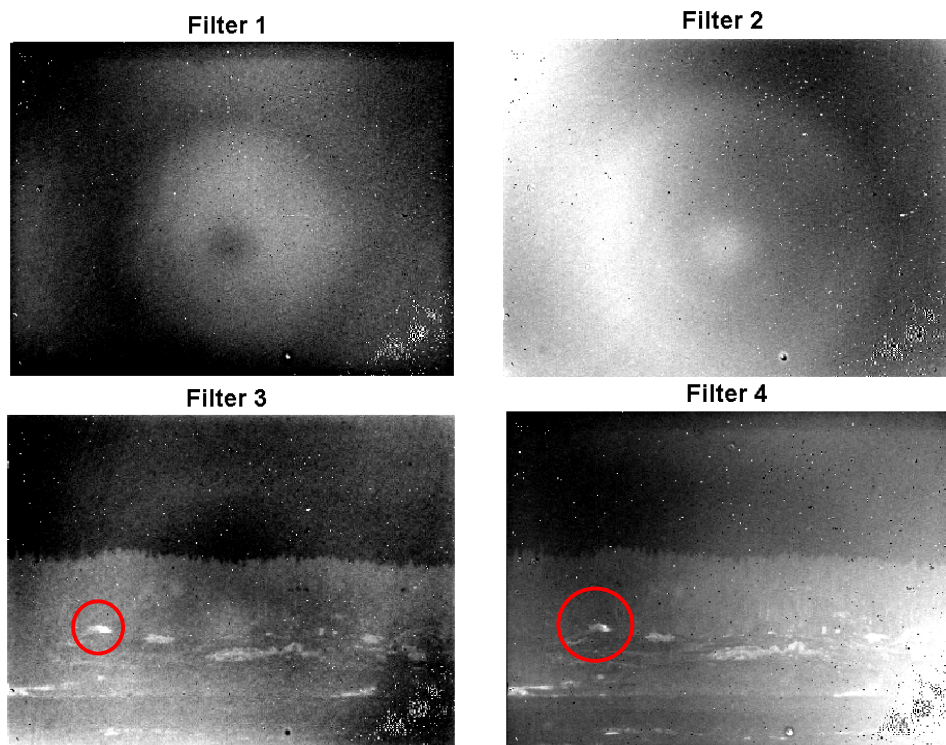
Figur 4.4. 2002-05-02 ca kl.23.53. Registrering i filter 1 ($1.55 - 1.75 \mu\text{m}$), filter 2 ($2.05 \mu\text{m} - 2.45 \mu\text{m}$), filter 3 ($3.45 - 4.15 \mu\text{m}$) och filter 4 ($4.55 \mu\text{m} - 5.2 \mu\text{m}$). Avståndet till T72 var 150 m; position 135 grader. Mål/bakgrundskontrasten är obefintlig i SWIR (filter 1 – 2)

2002-05-03

Vid väderförhållanden med dålig sikt kan registreringar i dagsljus bli likartade de vid nattetid. Ett exempel på detta är en registrering från den andra dagen mitt på dagen, Figur 4.5. Figur 4.5 kan jämföras med Figur 4.3, en registrering gjord under ett typiskt nattförhållande i "kolmörker". En visuell bild av scenen i Figur 4.5 kan ses i Figur 2.7. Denna visuella bild är synkron, så när som någon minut, med MULTIMIR-registreringen.

4.1.2 Fusionering av bilddata

Ett enkelt sätt att fusionera bilddata är genom konstruktion av RGB-bilder. Tre av de fyra spektralbilderna läggs då i röd, grön respektive blå färg. Figur 4.6 visar fusionering av bilder från Figur 4.1 – 4.3. När signalen är dålig i SWIR finns bara två band tillgängliga i MWIR.



Figur 4.5. 2002-05-03 ca kl.13.11. Registrering i filter 1 ($1.55 - 1.75 \mu\text{m}$), filter 2 ($2.05 \mu\text{m} - 2.45 \mu\text{m}$), filter 3 ($3.45 - 4.15 \mu\text{m}$) och filter 4 ($4.55 \mu\text{m} - 5.2 \mu\text{m}$). Avståndet till T72 var 1905 m; position 135 grader. Pilen markerar T72s position. En visuell bild av scenen syns i Figur 2.7.



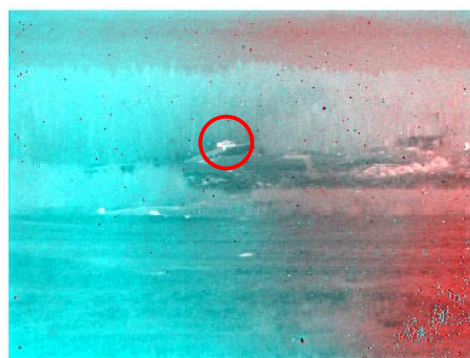
R=filter 4, G=filter 3, B=filter 1



R=filter 4, G=filter 2, B=filter 1



R=filter 4, G=filter 3, B=filter 1



R=filter 4, G=filter 3, B=filter 3

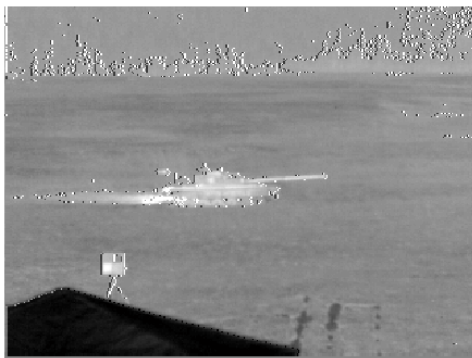
Figur 4.6. T72 med tre bilder kodade i en RGB-bild. Övre raden: från Figur 4.1. Undre vänstra bilden: från Figur 4.2; undre högra bilden: från Figur 4.3.

4.2 QWIP-kamera

En sammanställning av registreringar med QWIP-kameran finns i provprogrammet, Bilaga 2. QWIP-kamerans spektralband, 8 – 9 μm , finns i det långvågiga IR-området som förkortas LWIR (Long Wave IR, 8 – 12(ca) μm).

I Figur 4.7 har plottats samma scener som i Figur 4.1 – 4.4 ovan med MULTIMIR. QWIP-kameran och MULTIMIR hade inte samma optik, se tabellerna 3.1 och 3.2, vilket måste beaktas då systemen jämförs, framförallt med registreringar på längre avstånd. Vid registrering under dagtid med klart väder gav MULTIMIR en betydligt bättre mål/bakgrundskontrast liksom detaljinformation om scenen, jämför med Figur 4.7, övre vänstra bilden med Figur 4.1.

Under nattförhållande med obefintligt ljus blev QWIP-kameran jämförbar med MULTIMIRs filter 4-band avseende mål/bakgrundskontrast, jämför Figur 4.7, nedre högra bilden, med Figur 4.4, nedre högra bilden. Detsamma gällde även vid väderförhållandet med dålig sikt den andra dagen, jämför Figur 4.8 med Figur 4.5.



Avstånd 150 m, ca kl. 18.48



Avstånd 650 m, ca kl. 20.56



Avstånd 1900 m, ca kl. 21.59



Avstånd 150 m, ca kl. 23.52

Figur 4.7. 2002-05-02. Registreringar med QWIP-kamera



Figur 4.8. 2002-05-03 ca 13.10. Registrering med QWIP-kamera i regnväder. Pilen visar T72s position i bilden. En visuell bild av scenen syns i Figur 2.7.

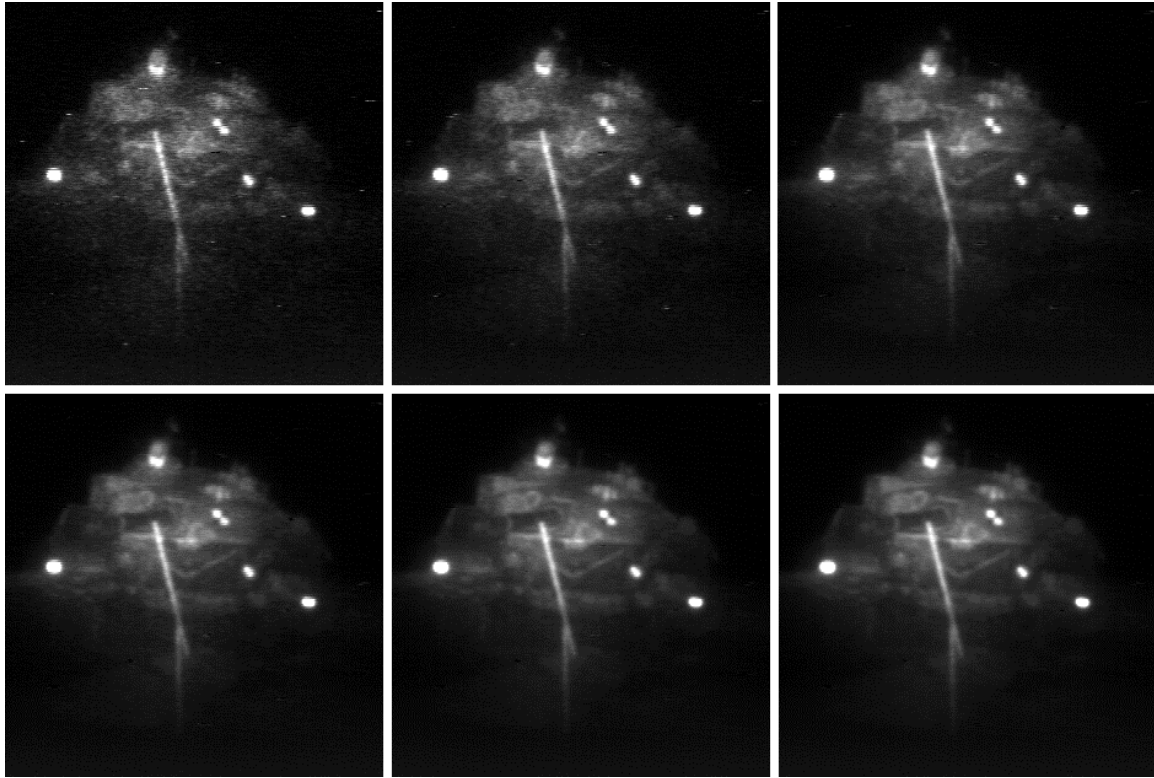
4.3 GV-kameran

En sammanställning av registreringar med GV-systemet finns i provprogrammet, Bilaga 2. Ett exempel på registrerade data återfinns i Figur 4.9 nedan. GV systemet har tagits fram för inledande prov med grindad avbildning på långa avstånd och som har utförts på uppdrag av Saab Avionics, Göteborg via Försvarets Materielverk, FMV³. Syftet med verksamheten har varit att studera förutsättningarna för ett system som kan kombineras med en IR kamera för operatörsstödd måligenkänning inom avståndsintervallet 5-10 km. För närvarande pågår studier av ett ögonsäkert system inom ett pågående FMV-projekt (E3889).



Figur 4.9. En bild av T72an på nära avstånd samt registrering med GV-systemet på avstånd 1905 meter med grindluckan på respektive bakom fordonet.

De resultat som framkommit i de föregående studierna är att en signifikant förbättring av bildkvaliteten erhålls genom sammanslagning av en sekvens med efterföljande bilder. De resultat som framkommit, och som redovisats³, har även gett upphov till en metod för semiautomatisk bildförbättring. Motiveringen var att utforma en metod som inte är beroende av specifika målegenskaper, utan som kan klara olika måltyper utan a priori information. Metoden finns beskriven⁶ och baserar sig på en algoritm (Transformation-Based Motion Compensation TBMA) som effektivt kan hantera bilddegenerering som uppkommer av bl a atmosfärs effekter och kamerarörelser. Efter estimering och kompensering av bildrörelsen, kan efterföljande bilder slås samman. Härigenom kan effekter hanteras som uppkommer av främst atmosfärisk tilt, speckelbrus och kamerarörelser, vilket illustreras i Figur 4.10. De processade bilderna kan t ex användas som indata till metoder för detektion, klassning eller igenkänning.



Figur 4.10. GV data från registrering av T72an på avstånd 1905 meter. Ovan från vänster ses en obearbetad bild, följt av 2, 5, 10, 20 och 30 processade bilder.

4.4 Utvärderingsmetoder för registrerade data från Optech ILRIS-3D

4.4.1 Generering av geometriska modeller

Från rådata omvandlas binärfilen I3D innehållande x-, y-, z-koordinat samt intensitet till ett filformat kallat PIF. Detta format är läsbart av programvaran Polyworks, vilket är ett programpaket från kanadensiska Innovmetric som används för att generera geometriska modeller. Sådana modeller kan vara militära objekt eller modeller av olika scenarier.

För att bygga upp en geometrisk modell av ett fordon skannas objektet av från olika håll, antingen roteras objektet eller också måste skannern förflyttas runt objektet. Exempel på en skannad vy ses i Figur 4.11. För att kunna bygga upp en bra geometrisk modell bör objektet skannas i intervall om cirka 30° för ett helt horisontellt varv samt även ett varv så mycket uppifrån som det bara går. I fält är det dock oftast svårt att komma upp på höjd över objektet. Tätheten på laserpunkterna (x och y) bör läggas på cirka 1 cm, vilket är noggrannheten vid avståndsmätning för ILRIS-3D. Innehåller objektet svårare geometriska former, till exempel larvfötter, bör dessa om möjligt skannas lite tätare.

Polyworks består av ett antal programmoduler. Vi ska följa uppbyggnaden av ett objekt genom de olika programmodulerna. Objektet är T72:an på Kvarn.

PIFEdit

I PIFEdit utförs en grov redigering av objektet som ska byggas upp. All omgivning tas bort, se Figur 4.12, för alla vyer. Om objektet har roterat bör till exempel hjulnav maskas bort på alla vyer utom sidovyer. Reflektorer eller andra saker på objektet som är delvis genomsläppliga bör maskas bort på alla vyer utom en.



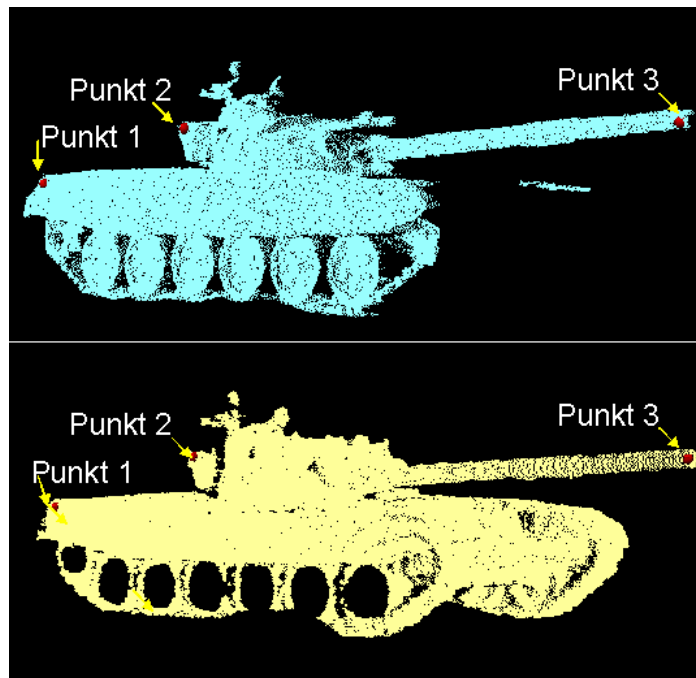
Figur 4.11. Exempel på en skannad vy från ILRIS-3D



Figur 4.12. I programmet PIFedit maskas omgivningen bort, rödmarkerat i bilden.

IMAlign

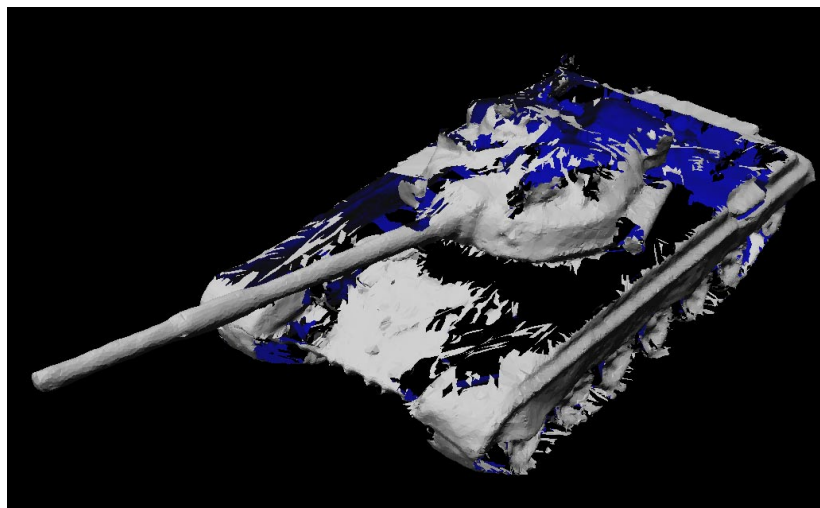
I IMAlign görs en inriktning av grovredigerade vyer. Vyerna låses till varandra genom att för två vyer definiera minst tre gemensamma punkter inom givna toleranser, se Figur 4.13. Dessa två vyer låses till varandra och en tredje riktas in med avseende på de låsta. Denna procedur upprepas till dess att alla vyer har ensats.



Figur 4.13. Inriktning av vyer görs genom att definiera minst tre gemensamma punkter inom givna toleranser.

IMMerge

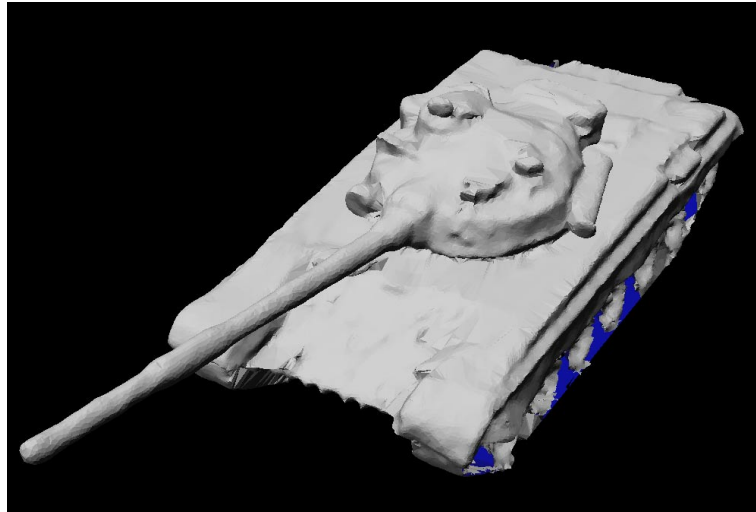
IMMerge är en programmodul som beräknar en modell. Modellen kan byggas upp som en polygonmodell, men det går också bra att generera punktmoln såväl binärt som på ASCII-format. Modellen kan här filtreras med avseende på brus. Figur 4.14 visar Kvarns T72:a skannad med enbart 8 vyer horisontellt, vilket gör att den är väldigt tunn på punkter på ovansidan.



Figur 4.14. Modell av Kvarns T72:a innan den är editerad.

IMEdit

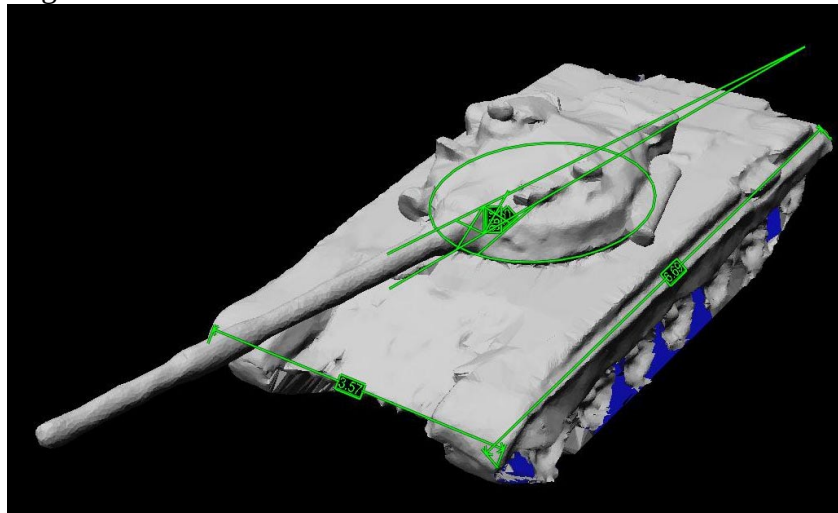
Modellen som skapas av IMMerge editeras i programmodulen IMEdit. Hål kan fyllas igen och trianguleras upp. Ytor kan byggas upp av såväl plana, sfäriska som cylindriska ytelement. Figur 4.15 visar Kvarns T72 editerad i IMEdit.



Figur 4.15. Editerad modell av Kvarns T72:a. Larvfötterna kräver fler skanningar för att bygga upp en bra modell.

IMInspect

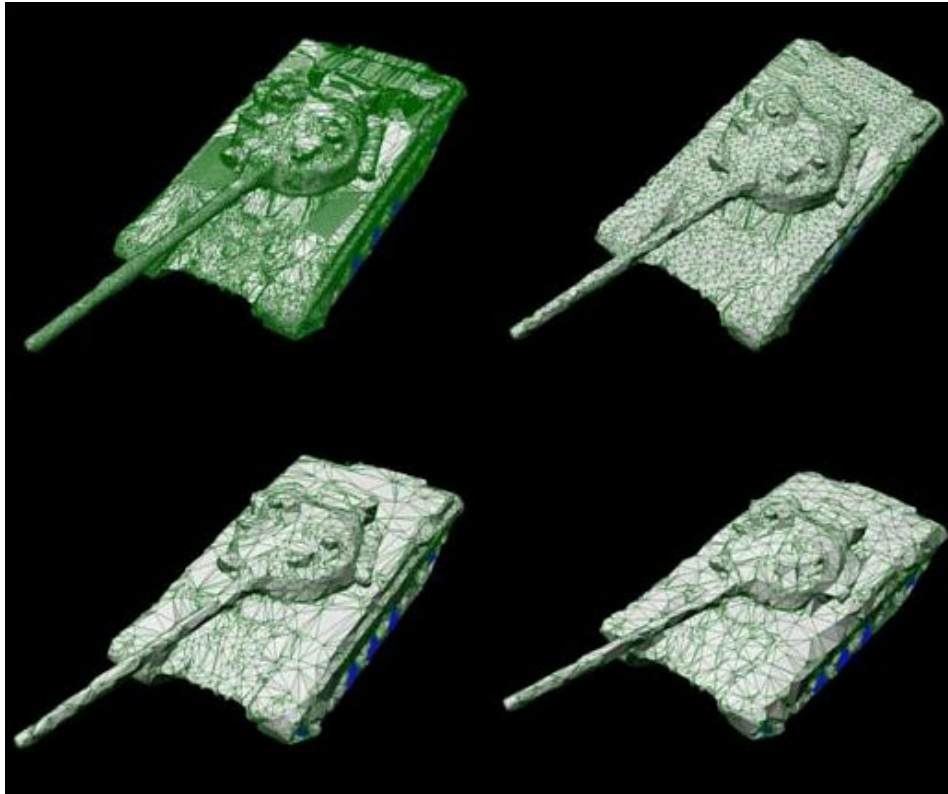
I IMInspect kan modellen mätas i olika avseenden, till exempel avstånd mellan punkter, radier och vinklar. Direkta jämförelser mellan en CAD-modell och uppmätt modell kan också göras. Figur 4.16 visar en måttsatt modell av T72.



Figur 4.16. Måttsatt modell av T72. (Uppmätt längd x bredd är 6,69 x 3,57 m, kanontornets radie är 1,22 m, samt kanonens vinkel i förhållande till tornets bas är 3,68° i detta specifika fall).

IMCompress

I programmodulen IMCompress komprimeras modellen med avseende på antalet ytor eller i procent av ursprungsmodellen. I Figur 4.17 visas T72 okomprimerad med cirka 140000 ytor, samt komprimerad till cirka 14000, 10000 respektive 8400 ytor.

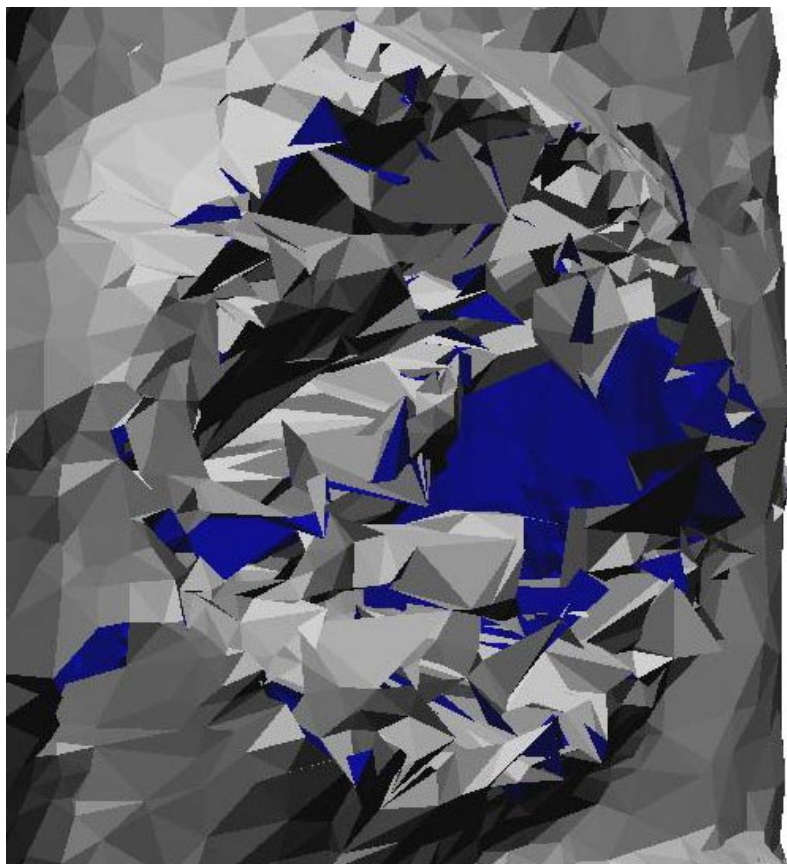


Figur 4.17. Bilden visar olika komprimeringsgrader av T72. Längst upp till vänster är modellen okomprimerad och består av ca 140000 triangelytor, längst upp till höger ca 14000 ytor och en maxsida på 0,2 m för varje triangel, längst ner till vänster ca 10000 ytor och med hur stora ytor som helst, samt längst ner till höger 8400 ytor med en sida på max 0,5 m.

Modell i DXF-format kan sedan köras i ett program kallat dxf2patches.m, utvecklat vid FOI Lasersystem, vilket omvandlar CAD-formatet DXF till av Matlab läsbara patches. Patches är definierade triangelytor och hörn. Den geometriska modellen är sedan klar att utnyttjas av Matlab eller andra program som kan läsa DXF eller patches. Ovanstående komprimering till ca 14000 ytor är här optimal att använda i Matlab. Fler ytor än så gör det beräkningsmässigt tungt att köra och färre ytor gör modellen för grov.

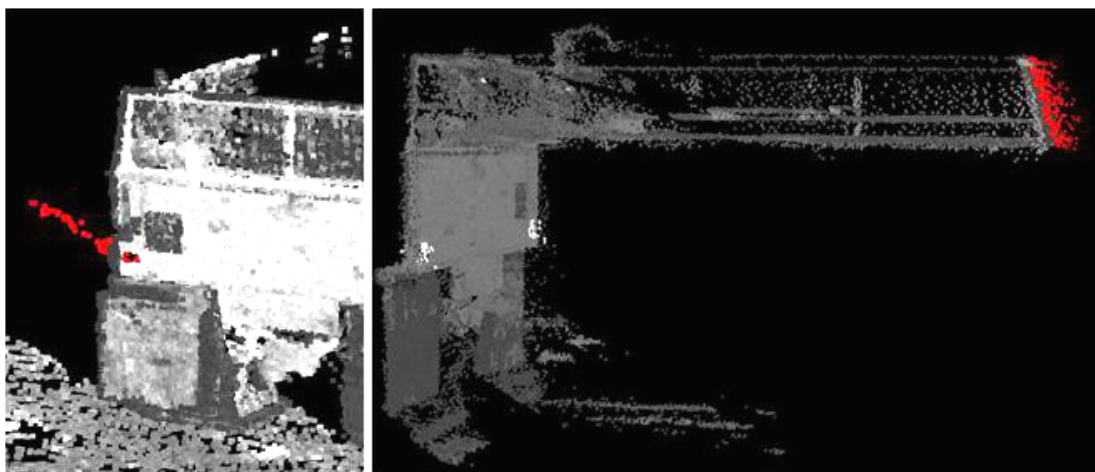
Problem vid generering av geometriska modeller

På samma sätt som det är ett problem att generera en bra geometrisk modell utifrån få skanningar av objektet är det inte bra att ha med sig för många punkter in i modellen heller. Figur 4.18 visar en avskannad reflektor på Bandvagn206. Vissa punkter har träffat glasets utsida medan andra har träffat reflektorns insida. Här är det nödvändigt att maska bort det man inte vill ha innan uppbyggnad av en polygonmodell. Förslagsvis får framifrån vyn vara den dominerande vyn. I övriga vyer där reflektorn är med maskas den bort.



Figur 4.18. Polygonmodell av reflektor på Bandvagn 206.

Ett fenomen som kan uppstå vid mätning är så kallade kanteffekter. Detta är ett fenomen som kan uppstå när enbart en del av laserstrålen träffar objektet. I Optechs datablad går det att läsa att ILRIS-3D inte producerar några falska ekon, men de finns och Optech är medvetna om dem. Effekter med överstyrd intensitet kan leda till att punkter hamnar fel i längsled. Exempel på dessa fenomen finns i Figur 4.19.



Figur 4.19. Till vänster exempel på överstyrd intensitet där alla rödmarkerade punkter borde ha legat på samma yta och till höger en kanteffekt då laserstrålen har gått igenom ett nät. Rödmärkade punkter till höger borde även de ha legat på samma yta.

Vid uppbyggnaden av en polygonmodell då kanteffekter eller överstyrda signaler finns blir dessa trianglars sidor långa jämfört med andra trianglar. Optech säger sig ha rättat till

detta i sin senaste programutgåva av Parser, då användaren får sätta en gräns för hur lång en triangelsida får vara. Vi får denna programutgåva någon gång under vintern 2002.

Kalibrering av ILRIS-3D vid mätning av geometri

I samband med mätning av ett objekt som ska generera en geometrisk modell är det bra att ha en tavla som står på samma avstånd hela tiden. Det är då lätt att göra standardavvikelseberäkningar till en area på denna tavla och på så vis få en kvalitet på avståndsmätningen, se vidare Bilaga 5.

4.4.2 Beräkning av lasermålarea och generering av skalade intensitetsbilder

Textfilen (RAW) innehållande x-, y-, z-koordinater samt intensiteter läses tillsammans med loggfilen in i LabVIEW-programmet ScanView, vilket är utvecklat vid FOI Lasersystem. Programmet utvärderar mätningar från ILRIS-3D och genererar intensitetsbilder från RAW-filerna skalade med ekvivalent reflektionskoefficient. I bilderna görs urval för mätning. Beräkningar (t.ex. reflektion, lasermålarea) utförs dock direkt i RAW-filen med genererade bitmap-bilder som gränssnitt.

Det råder inte ett linjärt förhållande mellan den intensitet som presenteras i RAW-filen från ILRIS 3-D och målytans faktiska reflektionskoefficient. Varje bild kan dock kalibreras med hjälp en referenstavla med fyra kända reflektanser i bilden, se Figur 4.20. Referenserna är kalibrerade i samband med leverans från Labsphere⁷ Hur reflektionen ρ beräknas i varje mätpunkt förklaras nedan.



Figur 4.20. Kalibreringstavla med fyra kända reflektanser samt bandvagn som objekt (från Älvdalen-mätningar oktober 2002; kommande rapport).

Ett förhållande mellan intensiteten S och dess reflektans ρ har definierats för respektive referensyta enligt:

$S_{ref_0} / \rho_{ref_0}(\text{referensplatta}_0)$	99 % reflektans
$S_{ref_1} / \rho_{ref_1}(\text{referensplatta}_1)$	60 % reflektans
$S_{ref_2} / \rho_{ref_2}(\text{referensplatta}_2)$	30 % reflektans
$S_{ref_3} / \rho_{ref_3}(\text{referensplatta}_3)$	2 % reflektans

Tre nivåer för intensiteten räknas fram vid kalibreringen av bilden kallade LimHi (Nivå Hög), LimMi (Nivå mellan) samt LimLo (Nivå låg) enligt (4.1), (4.2) och (4.3). Dessa nivåer är en gräns i intensitetsvärde för var de olika reflektansvärdena ska börja gälla.

$$LimHi = S_{ref_0} - \frac{S_{ref_0} - S_{ref_1}}{2} \quad (4.1)$$

$$LimMi = S_{ref_1} - \frac{S_{ref_1} - S_{ref_2}}{2} \quad (4.2)$$

$$LimLo = S_{ref_2} - \frac{S_{ref_2} - S_{ref_3}}{2} \quad (4.3)$$

Fysikaliskt gäller att detekterad intensitet avtar med avståndet R som $1/R^2$. Man kan mäta över ett längre avstånd och vinna dynamik på intensitetsvärdet. Mätningar visar att intensiteten S är proportionell mot reflektansen ρ enligt

$$S \sim \frac{\rho}{R^{upph[x]}} \quad (4.4)$$

där $upph[x]$ är respektive materials exponent. Detta gäller givetvis både målet (tar) och referensen (ref). Respektive materials exponent skiljer sig på olika avstånd. Exponenten är intensitetskurvans lutning mellan ett avstånd från referenstavlan till ett medelvärde på avståndet till objektet, det laserstrålen träffar. Exponenten beräknas därför i exempelvis Excel för att sedan lyftas in i ScanView som fyra variabler. I Bilaga 4 finns ett kalibreringsavsnitt för ILRIS-3D. Genom att använda proportionalitetsuttrycket (4.4) både för referens och mål erhålls:

$$\rho_{tar} = \rho_{ref_{[x]}} \cdot \frac{R_{tar}^{upph[x]}}{R_{ref}^{upph[x]}} \cdot \frac{S_{tar}}{S_{ref_{[x]}}} \quad (4.5)$$

där x beskriver de tidigare nämnda intensitetsområdena för LimHi (4.1), LimMi (4.2) och LimLo (4.3). Intensitetsområdet större än LimHi, refererar till index 0 (99%), värden mellan LimHi och LimMi refererar till index 1 (60%), värden mellan LimMi och LimLo refererar till index 2 (30%) samt för värden under LimLo refererar till index 3 (2%).

Beroende på önskad vinkelupplösning kan vinkelförflyttningen $\alpha_{spot\ space}$ mellan varje mätpunkt (strålfläcksavståndet; "spot space") väljas i 10 steg, se Tabell 4.1.

Tabell 4.1. Vinkelförflyttning för olika strålfläcksavstånd

"Spot space"	Vridning i rad
1	0,00017
2	0,00034
3	0,00051
4	0,00068
5	0,00085
6	0,00102
7	0,00119

8	0,00136
9	0,00153
10	0,00170

Varje laserpuls motsvarar en yta på mätobjektet, $Area_{spot\ space}$, enligt

$$Area_{spot\ space} = (\tan \alpha_{spot\ space} \cdot Z)^2 \quad [m^2] \quad (4.6)$$

Den totala lasermålarean A_Δ beräknas sedan med formeln

$$A_\Delta = \frac{\rho_m \cdot \Sigma A_{spot\ space}}{\pi} \quad [m^2/sr] \quad (4.7)$$

där ρ_m är medelvärde av alla punkters reflektansvärden beräknade enligt (4.5) och $\Sigma A_{spot\ space}$ summan av alla areor beräknade enligt (4.6).

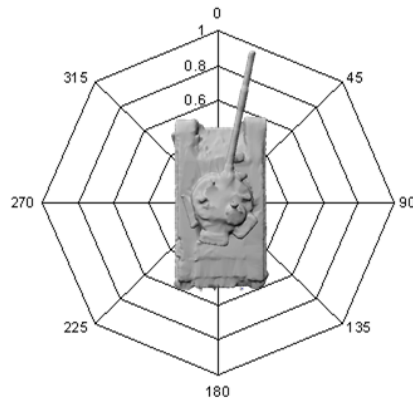
Programmet ScanView levererar skalade intensitetsbilder i ekvivalent reflektionskoefficient. Exempel på intensitetsbild genererad av ScanView visas i Figur 4.21.



Figur 4.21. Intensitetsbild på T72 Kvarn skalad med ekvivalent reflektionskoefficient

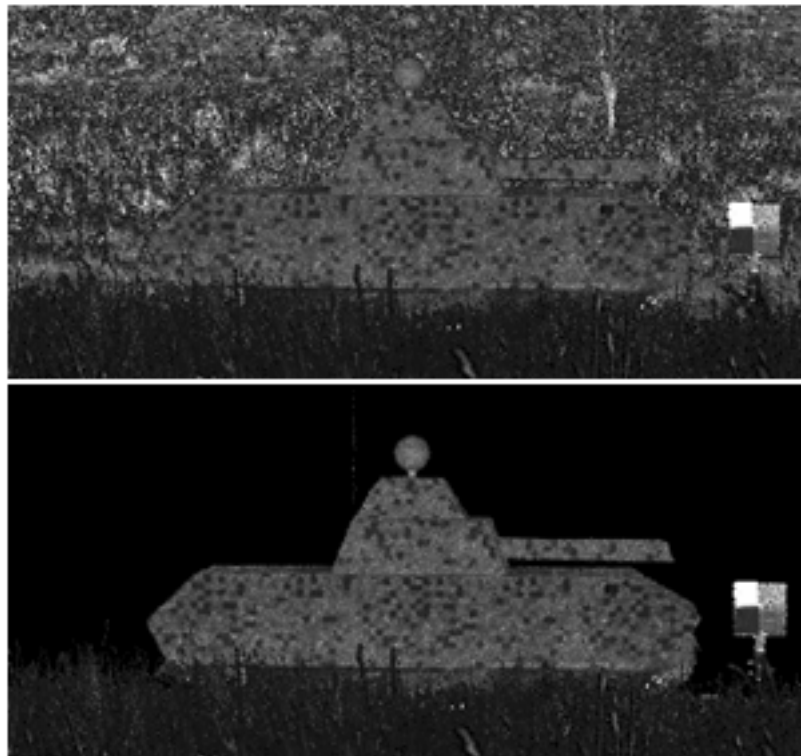
För att enbart få med det intressanta vid beräkningen av total lasermålarea, det vill säga objektet, maskas bilden först i ett fotoredigeringsprogram, exempelvis Photoshop. Masken talar om vilka punkter som ska tas med från RAW-filen (de riktiga mätpunkterna), övriga punkter tas bort i den fortsatta behandlingen.

Vid sammanslagningen av intensitetsbild och mask beräknas total lasermålarea, medelreflektans, tvärsnittsarea mm. Dessa uppgifter sparas i en loggfil vars uppgifter sedan kan lyftas in i Excel eller Matlab för att exempelvis presenteras i en polärplott. Värdena för total lasermålarea redovisas i enheten m^2/sr . Objektets orientering vid utvärdering av data brukar läggas så att objektets front står i läge 0° , se Figur 4.22.



Figur 4.22. Objektets riktning vid utvärdering av mätta data från Optech ILRIS-3D

Ibland kan det vara svårt att se ett objekt i en bild. Möjligheten finns då att göra en avståndsdiskriminering, dvs skala bort mätpunkter som ligger framför och bakom mätobjektet. Figur 4.23 visar TD2 avståndsdiskriminerad.



Figur 4.23. Avståndsdiskriminerad TD2

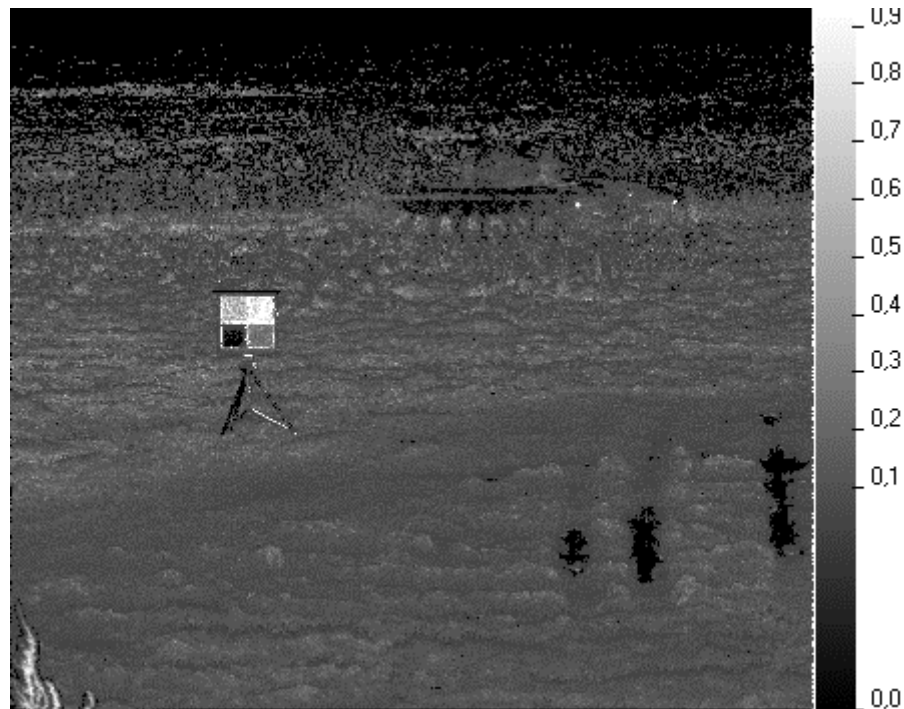
Kalibrering av Optech ILRIS-3D i samband med lasersignaturmätningar

Vid mätning av ett objekt som ska generera en lasersignatur krävs en mer omfattande kalibrering av intensiteten. Tidigare gjordes denna kalibrering på labb, men den har visat sig opålitligt beroende av att detektorn verkar mäta olika mängd ströljus med dålig överensstämmelse mellan inomhus- och utomhusmätningar som följd. För att få en bättre noggrannhet vid mätning av intensiteten ska därför kalibreringen göras på plats genom att mäta referenstavlan en gång framför objektet och en gång bakom. På så sätt kan

exponentkompensering för avståndet räknas fram i rätt miljö. Kvarnmätningen bygger på en labbkalibrering som utfördes inomhus.

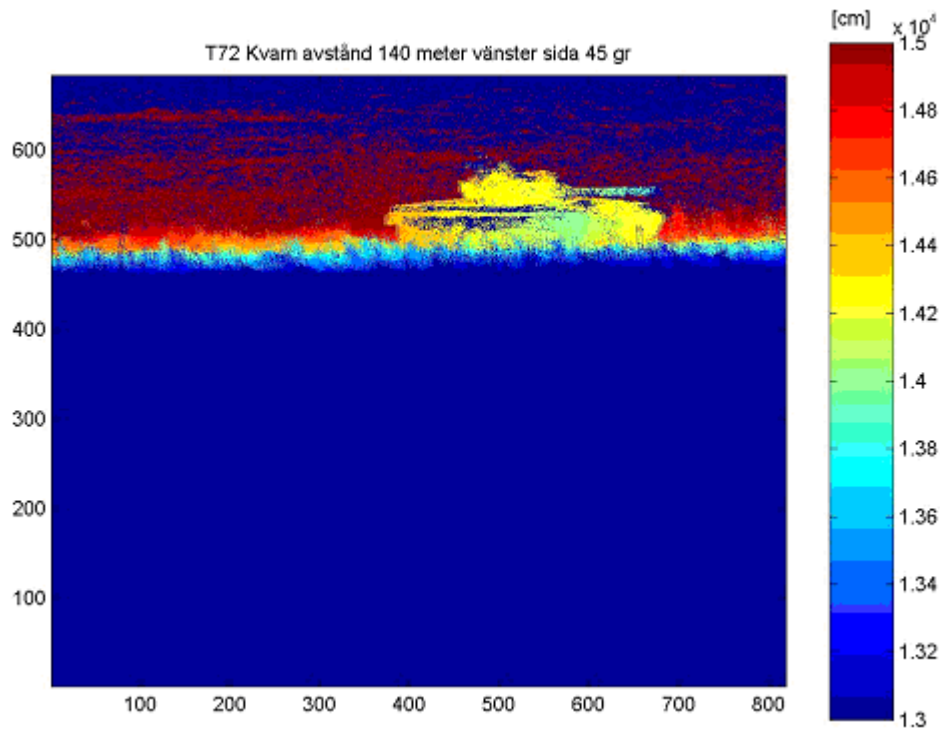
4.4.3 Mätningar med Laserradar i Kvarn

Vid Kvarnmätningarna användes ILRIS-3D på avstånd upp till ca 140 m från T72. Avstånden 650 m och 1,9 km var alldeles för stora att mäta på för ILRIS. Det visade sig dock att skannern hade svårt att mäta även på 140 m i Kvarn, se Figur 4.24. Utmed T72s sida är det ganska svart i denna bild vilket är ett resultat av att reflektansen var för låg.



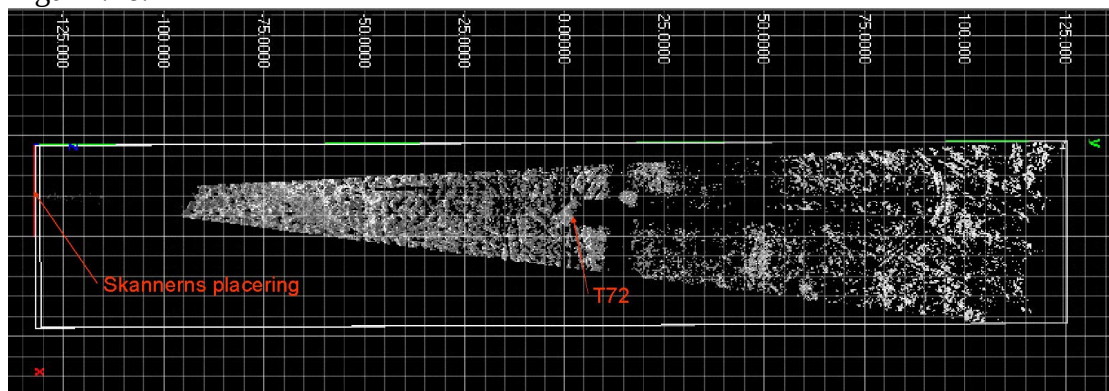
Figur 4.24. Intensitetsbild på T72 Kvarn på avstånd 140 m.

Avståndsbilder genererade i Matlab visar att T72 stod på ett avstånd av ca 140 m vid denna mätning, se Figur 4.25. I Bilaga 4 visas samtliga registreringar avståndsskalade, intensitetsbilder samt en sammanställning av registreringarna.



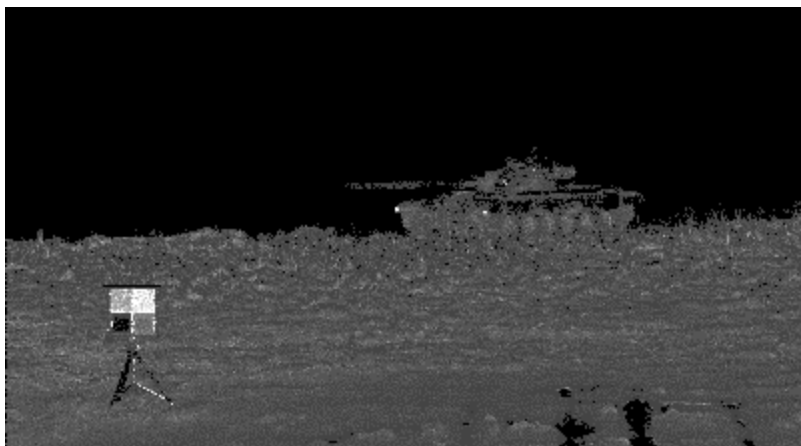
Figur 4.25. Avståndsskalad bild av mätningarna av T72 på avstånd 140 m

På vilket avstånd klarade skannern att mäta under dessa förhållanden? Ett skann har lagts in i Polyworks och det går där att konstatera att det finns träffar endast ut till ca 260 m, se Figur 4.26.

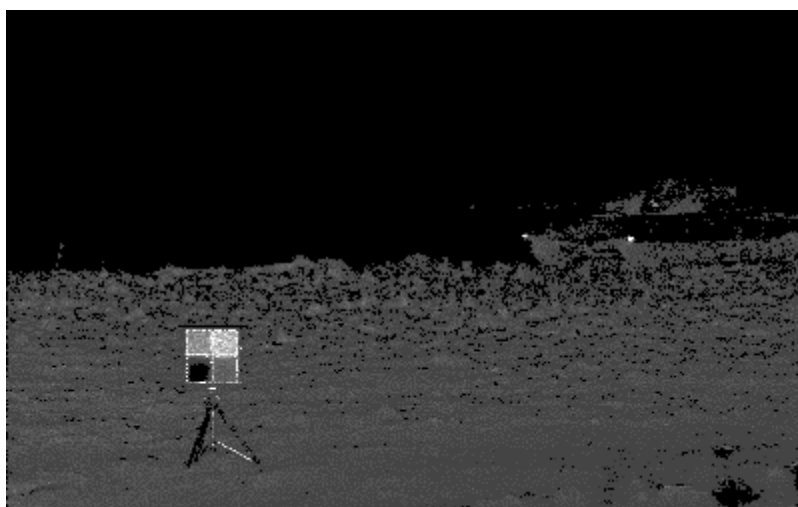


Figur 4.26. Skannad vy inlagd i Polyworks. Skannet syns här rakt uppifrån och det kan konstateras träffar upp till 260 m.

Mätning dagtid och på natten visar att skillnader finns. Vid jämförelse mellan Figur 4.27 och Figur 4.28 syns den reflekterade intensiteten vara lägre nattetid. I nattbilden syns tydligt att sidan är mörkare. För att lättare kunna se T72 har avståndet diskriminerats så att bakgrunden är svart i Figur 4.27 – 4.28. En orsak till skillnaden kan vara att mätobjektets yta blev fuktig av dagg vid nattmätningen.



Figur 4.27. T72 registrerad i dagsljus.



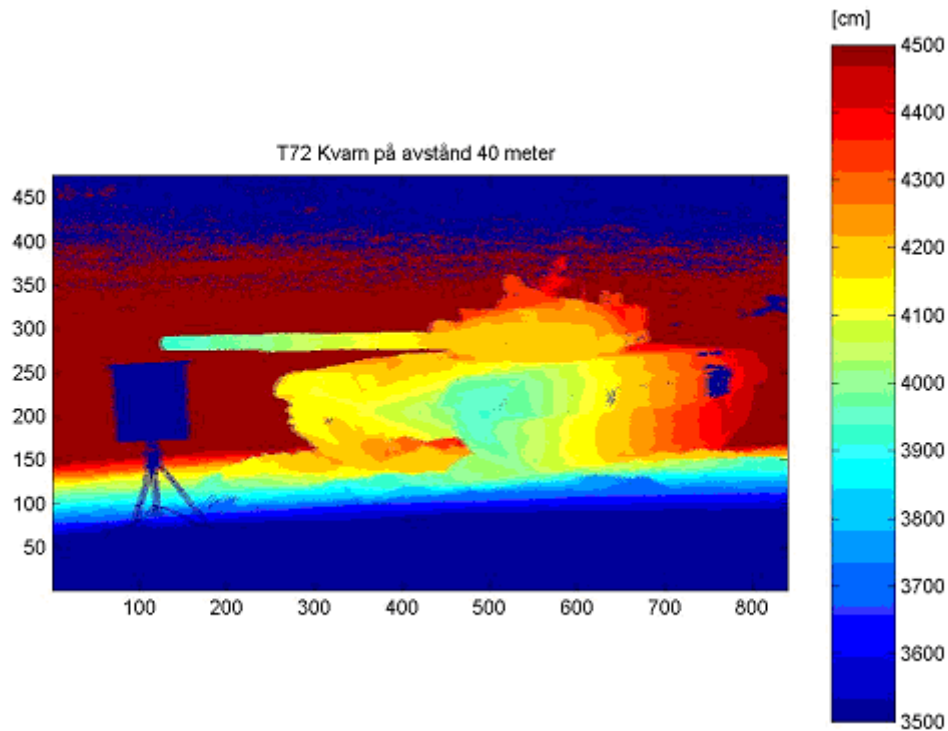
Figur 4.28. T72 registrerad nattetid. Den reflekterade intensiteten är lägre vid mätningen nattetid. Fordonet saknar mätpunkter utmed hela sidan.

Mätningar utfördes också på 30 m för att kunna bygga upp en geometrisk modell av T72 se Figur 4.29. I samband med mätningarna på 30 m utfördes också en signaturmätning av T72 på avstånd 40 meter, se exempel Figur 4.29. Bilaga 3 visar samtliga 8 vyer för denna intensitetsmätning.



Figur 4.29. Intensitetsbild av T72 Kvarn. Skalan är angiven som ekvivalent reflektionskoefficient.

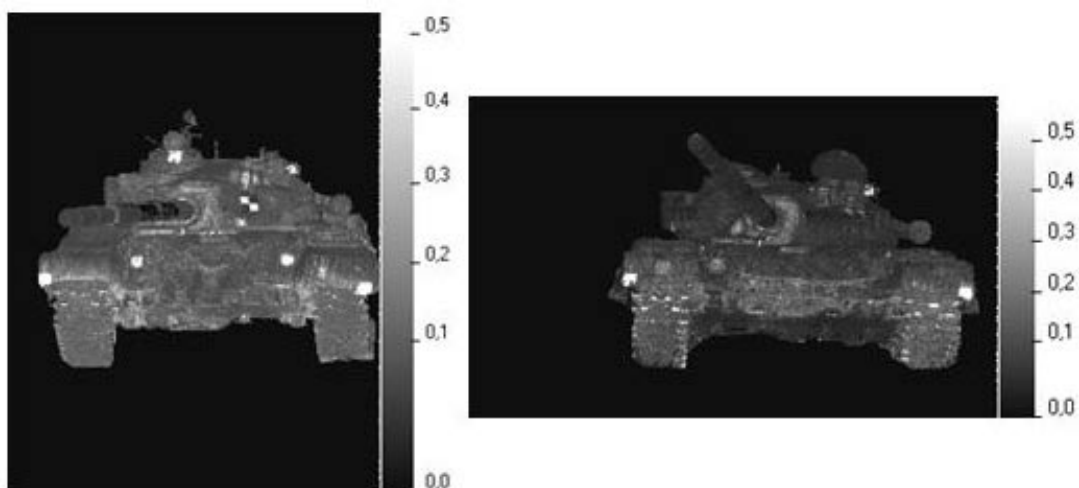
Avståndsbilden på T72 i Figur 4.30 visar att fordonet stod på ca 40 meters avstånd vid mätningen av lasermålarea.



Figur 4.30. Avståndsbild som visar att T72 stod på ca 40 meters avstånd vid mätningen av lasermålarea.

Lasermålarean kan presenteras i en polärplott med enheten m^2/sr . Denna polärplott är dock felaktig för mätningen av T72 i Kvarn eftersom dess uträknade tvärsnittsareor inte stämmer, se Bilaga 4. Vad detta beror på är ännu inte klarlagt. Mjukvaran är bytt i ILRIS och nya referensytor nyttjas också. Problemet ska utredas.

En mätkampanj har genomförts i Skövde för projektet Intelligent Verkanssystem på bland annat T72⁸. Tvärsnittsareorna är där verifierade att de är ok. En jämförelse mellan T72 på Kvarn och T72 i Skövde visar att T72 i Kvarn har ett reflektionsmedelvärde som är marginellt högre än vid mätningarna i Skövde. En förklaring kan vara att olika referenstavlur användes vid mätningarna och att mjukvaran i skannern modifierats mellan mätkampanjerna. T72 på Kvarn är mätt lite uppifrån. Den troliga orsaken är dock att fordonen är något olika konfigurerade. Figur 4.31 visar de båda T72'orna på Kvarn och Skövde sida vid sida rakt framifrån.



Figur 4.31. Jämförelse mellan T72 Kvarn (till vänster) och T72 Skövde (till höger)

Här kan konstateras att T72 på Kvarn har något fler reflektorer än T72 Skövde. Genom att maska bort reflektorena på T72 Skövde (Figur 4.32) sänktes lasermålarean ca 50% av den ursprungliga, se Bilaga 5. Detta visar att det är svårt att karaktärisera ett objekt enbart utifrån ett värde på lasermålarean.



Figur 4.32. Bortmaskade reflektorer på den undre bilden gjorde att lasermålarean sänktes 50 % i detta fallet.

4.4.4 Felanalys vid mätning med ILRIS-3D

För tekniska data som presenterats säger Optech att felet vid avståndsmätning är ca ± 10 mm vid 50 m. En kontroll av avståndsfelet har gjorts genom att mäta referenstavlan för de 8 registreringarna av T72 i Kvarn på 40 m avstånd. Standardavvikelsen beräknas enligt

$$u(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.1)$$

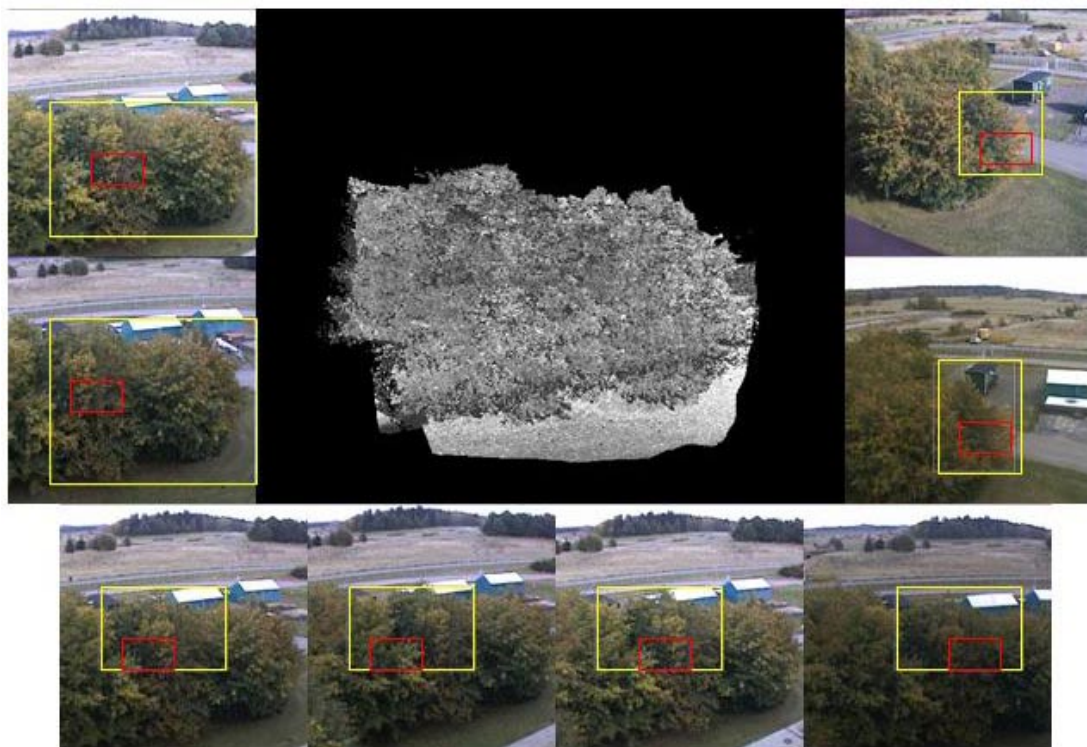
där n är antalet mätpunkter, x_i är mätvärdet och $\bar{x}$ medelvärde av mätvärdena. Standardavvikelsen beräknas direkt i ScanViewprogrammet (se vidare i texten under utvärderingsmetoder för registrerade data, Generering av intensitetsbilder och polärdiagram). I Bilaga 4 visas en sammanställning av felanalys på Optech ILRIS-3D. Cirka 400 mätpunkter ingår vid denna beräkning av standardavvikelse för varje vy. För samtliga vyer är beräknad standardavvikelse 0,01 m, det vill säga precis vad databladet till skannern säger, se Tabell 3.6.

Databladet till ILRIS-3D säger inget om hur noggrant den mäter intensitet. En beräkning av standardavvikelse för intensiteten görs genom att mäta upp de olika reflektanstavlorna (99 %, 60 %, 30 % samt 2 %) i ScanView programmet. Samma vyer som ovan har använts, det vill säga referenserna har stått på samma avstånd hela tiden. Bilaga 4 visar data från denna mätning. Spridningen över en och samma referenstavla får anses vara ganska stor, 10-30 %. Eftersom det dock är samma area som mäts vid varje kalibrering är inte spridningen mellan de olika vyerna mer än från 0,6 % upp till 3 % vilket får anses vara väldigt bra.

ILRIS-3D har lite svårt att reproducera intensitetsvärdena i flera mätningar av samma vy. I Bilaga 4 finns en sammanställning av en mätning utförd under ca 6 timmar en och samma dag med samma mätuppställning. Data visar att ILRIS-3D har särskilt svårt att reproducera intensitetsvärdet i de högre reflektionstalen. För 99 %-referensen är variationen hela 36 %. Hösten 2002 har ILRIS-3D erhållit ny programvara som ännu inte är verifierad med avseende på upphettningsproblematiken som tidigare har funnits.

4.4.5 Multipla vyer (mätningar vid FOI i Linköping)

ILRIS-3D kan registrera antingen första eller sista pulsen i varje skott. Hur mycket kan ILRIS-3D se genom en ganska tät dunge då sista puls väljs? Ett försök gjordes från taket på FOI (E-huset) tillsammans med projektet Intelligent Verkanssystem⁸. I mätscenariot ställdes en Volvo V40 upp bakom en dunge enligt Figur 4.33. Modellen som har byggts består av åtta avskannade vyer, varav två är gjorda med lite lägre upplösning för att få med hela dungen. I Figur 4.33 betecknar gula rektanglar det avskannade området och röda rektanglar betecknar bilens ungefärliga placering. Fordonet gick knappt att skönja med ögat genom lövverket. I mitten syns ihopsatt modell av dungen. Figur 4.34 visar en del av 3-D-modellen, som roterats så att vi kan se "bakom" dungen. Fordonets konturer kan tydligt ses. En sammanställning av utförda mätningar finns i Bilaga 3.



Figur 4.33. Scenario över mätning i multipla vyer. 8 vyer av en dunge har skannats i olika aspektvinklar. De gula ramarna anger avskannat område. Ett fordon (Volvo) är placerad i dungen, dess läge markeras av de röda rektanglarna. Den resulterande 3-D-modellen syns i mitten



Figur 4.34. Fordonet, en Volvo, skannad genom en dunge.

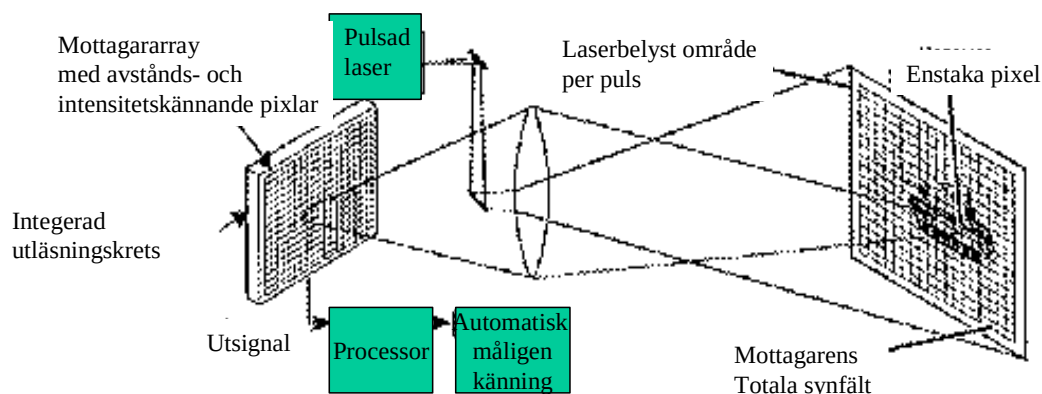
4.4.6 Sammanfattning 3D laserradar

Optech ILRIS-3D är en skannande laserradar som strategiskt är ointressant eftersom ett större skan med hög upplösning ner till några mm tar uppemot 30 minuter. I bl a USA och

England utvecklas nu avståndskännande fokalplanmatriser där varje pixel kan registrera avstånd (tid) och intensitet⁹. Med hjälp av en sådan detektor kan man erhålla en "3-D bild" med en enda kort laserpuls. "State of the art" idag innebär $NEP < 1 \text{ nW}$ vid $1.55 \mu\text{m}$ och en avståndsupplösning i klassen 15-20 cm. För automatisk måligenkänning (ATR) har man kommit fram till tumregler som säger att det krävs ca 200 pixlar på målet och 15 cm avståndsupplösning för att ATR algoritmerna skall fungera väl. I Figur 4.35 visas ett exempel från en bild genererad av Optech ILRIS-3D med ca 20000 pixlar på objektet som har delats ner till 200 pixlar. Figur 4.36 visar en principskiss hur ett avståndskännande fokalplanmatrissystem ska kunna fungera.



Figur 4.35. T72 nerdelad från cirka 95000 pixlar till cirka 200 pixlar på objektet .



Figur 4.36. Principskiss för en laser med avståndskännande fokalplanematrix.

Under ett par dagar i augusti 2002 utfördes mätningar i Tönnersjö i samband med Topeye-mätningar över tre fordon i vegetation. Topeye är ett flygburet laserradarsystem med noggrannhet några centimeter. På marken mättes med ILRIS-3D för att kunna bygga upp en modell av scenariot och jämföra data med resultat från Topeye. Tidigare hade Carabas

med ett SAR-system flugit över samma område. Utifrån uppmätta vyer på marken har en simulerad flygning tagits fram av hur ett kommande i framtiden flygburet laserradarsystem med en matrisdetektor skulle kunna uppfatta markscenen i full videotakt. Bild från denna video visas i Figur 4.37.



Figur 4.37. Bild från video av hur ett kommande i framtiden flygburet laserradarsystem med en matrisdetektor skulle kunna uppfatta en markscen.

4.5 Vibrometri

4.5.1 Kvarn 2-3 maj 2002

Mätningar av karossvibrationer på en stridsvagn modell T72, se Figur 4.38, gjordes med olika avstånd och vinklar mellan mätsystem och målfordon. På ett mätavstånd gjordes även mätningar när stridsvagnens motorvarvtal varierades. I alla mätsituationer gjordes mätningar mot olika delar av karossen på T72:an för att undersöka var vibrationerna var starkast och om vibrationsfrekvensen varierade. Antalet mätningar vid de olika förhållandena finns registrerade i Bilaga 2, Tabell 10. Tabell 4.2. När antalet mätningar anges som en produkt har ett rektangulärt område innehållande fordonet skannats av. Naturligtvis är en del av randpunkterna då utanför fordonet och innehåller bara bakgrundsmätningar.

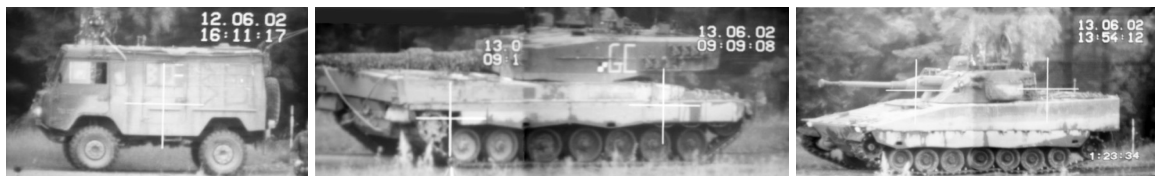


Figur 4.38. Målfordon T72 i Kvarn, maj 2002.

Vinkeln mellan mätsystemet och stridsvagnen är definierad som 0° när stridsvagnen har sidan mot mätsystemet och 90° när fronten är mot mätsystemet. Vilken punkt på målet som laserstrålen träffade finns dokumenterat på videoband för de flesta mätningarna. Några mätningar gjordes när det blivit så mörkt att stridsvagnen inte kunde urskiljas med blotta ögat. På avståndet 1900 m var kameraobjektivets brännvidd otillräcklig för att lösa upp stridsvagnen. Avståndet orsakade också problem att sikta med laserstrålen och en del av mätningarna på 1900 m missade troligen målet.

4.5.2 Skövde 12-13 juni 2002

Under mätningarna i Skövde utgjordes målobjekten av två likadana terrängbil 11 (fortsättningsvis benämnd tgb11), en stridsvagn 121 Leopard (strv121) samt ett stridsfordon 90 (strf90), se Figur 4.39.



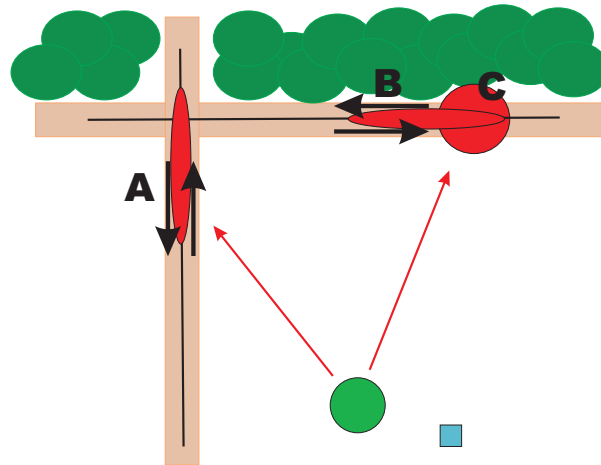
Figur 4.39. Målfordon vid mätningarna i Skövde juni 2002. Från vänster tgb11, strv121 och strf90.

Flera typer av mätningar utfördes:

- 1) Punktmätningar på olika delar av stillastående mål (tgb11, strv121 och strf90)
- 2) Skann över hela mål (tgb11 och strf90)
- 3) Mätningar mot mål under förflyttning. (tgb11, strv121 och strf90)

Metod 1 och 2 var väl utprovade och genomfördes rutinmässigt, medan metod 3 var en tidigare oprövad metod och mätningarna genomfördes enbart för att undersöka metodens möjligheter.

Samtliga mätningar på stillastående fordon utfördes på ungefär 100 m avstånd (se Figur 4.40) och täckte i möjligaste mån in fordonens alla fyra sidor (Tabell 4.3). Vinkeldefinitionerna överensstämde med det tidigare fältförsöket beskrivet ovan. Antalet mätningar innebär för detta fältförsök antal genomförda mätningar och inte antalet goda och representativa mätningar vilket borde reducera antalet mätningar med ungefär en fjärdedel. Då antalet mätningar mot ett mål är uppdelat i flera termer innebär det att mätningarna är gjorda med till viss del olika förutsättningar.



Figur 4.40. Geografibeskrivning vid skövdemätningarna. Ensam grön cirkel betecknar vibrometerplats. Blå kvadrat representerar elverk. Röda ellipser (A och B) visar området för fordonens förflyttning under mätningarna, medan röd cirkel (C) är stillastående fordon.

Tabell 4.3. Registrerade mätningar. Skövde juni 2002.

Målfordon	Vinkel	Antal mätningar
Strf90, i rörelse	45° / 225°	22
Strf90, stilla	0°	23
Strf90, skann	0°	20 × 16
Strv121, i rörelse	45° / 225°	14
Strv121, stilla	0°	14 + 17
Strv121, stilla	90°	21
Strv121, stilla	180°	12
Strv121, stilla	270°	18
Tgb11, i rörelse	45° / 225°	6 + 13
Tgb11, stilla	0°	18 + 35 + 22
Tgb11, stilla	90°	9
Tgb11, stilla	180 °	9
Tgb11, stilla	270°	7
Tgb11, skann	0°	30 × 19

4.5.2 Analys av vibrometridata

Vibrometridata från tre olika fordon (T72, strv121 och strf90) analyserades i syfte att extrahera karakteristiska parametrar för fordon. Data kom från mätningar i Kvarn maj 2002 och Skövde juni 2002. Fordonen belystes med en laser och den reflekterade signalen insamlades från både stillastående fordon och fordon i rörelse.

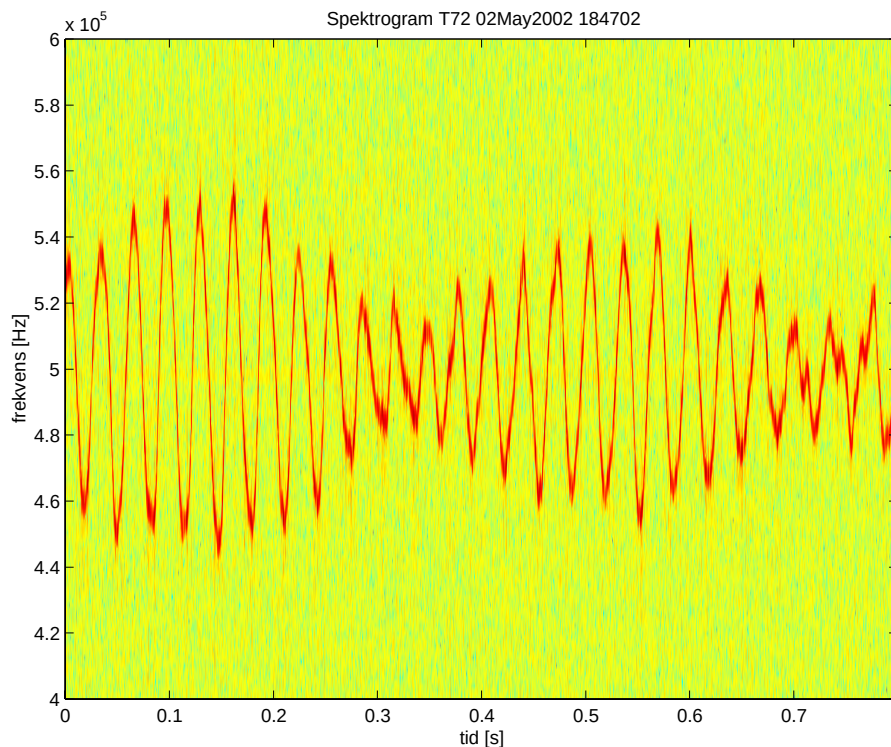
Den reflekterade signalens frekvens ändras genom Dopplerskift när det belysta objektet rör sig mot eller ifrån ladarn. I heterodynlasersystemet blandas den reflekterade signalen ned med en intern lokaloscillator (LO)¹⁰. Avståndet har en avgörande betydelse för hur mycket av reflexen, som härrör från fordonet och hur mycket bakgrunden inverkar. Vi kan förvänta oss att flera ytor på fordonet belystes samtidigt och att dessa ytor kunde vibrera i olika moder vilket minskar signal/brusförhållandet¹¹. De belysta ytornas orientering och

struktur påverkar också reflexen¹². Mätningar utfördes därför i olika vinklar och på olika mätpunkter. T72 mättes upp stillastående med olika varvtal och på olika avstånd. I den analysen användes mätdata från stillastående fordon.

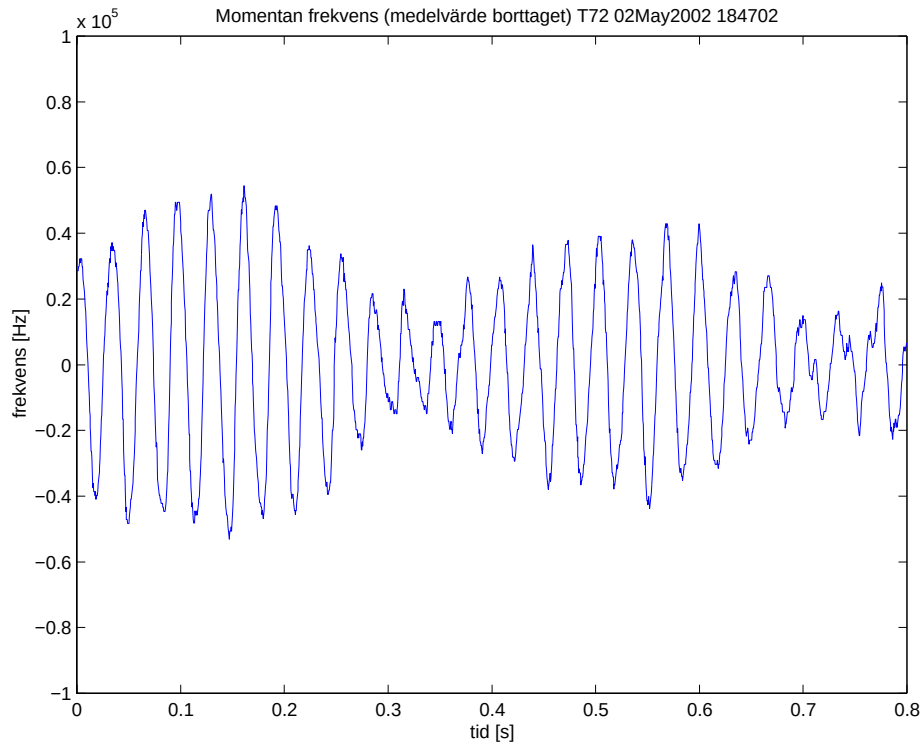
Demodulering och estimering av parametrar

En direkt frekvensdemodulering i hård- eller mjukvara kunde inte utföras eftersom bärfrekvensen inte är stabil i den nedblandade signalen¹³. Den momentana frekvensen estimerades därför med *peak detection* och den därur erhållna signalen outlier-filtrerades enligt en *rekursiv modell* där så ansågs nödvändigt. Parametrar för en autoregressiv modell (*AR-modell*), ordning 6, av signalen estimerades och frekvensen för den maximala amplituden av *Morlet wavelet* har bestämdes. Medelvärden av wavelet-amplituden för olika skalor ("frekvenser") estimerades också och extremvärden bestämdes genom att bestämma nollgenomgången (*zero-crossing*) för den differentierade signalen. Maxvärdena bestämdes och sorterades i avtagande storleksordning varefter de sex största valdes ut.

Den nedblandade signalen delades först upp i tidsfönster om vardera 1024 sampel. För varje fönster beräknades effekttäthetspektrum med fft-storlek $NFFT = 2048$. Detta gav en upplösning i frekvensskiftet av 488 Hz vid samplingsfrekvensen $F_s = 1\text{ MHz}$ och en upplösning 1.22 kHz vid samplingsfrekvensen $F_s = 2.5\text{ MHz}$. Den momentana frekvensen estimerades sedan från den diskreta frekvens som har störst nivå. Ett spektrogram för T72 (fil 02May2002_184702) visas i Figur 4.41 och den estimerade momentana frekvensen visas i Figur 4.42.



Figur 4.41. Spektrogram T72 mätdatafil: 02May2002_184702



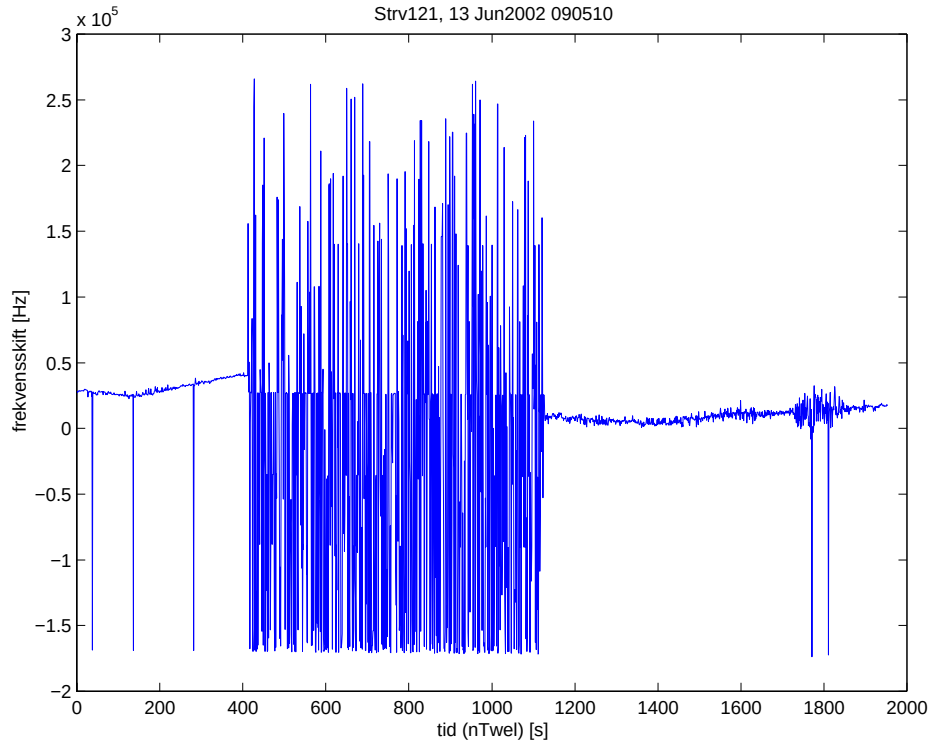
Figur 4.42. Momentan frekvens (medelvärde borttaget) T72 mätdatafil: 02May2002_184702, jämför med Figur 4.34.

I flera fall observerades transienta störningar i den demodulerade signalen. Där störningarna var stora ersattes signalens värde med värdet av föregående sampel om det avvikande värdet översteg tre standardavvikelser för signalen. Den uppmätta signalen kan tecknas $Y(n)=S(n)+N(n)$. Det predikterade värdet fås som väntevärdet av en första ordningens rekursiv modell,

$$E[Y(n+1)] = E[\alpha S(n)] + E[N(n)] \quad (4.1)$$

där mätbruset $N(n)$ antas vara vitt med ett medelvärde = 0 och oberoende av signalen $S(n)$. Här är α en fix parameter, som sätts till $\alpha = 1$.

Ett exempel på störningar och avbrott, som påträffades vid mätningarna i Skövde på strv121 visas i Figur 4.43. Alla mätdatafiler har inte så allvarliga störningar, men transienter förekommer i många signaler. För data från Kvarn finns en logg över mätdatafiler där filer med systemfel angivits. Dessa innehåller endast nollor och kunde undvikas.



Figur 4.43. Strv121 störning på mätdatafil: 13Jun2002_090510

Parametrar för en AR-modell av den demodulerade signalen estimerades med den modifierade kovariansmetoden ("forward-backward approach")^{14,15}. Den autoregressiva (AR) modellen beskrivs av

$$\sum_{i=0}^6 a_i y(n-i) = e(n) \quad (4.2)$$

där a_i är modellparametrarna, $y(n)$ är den uppmätta signalen och $e(n)$ är en genererande vit stokastisk process.

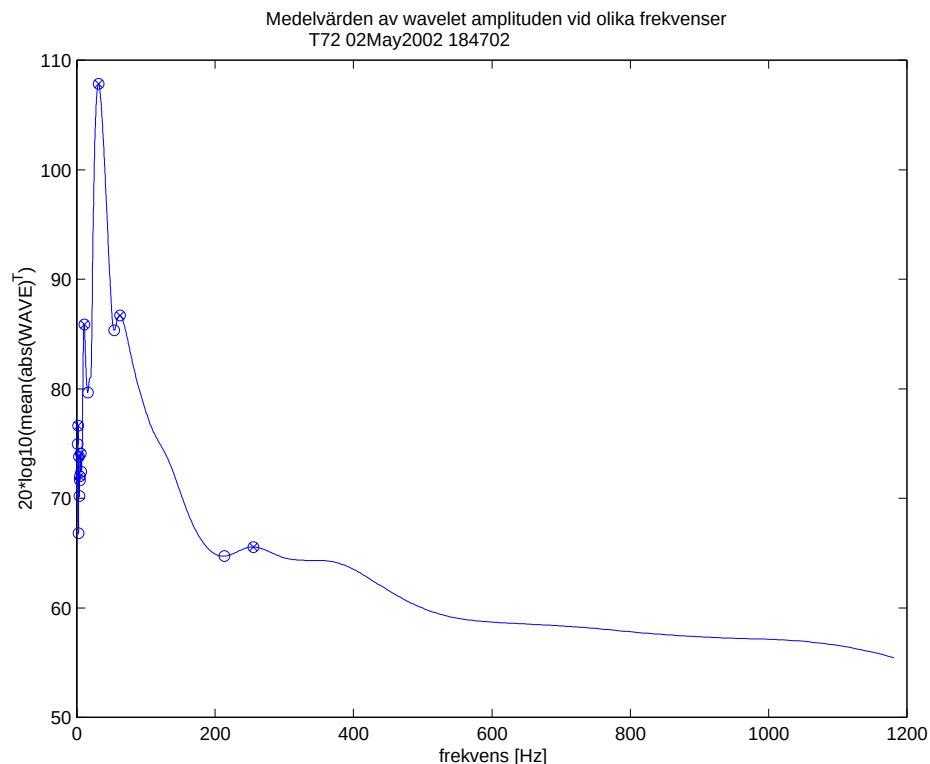
Detektion och klassificering av signaler kan båda ses som test av hypoteser. Vid *detektion*¹⁶ önskar man avgöra om en signal är närvarande eller ej och vid *klassificering* önskar man att i någon metrik avgöra avståndet till olika klasser av signaler. Då signalen är känd och bruset är vitt och Gaussiskt erhåller man en fix optimal detektor med ett matchat filter¹⁷. För vibrerande ytor är signalen inte känd, men kan antas utgöras av sinuslika transienter av olika frekvens och varaktighet. Detta gör att wavelet-transformen med Morlet-bas är särskilt lämpad för vibrometri¹⁸. Morlet-basen fås ur en plan våg modulerad av en Gaussisk funktion,

$$\psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0\eta} e^{-\eta^2/2} \quad (4.3)$$

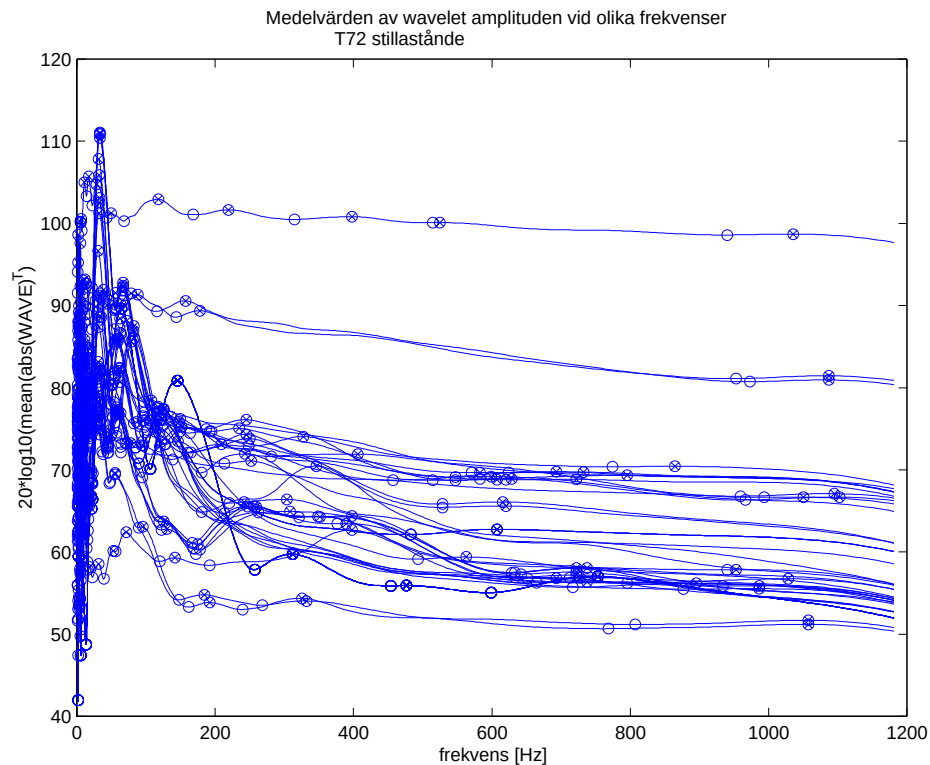
där η är en dimensionslös tidparameter och ω_0 är en dimensionslös frekvens. Vid wavelet-analysen användes MATLAB-program från University of Colorado¹⁹. Mellanrummet mellan skalorna var 0.01 och vågnummer var 6.

Frekvensen motsvarande tidsskaleindex för den maximala amplituden i Morlet wavelet bestämdes. Numerisk differentiering användes för att beräkna extremvärden för medelvärden av wavelet-amplituden vid olika frekvenser och maxima sorterades i storleksordning. De sex största maxvärdena angavs som karakteristiska parametrar.

Mätdata från 47 filer med signaler från T72 från mätningar i Kvarn analyserades. Samtliga analyserade filer samlades in under 0.8 sekunder, med en samplingsfrekvens på 2.5 MHz. De demodulerade signalerna är av längden 1953 sampel med en samplingsfrekvens $F_{swel} = 2441$ Hz. Figur 4.44 visar medelvärden av wavelet-amplituden vid olika frekvenser för T72 (fil 02May2002_184702). Ringarna i figuren betecknar extremvärden och kryssen är maxvärden. Om mindre än sex värden finns anges det med 0. Vi observerar en dominerande frekvens vid 32 Hz, som skulle kunna hänföras till vibrationer från T72. Figur 4.45 visar medelvärden av wavelet-amplituden för alla 47 filerna. Här kan vi se hur frekvensen varierar mellan mätdatafiler.

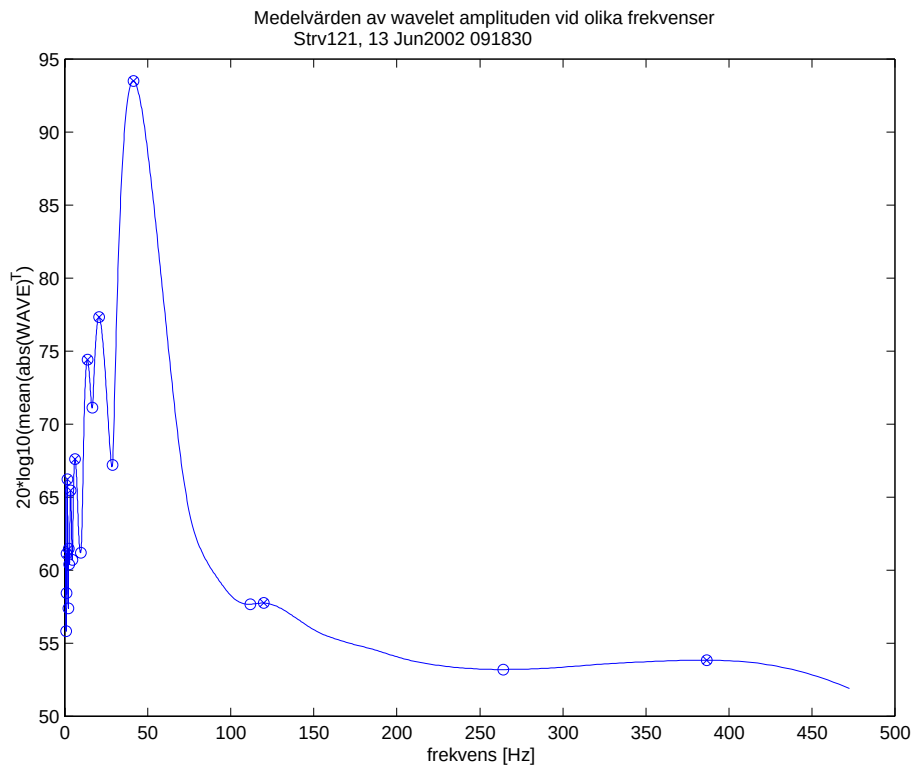


Figur 4.44. Medelvärden av Morlet wavelet-amplituden (T72) vid olika frekvenser. Kryss markerar maxvärden beräknade med numerisk differentiering.



Figur 4.45. Medelvärden av Morlet wavelet-amplituden (T72) vid olika frekvenser. Samtliga av de analyserade löporna.

Mätdata från 79 filer med signaler från strv121 (i olika vinklar) från mätningar i Skövde analyserades. Samtliga analyserade filer samlades in under 2 sekunder med samplingsfrekvensen 1 MHz. De demodulerade signalerna är av längden 1953 sampel med en samplingsfrekvens $F_{swel} = 977$ Hz. Figur 4.46 visar medelvärden av wavelet-amplituden vid olika frekvenser för strv121 stillastående vid olika vinklar (fil 13Jun2002_091830). Vi observerar en dominerande frekvens vid 41 Hz, som skulle kunna hänföras till vibrationer från strv121. Figur 4.47 visar medelvärden av wavelet-amplituden för alla 79 filerna.

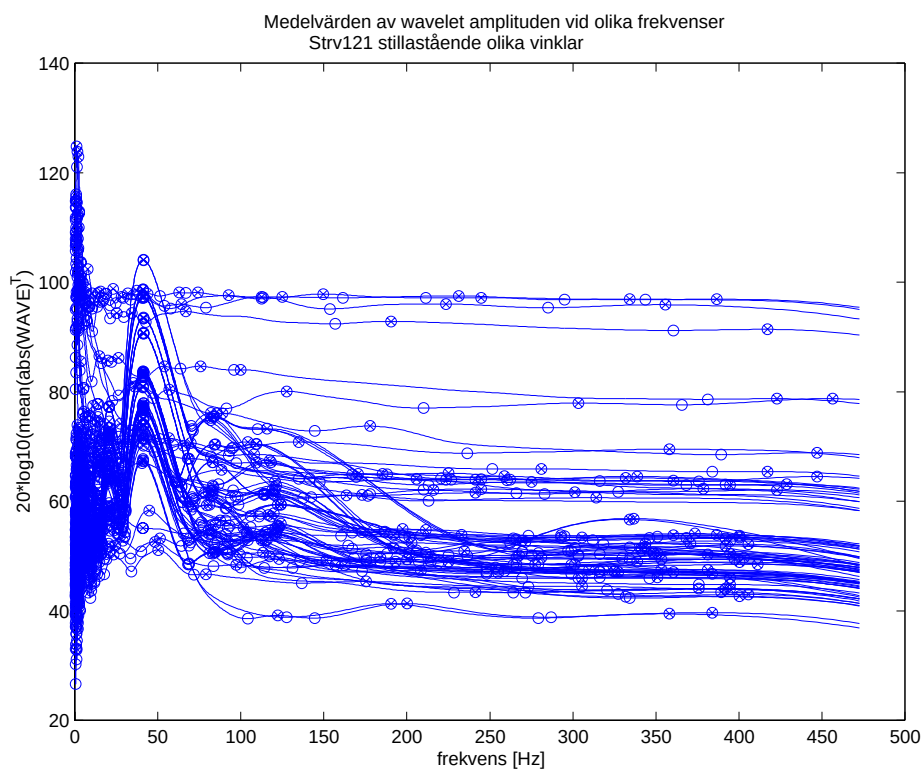


Figur 4.46. Medelvärden av Morlet wavelet-amplituden (strv121) vid olika frekvenser. Kryss markerar maxvärden beräknade med numerisk differentiering.

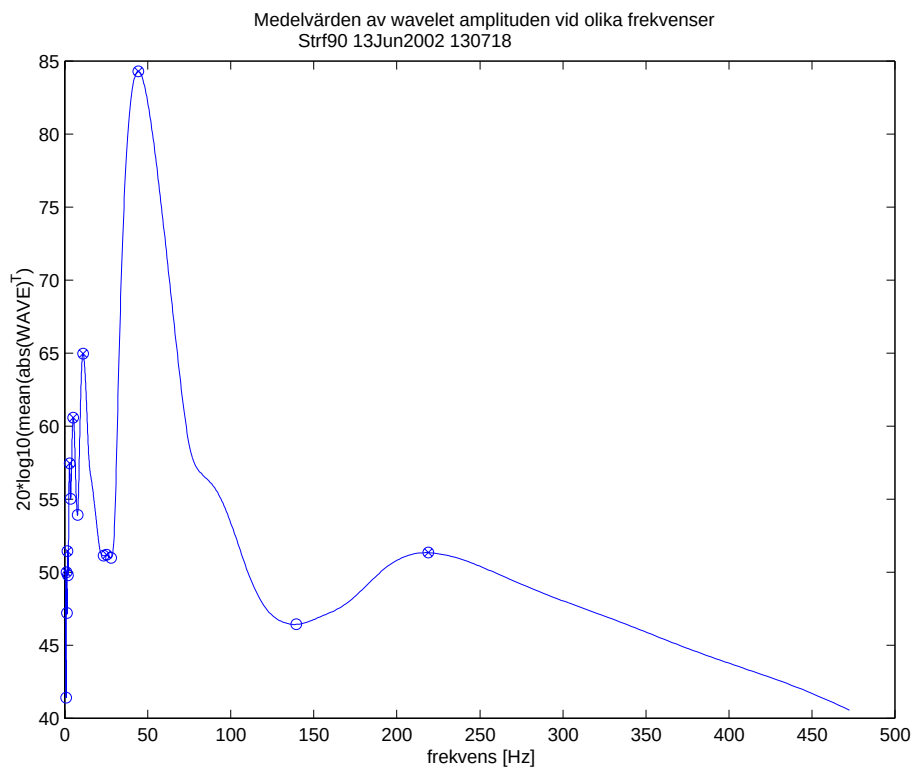
Mätdata från 21 filer med signaler från strf90 från mätningar i Skövde analyserades. Samtliga analyserade filer samlades in under 2 sekunder, med samplingsfrekvensen 1 MHz. De demodulerade signalerna är av längden 1953 sampel med en samplingsfrekvens $F_{swel} = 977$ Hz. Figur 4.48 visar medelvärden av wavelet-amplituden vid olika frekvenser för strf90 (fil 13Jun2002_130718). Vi observerar en dominerande frekvens vid 44 Hz, som skulle kunna hänföras till vibrationer från strf90. Figur 4.49 visar medelvärden av wavelet-amplituden för alla 21 filerna. Vi kan också se andra återkommande frekvenser t.ex. vid 11 Hz och 88 Hz.

4.5.3 Sammanfattning Vibrometri

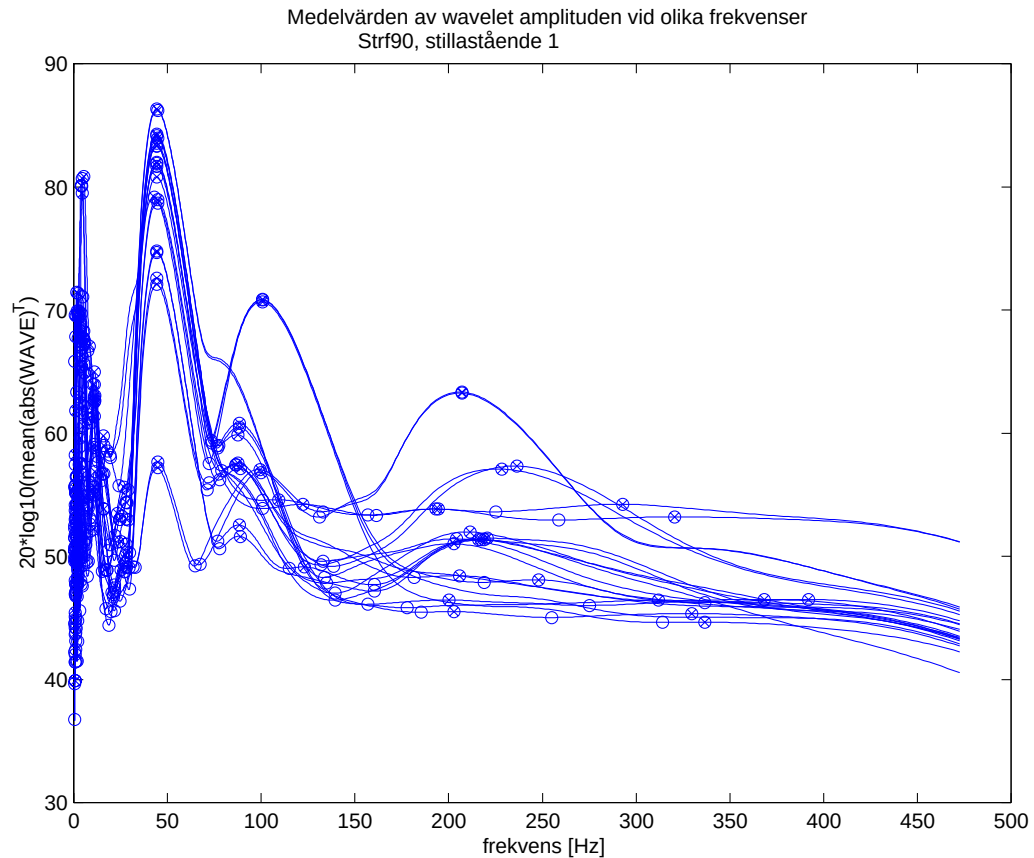
För vibrometrin var upplösningen inte tillräcklig för mätning på 1905 m. Ett antal, mellan mätdatafiler, återkommande frekvenser observerades för de tre fordonen. Huruvida dessa stämmer med vibrationerna vid källan bör kanske jämföras med en referensmätning vid källan. Vi kunde också notera vibrationer med multiplar. För mätdata från strf90 observerades t.ex. frekvenserna 5.5 Hz, 11 Hz, 44 Hz och 88 Hz. Fortsatt arbete kan innefatta försök att förbättra analysen genom att ta tillvara mer information om källan och den omgivande brusmiljön och skapa modeller för detta.



Figur 4.47. Medelvärden av Morlet wavelet-amplituden (strv121) vid olika frekvenser. Samtliga av de analyserade löporna stillastående olika vinklar.



Figur 4.48. Medelvärden av Morlet wavelet-amplituden (strf 90) vid olika frekvenser. Kryss markerar maxvärden beräknade med numerisk differentiering.

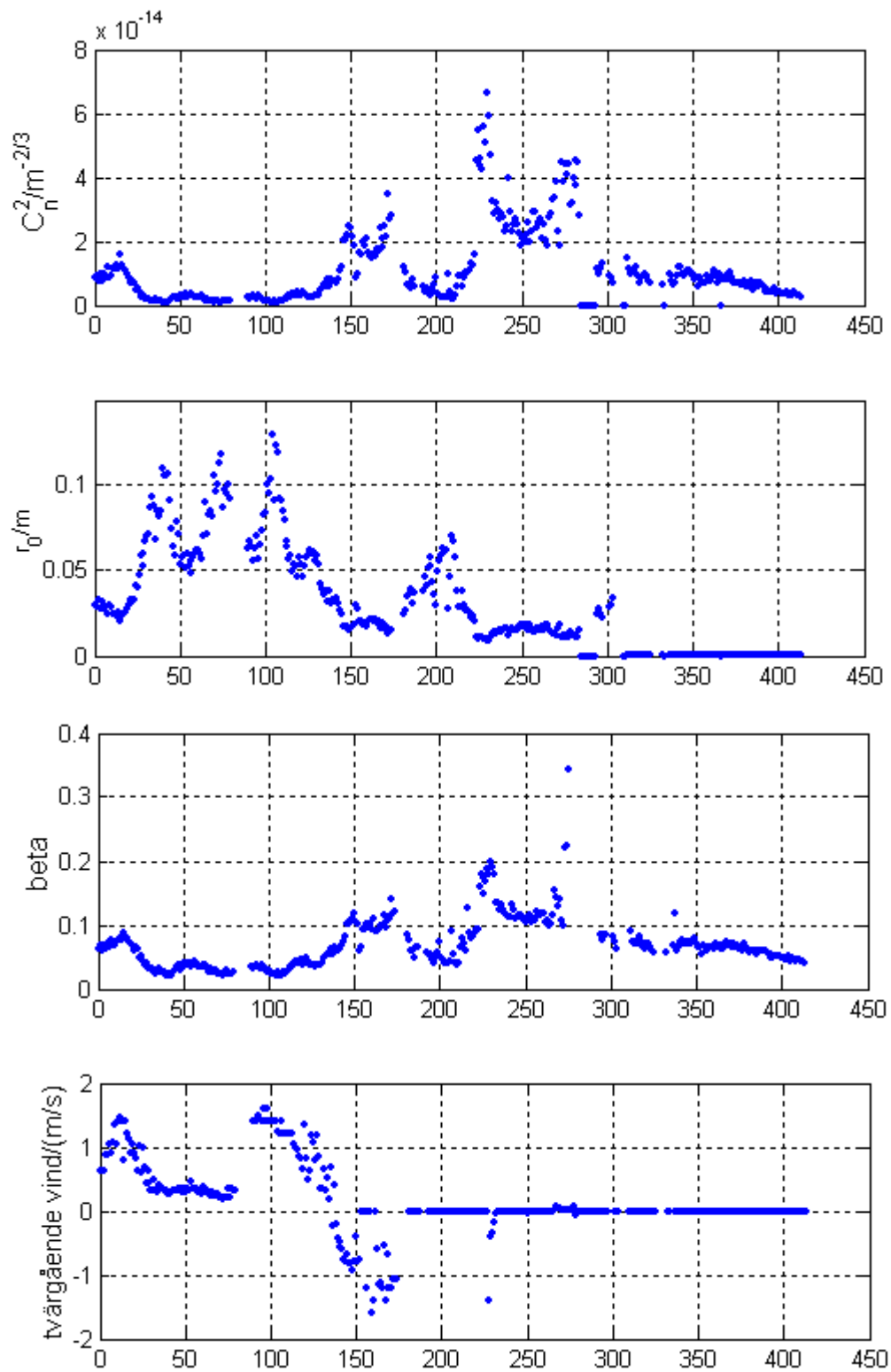


Figur 4.49. Medelvärden av Morlet wavelet-amplituden (strf90) vid olika frekvenser. Samtliga av de analyserade löporna.

5. Atmosfärsegenskaper

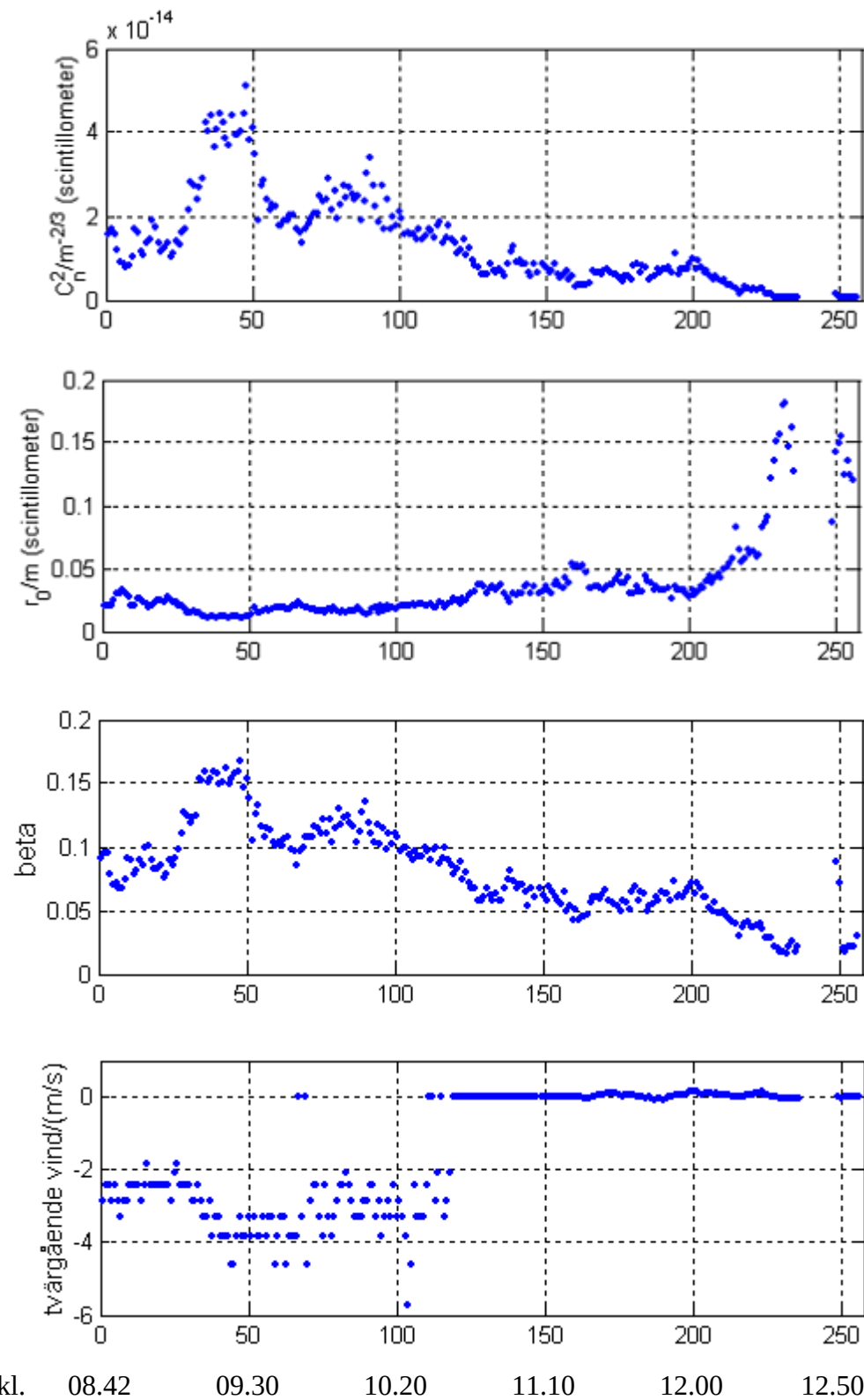
5.1 Scintillometer

Scintillometerdata, däribland C_n^2 , r_0 , beta och tvärgående vindhastighet, registrerades 1 gång/minut vilket var den maximala samplingshastigheten. Den första dagen gjordes registrering mellan kl.17.10 och kl.00.02 (Figur 5.1). C_n^2 varierade då mellan $1 \cdot 10^{-15}$ – $3 \cdot 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, d.v.s. ganska svag turbulens, typiskt för en tidpunkt nära och efter solnedgång. I ett fåtal punkter steg turbulensnivån upp mot $5 \cdot 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ – dessa tidpunkter utmärktes av väder med en tillfällig, kraftigare vind. Ett typiskt värde för r_0 var 0.1 m. I ett fåtal punkter sjönk värdet ned mot 0.02 m. Den andra dagen gjordes registrering mellan kl. 08.23 och 13.00 (Figur 5.2) då registreringen avbröts p.g.a. regn.



kl. 17.10 18.00 18.50 19.40 20.30 21.20 22.10 23.00 23.50 00.40

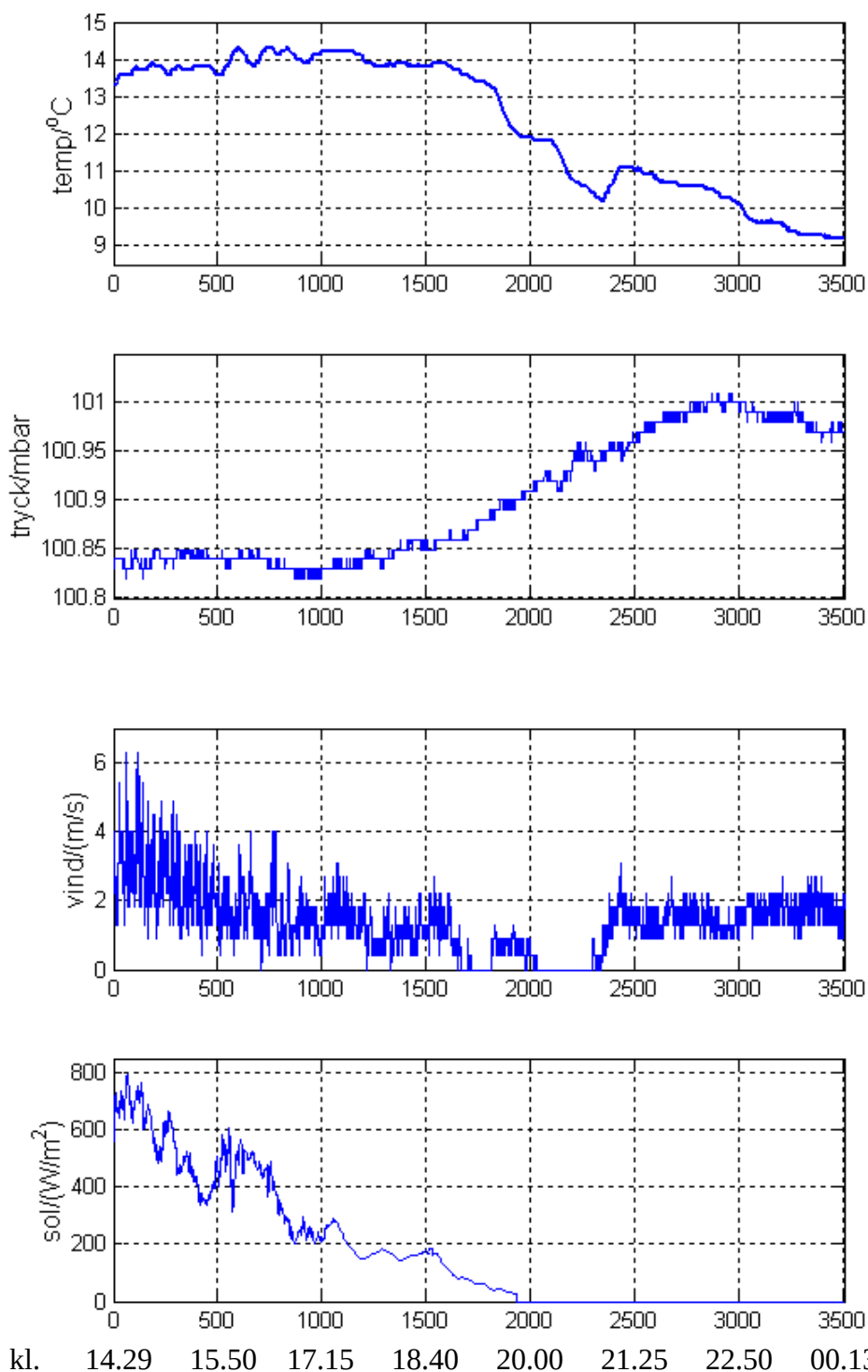
Figur 5.1. 2002-05-02, scintillometerdata; x-axeln visar tidsskalan med start kl.17.10 (punkten 0) och slut kl.00.02 (punkten 413), varje punkt svarar mot 1 minut.



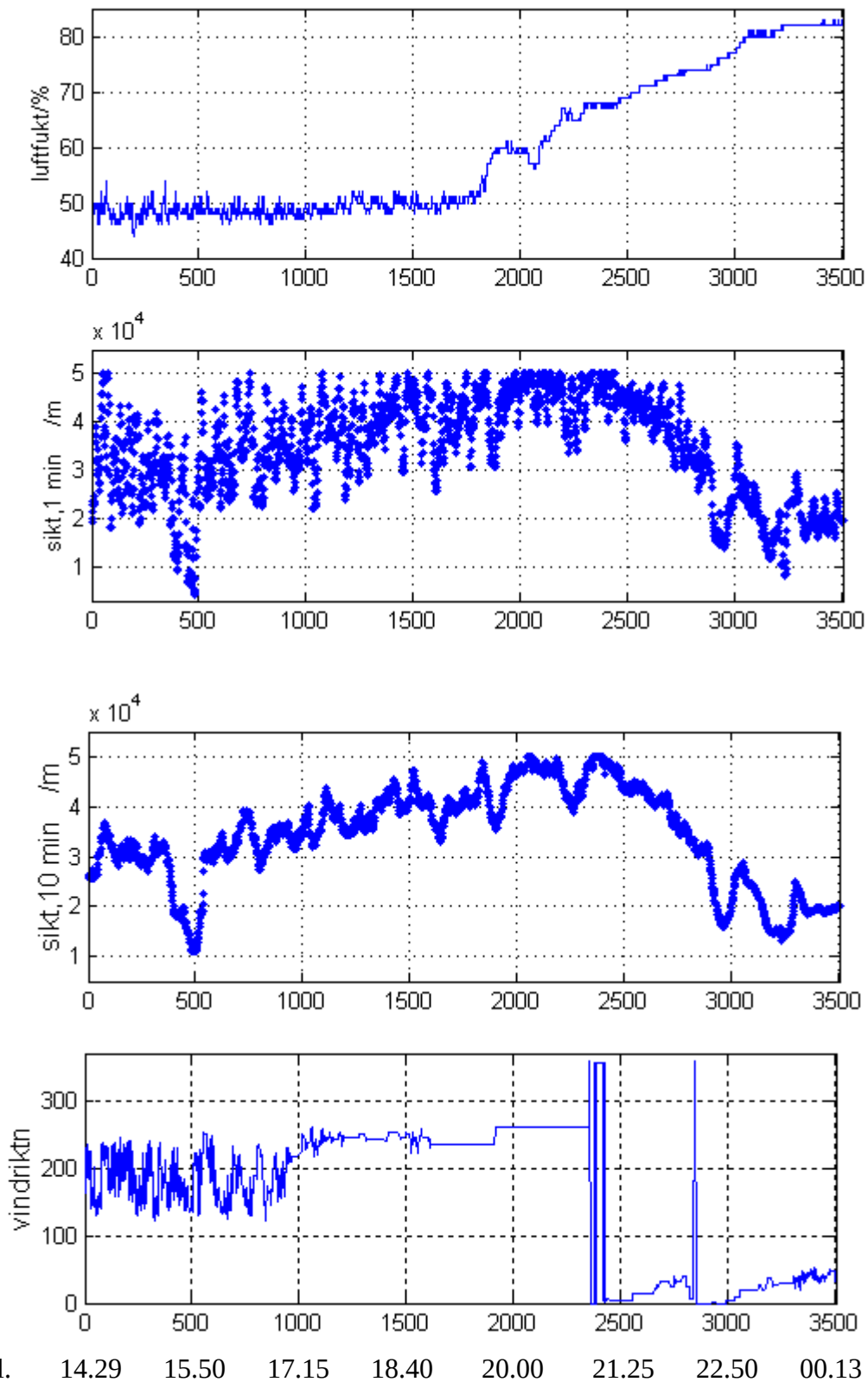
Figur 5.2. 2002-05-03, scintillometerdata; x-axeln visar tidsskalan med start kl.08.42 (punkten 0) och slut kl.13.00 (punkten 258), varje punkt svarar mot 1 minut.

5.2 Väderstation

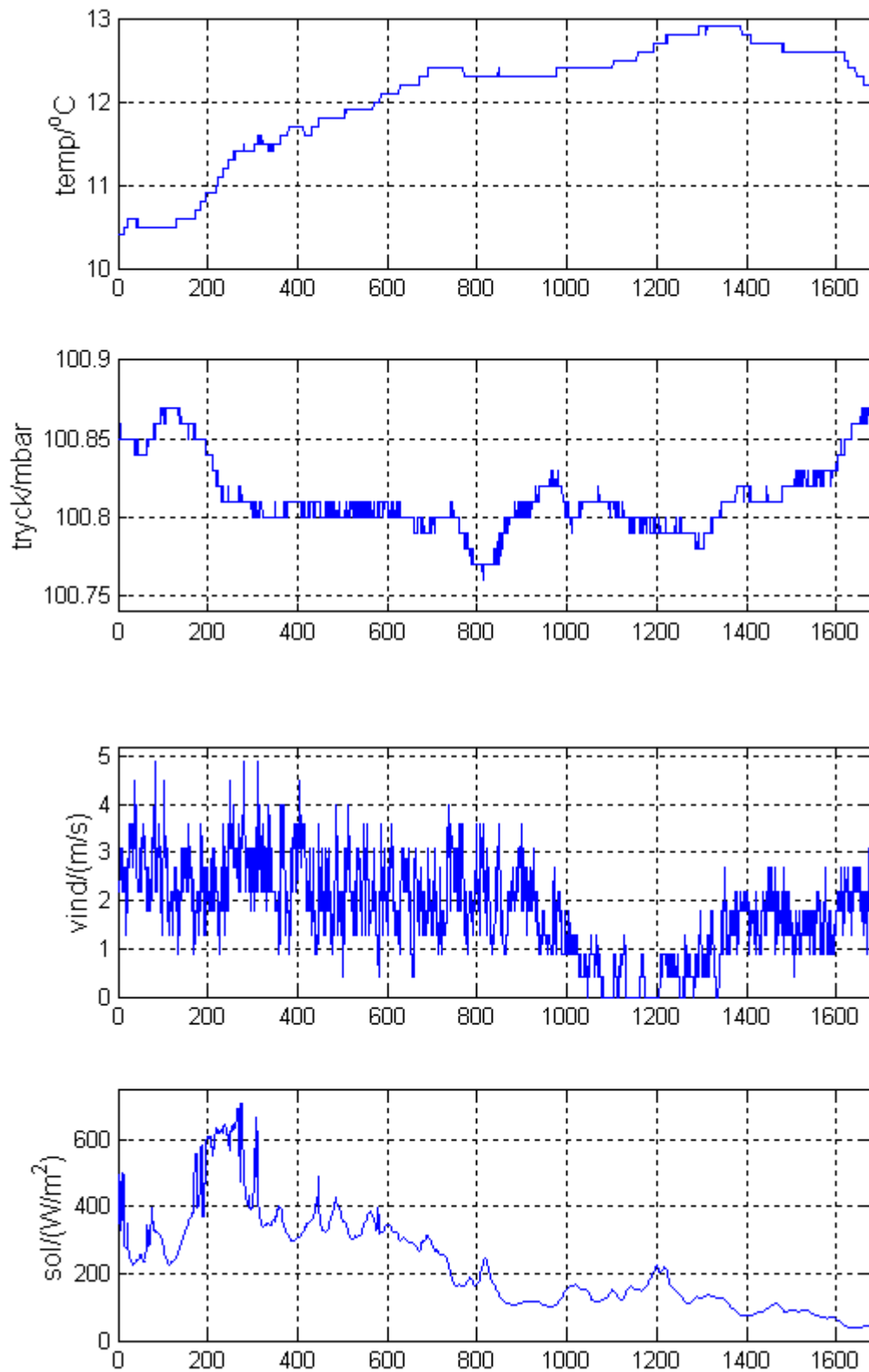
Väderparametrarna registrerades var 10:e sekund, vilket var väderstationens maximala samplingshastighet. Den första dagen (2002-05-02) gjordes registrering mellan kl.14.29 och kl. 00.13 (Figur 5.3 – 5.4) och den andra dagen (2002-05-03) mellan kl.08.42 och kl.13.22 (Figur 5.5 – 5.6).



Figur 5.3. 2002-05-02, väderparametrar; x-axeln visar tidsskalan med start kl.14.29 (punkten 0) och slut kl.00.13 (punkten 3507), varje punkt svarar mot 10 s

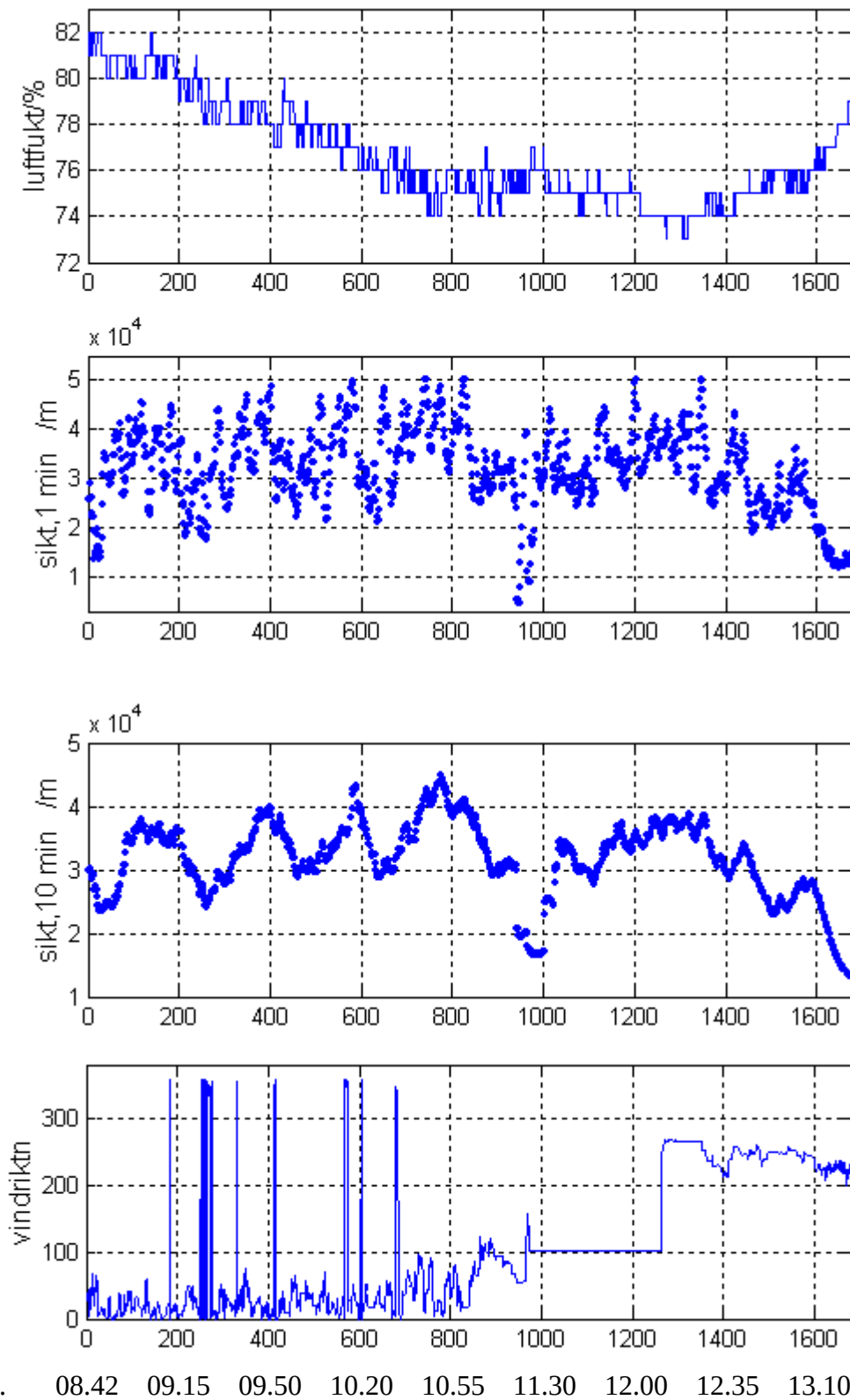


Figur 5.4. 2002-05-02, väderparametrar; x-axeln visar tidsskalan med start kl.14.29 (punkten 0) och slut kl.00.13 (punkten 3507), varje punkt svarar mot 10 s.



kl. 08.42 09.15 09.50 10.20 10.55 11.30 12.00 12.35 13.10

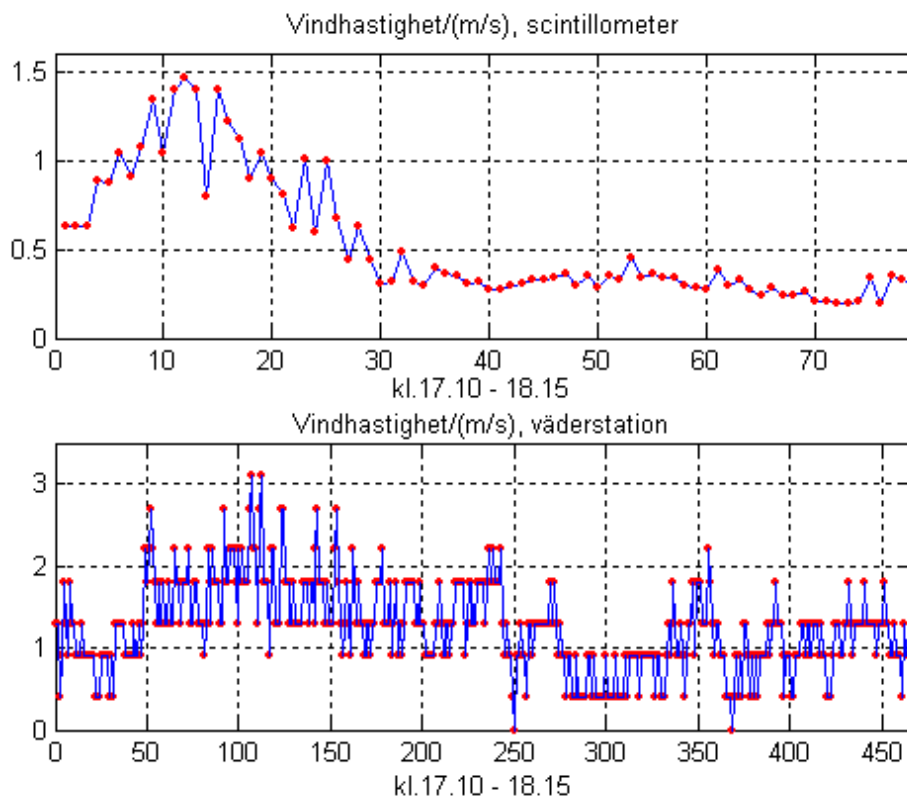
Figur 5.5. 2002-05-03, väderparametrar; x-axeln visar tidsskalan med start kl.08.42 (punkten 0) och slut kl.13.22 (punkten 1677), varje punkt svarar mot 10 s.



Figur 5.6. 2002-05-03, väderparametrar; x-axeln visar tidsskalan med start kl.08.42 (punkten 0) och slut kl.13.22 (punkten 1678), varje punkt svarar mot 10 s.

5.2.1 Jämförelse av vindhastighet registrerad med scintillometer och väderstation

Under mätningarna i Kvarn användes scintillometers sändarenhet med den maximala pulsfrekvensen 125 Hz, vilket dels resulterade i maximal noggrannhet och dels resulterade i att värden på den tvärgående vindhastigheten registrerades. Två metoder, scintillometer och väderstation, för mätning av vindhastigheten ger möjlighet att jämföra data. Figur 5.7 visar vindhastigheter registrerade med scintillometer och väderstation den första dagen mellan kl.17.10 – 18.15. Som framgår av figuren gav väderstationen ett fåtal diskreta värden på vindhastigheten (0.4, 0.9, 1.3, 1.8 o.s.v.), vilket inte stämmer med de 0.1 m/s som tillverkaren uppgivit (Tabell 3.5). Som också framgår av Figur 5.7 var vindhastigheter registrerade med väderstationen en faktor ca 2 ggr större än vindhastigheter registrerade med scintillometern. Att väderstationen registrerade större vindhastigheter verkar rimligt med tanke på att scintillometern endast registrerar den tvärgående vindhastigheten.



Figur 5.7. 2002-05-02. Vindhastigheten registrerad mellan kl. 17.10 och 18.15, övre figuren visar data med scintillometer och den undre med väderstation.

5.2.2 Modellering av optisk turbulens över land

Kopplingen mellan registrerade väderparametrar och observerad turbulens har modellerats av D. L. Hutt²⁰. Här följs Hutt's modellering och för ytterligare detaljer hänvisas till den givna referensen. En jämförelse av denna turbulensmodell med väderdata och scintillationsdata insamlade i Kvarn har genomförts. Turbulensmodellen är giltig i det atmosfäriska ytskiktet över land. Skiktets tjocklek varierar från några meter under stabila förhållanden till hundratals meter under instabila förhållanden (stark konvektion).

Brytningsindex strukturparameter C_n^2 är ett mått på turbulensstyrkan och definieras

$$C_n^2 = \langle [n(r_1) - n(r_2)]^2 \rangle / |r_1 - r_2|^{2/3} \quad (5.1)$$

där n är brytningsindex i punkterna r_1 och r_2 . Fluktuationer hos brytningsindex beror av temperaturfluktuationer vilka karakteriseras med temperaturens strukturparameter C_T^2 ($K^2 m^{-2/3}$). Om fuktinverkan och våglängdsberoende försummas kan C_n^2 uttryckas som en funktion av C_T^2

$$C_n^2 = (79PT^{-2} \times 10^{-6})^2 C_T^2 \quad (5.2)$$

där P är lufttrycket i mbar och T lufttemperaturen i K.

Nära marken beror temperaturfluktuationernas intensitet av marktyp, jordfuktighet, omgivningens temperatur, solinstrålning och vindhastighet. Genom att kombinera ett antal sådana parametrar har Thiermann²¹ utvecklat en modell som ger värden på C_n^2 och l_0 och som är giltig över land. Väderparametrar som ingår i denna modell är lufttemperatur ($^{\circ}C$), solinstrålning (W/m^2), vindhastighet (m/s) och lufttryck (mbar). Hutt¹ har gjort en jämförelse mellan C_n^2 och l_0 erhållna från denna modell och C_n^2 och l_0 uppmätta med scintillometer. Under förhållanden som råder dagtid visade jämförelsen en god korrelation mellan modellerade och uppmätta värden, både för C_n^2 och innerskalan l_0 .

Parametern l_0 kan uttryckas som en funktion av luftens kinematiska viskositet ν (m^2/s) och avledningshastigheten av turbulent kinetisk energi ε (m^2/s^3) som

$$l_0 = 7.4\nu^{3/4}\varepsilon^{-1/4} \quad (5.3)$$

Turbulensmodellen ger ε varpå l_0 beräknas via (5.3). Luftens kinematiska viskositet ges av formeln

$$\nu = \left(\frac{1.718 + 0.0049\vartheta}{\rho} \right) \times 10^{-5} \quad (5.4)$$

där ϑ ($^{\circ}C$) är lufttemperaturen och ρ är luftdensiteten. ρ för torr luft kan beräknas enligt

$$\rho = 1.286 - 0.00405 \times \vartheta \quad (5.5)$$

där ϑ är lufttemperaturen i $^{\circ}C$.

C_T^2 och ε beräknas från de tre termerna friktionshastighet u_* (m/s), turbulent temperaturskala T_* (K) och Monin-Obuhkov-längd L (m).

Friktionshastigheten, u_* uttrycks som

$$u_* = uk \left[\ln \left(\frac{z_u}{z_0} \right) - \psi(L) \right]^{-1} \quad (5.6)$$

där u är vindhastigheten mätt på höjden z_u över marken och k (dimensionslös) är Von Karmans konstant (= 0.35, Hutt). Höjden z_u var svårt att definiera i Kvarn p.g.a. att väderstationen stod på en avsats med några meter ner till den småkuperade terrängen runtomkring. Värdet 5 m (vindmätarens höjdnivå, ca 2 m + avsatsens höjd, ca 3 m) ansattes. Parametern z_0 (m) är markytans grovhet vilken sattes till 0.02 m av Hutt. Eftersom förhållandena för Hutt verkar ha varit likartade de i Bondeby (grästäckt mark, omgivning av träd, nordlig breddgrad) sattes denna också till 0.02 m. z_0 (m) har en ganska liten inverkan på modellen. Termen $\psi(L)$ – se nedan.

Turbulenta temperaturskalan, T_* , uttrycks som

$$T_* = -\frac{Q_0}{u_*} \quad (5.7)$$

där Q_0 (K×m/s) är det vertikala flödet av turbulent kinematiskt värme. Vid förhållanden som råder under dagtid kan Q_0 beräknas genom

$$Q_0 = \frac{\eta}{c_p \rho} \left[\left(1 - \frac{\alpha}{1 + \gamma/s} \right) (1 - A) R - \beta \right] \quad (5.8)$$

där η (dimensionslös) är en empirisk konstant som är lika med 0.9 och c_p (J/kg/K) är luftens specifika värme, vilken sattes till 1005. α (dimensionslös) är ett tal mellan 0 och 1 som anger markens förmåga att avge fukt och är för grästäckt mark ≈ 1 . γ är kvoten mellan specifika värmerna för luft vid konstant tryck och ångbildningsentalpi för vatten. s är temperaturderivatan av vattenångmättad luft. Kvoten γ/s kan beräknas enligt

$$\gamma/s = 1.4631 - 0.0923\vartheta + 0.0027\vartheta^2 - 3.18 \times 10^{-5} \vartheta^{-3} \quad (5.9)$$

A är ytans albedo, d.v.s. reflektivitet. Ett typiskt värde för grästäckt mark är 0.2. $A = 0.2$ gav värden på C_n^2 som var ca 1.5 - 2 ggr större än C_n^2 som registrerades med scintillometer. Terrängen i Bondeby inkluderade emellertid också grusvägar, sönderkörd grästerräng (av stridsvagn) samt sten. Med $A = 0.3$ hamnade värdena på C_n^2 ungefär rätt. R (W/m²) är solinstrålningen och β (W/m²) är en empirisk konstant som sattes till 35 W/m² i enlighet med [1].

Under nattetid går solinstrålningen ner till noll och Q_0 beräknas då istället enligt

$$Q_0 = \frac{cu^3}{1 + (c/Q_{0,\max})u^3} \quad (5.8b)$$

där

$$C = \frac{-4}{27} \frac{k^2 T}{5g z_u [\ln(z_u / z_0)]^2} \quad (5.8bb)$$

$Q_{0, \max}$ ges av $Q_{0, \max} = H_{\max} / (c_p \rho)$ där värmeentalpiflödet ("sensible heat flux") $H_{\max}$ sätts till mellan -5 och -100 W/m^2 . Värdet -12 W/m^2 ansattes i enlighet med Hutt.

Monin-Obuhkov-längden L (m) ges av L ges av

$$L = \frac{u_*^2 T}{kg T_*} \quad (5.10)$$

där g är tyngdaccelerationen samt samma k som i ekv. 5.6.

Hur $\psi(L)$ i ekvation (5.6) beräknas är avhängigt kvoten z_u/L . Om $z_u/L > 0$ definieras förhållandet som stabilt och $\psi(L)$ ges då av

$$\psi(L) = -4.7 z_u / L; \quad z_u / L > 0 \quad (5.11)$$

Enligt Hutt är detta fallet då luften är varmare än marken. Om kvoten $z_u/L < 0$ definieras förhållandet som instabilt och $\psi(L)$ ges då av

$$\psi(L) = 2 \ln \left(\frac{1+y}{2} \right) + \ln \left(\frac{1+y^2}{2} \right) - 2 \tan^{-1} y + \frac{\pi}{2}; \quad z_u / L < 0 \quad (5.12)$$

där $y = (1-15z_u/L)^{1/4}$. Enligt Hutt är detta fallet då luften är kallare än marken. Nattetid beräknas $\psi(L)$ enligt ekv. (5.11).

L kan inte skrivas explicit som en funktion av ψ och dessa parametrar måste därför bestämmas genom iteration. Som startvärde för $\psi(L)$ i (5.6) används värdet 0. Erhållet u_* sätts sedan in i (5.7) varpå erhållet värde på T_* sätts in i (5.10). Ett nytt $\psi(L)$ kan sedan räknas fram ur (5.11) eller (5.12). Itereringen fortgår tills det skiljer mindre än 0.5 % mellan två på varandra beräknade u_* .

Om förhållandet är stabilt ($Q_0, z_u/L > 0$) beräknas sedan C_T^2 och ε enligt

$$C_T^2 = 4\beta \frac{T_*^2}{(kz_u)^{2/3}} \left[1 + 7 \frac{z_u}{L} + 20 \left(\frac{z_u}{L} \right)^2 \right]^{1/3} \quad (5.13)$$

respektive

$$\varepsilon = \frac{u_*^3}{kz_u} \left[1 + 4 \frac{z_u}{L} + 16 \left(\frac{z_u}{L} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5.14)$$

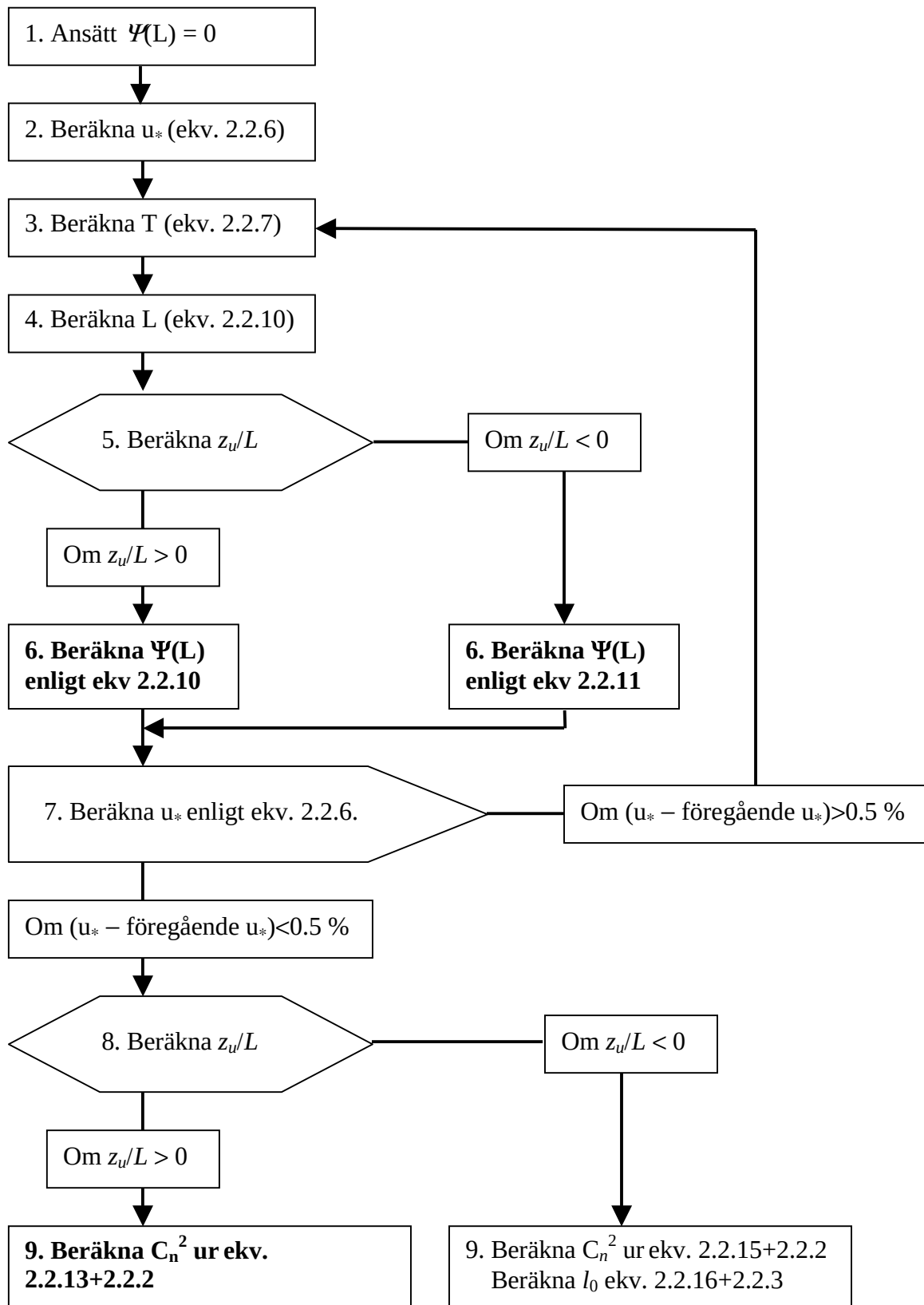
och om förhållandet är instabilt ($Q_0, z_u/L < 0$) enligt

$$C_T^2 = 4\beta \frac{T_*^2}{(kz_u)^{2/3}} \left[1 - 7 \frac{z_u}{L} + 75 \left(\frac{z_u}{L} \right)^2 \right]^{-1/3} \quad (5.15)$$

respektive

$$\varepsilon = \frac{u_*^2}{kz_u} \left[\left(1 - 3 \frac{z_u}{L} \right)^{-1} - \frac{z_u}{L} \right] \quad (5.16)$$

C_n^2 och l_0 beräknas slutligen enligt (5.2) respektive (5.3). En sammanfattning av turbulensmodelleringen visas i Figur 5.8.

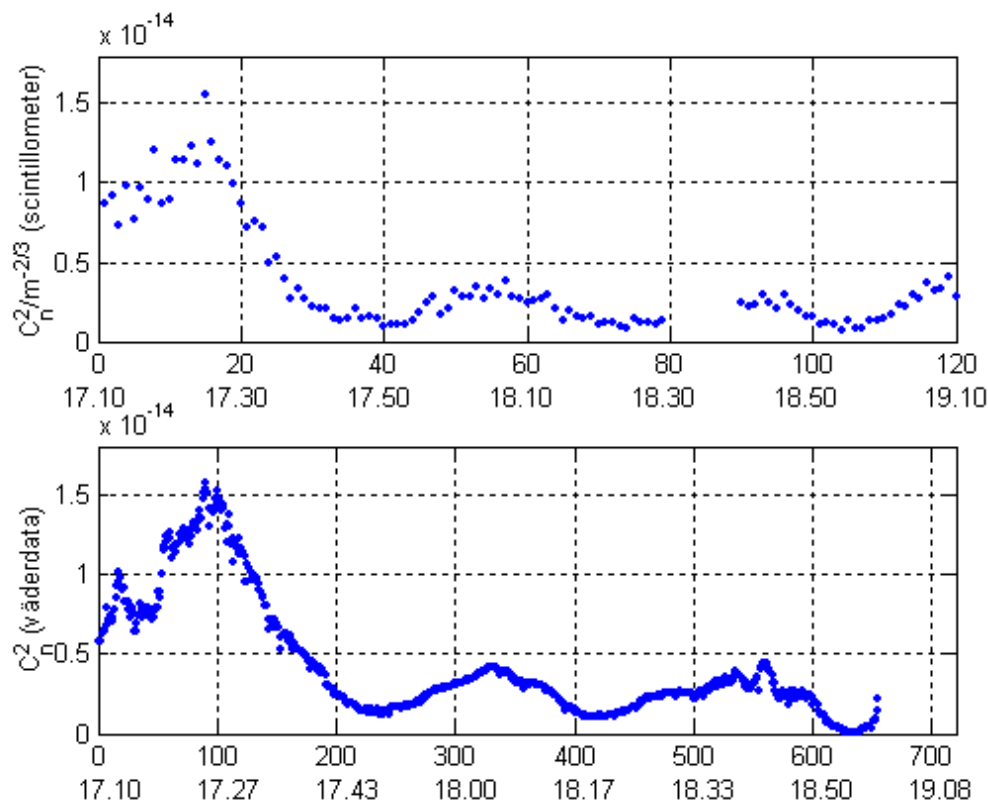


Figur 5.8. Sammanfattning av turbulensmodellen

5.2 Resultat och diskussion

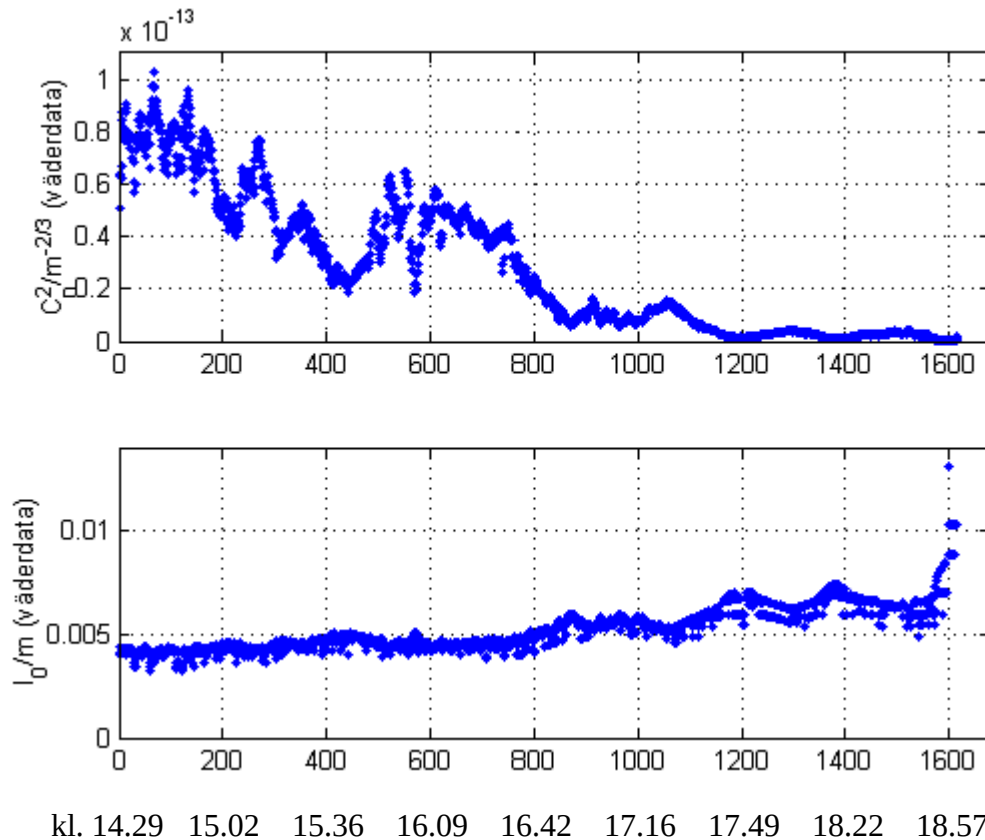
2002-05-02

Vid modellering av turbulens under dagtid är modellen beroende av att värdena på vindhastighet och solinstrålning båda är > 0 , och under nattetid av att vindhastigheten är > 0 . I annat fall växer C_n^2 mot oändligheten eller blir ett odefinierbart tal $= 0/0$ (ekvation (5.7), (5.8 eller 5.8b + 5.8bb), (5.10) och (5.12)). Första dagen (2002-05-02) blev solinstrålningen mycket svag strax efter kl.19.30 på kvällen för att sedan gå ned mot noll. Efter ca 19.10 var även vindhastigheten mycket låg och gick periodvis även den ned mot noll vilket omintetgjorde en modellering av C_n^2 utifrån väderdata mellan kl. 19.10 – 19.30, såväl med beräkning av Q_0 enligt ekv. (5.8) som (5.8b) + (5.8bb). En jämförelse mellan C_n^2 mätt med scintillometer och C_n^2 -värden modellerade utifrån väderparametrar mellan kl.17.10 – 19.10 visas i Figur 5.9. Som framgår av figuren är överensstämmelsen, såväl korrelation som storleksordning på resultaten, mellan uppmätta och modellerade värden på C_n^2 god med de ansatser som gjorts i 5.2.2. **Modellering av optisk turbulens över land.** BLS900 scintillometer (Scintec) gav inga värden på den inre skalan l_0 . I Huttus turbulensmodellering var korrelationen mellan data uppmätta med SLS-20 scintillometer (Scintec) och modellerade värden på l_0 god och likvärdig med resultaten för C_n^2 .



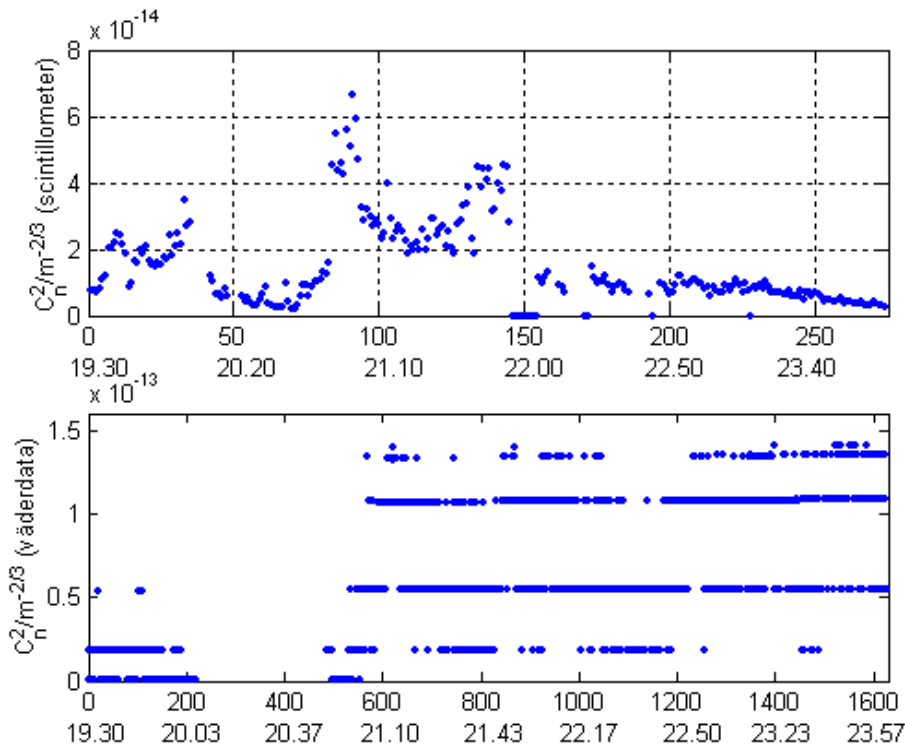
Figur 5.9. 2002-05-02. Turbulenskonstanten C_n^2 mätt med scintillometer BLS900 (övre kurvan) och modellerad utifrån väderparametrar (undre kurvan). x-axeln visar tidsskalan med start kl.17.10 (punkten 0) och slut kl.19.10 (för den övre kurvan svarar detta mot punkten 120 och för den undre mot punkten 720); den andra raden under x-axeln visar vilken tid den vertikala skallinjen svarar mot.

Om man antar att förhållandet mellan uppmätta och modellerade data var ungefär detsamma mellan kl. 14.29 – 17.10 (då mätningar inte gjordes med scintillometern) som mellan kl. 17.10 – 19.10, kan en uppskattning av C_n^2 och l_0 göras under denna tidsperiod utifrån väderparametrarna (Figur 5.10).

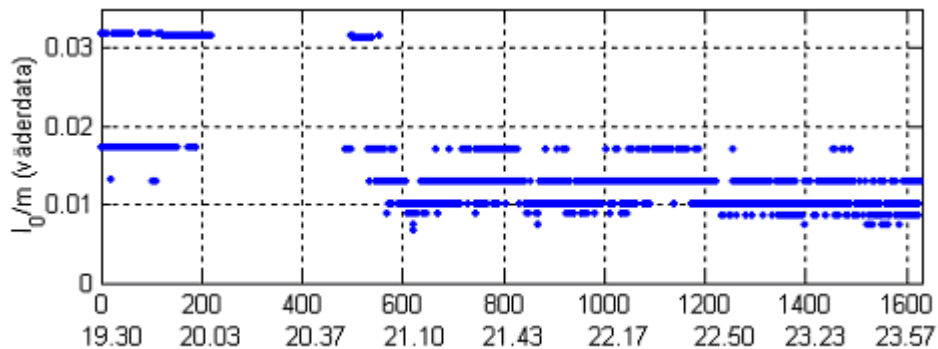


Figur 5.10. 2002-05-02. Turbulenskonstanten C_n^2 och l_0 modellerade utifrån väderparametrar. x-axeln visar tidsskalan med start kl.14.29 (punkten 0) och slut kl.19.10 (punkten 1680); den andra raden under x-axeln visar vilken tidpunkt den vertikala skallinjen svarar mot.

I ref.20 gav beräkning av Q_0 enligt (5.8b) + (5.8bb) från data insamlade under nattförhållanden en avsevärt sämre korrelation mellan uppmätta och modellerade värden än med (5.8) och data insamlade under förhållanden som råder dagtid. Anledningen är att beräkning av Q_0 enligt (5.8) är betydligt mer tillförlitlig än beräkning enligt (5.8b) + (5.8bb). Dagtid beror värdet på det vertikala flödet av turbulent kinematiskt värme (Q_0) huvudsakligen av solinstrålningen R , en parameter som är enkel att mäta. Under förhållanden nattetid är Q_0 svårare att beräkna. Särskilt problematiskt blir det vid väderförhållanden med svag vind och låga turbulensnivåer. Vid vindhastigheter < 1 m/s är modellen inte tillförlitlig²⁰. Resultatet av modellering av C_n^2 och l_0 från data insamlade efter mörkrets inbrott i Kvarn visas i Figur 5.11 och 5.12. Mellan ca kl.20.00 – 21.00 var det helt vindstilla varför några modellerade värden på C_n^2 och l_0 då inte erhöles. Modellerade C_n^2 och l_0 framträder som parallella, horisontella linjer vilket vid en första anblick ser besynnerligt ut. Detta är ett resultat av att vindmätaren presenterar vindhastigheterna som ett antal diskreta nivåer och att Q_0 är en funktion av vindhastigheten i kubik ((5.8b) + (5.8bb)). Notera att mellan kl 19.30 – 20.00 var vinden mycket svag, < 1 m/s, ett förhållande under vilket modellen egentligen inte ska användas.



Figur 5.11. Nattmodell. Turbulenskonstanten C_n^2 Dag 1 (2002-05-02) mätt med scintillometer BLS900 (övre kurvan) och modellerad utifrån väderparametrar (undre kurvan). x-axeln visar tidsskalan med start kl.19.30 (punkten 0) och slut kl.00.02 (för den övre kurvan svarar detta mot punkten 274 och för den undre mot punkten 1629)



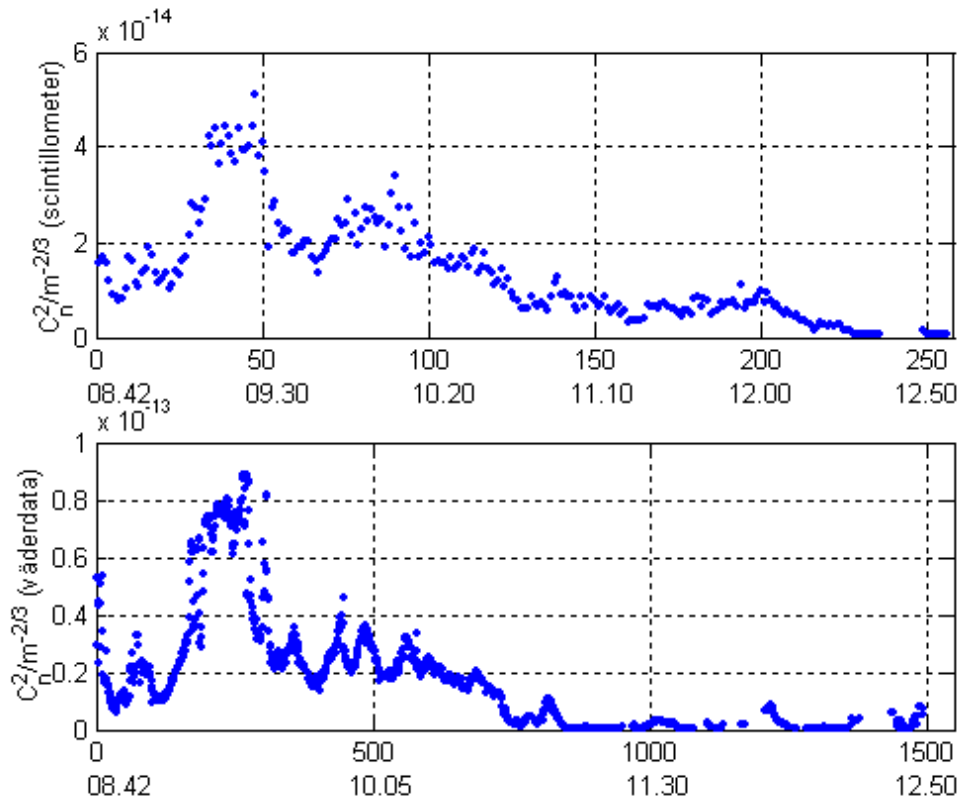
Figur 5.12. 2002-05-02, nattmodell. l_0 modellerad utifrån väderparametrar. x-axeln visar tidsskalan med start kl.19.30 (punkten 0) och slut kl.00.02 (punkten 1629)

Som framgår av Figur 5.11 och är resultatet från Kvarn i överensstämmelse med resultaten i ref. 20 i det att korrelationen mellan uppmätta och modellerade värden är dålig eller obefintlig. Modellen ger dock en rimlig storleksordning på såväl C_n^2 som l_0 .

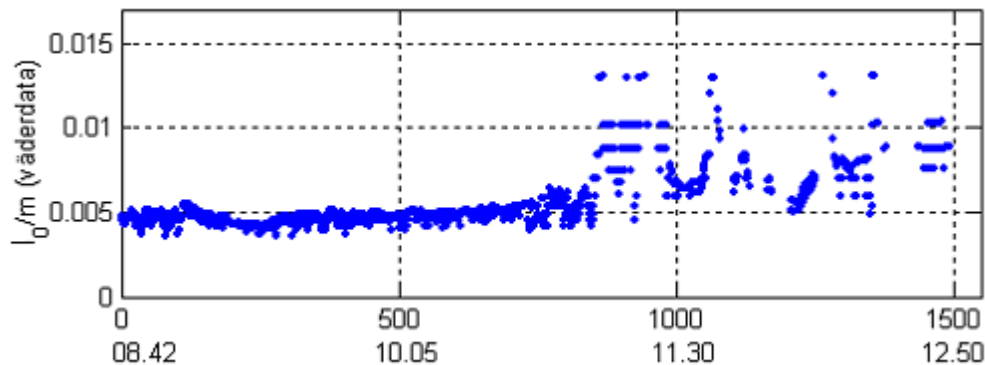
2002-05-03

Värden på C_n^2 erhållna med scintillometer och från modellering utifrån väderdata framgår av Figur 5.13. C_n^2 varierade mellan $10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ upp mot $5 \cdot 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ kl.09.30, d.v.s. relativt stark turbulens, för att därefter stadigt sjunka. Efter kl.09.30 blev vädret allt sämre med regn och en minskande solinstrålning. Modellerade värden på l_0 framgår av Figur 5.14. l_0

varierade mellan 0.004 m och upp mot 0.013 m den sista timmen (kl.12.00 – 13.00). I likhet med resultaten från den första dagen är korrelationen mellan uppmätta och modellerade värden på C_n^2 god. För den andra mättdagen tenderar dock modellen att ge för stora värden på C_n^2 med de ansatser som gjordes för den första dagen. Samma värden på parametrarna, bl.a. A , ansattes den andra dagen. En brist hos väderstationen var avsaknad av albedometer.



Figur 5.13. 2002-05-03. Turbulenskonstanten C_n^2 mätt med scintillometer BLS900 (övre kurvan) och modellerad utifrån väderparametrar (undre kurvan). x-axeln visar tidsskalan med start kl.08.42 (punkten 0) och slut kl.13.00 (för den övre kurvan svarar detta mot punkten 258 och för den undre mot punkten 1548); den andra raden under x-axeln visar vilken tid den vertikala skallinjen svarar mot.



Figur 5.14. 2002-05-03. l_0 modellerad utifrån väderparametrar. x-axeln visar tidsskalan med start kl.08.42 (punkten 0) och slut kl.13.00 (punkten 1548); den andra raden under x-axeln visar vilken tid den vertikala skallinjen svarar mot.

6. Diskussion

En unik sammätning i Kvarn med flera aktiva och passiva sensorer har redovisats. Med detta exempel på multisensorsystem kombineras flera sensorers förmågor och man vinner fördelar såsom robustare funktion, förbättrade upplösningsegenskaper, fler särdragsegenskaper, ökad tillförlitlighet och ökad dimensionalitet.

Multi/hyperspektrala sensorsystem kan tillföra väsentligt ökad information om både tillverkade objekt och naturlig bakgrund. De hyperspektrala system som har demonstrerats hittills har i huvudsak varit beroende av dagsljus. Nya system utvecklas emellertid för MWIR och termisk IR. Signalbehandling av hyperspektrala data är fortfarande bara i sin början. Huvudsakligen sker signalbehandling med fjärranalys som utgångspunkt men signalbehandling för målupptäckt och målklassning ökar. Två IR-kameror har demonstrerats under olika ljus- och väderförhållanden, en multispektral IR-kamera i spektralområdet 1.5- 5.2 μm och en QWIP-kamera i 8-9 μm .

Det finns en enorm potential att systemmässigt integrera aktiva och passiva funktioner i framtida EO sensorer. Givetvis kan ge bilder för måligenkänning på långa avstånd <10 km och vi har gett exempel på möjligheten med 3D laserradar med matrisdetektor. Ett aktivt/passivt EO system har även stora möjligheter att kartera högupplösta syntetiska omgivningar i 3D sedda antingen i dagsljus eller i mörker. Detta har stor tillämpning för sensortolkning, operatörsstöd, uppdragsplanering, terrängnavigering m m. Kombinationer av passiva och aktiva sensorer underlättar betydligt både för operatörsstödd och automatisk måligenkänning. I USA finns DARPA-projektet JIGSAW som syftar till att sätta samman multipla vyer från en laserradarsensor för att se under vegetation och känna igen mål. Ett exempel ges i rapportens Figur 4.33-4.34.

Atmosfärsturbulensen har konsekvenser för utformningen av optiska sensorer för både varnarsystem och spaningssystem. För taktiskt utnyttjande måste den förväntade turbulensnivån kunna predikteras. Modellering av turbulensnivån utifrån väderparametrar studerades i Kvarn. En god överensstämmelse erhöles mellan turbulensnivå modellerad från väderparametrar och data uppmätt med scintillometer.

Multisensorsystemen under utveckling avser att visa den ökade förmåga som kan erhållas genom att kombinera multi/hyperspektrala system och laserradarsystem mot dolda och kamouflerade mål. I ett efterföljande steg skall realtidsalgoritmer tillföras och detektion demonstreras. För att kunna klara algoritmutvecklingen krävs datainsamling i realistiska scenarier. Fältförsök under någorlunda realistiska förhållanden utgör därför en viktig del i utvecklingen av sensorsystem. Metodik och algoritmer för insamlade data kommer att behandlas i en kommande rapport.

7 Referenser

- [1] I. Renhorn, T. Svensson, G. Carlsson, D. Letalick, H. Larsson, O. Steinvall, Försök med multispektrala/passiva sensorer (December) FOI-R--0290—SE.
- [2] FLIR Systems, ThermoCAMTM SC3000 Operator's Manual (June 1999).
- [3] L. Klasén, O. Steinvall, G. Bolander, M. Elmquist, Grindad utbildning – Inledande prov vid långa avstånd (December 2001) FOI-R--0302—SE.

- [4] Scintec AG, Boundary Layer Scintillometer BLS900 User's manual, Version 1.1 (22 April 2002).
- [5] T. Carlsson and D. Letalick, System setup and characterization – Laser radar vibrometer at 1.55 μm , FOI report, FOI-D--0028--SE, Nov 2001.
- [6] L. Klasén, Image Sequence Analysis of Complex Objects – Law Enforcement and Defence Applications, Linköpings Universitet, avhandling nr. 762, Oktober 2002.
- [7] Labsphere, Calibration Certificate, Report Numbers 34597-1-1, 34597-2-1, 34597-3-1, 34597-4-1, December 3, 2001.
- [8] F. Näsström, R. Aljasmi, B. Boberg, L. Carlsson, M. Gustafsson, H. Larsson, D. Letalick, A. Persson, O. Steinvall, A. Sume, T. Svensson, M. Ulvklo, Å. Wernersson, Intelligent Verkanssystem, slutrapport av genomförda aktiviteter, FOI report, FOI-R--0746--SE, Feb 2003.
- [9] H. Larsson, O. Steinvall m fl, Lasersignaturmätningar mot JAS 39 – oktober 2001. Mätningar i jämförelse med simuleringar, FOI-RH-0112—SE, maj 2002.
- [10] H. Nordin, C. Carlsson, C. Karlsson, D. Letalick, Signal processing in laser radar vibrometry: A comparison of two frequency demodulation methods. FOA-R--96-003333.1--SE.
- [11] M. Millnert, C. Karlsson (Grönwall), C. Karlsson, D. Letalick, I. Renhorn, Robust coherent laser radar design and signal processing for vibrometry. SPIE Proceedings Vol. 2748, Laser Radar Technology and Applications, April 1996, Orlando, FL, USA.
- [12] D. Letalick, I. Renhorn, C. Karlsson (Grönwall), Koherent ladarteknik vid 1,55 μm – En projektrapportering. FOA-R--96-00317-3.1--SE.
- [13] T. Carlsson, Software signal processing. Scanning laser radar vibrometer at 1.55 μm . FOI-D--0027--SE.
- [14] L. Ljung, System Identification Theory for the User. Prentice-Hall, Inc., New Jersey 1987.
- [15] S. L. Jr. Marple, Digital Spectral Analysis with Applications. Prentice-Hall, New Jersey, 1987.
- [16] H. L. Van Trees, Detection, Estimation and Modulation Theory, part I, Wiley, New York, 1968.
- [17] S. Haykin, AdaptiveFilter Theory. Prentice-Hall, Inc., New Jersey 1996.
- [18] M. I. Plett, Ultrasonic Arterial Vibrometry With Wavelet Based Detection and Estimation. University of Washington 2000.
- [19] C. Torrence, G. P. Compo, A Practical Guide to Wavelet Analysis. Bulletin of the American Meteorological Society, Vol. 79, No. 1, January 1998.
- [20] D. L. Hutt, Modeling and measurements of atmospheric optical turbulence over land (1999), Opt.Eng. 38(8).
- [21] V. Thiermann, Optische Messung turbulenter Flüsse und Vorhersage der optischen Turbulenz aus einfachen grenschichtparametern, Ph.D. Dissertation, University of Hamburg (1990).

**Bilaga 2. Genomförda mätningar vid fältförsök enligt
PROVPROGRAM FÖR FÄLTFÖRSÖK OPTRONISKA
SENSORSYSTEM (E3036) OCH GRINDAD AVBILDNING (E3889)**

	Provprogram	T72		Registrerade data
	2002-05-02			
1	Rigging av försöks- och mätutrustning			
	Inmätning av mätplatsens position med GPS			-
	Scintillometern startas			Tabell 5
	Väderstation startas			Tabell 6
2	Mätning vid 150 meters målavstånd			
	Inmätning T72 position med GPS			E1474514 N6505180
	Mätning av avstånd till mätplats			150 m
	Mätning QWIP	Igång	0°-135°	Tabell 3
	Kalibrering MULTIMIR	Igång	0°-135°	Tabell 1
	Mätning MULTIMIR	Igång	0°-135°	Tabell 1
	Mätning Optech ILRIS-3D	Igång	0°-360°	Tabell 9
	Mätning Vibrometri	Igång	0°-135°	Tabell 10
	Mätning GV (T72 samt upplösningstavla vid alla GV mätningar)	Igång	0°-135°	Tabell 7
	Bilder av målområdet med CCD-kameran/ljusförst.	Igång	0°-135°	Tabell 8
	Mätning QWIP	Varm	135°	Tabell 3
	Mätning MULTIMIR	Varm	135°	Tabell 1
	Mätning GV	Varm	135°	Tabell 7
	Bilder av målområdet med CCD-kameran/ljusförst.	Varm	135°	Tabell 8
3	Mätning vid 650 meters målavstånd			
	Inmätning T72 position med GPS			E1474573 N6507674
	Mätning av avstånd till mätplats			650 m
	Mätning QWIP	Igång	0°-135°	Tabell 3
	Kalibrering MULTIMIR	Igång	0°-135°	Tabell 1
	Mätning MULTIMIR	Igång	0°-135°	Tabell 1
	Mätning Vibrometri	Igång	0°-135°	Tabell 10
	Mätning GV	Igång	0°-135°	Tabell 7
	Bilder av målområdet med CCD-kameran/ljusförst.	Igång	0°-135°	Tabell 8
4	Mätning vid 1905 meters målavstånd			
	Inmätning T72 position med GPS			-
	Mätning av avstånd till mätplats			1905 m

	Mätning QWIP	Igång	0°-135°	Tabell 3
	Kalibrering MULTIMIR	Igång	0°-135°	-
	Mätning MULTIMIR	Igång	0°-135°	Tabell 1
	Mätning GV	Igång	0°-135°	Tabell 7
	Bilder av målområdet med ljusförstärkaren	Igång	0°-135°	Tabell 8
5	Mätning vid 150 meters målavstånd			
	Inmätning T72 position med GPS			E1474514 N6505180
	Mätning av avstånd till mätplats			150 m
	Mätning QWIP	Igång	135°	Tabell 3
	Kalibrering MULTIMIR	Igång	135°	-
	Mätning MULTIMIR	Igång	135°	Tabell 1
	Mätning Vibrometri	Igång	135°	Tabell 10
	Mätning GV	Igång	135°	Tabell 7
	Bilder av målområdet med CCD	Igång	135°	Tabell 8
	2002-05-03			
6	Scintillometern startas			Tabell 5
	Väderstation startas			Tabell 6
7	Mätning vid 150 meters målavstånd			
	Mätning QWIP	Kall	135°	Tabell 4
	Kalibrering MULTIMIR	Kall	135°	Tabell 2
	Mätning MULTIMIR	Kall	135°	Tabell 2
	Mätning Optech ILRIS-3D	Kall	135°	Tabell 9
	Mätning Vibrometri	Kall	135°	Tabell 10
	Bilder av målområdet med CCD-kameran/ljusförst.	Kall	135°	Tabell 8
8	Mätning vid 150 meters målavstånd (maskeringsnät)			
	Mätning QWIP	Kall	135°	Tabell 4
	Mätning MULTIMIR	Kall	135°	Tabell 2
	Mätning Optech ILRIS-3D	Kall	135°	Tabell 9
	Mätning Vibrometri	Kall	135°	Tabell 10
	Bilder av målområdet med CCD-kameran/ljusförst.	Kall	135°	Tabell 8
9	Mätning på nära målavstånd			
	Mätning QWIP	Igång	0°-225°	Tabell 4
	Kalibrering MULTIMIR	Igång	0°-225°	-
	Mätning MULTIMIR	Igång	0°-225°	Tabell 2
	Mätning Optech ILRIS-3D	Igång	0°-225°	Tabell 9
	Bilder av målområdet med ljusförstärkaren	Igång	0°-225°	Tabell 8

10	Mätning vid 1905 meters målavstånd			
	Inmätning T72 position med GPS			-
	Mätning av avstånd till mätplats			1905 m
	Mätning QWIP	Igång	0-135°	Tabell 4
	Kalibrering MULTIMIR	Igång	0-135°	Tabell 2
	Mätning MULTIMIR	Igång	0-135°	Tabell 2
	Mätning GV	Igång	0-135°	Tabell 7
	Bilder av målområdet med ljusförstärkaren	Igång	0-135°	Tabell 8

Bilaga 3. Insamlade mätdata

**Tabell 1. Kalibreringsfiler och bilddatafiler med MULTIMIR-kamera
2002-05-02**

Temp.	kl.	fil
10 °C	17.56	kvarn-02-05-maj-coldref-10deg-2002May02_175623.ser
79 °C	17.55	kvarn-02-05-maj-warmref-70deg-2002May02_175552.ser
13 °C	20.46	coldref-13degr-2002May02_204555.ser
61 °C	20.46	warmref-61degr-2002May02_204256.ser

Målavstånd	kl.	pos	fil
150 m	18.49:32	0°	strv-dag-0grader-2002May02_184932.ser
150 m	19.27:06	45°	strv-dag-45grader-2002May02_192706.ser
150 m	19.41:54	90°	strv-dag-90grader-2002May02_194154.ser
150 m	19.51:44	135°	strv-dag-135grader-2002May02_195144.ser
150 m	20.15:36	135°	strv-dag-135grader-10minmotorav-2002May02_201536.ser
150 m	20.29:19	135°	strv-dag-135grader-25minmotorav_2002May02_202919.ser
650 m	20.56:49	0°	strv-650m-0gr-2002May02_205649.ser
650 m	21.07:22	45°	strv-650m-45gr-2002May02_210722.ser
650 m	21.27:13	90°	strv-650m-90gr-2002May02_212713.ser
650 m	21.29:43	90°	strv-650m-90gr-irav-2002May02_212943.ser
650 m	21.37:36	135°	strv-650m-135gr-2002May02_213736.ser
650 m	21.47:35	flytt	
1905 m	21.57:04	0°	strv-1905m-0gr-2002May02_215704.ser
1905 m	22.03:29	0°	strv-1905m-0gr-ny-2002May02_220329.ser
1905 m	22.19:55	45°	strv-1905m-45gr-dag-2002May02_221955.ser
1905 m	22.31:24	90°	strv-1905m-90gr-2002May02_223124.ser
1905 m	22.37:32	135°	strv-1905m-135gr-2002May02_223732.ser
150 m	23.53:41	135°	strv-150m-135gr-2002May02_235341.ser

Tabell 2. Kalibreringsfiler och bilddatafiler med MULTIMIR-kamera**1.1.1.1.1 2002-05-03**

Temperatur	kl.	fil
11 °C	08.30	coldref-11-fri-2002May03_083033.ser
64 °C	08.28	warmref-64-fri-2002May03_082819.ser

Målavstånd	kl.	pos	fil
150 m	08.38:29	135°	strv-kall-150m-2002May03_083829.ser
150 m	09.20:56	135°	strv-kall-150m-maskerad-2002May03_092056.ser
näravstånd	10.42:03	0°	strv-vsk-2002May03_104203.ser
näravstånd	10.55:43	90°	strv-vsk-90-2002May03_105543.ser
näravstånd	10.58:05	135°	strv-vsk-135-2002May03_105805.ser
näravstånd	11.03:17	180°	strv-vsk-180-2002May03_110317.ser
näravstånd	11.10:55	225°	strv-vsk-225-2002May03_111055.ser
1905 m	12.49:50	0°	strv-1905m-dag-2002May03_124950.ser
1905 m	12.49:50	0°	strv-1905m-0gr-dag-2002May03_124950.ser
1905 m	12.59:28	45°	strv-1905m-45gr-dag-2002May03_125928.ser
1905 m	13.05:58	90°	strv-1905m-90gr-dag-2002May03_130558.ser
1905 m	13.11:02	135°	strv-1905m-135gr-dag-2002May03_131102.ser

**1.1.1.1.2 Tabell 3. Bilddata-filer med QWIP-kamera ThermaCAM™ SC3000
2002-05-02**

Målavst.	kl.	Pos	fil
150 m	18.48	0°	strv-150m0grader-plus10-plus150.seq
150 m	18.50	0°	strv-150m-0gr-minus20-plus80.seq
150 m	19.26	45°	strv-150m45gr-minus20-plus80.seq
150 m	19.27	45°	strv-150m-45gr-plus10-plus150.seq
150 m	19.41	90°	strv-150m-90gr-minus20-plus80.seq
150 m	19.44	90°	strv-150m-90gr-plus10-plus150.seq
150 m	19.50	135°	strv-150m-135gr-minus10-plus80.seq
150 m	19.51	135°	strv-150m-135gr-plus10-plus150.seq
150 m	20.14	135°	strv-150m-135gr-minus20-plus80-10min-av.seq
150 m	20.15	135°	strv-150m-135gr-plus10-plus150-10min-av.seq
150 m	20.28	135°	strv-150m135gr-plus10-plus150-25min-av.seq
150 m	20.29	135°	strv-150m-135gr-minus20-plus80-25min-av.seq
650 m	20.56	0°	strv-650m-0gr-minus20-plus80-1st.seq
650 m	20.57	0°	strv-650m-0gr-plus10-plus150-1st.seq
650 m	21.06	45°	strv-650m-45gr-minus20-plus80.seq
650 m	21.07	45°	strv-650m-0gr-plus10-plus150.seq
650 m	21.26	90°	strv-650m-90gr-minus20-plus80-1st.seq
650 m	21.26	90°	strv-650m-90gr-plus10-plus150.seq
650 m	21.28	90°	strv-650m-90gr-IR-av-plus10-plus150.seq
650 m	21.29	90°	strv-650m-90gr-IR-av-minus20-plus80.seq
650 m	21.36	135°	strv-650m-135gr-minus20-plus80.seq
650 m	21.38	135°	strv-650m-135gr-plus10-plus150.seq
1905 m	21.55	0°	strv-1905m-0gr-plus10-plus150.seq
1905 m	21.56	0°	strv-1905m-0gr-minus20-plus80.seq
1905 m	22.24	45°	strv-1905m-45gr-minus20-plus80.seq
1905 m	22.24	45°	strv-1905m-45gr-plus10-plus150.seq
1905 m	22.27	90°	strv-1905m-90gr-minus20-plus80.seq
1905 m	22.28	90°	strv-1905m-90gr-plus10-plus150.seq
1905 m	22.37	135°	strv-1905m-135gr-minus20-plus80.seq
1905 m	22.37	135°	strv-1905m-135gr-plus10-plus150.seq
150 m	23.52	135°	strv-150m-natt-135gr-minus20-plus80.seq
150 m	23.53	135°	strv-150m-natt-135gr-plus10-plus150.seq

Not. QWIP-systemets interna klocka gick 50 min efter ”fröken ur” vilket har korrigerats för ovan. I första filen står därför 17.58.

**Tabell 4. Bilddata-filer med QWIP-kamera ThermaCAM™ SC3000
2002-05-03**

Målavstånd	kl.	pos	fil
150 m	08.37	135°	strv-kall-150m-minus20-plus80.seq
150 m	08.38	135°	strv-kall-150m-plus10-plus150.seq
150 m	09.19	135°	strv-kall-maskerad-150m-minus20-plus80.seq
150 m	09.21	135°	strv-kall-maskerad-150m-plus10-plus150.seq
Näravstånd	10.41	0°	strv-vsk-45-minus20-plus80.seq
Näravstånd	10.42	0°	strv-vsk-45-plus10-plus150.seq
Näravstånd	10.44	0°	strv-vsk-45-20grypt-plus10-plus150.seq
Näravstånd	10.45	0°	strv-vsk-45-20grypt-minus20-plus80.seq
Näravstånd	10.54	90°	strv-vsk-90-20grypt-minus20-plus80.seq
Näravstånd	10.56	90°	strv-vsk-135-20grypt-plus10-plus150.seq
Näravstånd	10.57	135°	strv-vsk-135-20grypt-minus20-plus80.seq
Näravstånd	11.01	180°	strv-vsk-180-20grypt-minus20-plus80.seq
Näravstånd	11.01	180°	strv-vsk-180-20grypt-plus10-plus150.seq
Näravstånd	11.09	225°	strv-vsk-225-20grypt-minus20-plus80.seq
Näravstånd	11.10	225°	strv-vsk-270-20grypt-minus20-plus80.seq
Näravstånd	11.10	225°	strv-vsk-270-20grypt-plus10-plus150.seq
Näravstånd	12.34		strv-vsk-start-minus20-plus80.seq
	12.36	vägen	strv-vagen-minus20-plus80.seq
1905 m	12.48	0°	strv-1905m-0gr-dag-minus20-plus80.seq
1905 m	12.49	0°	strv-1905m-0gr-dag-plus10-plus150.seq
1905 m	12.58	45°	strv-1905m-45gr-dag-minus20-plus80.seq
1905 m	12.58	45°	strv-1905m-dag-45gr-plus10-plus150.seq
1905 m	13.03	45°	strv-1905m-45gr-dag-plus10-plus150qq.seq
1905 m	13.05	90°	strv-1905m-90gr-dag-minus20-plus80.seq
1905 m	13.05	90°	strv-1905m-90gr-dag-plus10-plus150qq.seq
1905 m	13.09	135°	strv-1905m-135gr-dag-minus20-plus80.seq
1905 m	13.10	135°	strv-1905m-135gr-dag-plus10-plus150qq.seq

Not. QWIP-systemets interna klocka gick 50 min efter ”fröken ur” vilket har korregerats för ovan. I första filen står därför 07.47.

Tabell 5. Scintillometerdata-filer

Datum	Mättid	Fil
20020502	17.10 – 00.02 ^{*)}	020502.RES
20020503	08.22 – 13.00	020503.RES

*) scintillometerns interna klocka gick 13 min efter ”fröken ur” kl.17.10 – 18.28 (då klockan ställdes om) vilket har korrigerats för ovan; i filen står starttiden 16.57

Tabell 6. Filer väderstation

Datum	Mättid	Fil
20020502	14.29 – 00.13	020502
20020503	08.42 – 13.22	020503

Tabell 7. Insamlade data med GV

Avstånd	Tid	Pos.	Filnamn
150 m	To 19:14	0°	T72a150gated.dps
150 m	To 19:15	0°	T72a150gated2.dps
150 m	To 19:29	45°	T72a150gated45deg.dps
150 m	To 19:29	45°	T72a150gated45deg2.dps
150 m	To 19:30	45°	T72a150gated45deg3.dps
150 m	To 19:30	45°	T72a150gated45deg4.dps
150 m	To 19:31	45°	T72a150gated45degstil.dps
150 m	To 19:31	45°	T72a150gated45degstil2.dps
150 m	To 19:31	45°	T72a150gated45degstil3.dps
150 m	To 19:46	90°	T72a150gated90deg.dps
150 m	To 19:47	90°	T72a150gated90deg2.dps
150 m	To 19:47	90°	T72a150gated90deg3.dps
150 m	To 19:48	90°	T72a150gated90deg4.dps
150 m	To 19:57	135°	T72a150gated135.dps
150 m	To 19:57	135°	T72a150gated135a.dps
150 m	To 19:59	135°	T72a150passiv.dps
650 m	To 21:02	0°	T72a700gated0deg.dps
650 m	To 21:05	0°	T72a700gated0deg2stil.dps
650 m	To 21:23	45°	T72a700stil45deg.dps
650 m	To 21:24	45°	T72a700gated45deg.dps
650 m	To 21:34	90°	T72a700gated90deg.dps
650 m	To 21:35	90°	T72a700gated90deg2.dps
650 m	To 21:35	90°	T72a700stag90deg.dps
650 m	To 21:43	135°	T72a700gated135deg.dps
650 m	To 21:05	0°	T72a700passiv0deg.dps
650 m	To 21:48	0°	T72a700passiv0deg2.dps
650 m	To 21:22	45°	T72a700passiv45deg.dps
650 m	To 21:26	45°	T72a700passiv46deg.dps
650 m	To 21:37	90°	T72a700passiv90.dps
650 m	To 21:32	90°	T72a700passiv90deg.dps
650 m	To 21:32	90°	T72a700passiv90deg2.dps
650 m	To 21:41	135°	T72a700passiv135deg.dps
650 m	To 21:41	135°	T72a700passiv135deg2.dps
650 m	To 21:44	135°	T72a700stil135deg.dps

1905 m	To 22:15	0°	T72a1905gated0deg.dps
1905 m	To 22:17	0°	T72a1905laser0deg.dps
1905 m	To 22:19	0°	T72a1905sil0deg.dps
1905 m	To 22:24	45°	T72a1905sil45deg.dps
1905 m	To 22:25	45°	T72a1905gated45deg2.dps
1905 m	To 22:26	45°	T72a1905steg45deg3.dps
1905 m	To 22:27	90°	T72a1905steg90e.dps
1905 m	To 22:35	90°	T72a1905steg90deg.dps
1905 m	To 22:35	90°	T72a1905gated90degOK.dps
1905 m	To 22:36	90°	T72a1905sil90deg.dps
1905 m	To 22:42	135°	T72a1905gated135deg.dps
1905 m	To 22:43	135°	T72a1905sil135deg.dps

Tabell 8. Insamlade data med CCD

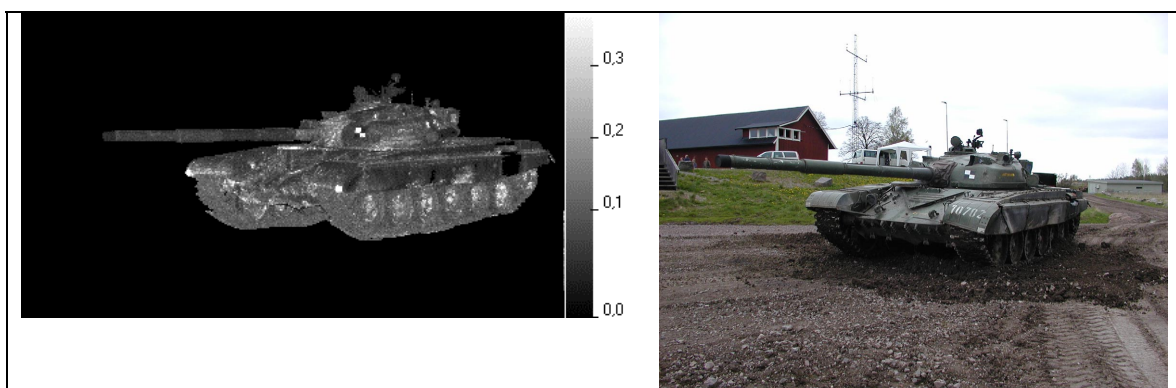
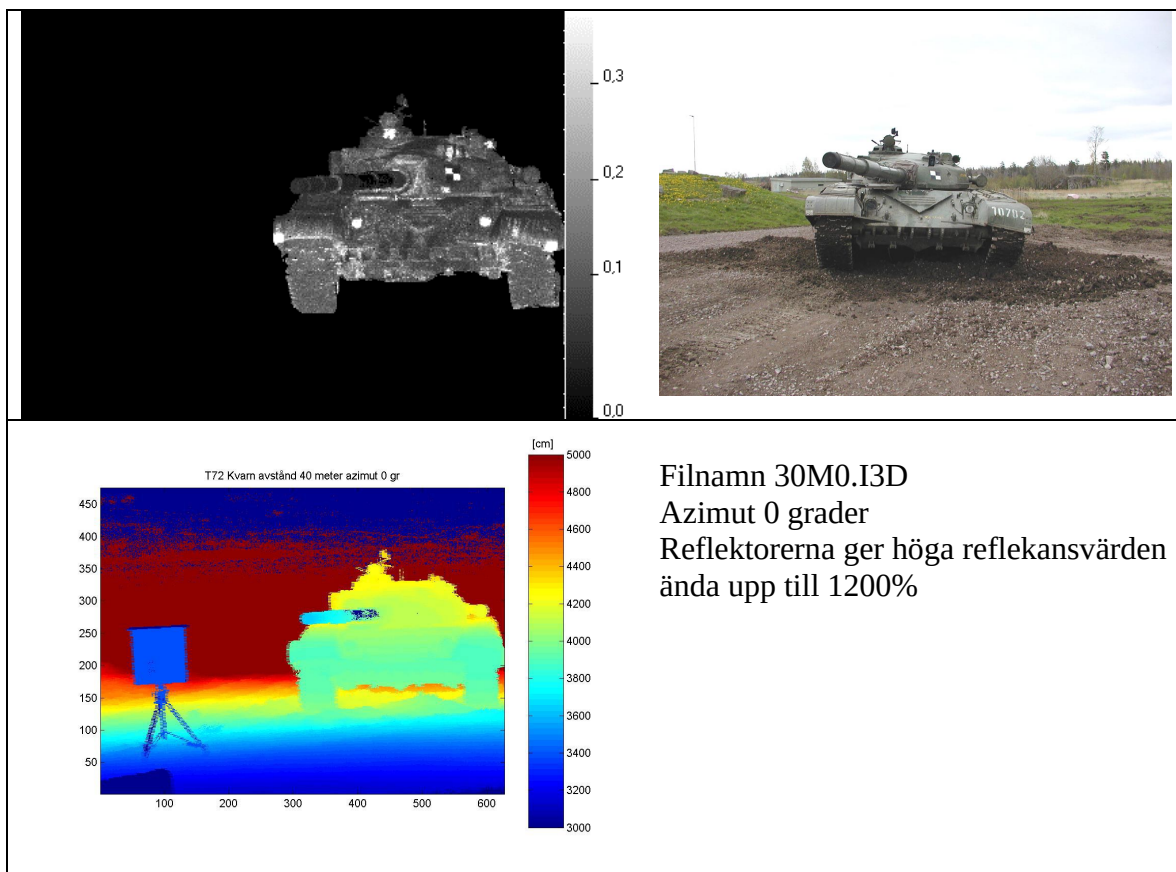
Avstånd	Tid	Filnamn
	To 18:54	T72a.dps
150 m	To 19:22	T72a150visccd.dps
150 m	To 19:23	T72a150visccd2.dps
150 m	To 19:24	T72a150visccd3.dps
150 m	To 19:25	T72a150visccd4.dps
150 m	To 19:25	T72a150visccd5.dps
	To 19:41	T72vis.dps
	To 19:42	T72vis2.dps
	To 19:42	T72vis3.dps
	To 19:42	T72vis4.dps
150 m	To 19:51	T72a150vis.dps
150 m	To 19:52	T72a150vis2.dps
150 m	To 19:52	T72a150vis3.dps
150 m	To 19:53	T72a150vis4.dps
150 m	To 20:03	T72a150vis135.dps
	To 20:35	T72akorning.dps
	To 20:36	T72akorning2.dps
	To 20:39	T72akorning3.dps
	To 20:39	T72akorning4.dps
	To 20:39	T72akorning6.dps
	To 20:40	T72akorning7.dps
650 m	To 20:43	T72a700vis0deg2.dps
650 m	To 21:09	T72a700vis45deg.dps
650 m	To 21:46	T72a700korning.dps
150 m	Fr 08:34	T72a150vis135degFR.dps
150 m	Fr 09:22	T72a150vis135degFR2.dps (kamouflage)

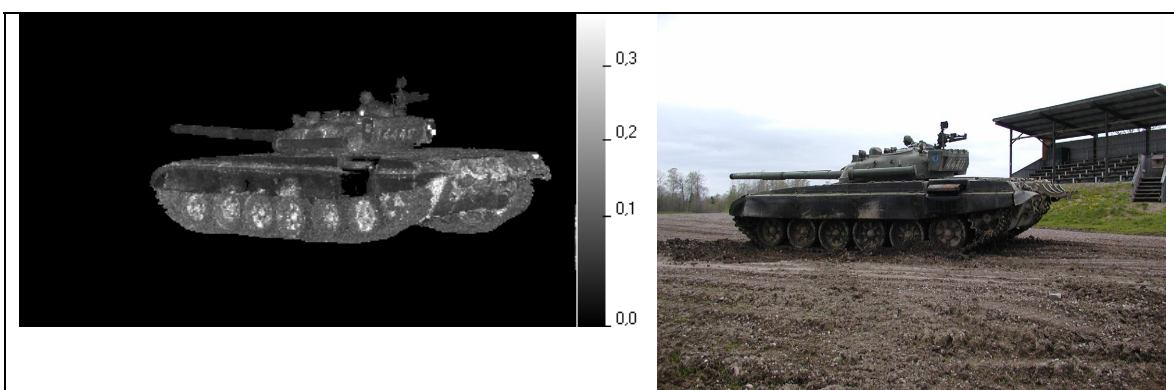
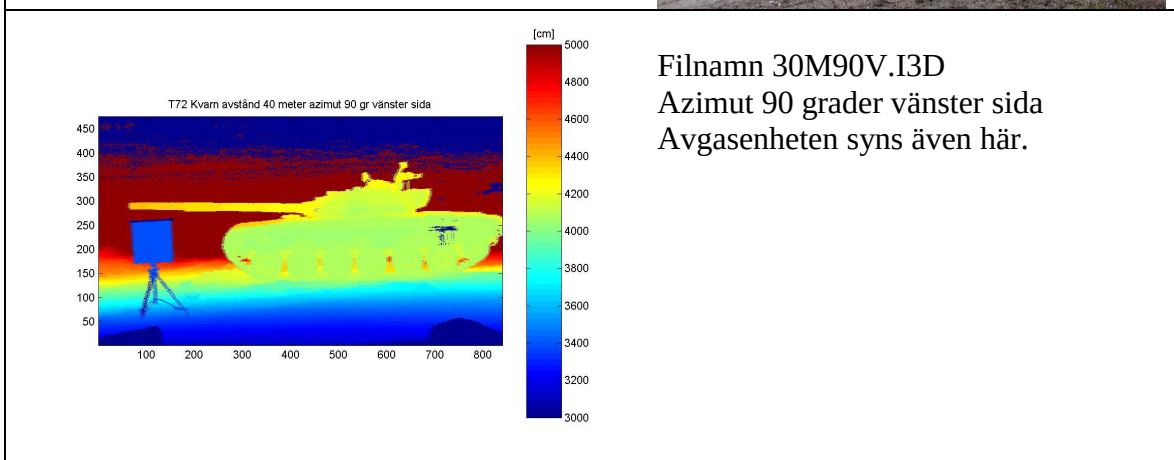
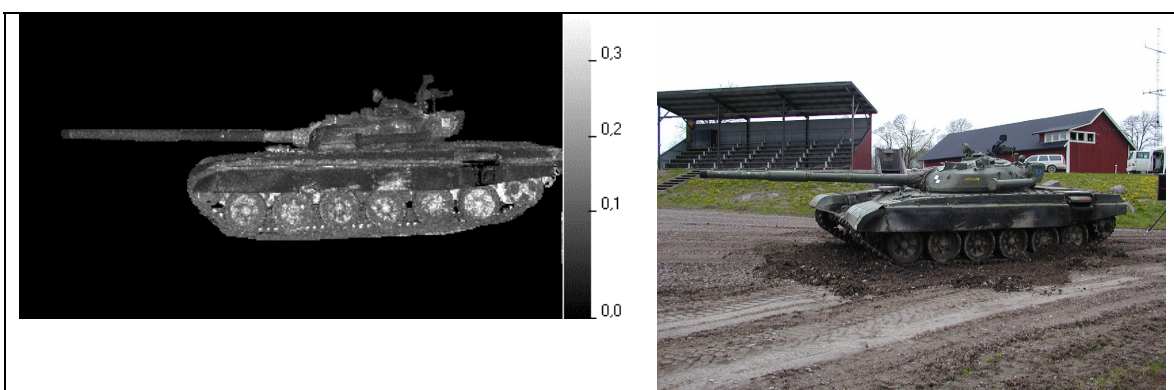
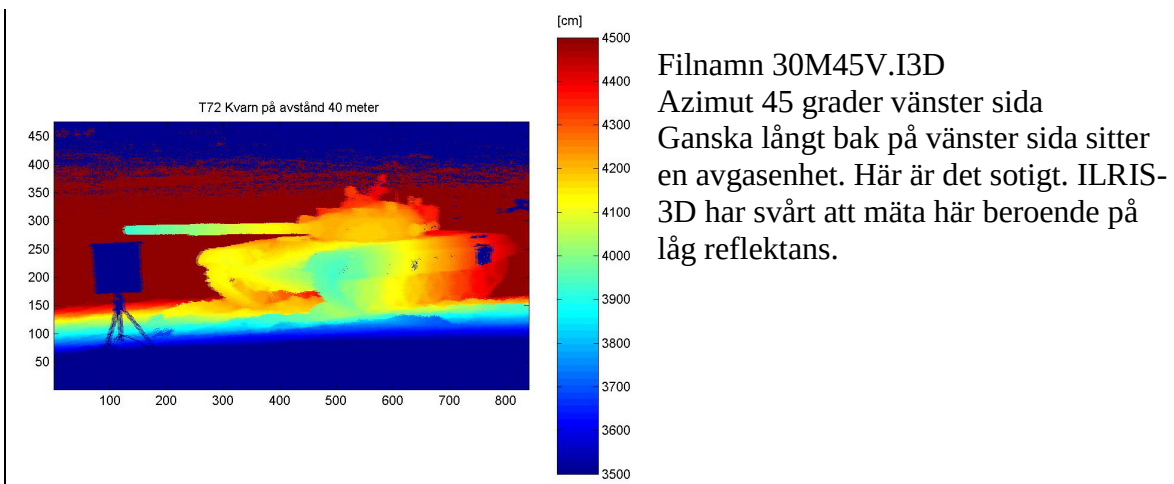
Tabell 9. Insamlade data med laserradar

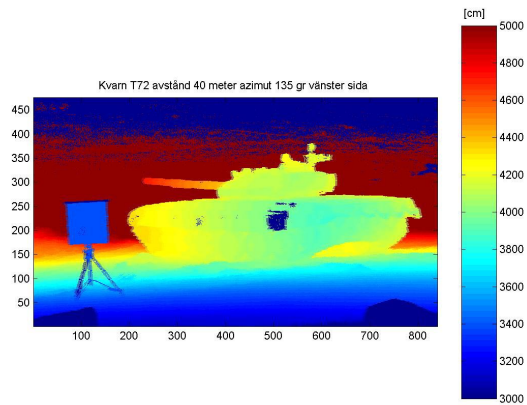
Detta appendix är en sammanställning av insamlade data och genererade intensitetsbilder och avståndsbilder vid mätning på T72 Kvarn maj 2002.

Filnamn	Avstånd till T72	Spot space	Points per scan line	Number of scan lines	Anmärkning
30M0.I3D	40 meter	2	627	475	
30M45V.I3D	40 meter	2	840	475	
30M90V.I3D	40 meter	2	840	475	
30M135V.I3D	40 meter	2	840	475	
30M180.I3D	40 meter	2	840	475	
30M135H.I3D	40 meter	2	883	475	
30M90H.I3D	40 meter	2	1139	660	
30M45H.I3D	40 meter	2	1139	475	
150M90H.I3D	140 meter	4	220	148	För dålig upplösning
150M90H2.I3D	140 meter	1	989	591	Spot space 1 = 25 mm på 150 meter
150M90H3.I3D	140 meter	1	1075	591	
150M45H.I3D	140 meter	1	1075	591	
150M45H2.I3D	140 meter	1	683	819	
150M0.I3D	140 meter	1	748	819	
150M45V.I3D	140 meter	1	989	748	
N150M45V.I3D	140 meter	1	836	757	

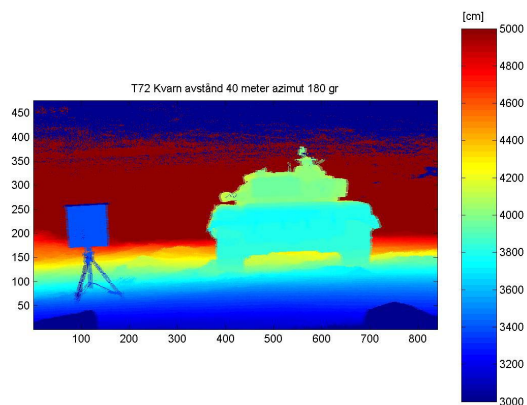
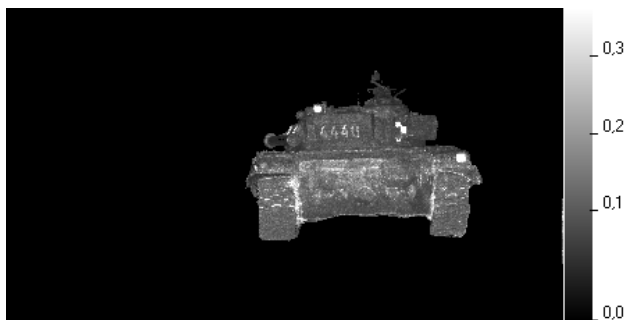
Avstånd 40 meter - För varje fil visas intensitetsbild längst upp till vänster med skalad ekvivalent reflektionskoefficient. Till höger om denna är ett digitalt foto av T72. Observera att detta foto inte överensstämmer med omgivning för intensitet och avståndsbild, vinkeln är heller inte den samma. Avståndsbilden under intensitetsbilden är skalad i avstånd 30 till 50 meter.







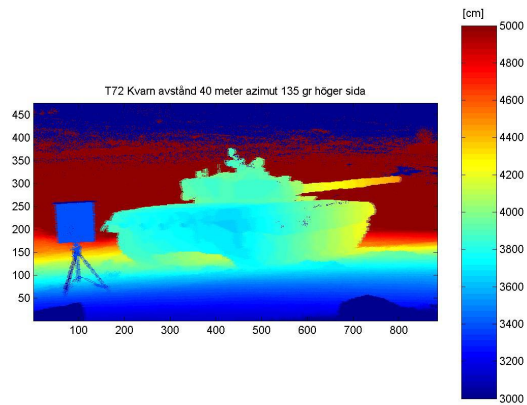
Filnamn 30M135V.I3D
Azimut 135 grader vänster sida
Avgasenheten syns även här.



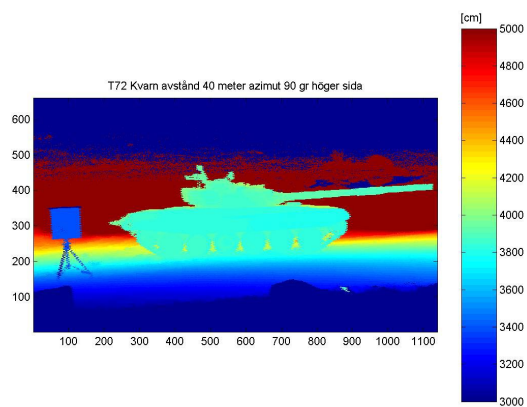
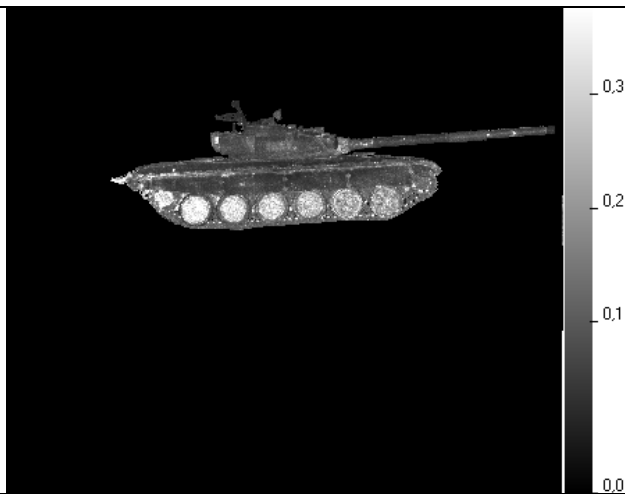
Filnamn 30M180.I3D
Azimut 180 grader vänster sida



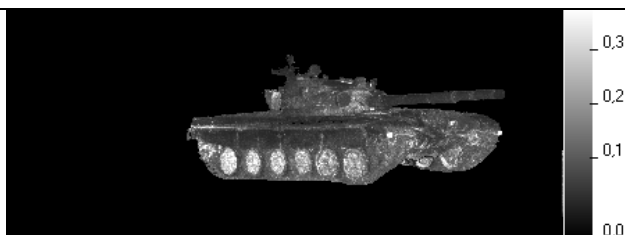
Digaltalt foto saknas

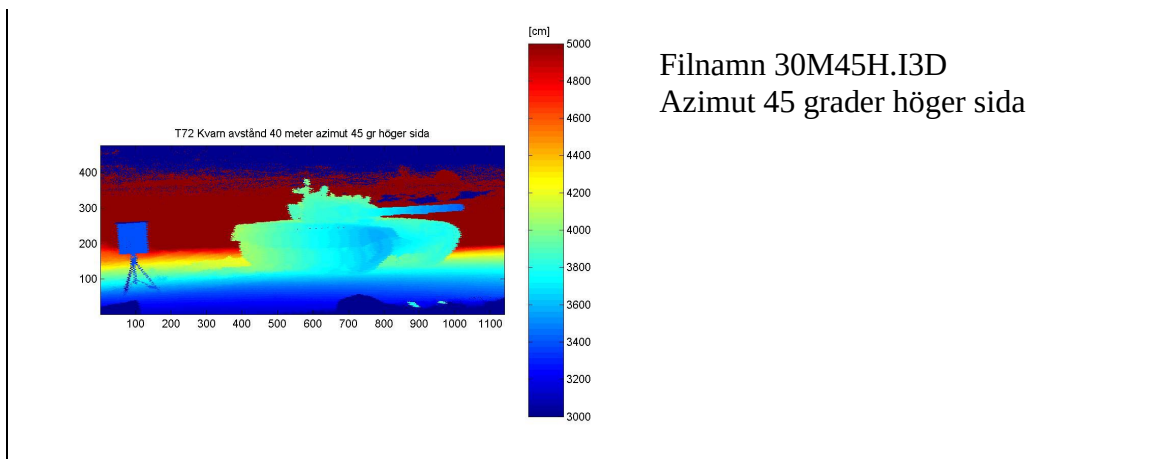


Filnamn 30M135H.I3D
Azimut 135 grader höger sida

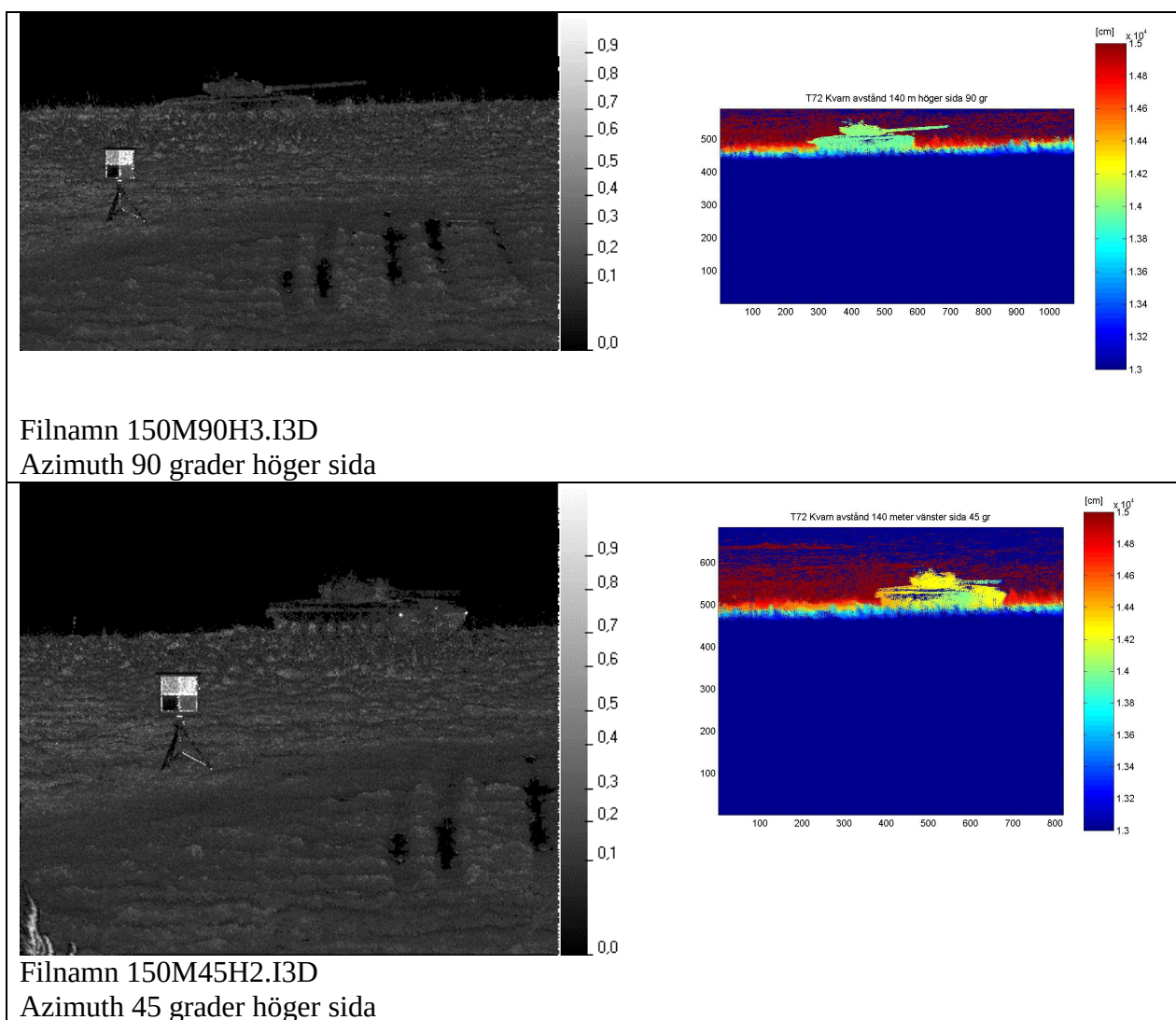


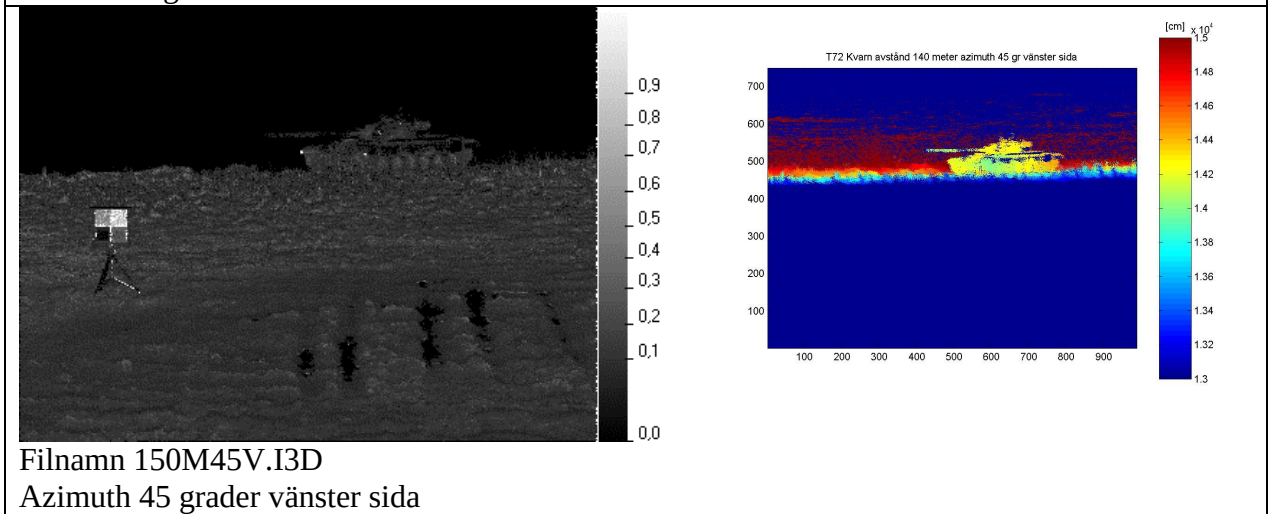
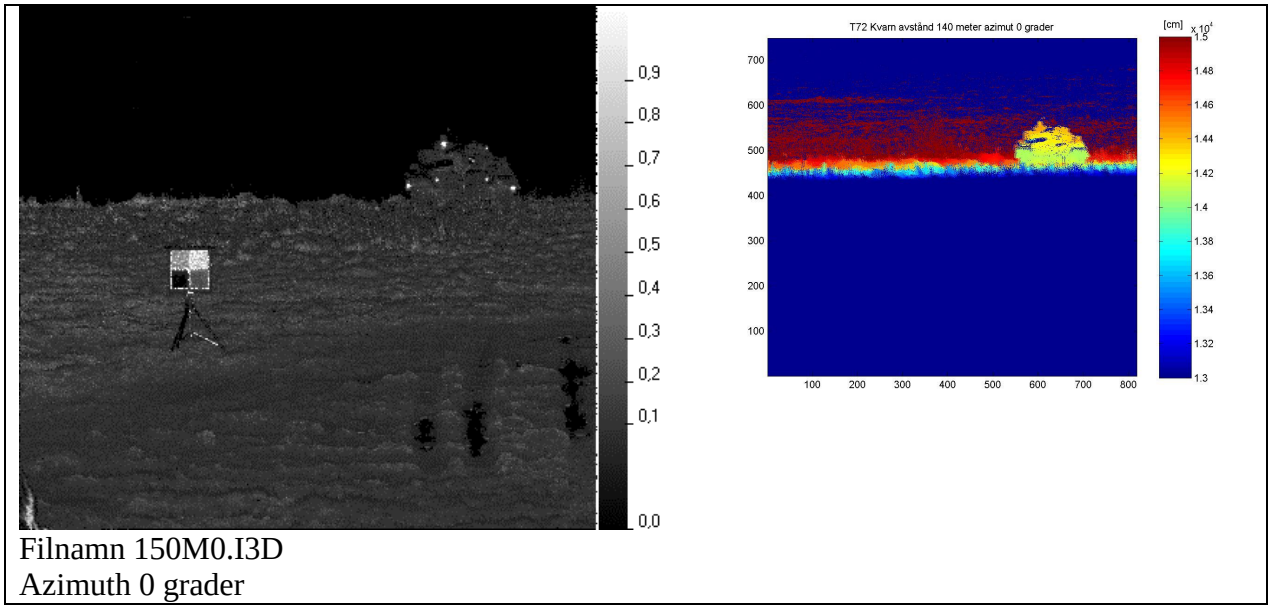
Filnamn 30M90H.I3D
Azimut 90 grader höger sida





Avstånd 140 meter – 4 olika uppställningar av T72 gjordes. En fil från respektive uppställning visas här under. Digitala foton saknas. Avståndsskalan är angiven mellan 130 till 150 meter





Tabell 10. Vibrometridata. Registrerade mätningar. Kvarn maj 2002

Avstånd	Vinkel	Motorvarvtal	Antal mätningar	Tidpunkt för mätningarna
150 m	0	800 rpm	6	19.17-19.18:20
150 m	0	1200 rpm	32	16.44-19.07
150 m	0	1500 rpm	7	19.18:20-19.19:20
150 m	0	2000 rpm	9	19.19:20-19.21
150 m	45	1200 rpm	14	19.24-19.32
150 m	90	1200 rpm	10*10	19.41-19.45
150 m	90	1200 rpm	10	19.45-19.47
150 m	135	1200 rpm	20*20	19.53-20.04
650 m	0	1200 rpm	33	20.47-21.05
650 m	0	1200 rpm	10*5	20.51-20.54
650 m	45	1200 rpm	37	21.06-21.18
650 m	90	1200 rpm	10	21.29-21.32
650 m	135	1200 rpm	3	21.42-21.43
1900 m	0	1200 rpm	45	22.01-22.06 + 12.52-12.57

Filerna från punktmätningar har döpts på följande sätt:
02May2002_tmmss.mat och 03May2002_tmmss.mat

Filerna från mätningar med skann har döpts på följande sätt:
020502_xn_yn.mat där x och y är löpnummer för skannen

Bilaga 4. Felanalys Optech 3D

Felanalys, kontroll och kalibrering av Optech ILRIS 3-D i samband med Kvarn

Felanalys av avståndet för Optech ILRIS-3D

Vy	30M0	30M45V	30M90V	30M145V	30M180	30M145H	30M90H	30M45H
Avstånd [m]	33,82	33,81	33,82	33,82	33,82	33,82	33,81	33,82
Stdavvikelse	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

Felanalys av intensitetsmätning Optech ILRIS-3D

(Standardavvikelserna i tabellen är angiven för reflektanstavlorna i respektive vy)

		30M0	30M45V	30M90V	30M145V	30M180	30M145H	30M90H	30M45H
99%	Intensitet	360,4	358,4	358,9	357	353,5	356,3	358,3	357,4
	Stdavvikelse	62,1	58,2	62,3	55,9	56,5	55,8	56,1	54,6
	Stdavvikelse %	17,2%	16,2%	17,4%	15,7%	16,0%	15,7%	15,7%	15,3%
60%	Intensitet	245,7	244,6	248,8	246,9	245,5	245,7	243	243,5
	Stdavvikelse	39,1	40,6	39,3	39,6	38,4	38,5	37,8	40,5
	Stdavvikelse %	15,9%	16,6%	15,8%	16,0%	15,6%	15,7%	15,6%	16,6%
30%	Intensitet	107,1	110,6	110,1	108,2	108,7	108,8	110,3	108,5
	Stdavvikelse	14,2	14,3	14,5	14,4	14,4	13,8	13,1	14,4
	Stdavvikelse %	13,3%	12,9%	13,2%	13,3%	13,2%	12,7%	11,9%	13,3%
2%	Intensitet	3,8	3,8	4,5	4,3	4,5	4,5	4,3	4,5
	Stdavvikelse	1	0,9	1,1	1,1	1,1	1,3	1	1
	Stdavvikelse %	26,3%	23,7%	24,4%	25,6%	24,4%	28,9%	23,3%	22,2%

Standardavvikelse beräknad för materialen i ovanstående vyer:

Medelvärde intensitet 99% reflektionstavla 357,5
 Standardavvikelse för intensitet sandpapper 2,22
 Detta ger en standardavvikelse i procent: 0,62%

Medelvärde intensitet 60 % reflektionstavla 245,7
 Standardavvikelse för intensitet smärjelduk 1,81
 Detta ger en standardavvikelse i procent: 0,74%

Medelvärde intensitet 30 % 109,1
 Standardavvikelse för intensitet sammet 1,27
 Detta ger en standardavvikelse i procent: 1,17%

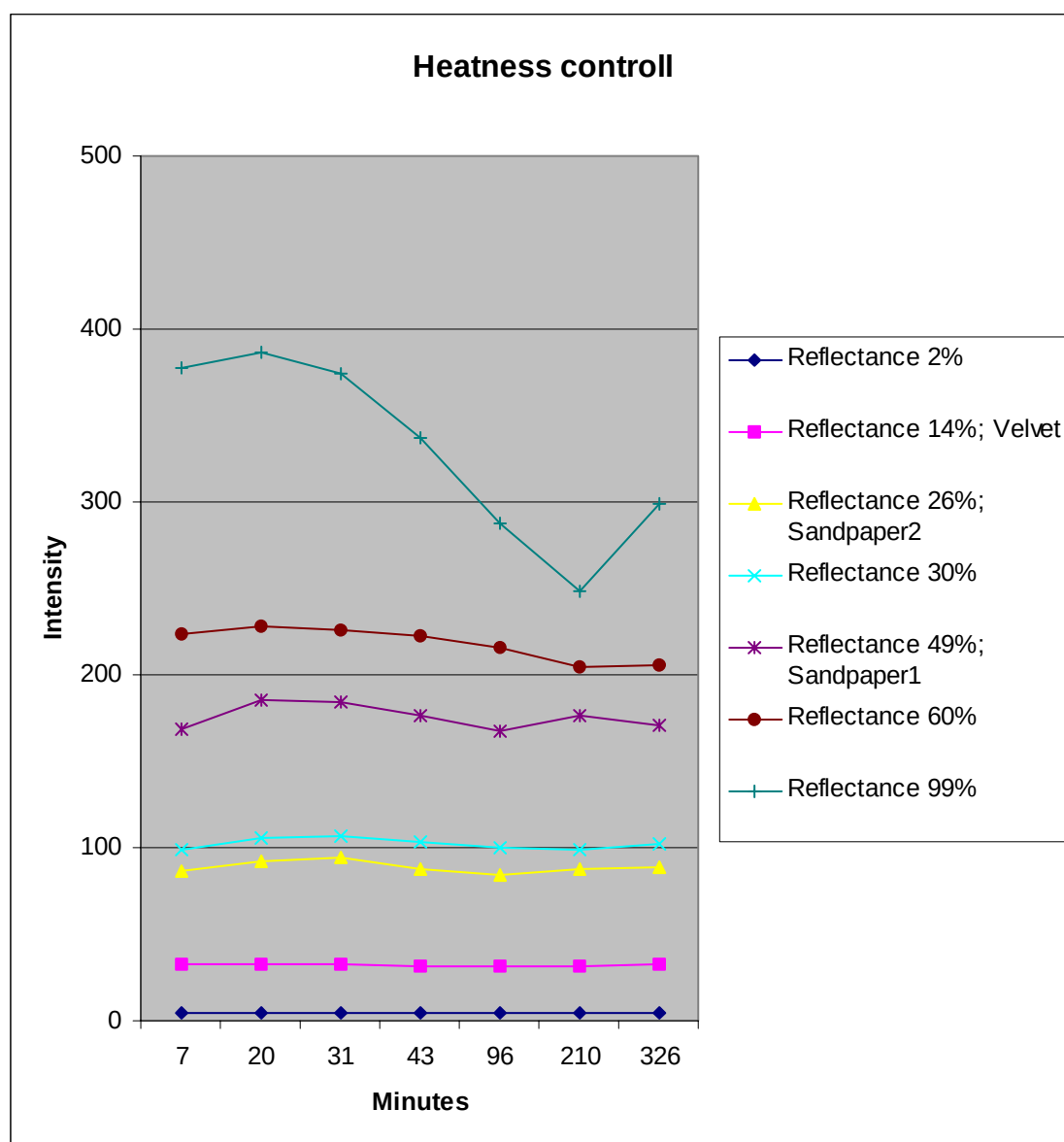
Medelvärde intensitet 30 % 4,2
 Standardavvikelse för intensitet sammet 0,13
 Detta ger en standardavvikelse i procent: 2,95%

Kontroll av uppvärmningsproblematik Optech ILRIS-3D

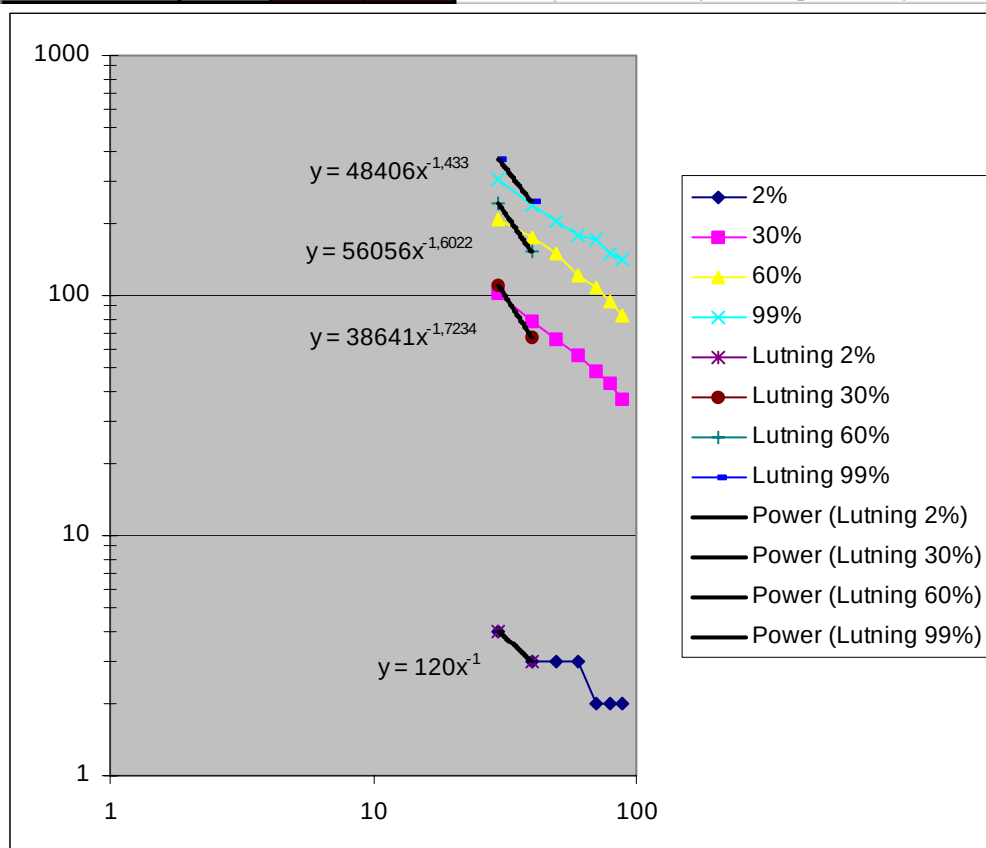
Sju olika referenstavlor nyttjades vid kontrollen enligt nedan.
Referenser och scanner har inte flyttats under mätningen.

Reflektor	2%	Sammet	Sandp2	30%	Sandp1	60%	99%
Reflektionsfaktor	0,02	0,14	0,26	0,3	0,49	0,6	0,99

Minuter från start	7	20	31	43	96	210	326
Intensitet 2%	4	4	4	4	4	4	4
Intensitet 14%	33	33	33	32	31	32	33
Intensitet 26%	87	92	94	88	84	88	89
Intensitet 30%	99	106	107	103	100	99	102
Intensitet 49%	168	185	184	176	167	176	171
Intensitet 60%	224	228	226	223	216	205	206
Intensitet 99%	378	387	374	337	288	248	299



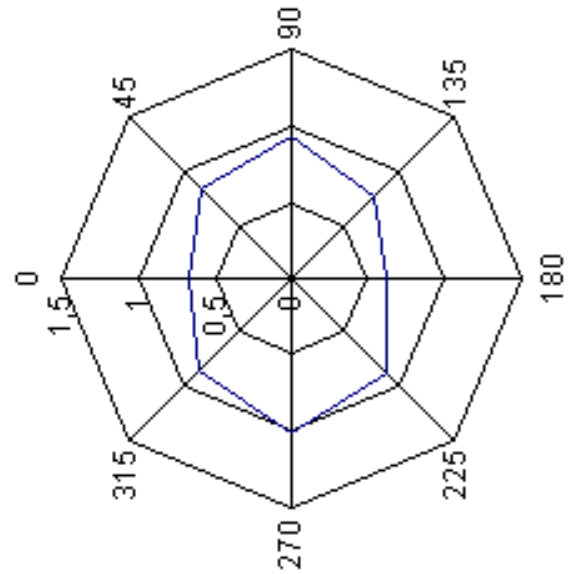
Kalibrering av Optech ILRIS-3D										
		Avstånd i meter								
Referenser		30	40	50	60	70	80	89	Hösten 2001	
2%	Intensitet	4	3	3	3	2	2	2		
30%		101	78	65	56	48	43	37		
60%		209	175	149	120	107	94	83		
99%		302	237	203	179	171	149	142		
Ideal 1/R^2		150,00	84,38	54,00	37,50	27,55	21,09	17,04		
Ideal 1/R		33,33	25,00	20,00	16,67	14,29	12,50	11,24		
1/R^0,95		3,95	3,01	Avståndkompensering 2% exponent 0.95						
1/R^0,9		101,03	77,98	Avståndkompensering 30% exponent 0.9						
1/R^0,6		208,55	175,48	Avståndkompensering 60% exponent 0.6						
1/R^0,85		302,58	236,94	Avståndkompensering 99% exponent 0.85						
		Avstånd i meter								
Referenser		30	40	2002-05-31						
2%	Intensitet	4	3							
30%		110	67							
60%		241	152							
99%		370	245							
1/R^1		4,00	3,00	Avståndkompensering 2% exponent 1						
1/R^1.73		107,55	65,39	Avståndkompensering 30% exponent 1.73						
1/R^1.6		242,79	153,22	Avståndkompensering 60% exponent 1.6						
1/R^1.43		374,70	289,23	Avståndkompensering 99% exponent 1.43						



Bilaga 5. Polärplottar T72 – Kvarn och Skövde

T72 Kvarn maj 2002									
Count	Signal	Std dev	Dist	Std dev	Points	A	Laser A	Typ	File
4	0,2158	1,0467	40,2	1,31	51980	9,72	0,6678	M	30M10.raw
25	0,1492	0,312	41,65	1,26	87355	17,53	0,8325	M	30M45V.raw
30	0,1594	0,1203	41,18	0,86	94205	18,48	0,9374	M	30M190V.raw
13	0,1445	0,0921	41,02	1,35	86310	16,81	0,7734	M	30M135V.raw
18	0,2088	0,7681	38,74	1,03	54258	9,42	0,6263	M	30M180.raw
10	0,1718	0,4227	38,83	1,56	92433	16,14	0,8825	M	30M135H.raw
27	0,1743	0,1231	38,6	0,58	106038	18,27	1,0138	M	30M190H.raw
21	0,1565	0,1872	38,04	1,27	103154	17,27	0,8605	M	30M45H.raw
ORIMILIGA TVÄRSNITTSAREOR									
Vinkeläge	0	45	90	135	180	225	270	315	360
Lasermålära	0,6678	0,8325	0,9374	0,7734	0,6263	0,8825	1,0138	0,8605	0,6678

Lasermålära T72 Kvarn0° elevation



T72 Skövde oktober 2001

NR	Signal	St dev	Dist	St dev	Points	Tvärnittsarea	Lasermålärea	Mask	Fil
77	0,16	1,0307	36,79	1,39	36942	5,79	0,2948	M	T72N000,raw
81	0,1153	0,6003	42,19	2,26	49255	10,16	0,3729	M	T72N030,raw
85	0,1345	1,246	40,59	2,15	60897	11,63	0,4979	M	T72N060,raw
89	0,1772	1,9853	38,41	1,51	64914	11,09	0,6252	M	T72N090,raw
129	0,1606	1,7317	36,99	1,4	69975	11,08	0,5665	M	T72N120,raw
96	0,1089	0,3691	36,16	2,49	65289	9,92	0,3437	M	T72N150,raw
100	0,1855	1,5121	37,5	1,12	36135	5,88	0,3472	M	T72N180,raw
106	0,1227	0,83	39,73	2,07	50654	9,27	0,3621	M	T72N210,raw
111	0,1438	1,4646	40,03	1,74	60693	11,26	0,5154	M	T72N240,raw
118	0,1436	1,1648	38,99	1,18	60255	10,6	0,4842	M	T72N270,raw
121	0,1542	1,6756	38,58	1,58	64621	11,14	0,5467	M	T72N300,raw
125	0,1188	0,4323	38,37	1,93	56953	9,72	0,3676	M	T72N330,raw

Vinkeläge	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
Lasermålärea	0,2948	0,3729	0,4979	0,6252	0,5665	0,3437	0,3472	0,3621	0,5154	0,4842	0,5467	0,3676

Vinkeläge	90	270
Lasermålärea (Reflektor bortmaskade)	0,328	0,3598

