

Andreas Beil, Åsa Fällman, Claes Nelsson

Utomhusförsök med passiv avståndsindikering av ammoniak, svaveldioxid och propan



TOTALFÖRSVARETS FORSKNING SINSTITUT

NBC-skydd
901 82 Umeå

FOI-R--0440--SE

April 2002

ISSN 1650-1942

Användarrapport

Andreas Beil, Åsa Fällman, Claes Nelsson

Utomhusförsök med passiv avståndsindikering av ammoniak, svaveldioxid och propan

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI NBC-skydd 901 82 Umeå	Rapportnummer, ISRN FOI-R--0440--SE	Klassificering Användarrapport
	Forskningsområde 3. Skydd mot massförstörelsevapen	
	Månad, år Februari 2002	Projektnummer E4242
	Verksamhetsgren 2. NBC skyddsforskning	
	Delområde 33. NBC-studier (FM)	
Författare/redaktör Andreas Beil Åsa Fällman Claes Nelsson	Projektledare Göran Olofsson	
	Godkänd av	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig	
Rapportens titel Utomhusförsök med passiv avståndsindikering Utomhusförsök med passiv avståndsindikering av ammoniak, svaveldioxid och propan		
Sammanfattning (högst 200 ord) För att skaffa mer erfarenhet av passiv FTIR utfördes ett fältförsök på norra skjutfältet (I20, Umeå) under tre dagar i september 2001. Frågeställningar som önskades besvaras var om RAPID kunde användas för mobil indikering, hur olika IR-bakgrunder påverkar tekniken samt verifiera misstanken om att svaveldioxid och propan är svårt men möjligt att indikera med denna teknik. I de flesta försöken användes ammoniak och alla utsläpp gjordes från gasflaska innehållande kondenserad gas. För försöken med mobil indikering monterades RAPID på ett terrängfordon och ammoniak indikerades på 700 meters avstånd då terrängfordonet kördes med hastigheten 15-25 m/s. Detektionsgränsen för ammoniak beräknades till 2,5 ppm, för svaveldioxid till 18 ppm och för propan till 300 ppm. Ur mätningarna med ammoniak uppskattades detektionsgränsen för G-ämnen till 0,4-0,8 ppm och för senapsgas till 0,7-1 ppm. För alla detektionsgränser ovan gjordes antagandet om en molnbredd på 100 m och en temperaturskillnad mellan moln och bakgrund på 1 Kelvin. Instrumentet demonstrerades dessutom för personal från FM (främst SkyddC) och FMV då tekniken är intressant för NBC-kompaniets vidkommande.		
Nyckelord Ammoniak, avståndsindikering, C-stridsmedel, FTIR, IR, RAPID, Thermovision 900, TIC		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 28	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency NBC Defence SE-901 82 Umeå	Report number, ISRN FOI-R--0440--SE	Report type User report
	Research area code 3. Protection against Weapons of Mass Destruction	
	Month year February 2002	Project no. E4242
	Customers code 2. NBC Defence Research	
	Sub area code 33 NBC Studies for the Armed Forces	
Author/s (editor/s) Andreas Beil Åsa Fällman Claes Nelsson	Project manager Göran Olofsson	
	Approved by	
	Sponsoring agency	
	Scientifically and technically responsible	
Report title (In translation) Outdoor experiments with passive remote detection of ammonia, sulphur dioxide and propane.		
Abstract (not more than 200 words) In order to obtain more experience about passive FTIR a field trial was performed in Umeå, Sweden, during three days in September 2001. The questions wished to be asked were whether RAPID could be used for mobile detection, how different IR backgrounds influence the technique and to verify the suspicion that sulphur dioxide and propane are difficult but possible to detect with this technique. Ammonia was used in most of the trials and all the releases were made from gas cylinders containing condensed gas. For the trial with mobile detection, RAPID was mounted on a terrain vehicle and ammonia was detected at 700 metres distance while the vehicle drove at a speed of 15-25 km/h. The detection limit of ammonia was calculated to be 2.5 ppm, for sulphur dioxide 18 ppm and for propane 300 ppm. From the measurements with ammonia the detection limit for G agents was estimated to 0.4-0.8 ppm and for mustard gas to 0.7-1 ppm. For the detection limits above the assumptions were made that the cloud thickness was 100 metres and that the temperature difference between the cloud and the background was 1 Kelvin. The instrument was also demonstrated for staff from the Swedish Armed Forces and the Swedish Defence Materiel Administration since the technique is interesting for the NBC Company.		
Keywords Ammonia, CWA, FTIR, IR, RAPID, Remote detection, Thermovision 900, TIC		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 28	
	Price acc. to pricelist	

Innehållsförteckning

1 Medverkande	5
2 Introduktion.....	6
2.1 Syfte med försöken.....	6
2.2 Tillstånd för utsläppen.....	7
2.3 Rapportupplägg	7
3 RAPID (Remote Air Pollution Infrared Detector).....	8
3.1 Tekniska data för RAPID	8
4 Thermovision 900	11
5 Utförda försök	12
5.1 Dagbok.....	12
5.2 Mätningar med Thermovision 900	13
6. Resultat.....	14
6.1 Mobil detektion med RAPID	14
6.2 Spatial visning av ammoniakmolnet.....	14
6.3 Resultat från mätningar med Thermovision 900	15
6.4 Detektionsgräns för ammoniak och uppskattad dito för kemiska stridsmedel.....	20
6.5 Passiv avståndsindikering av svaveldioxid och propan	22
6.6 Passiv avståndsindikering av tårgas.....	22
7 Diskussion.....	23
8 Referenser	24
8.1 FOI rapporter	24
8.2 Övrig litteratur	24
Bilaga 1 Notes for Thermovision 900 and Video camera	25
Bilaga 2 Beräkning av temperaturdifferens mellan bakgrunden och luften.....	28

1 Medverkande

Andreas Beil

IR-development group, Bruker Saxonian Analytik GmbH, Leipzig, Tyskland

Rainer Spudich

Bruker Daltonik GmbH, Bremen, Tyskland

Åsa Fällman, Melker Nordstrand, Göran Olofsson, Lennart Thaning och Marianne Strömquist

Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI NBC-skydd, Umeå

Claes Nelsson och Roland Lindell

Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI Sensorteknik, Linköping

Thomas Fahlander och Per-Martin Gustafsson

Totalförsvarets skyddscentrum, Umeå



2 Introduktion

Behovet av att kunna indikera kemiska stridsmedel och giftiga kemikalier (TIC, Toxic Industrial Chemicals) på avstånd är stort. Giftiga kemikalier finns i stora lager och transporteras dessutom på våra vägar och på räls i transportbehållare som kan springa läck och kemikalierna kan spridas med vinden över stora områden och hota både FM personal och civil befolkning. Ett flertal industrikemikalier transporteras på vägarna i stora mängder och kan, på samma sätt som stora kemikalielager, vara ett hot. Att giftiga kemikalier kan användas i ett medvetet syfte för att skada/inkapacitera är också en skrämmande realitet.

Fördelarna med att använda avståndsindikering är många. Klassiska indikeringsmetoder såsom indikeringspapper, jonmobilitets- och flamfotometriskainstrument är punktindikerings metoder som kräver att instrumentet och operatören befinner sig i det kontaminerade området eller i kemikaliemolnet. Dessa tekniker ger inte en uppfattning om hur området berörs av kemikaliemolnet, åt vilket håll och hur fort det verkar röra sig. Dessutom krävs ibland att punktindikeringsinstrument och personal saneras och framför allt utsätts för en stor fara genom att de vistas i området/molnet. Däremot så ersätter inte den passiva IR-tekniken punktindikeringsmetoderna, dessa kommer alltid att behövas, utan ska användas som ett bra komplement. IR-tekniken kan användas som en tidig varning om att ett moln, som befinner sig flera km bort, är på väg mot aktuellt område eller för att följa molnets rörelse. Dessutom ger instrumentet svar på vilket ämne som finns i molnet och inte bara typ av ämne (t ex G eller H-ämne), vilket vissa punktindikeringsinstrument gör. Flera fältförsök har tidigare gjorts för att demonstrera tekniken, se t ex referenserna 2, 6, 7, 10, 12, 13. Likaså har teoretiska beräkningar redovisats, se t ex referens 11.

2.1 Syfte med försöken

Erfarenheten av passiv FTIR (FourierTransform IndraRöd spektroskopi) i labbmiljö är vid det här laget relativt stor, se referens 1 och 2. Många frågor kan däremot inte besvaras på labb, utan verkliga försök måste utföras där instrumentet används i sin tilltänkta miljö. Därför var syftet med utomhusförsöken flera:

1. att utvärdera och för FM demonstrera RAPID under fältmässiga förhållanden
2. att utvärdera hur bra indikering med RAPID fungerar i rörelse, monterat på fordon
3. att utvärdera hur olika väderförhållanden och IR-bakgrunder påverkar tekniken
4. att verifiera misstanken om att svaveldioxid och propan är svårt, men möjligt, att indikera med passiv teknik.

Punkt 3 kan utvecklas ytterligare i följande frågeställningar:

vilken terräng- eller himmelsbakgrund används
 tidpunkt på dagen
 årstid
 avståndet mellan instrument och moln/utsläppskälla
 rådande väderlek (moln, lufttemperatur, luftfuktighet, dimma, vindhastighet)

Tidigare försök gjorda utomhus visar t ex att regn minskar förmågan till indikering för denna typ av teknik samt att snöfall mest kan liknas vid att en rullgardin dras ner framför instrumentet. De olika omgivningsparametrarna som nämns ovan påverkar temperaturskillnaden mellan gasmoln och bakgrund (T) och den atmosfäriska transmissionen av IR-strålning och således instrumentets förmåga. En teoretisk studie som belyser detta har tidigare genomförts (referens 4). En IR-kamera (Thermovision 900) användes under försöken för att studera bakgrunden som RAPID använder som IR-källa. Ett försök har gjorts att korrelera temperaturdifferensen mellan bakgrund och gasmoln med resultaten från RAPID.

2.2 Tillstånd för utsläppen

Utomhusförsöken föregicks av ett relativt omfattande arbete för att få tillstånd att släppa ut 40 kg ammoniak, 10 kg svaveldioxid och 10 kg propan på norra skjutfältet (I20 området) strax utanför Umeå. Eftersom marken angränsar till kommunalägd mark blev tre aktörer inblandade i tillståndsansökan; Generalläkaren, Umeå kommun och Länsstyrelsen i Västerbotten. Ansökan finns att tillgå hos FOI NBC-skydd och är diarieförd som 01-2195/U.



Figur 1. Utsläpp av ammoniak ur gasflaska.

2.3 Rapportupplägg

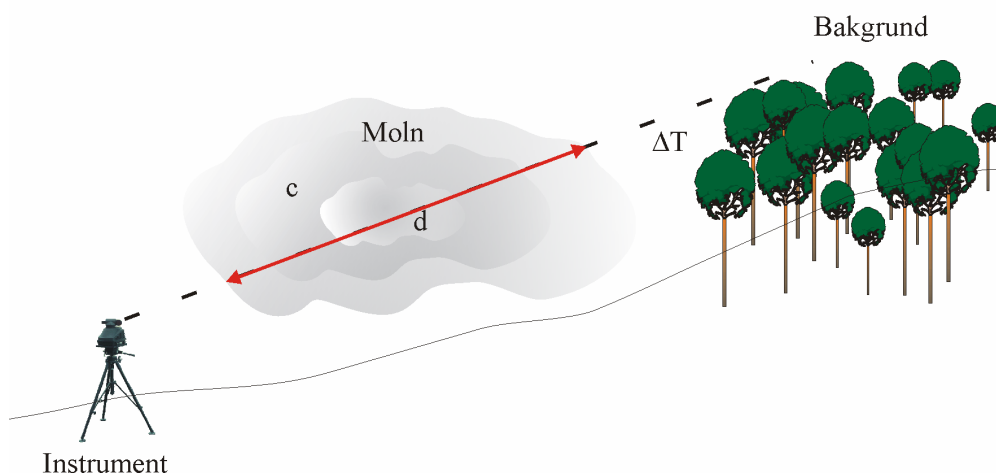
Rapporten beskriver kort de i försöken ingående instrumenten RAPID och Thermovision 900. Vidare redovisas resultaten från utomhusförsöken där dessa båda instrument användes. En mer ingående analys av RAPIDs detektionsförmåga ingår också. Delarna som behandlar RAPID är baserade på referenserna 8 och 9.

3 RAPID (Remote Air Pollution Infrared Detector)

Instrumentet erbjuder passiv avståndsindikering av kemiska ämnen som finns i luften, främst i gasfas men även i vätskefas.

Detektionsmetoden är baserad på spektralanalys av den omgivande IR-strålningen, den sk bakgrundsstrålningen, vilket t ex kan vara strålning från marken, skogen eller en byggnad. Om ett flyktigt kemiskt ämne kommer inom FOV (field of view) för instrumentet så uppstår en karaktäristisk spektral struktur (sk fingeravtryck) i det passiva IR-spektrat på grund av att molekylerna i molnet interagerar med bakgrundsstrålningen. Dessa spektrala fingeravtryck identifieras och i viss mån kvantifieras av mjukvaran och ett ljud- och/eller ljuslarm erhålls.

Det är viktigt att påpeka att det inte är koncentrationen (c) av kemiskt ämne i molnet som erhålls, utan produkten $c \cdot d \cdot \Delta T$ där d är tjockleken på molnet och ΔT är temperaturskillnaden mellan molnet och bakgrunden, se figur 2. Därav kan koncentrationen i molnet endast uppskattas genom att först uppskatta molnbredd och temperaturskillnaden moln-bakgrund. Med andra ord så är känsligheten med passiv IR-teknik starkt beroende av vilken temperaturskillnad (ΔT) som råder mellan moln och bakgrund. Tidigare försök utomhus visar att typiska värden på ΔT är 1-5 Kelvin ($^{\circ}\text{C}$).

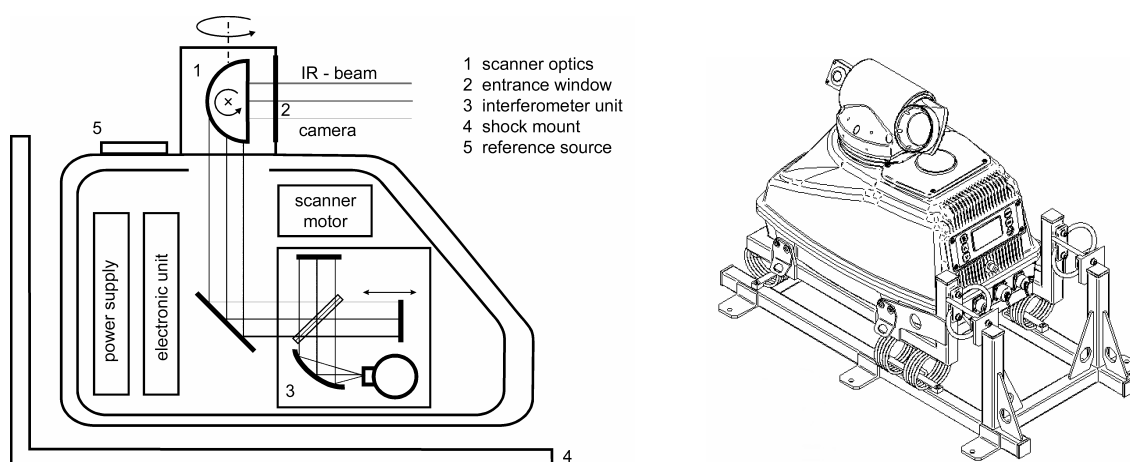


Figur 2. Principskiss av passiv avståndsindikering med FTIR samt använda förkortningar.

Olika kemiska ämnen absorberar olika mycket IR-strålning, de har olika absorptionskoefficient. Kemiska ämnen med en låg absorptionskoefficient är svårare att detektera med IR-teknik och vice versa. Struktursymmetriska molekyler som tex. vätgas och klorgas kan inte detekteras alls eftersom de inte interagerar med IR-strålning. Däremot är majoriteten av toxiska kemikalier möjliga att detektera med passiv avståndsindikering eftersom de inte är struktursymmetriska.

3.1 Tekniska data för RAPID

Figur 3 visar en schematisk skiss över instrumentet. IR-strålningen överförs via scanner optiken (1) till interferometern och detektorenheten (3). Referenskällan (5) används för intern radiometrisk kalibrering av instrumentet. Detta görs automatiskt när instrumentet startas.



Figur 3. Schema över RAPID (vänster) och skiss på RAPID monterad på stötdämparställning (höger).

Systemet innehåller:

- en skannerenhet med IR optik och videokamera
- en IR-analysator med interferometer och detektor
- elektronik och PC
- display med knappar

Skannerenheten

Hastighet azimut: max 120°/sekund

 elevation: max 20°/sekund

Field of regard (FOR): 360° azimuth, -10° till 50° elevation

Field of view (FOV): 30 mrad (instrumentet vid försöken har FOV 45 mrad)

FOR är området som instrumentet kan svepa/skanna över medan FOV är hur stor sektor instrumentet använder vid varje enskild mätpunkt.

En videokamera (CCD-kamera) sitter på den skannande delen av instrumentet och ger en bild av verkligheten på datorskärmen.

Sensorenheten

Spektralområde: 700-1300 cm^{-1}

Spektral upplösning: 1 till 4 cm^{-1}

Känslighet: < 0,06 K (1 dubbelsidigt interferogram vid upplösningen 4 cm^{-1})

Mäthastighet: 16 mätningar/sekund

Elektronikenheten

Energibehov: 18-36 V DC

DSP: 60 MHz (digital signalprocessor)

ADC: 40 kHz, 24 bitars upplösning

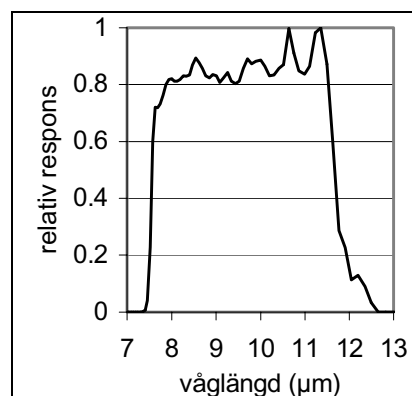
Instrumentet kan opereras antingen från displayen som sitter på baksidan av instrumentet eller via en extern PC. I det senare fallet används mjukvaran Rapid Control eller Iris NT.



Figur 4. RAPID monterad på ett stativ.

4 Thermovision 900

Thermovision 900 är ett IR-kamerasystem som ger radiometriskt kalibrerade bilder. Systemet som är tillverkat av FLIR Systems i Stockholm består av två scannande IR kameror, en med InSb-detektor för MWIR (2-5 μ m) och en med MCT-detektor för LWIR (7,5-14 μ m). Kamerorna är kopplade till en systemenhet varifrån de opereras. Detektorerna kyls till 77 K med Stirlingkylare och de har en temperaturupplösning på 0,1 K. Varje kamera har ett internt filterhjul med sex positioner. Mätningarna som presenteras i denna rapport gjordes med filter "LPL" för LWIR-kameran. Spektral känslighet för detektor och filter visas i figur 5. Bildstorleken är 272x136 bildpunkter och bilderna digitaliseras direkt i kamerorna och lagras därefter på hårddiskar i systemenheten. Kamerorna var monterade på ett stativ och systemenheten med operatör placerades i en bandvagn, se figur 5. En mer detaljerad beskrivning av Thermovision 900 och metoder för utvärdering av data mm finns i referens 3.



Figur 5. Till vänster: Thermovision 900 med de två IR-kamerorna på stativ och systemenhet med operatör i bandvagnen. Till höger: Spektral känslighet för LWIR-kameran (LPL-filter).

För dokumentation av utsläppen, bakgrunden och vädersituationen användes en digital videokamera. Syftet med mätningarna med Thermovision 900 var att kartlägga bakgrundens temperatur i samband med utsläppen. Därför var det viktigt att kalibreringen av kamerorna var så bra som möjligt. För att säkerställa detta ställdes en lufttemperaturreferens upp i anslutning till kamerorna. Genom att rikta kamerorna mot referensen med jämna mellanrum och avläsa temperaturen på den kunde en korrektionsterm för temperatur bestämmas. Temperaturen mättes med monterade Pt100-givare i referensen kopplade till en Temp-master 100 temperaturmätare. Lufttemperaturreferensen är närmare beskriven i referens 3.

5 Utförda försök

Försöket ägde rum på norra skjutfältet på före detta I20 i Umeå. Positioner för instrument och utsläpp varierades under försöket för att åstadkomma olika bakgrunder och avstånd, se karta i figur 6. På instrumentpositionerna ställdes RAPID och Thermovision 900 upp jämsides för att få så lika synfält som möjligt. I anslutning till Thermovision 900 ställdes även lufttemperaturreferensen upp. För mätningarna med RAPID monterad på fordon ställdes Thermovision 900 upp längs vägen där fordonet passerade.

Utsläppen av ammoniak, svaveldioxid och propan gjordes ur gasflaskor innehållande ca 10 kg av ämnet som kondenserad gas. Gasflaskorna monterades på ett stativ och vändes därefter uppochner eftersom utsläppen gjordes från vätskefasen via en dysa. Ammoniakutsläppen genererade ett gasmoln, som kunde observeras på 700 m avstånd med RAPID, vilket var det längsta avstånd terrängen medgav. Närmast utsläppdysan bildades ett vitt aerosolmoln bestående av kondenserad ammoniak och vatten. Det bildade molnet var i storleksordningen 3-5 m och var synligt för blotta ögat. Alla utsläpp föregicks av signalröksutsläpp för att få en uppfattning om vindens rörelser och hastighet.

Väderdata samlades kontinuerligt in, dels på plats (temperatur, relativ luftfuktighet, vindhastighet och riktning, turbulens) och dels från Umeå flygplats via NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) NWS (National Weather Service) där man kan hämta väderdata från hela världen som är mindre än 1 dygn gamla. De olika utsläppspositionerna och instrumentens läge bestämdes genom att använda GPS.

5.1 Dagbok

2001-09-04

Planeringsmöte på FOI i Umeå där hela utomhusförsöket planerades. Ett besök gjordes på norra skjutfältet för att bestämma lämpliga positioner för instrument och utsläpp. Därefter packades fordon på FOI med instrument, datorer, generatorer mm.

2001-09-05

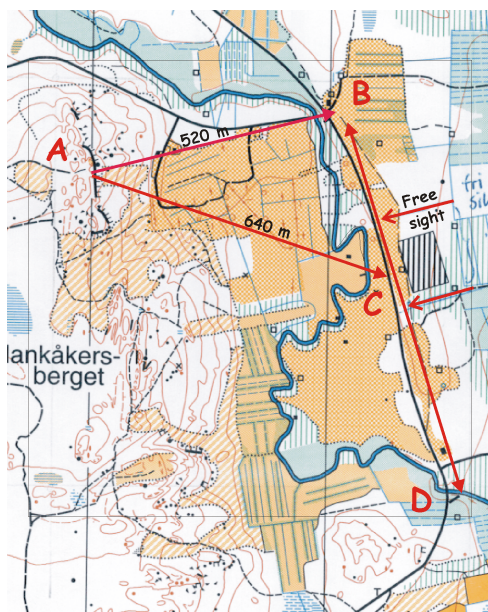
Instrumenten och all tillhörande utrustning transporterades till försöksområdet och monterades vid punkt A, se karta i figur 6. Tre utsläpp av ammoniak gjordes från punkt B och varje utsläpp varade i ungefär 2 minuter. Dessutom släpptes propan och svaveldioxid ut från en plats mellan punkt A och B. Detta för att korta ner avståndet till instrumenten.

2001-09-06

Två parallella verksamheter genomfördes. Rainer Spudich presenterade RAPID i Skyddcentrums lokaler för inbjudna gäster från FM (SkyddC) och FMV och därefter demonstrerades instrumentet på norra skjutfältet. Under tiden fortsatte försöken på norra skjutfältet med fler utsläpp av ammoniak, denna dag ifrån punkt C, och instrumenten var placerade vid punkt A, se figur 7 och 8. På eftermiddagen gjordes ytterligare ett utsläpp med svaveldioxid och propan med instrumenten på ett avstånd av ca 50 m.

2001-09-07

RAPID monterades på taket till en terrängbil, se figur 9. Fyra utsläpp av ammoniak gjordes från punkt A, där instrumenten stod de övriga dagarna, och terrängbilen körde med en hastighet av 15-25 km/h på vägen mellan punkt B och D. Försöken avslutades genom att tända 5 tårgasfacklor (4 g CS/fackla) och instrumentet som fortfarande var monterat på terrängbilen befann sig endast 10 meter från facklorna.



Figur 6. Karta över norra skjutfältet med instrument- och utsläppspunkter.



Figur 7. Utsläppsområdet (C) sett från punkt A.



Figur 8. Utsläpp av ammoniak. Instrumentens placering är markerade med rött (A).



Figur 9. RAPID monterad på terrängfordon.

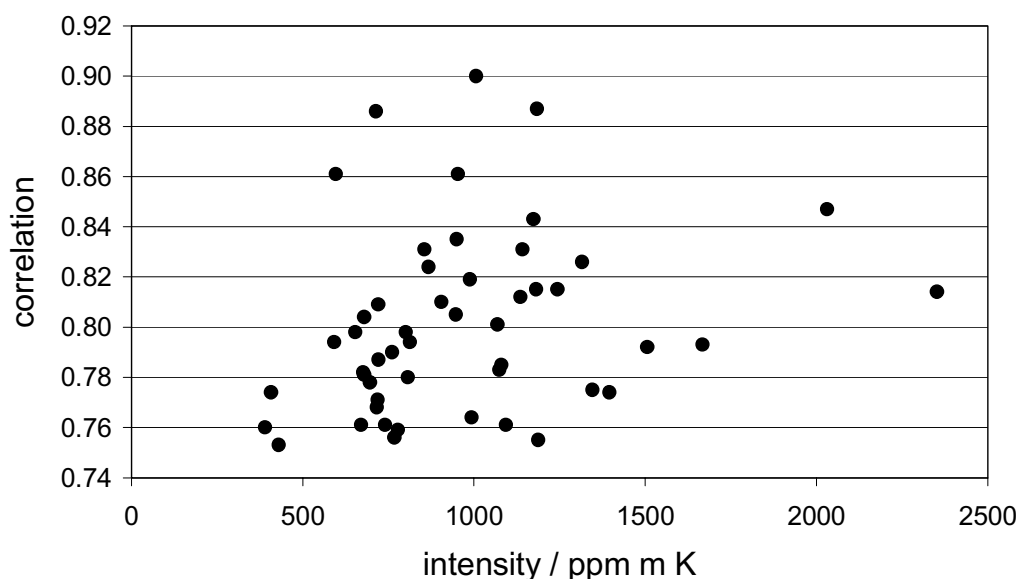
5.2 Mätningar med Thermovision 900

Mätningarna med Thermovision 900 genomfördes under hela försöket parallellt med mätningarna med RAPID. Insamlingen av bilder skedde en gång per sekund med start strax innan utsläppet startade och pågick tills att RAPID inte längre kunde detektera någon gas. Samtidigt gjordes också videoregistreringar. I anslutning till varje mätning (strax före eller efter) gjordes mätning av lufttemperaturreferensen för att kontrollera nivåkalibreringen i Thermovision 900. Ett provprotokoll finns i bilaga 1.

6. Resultat

6.1 Mobil detektion med RAPID

Vid dessa försök skedde utsläppen från punkt A och fordonet rörde sig längs vägen mellan punkt B och C. RAPID och stötdämparställningen monterades relativt enkelt på en terrängbil 13. Fordonet framfördes med en hastighet av 15-25 km/h under det att ammoniak släpptes ut under 5 minuter på ett avstånd av 600-700 m ifrån ”indikeringsfordonet”. Detta fungerade bra och 52 larm för ammoniak erhöles under dessa 5 minuter, se figur 10. Koncentrationen i molnet uppskattades till att variera mellan 1 och 10 ppm.



Figur 10. Larm för ammoniak vid mobil detektion. Larmgränsen (threshold) var satt till 0.75 i korrelation.

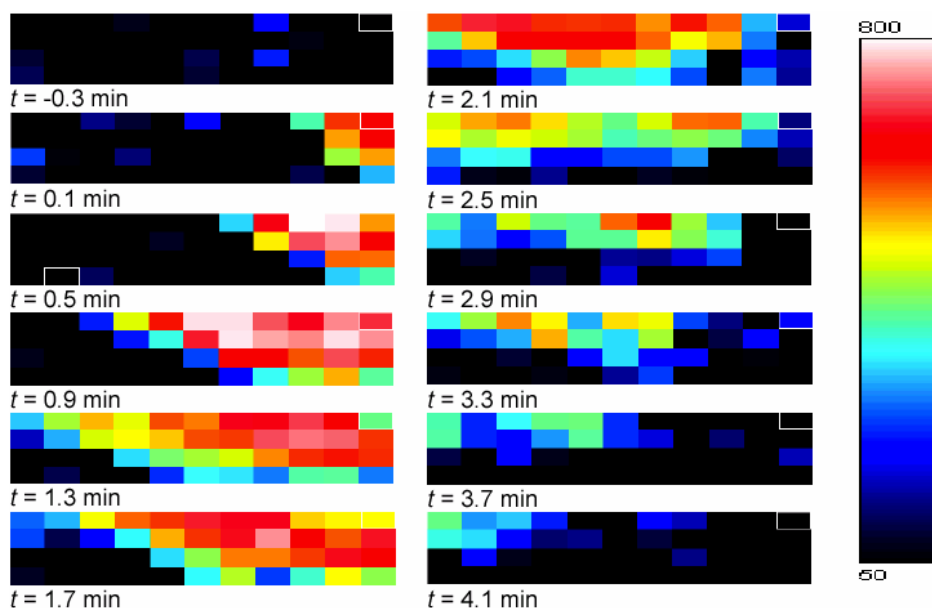
6.2 Spatial visning av ammoniakmolnet

Ammoniakmolnets rörelse orsakad av vinden visualiserades med RAPID under försöken. Figur 11 visar försöksområdet filmat med RAPIDs CCD-kamera. Det skannade området visas av de röda (prickade) linjerna där azimuth var -20 till 0° och elevation -4 till -1°. RAPIDs FOV (field of view) visas med vita cirklar. Utsläppet skedde från en punkt på vägen strax norr om punkt C. Instrumenten var uppställda vid punkt A. Avståndet mellan instrument- och utsläppsplatsen var cirka 700 m och den vita plymen av signlrök som släpptes ut före varje försök rör sig med vinden (2,1 m/s) syns i bilden. Utsläppstiden var 2 minuter.



Figur 11. Vy över utsläppsområdet.

I figur 12 visas den spatiala utbredningen av ammoniakmolnet från utsläppet 13.55 2002-09-06. Området som instrumentet skannade över visas i figur 11. De 12 färgbilderna motsvarar perioder om 0,4 sekunder från att ammoniakutsläppet startade ($t=0$) till att utsläppet avslutades ($t=2$) och ammoniakmolnet försvann ($t=4,1$). Färgstapeln till höger visar den integrerade ammoniaksignalen ($x d \cdot T$), vilken varierade mellan 50 ppm m K (svart) till 800 ppm m K (vitt). Använd azimuth var 20° i 2-graderssteg och elevationen var 4° i 1-graderssteg. De spatiala bilderna visar att ammoniakmolnet snabbt lyfte från marken och sakta drev med vinden.



Figur 12. Spatial utbredning av ammoniakmolnet.

6.3 Resultat från mätningar med Thermovision 900

Enligt referens 7 kan den uppmätta temperaturkontrasten för en gas approximativt beskrivas:

$$\Delta^2 T(\nu) \cong \Delta T \cdot \varepsilon(\nu) \cdot c \cdot d$$

där T temperaturdifferensen mellan luft och bakgrund
 $\varepsilon(\nu)$ absorptionskoefficient för gasen
 c gasens koncentration
 d gasmolnets tjocklek

RAPID mäter $T(v)$ och med kunskap om gasen ($\epsilon(v)$) beräknas ($T \cdot c \cdot d$). Om känsligheten hos RAPID betecknas NETD (noise equivalent temperature difference) kan detektionsgränsen uttryckas:

$$c \cdot d \cong \frac{NETD}{\Delta T \cdot \epsilon(v)}$$

För en viss gas är alltså detektionsgränsen direkt beroende av temperaturdifferensen T . Syftet med mätningarna med Thermovision 900 var att bestämma denna temperaturdifferens för aktuella mätfall. För bakgrunden avses den ekvivalenta strålningstemperaturen i aktuellt våglängdsband (LWIR) och den mättes upp med Thermovision 900. För luften avses den termodynamiska temperaturen som mättes upp med en traditionell termometer i en väderstation.

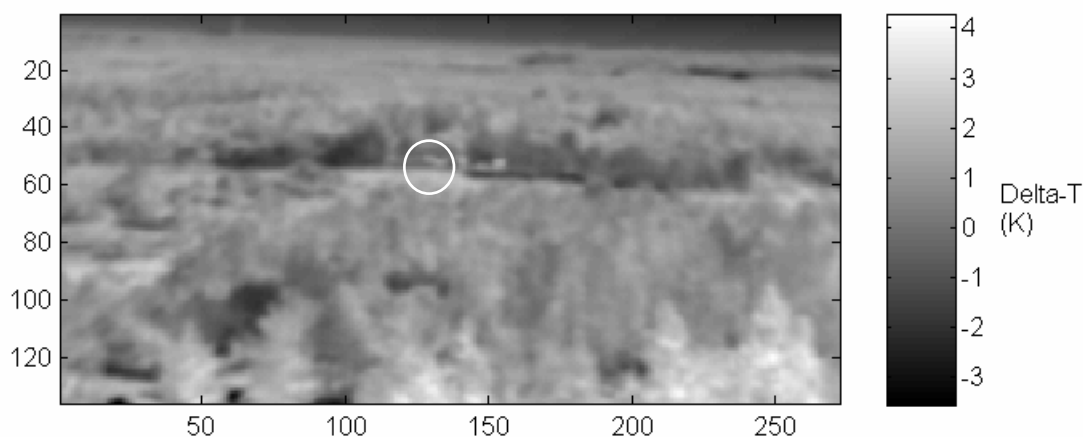
För att beräkna den ekvivalenta strålningstemperaturen från bakgrunden och därifrån till temperaturdifferensen relativt luften behövdes en kompensation för atmosfärens dämpning göras. Denna och övriga beräkningar är beskrivna i bilaga 2. I bilagan finns också en osäkerhetsanalys redovisad.

För analys av T med hjälp av Thermovision 900 valdes tre olika utsläpp, se tabell 1. Alla tre var ammoniakutsläpp eftersom övriga gasutsläpp inte skedde på relevanta avstånd med en rimlig känslighet. Utsläppen är utvalda för att illustrera lyckade och misslyckade försök att detektera ammoniak samt utsläpp mot olika bakgrunder.

Tabell 1. Utsläpp som analyserats m.a.p. temperaturdifferens. Väderdata från väderstationen i provområdet.

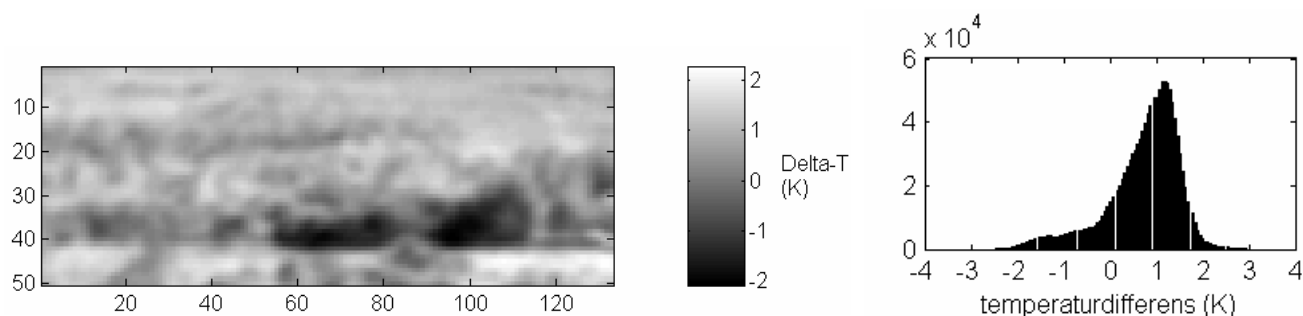
Beteckning	Tid	Utsläppsposition	Instrumentposition	Lufttemperatur (°C)	Luftfuktighet (%RH)	Vindhastighet (m/s)	Vindriktning (°)	Insamlingsmod med Rapid och resultat
a	2001-09-06 10.40	C	A	14,0	58	1	121	Rapid Control, ingen detektion
b	2001-09-06 13.55	C	A	16,1	65	2	172	IRIS, tydlig detektion av gasmolnet, se kap. 6.2
c	2001-09-07 11.50	A	mellan B och C	13,4	99,5	2	161	Rapid Control fordonsmonterat, lyckad detektion

Utsläpp a skedde på förmiddagen och i figur 13 visas en differensbild. Bakgrunden uppvisar både lägre och högre temperatur än luften. Utsläppet skedde i den vita cirkeln och vinden drog gasen åt vänster i bilden.



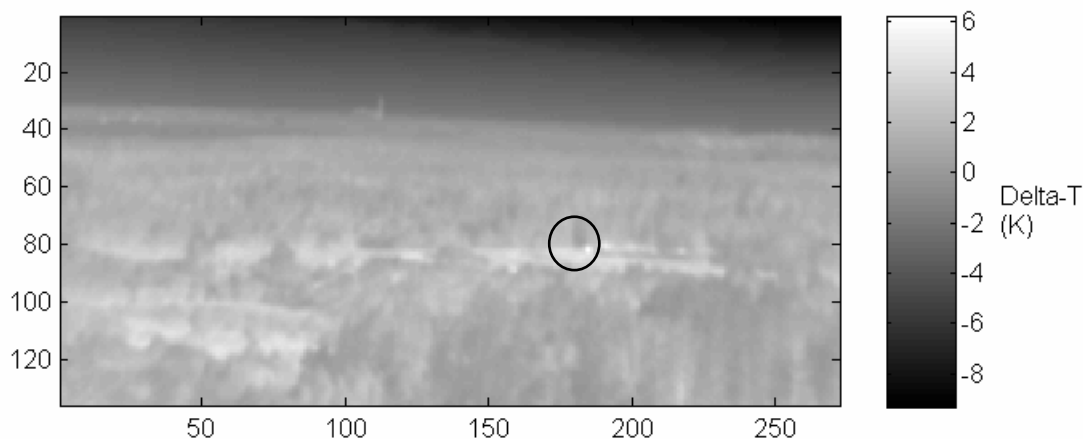
Figur 13. Medelbild över 4 min 20 s som visar temperaturskillnaden mellan bakgrunden och luften för utsläpp a. Positivt värde anger att bakgrunden är varmare. Utsläppet skedde i den vita cirkeln.

I figur 14 visas det ungefärliga mätområdet för RAPID och ett histogram över temperaturdifferensen. Medelvärde är $0,6^\circ$ vilket är ganska lågt. Histogrammet och bilden visar dock att det finns punkter som har en större temperaturdifferens. Det är ett typiskt förhållande på morgonen att differenserna är små. I detta fall kunde inte RAPID detektera gasen. Det kan ha berott på att gasen rörde sig i de delar av bilden som uppvisade låg differens.



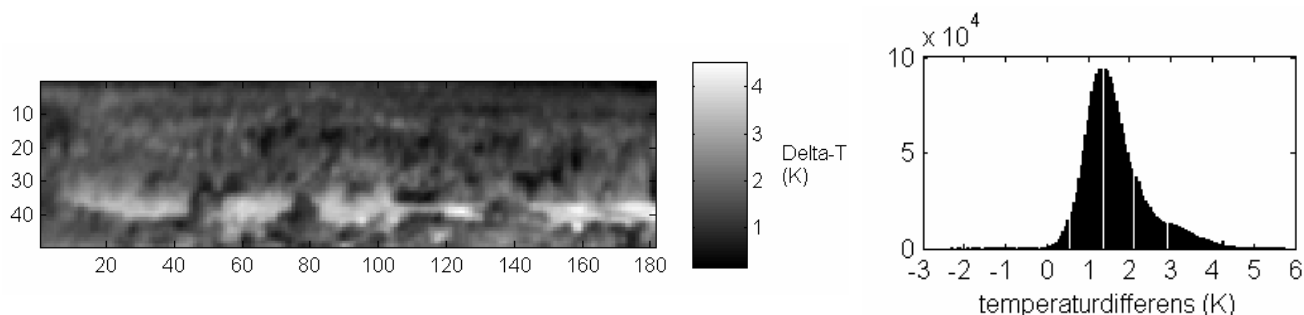
Figur 14. Till vänster visas en förstoring av figur 13 som visar ungefärligt mätområde för RAPID för utsläpp a. Utsläppspunkten ligger i bildens högerkant. Till höger visas ett histogram över temperaturdifferensen inom samma mätområde.

I figur 15 visas utsläpp b från eftermiddagen och temperaturdifferenserna har överlag ökat. Utsläppet skedde i den svarta cirkeln och även här rörde sig gasen åt vänster i bilden. Temperaturdifferensen hos markbakgrunden är i hela området positiv.



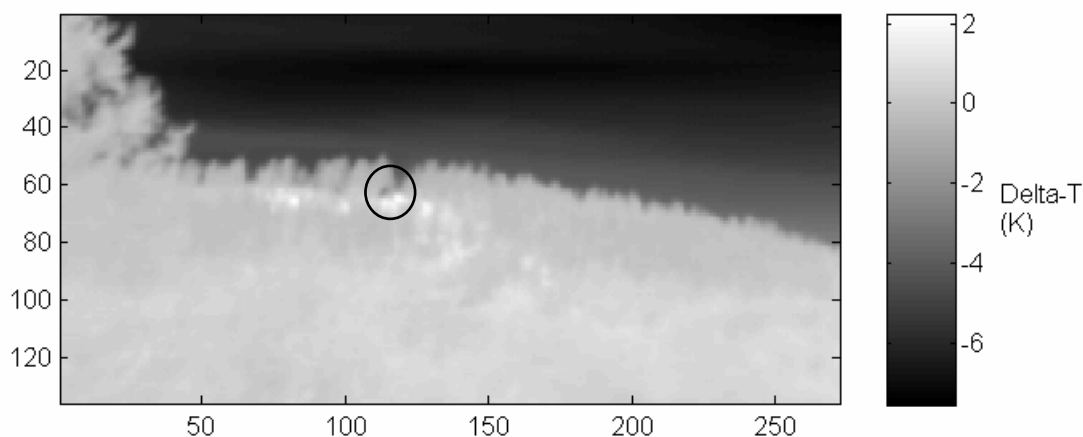
Figur 15. Medelbild över 3 min 9 s som visar temperaturskillnaden mellan bakgrunden och luften för utsläpp b. Positivt värde anger att bakgrunden är varmare. Utsläppet skedde i den svarta cirkeln.

Resultaten från RAPID för utsläpp b har i detalj redovisats i kapitel 6.2. En bild av temperaturdifferensen för mätområdet visas i figur 16. Differensen var i hela mätområdet positiv med medelvärdet 1,7 °C. De högsta värdena finns vid en väg som går genom mätområdet och vid de angränsande öppna partierna. RAPID lämnade i detta fall tydliga bilder av gasmolnet under en lång tid. Detektionerna verkade i hög grad ske i den övre delen av mätområdet där temperaturdifferensen var lägst vilket är något förvånande. Anledningen var troligen att gaskoncentrationen var högre några meter över marken. Gasen kan också ha rört sig bort från vägen och på så sätt inte kommit in i området mellan vägen och RAPID.



Figur 16. Till vänster visas en förstoring av figur 15 som visar mätområdet för RAPID för utsläpp b. Utsläppspunkten ligger i bildens högerkant. Till höger visas ett histogram över temperaturdifferensen inom samma mätområde.

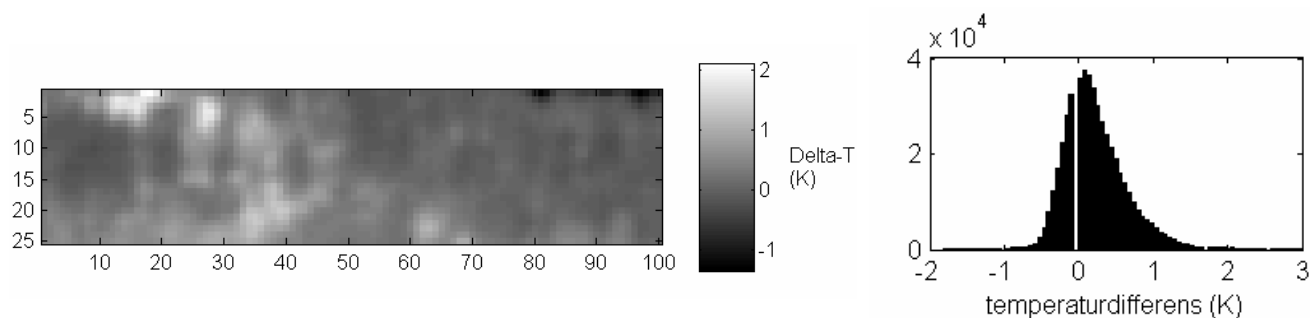
Det tredje redovisade utsläppet gjordes från punkt A på höjden med instrumenten mellan punkt B och C. Vädret var molnigt med regnskurar och hög luftfuktighet. I figur 17 syns att markbakgrunden har en temperaturdifferens nära noll vilket är förväntat för väderlekstypen. Vid utsläppspunkten (A) fanns en del klippor och sand som hade en högre temperatur. Molnen var kallare.



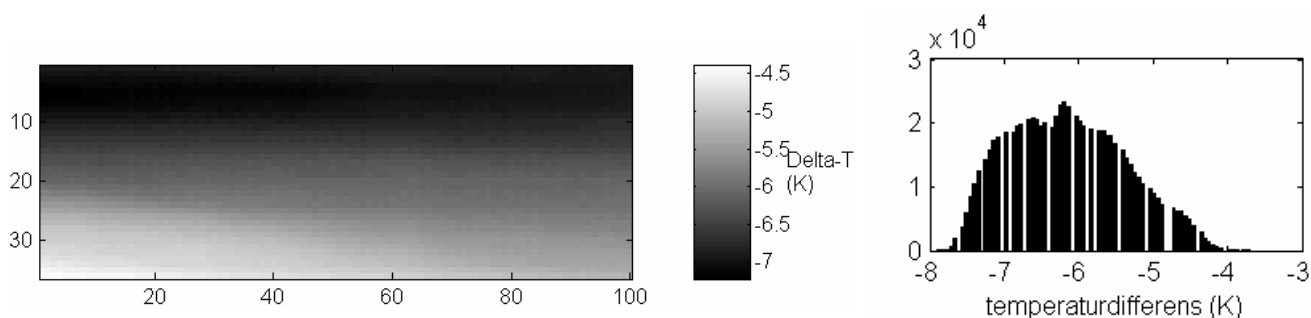
Figur 17. Medelbild över 3 min 20 s som visar temperaturskillnaden mellan bakgrunden och luften för utsläpp c. Positivt värde anger att bakgrunden är varmare. Utsläppet skedde i den svarta cirkeln.

Vid detta utsläpp var RAPID monterad på taket på en terrängbil 13, se figur 9. Fordonet rörde sig längs vägen mellan punkt B och C och det finns ingen uppgift om exakt vilket synfältet var vid olika tidpunkter. RAPID var dock riktad mot utsläppspunkten och fick flera lyckade dektektioner under utsläppet. Eftersom bakgrunden i detta fall bestod av två partier med distinkt olika temperaturer – mark och himmel – så har två delområden valts ut för analys. I figur 18 visas ett delområde med markbakgrund strax under utsläppspunkten. Temperaturen ligger mycket nära luftens och det är förvånande om RAPID skulle ha detekterat någon ammoniak här. Medelvärde för temperaturdifferensen var 0,2°C. I figur 19 visas ett delområde över utsläppspunkten där molnen på himlen utgör bakgrund. Området ligger precis över skogskanten och det syns en tydlig temperaturgradient i nedre delen av bilden. Temperaturdifferensen är överlag negativ med ett medelvärde på -6,1°C. Förutsättningarna för detektion var alltså goda. I IR-bil-

derna kunde man dessutom ana att ammoniakmolnet rörde sig över himlen vilket styrker antagandet att den lyckade detektionen med RAPID skedde mot himlen och inte mot marken.



Figur 18. Till vänster visas en förstoring av figur 17 som visar ett område med markbakgrund nedanför utsläppspunkten för utsläpp c. Till höger visas ett histogram över temperturdifferensen inom samma område.

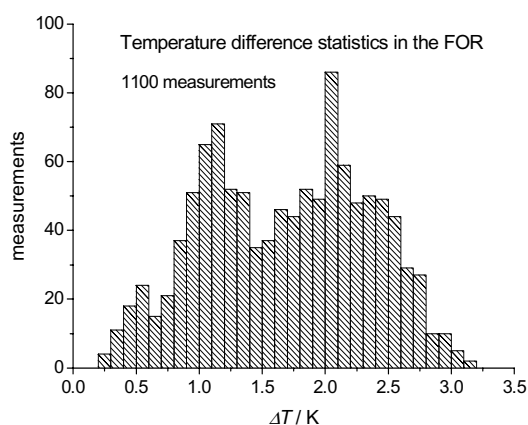


Figur 19. Till vänster visas en förstoring av figur 17 som visar ett område med himmelsbakgrund ovanför utsläppspunkten för utsläpp c. Till höger visas ett histogram över temperaturdifferensen inom samma område.

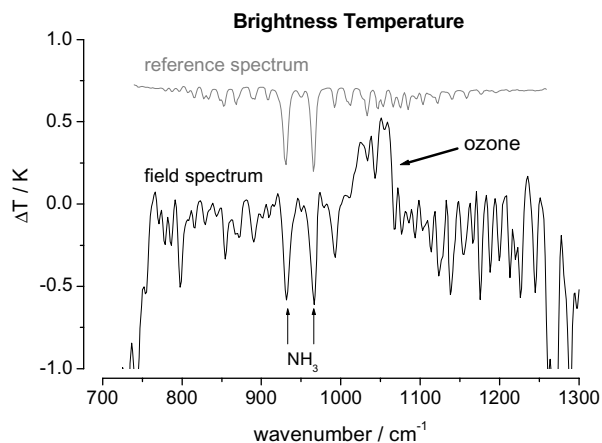
6.4 Detektionsgräns för ammoniak och uppskattad dito för kemiska stridsmedel

Ammoniak används ofta som referensämne för FTIR-instrument eftersom det inte är speciellt toxiskt, jämfört med C-stridsmedel, och har ett tydligt IR-spektra i området $700\text{--}1300\text{ cm}^{-1}$. De allra flesta utsläppen som gjordes under försöken var just med ammoniak varför här följer en grundligare utvärdering av insamlade spektra därifrån.

Bakgrundstemperaturen (T_b) för de olika FOV varierade mellan $12,8^\circ\text{C}$ till $14,8^\circ\text{C}$ för aktuellt utsläpp medan lufttemperaturen (T_l) var $12,0 \pm 0,2^\circ\text{C}$. Detta ger att temperaturskillnaden moln-bakgrund (ΔT) är 1 till 2°C (eller Kelvin), se figur 20A. Temperaturdifferensen bestämdes i detta fall ur de spektra som Rapid samlade in och var i överensstämmelse med mätningarna med Thermovision 900, se avsnitt 6.3.



Figur 20A. Temperaturstatistik (ΔT) i FOR för 1100 mätningar.

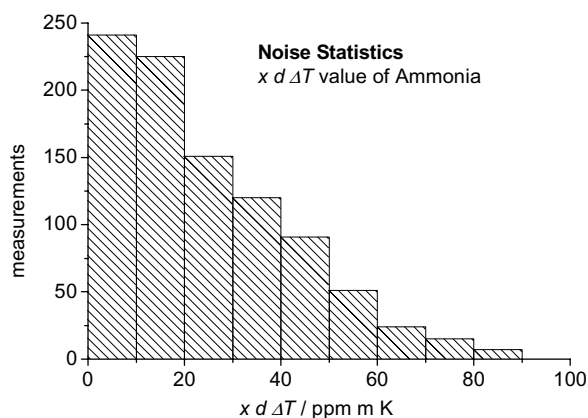
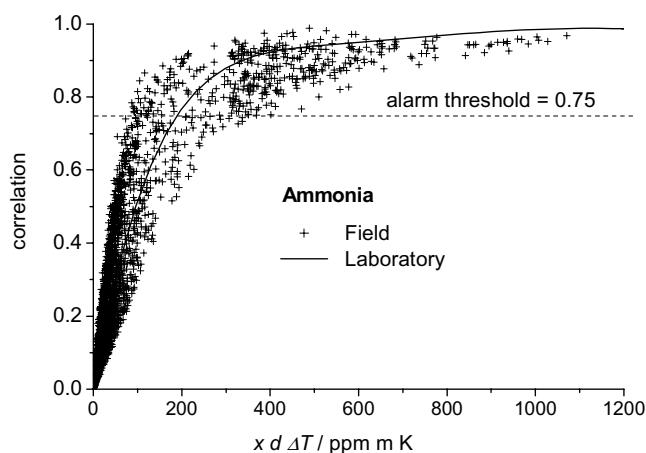


Figur 20B. Spektra med ammoniaklinjer mätt i fält samt referensspektra.

Figur 20B visar ett uppmätt temperaturspektrum (ΔT) som funktion av vågtalet (ν) vilket visar transmissionen för ammoniak, vatten och koldioxid, där de två senare syns längst till höger och vänster i spektret. På grund av reflektion av himmelsstrålningen så erhöles även ett emissionsband av ozon i spektret. Längst upp i figuren finns referensspektret för ammoniak.

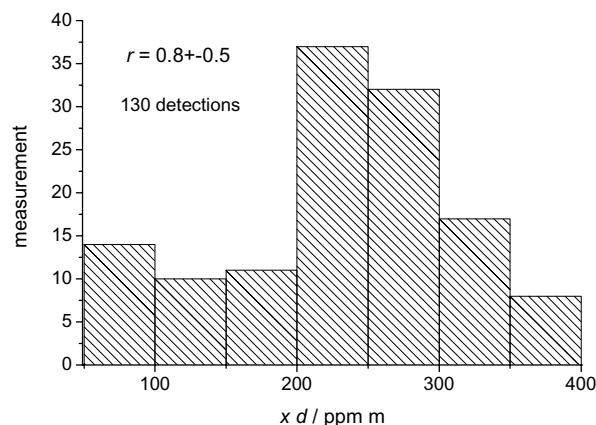
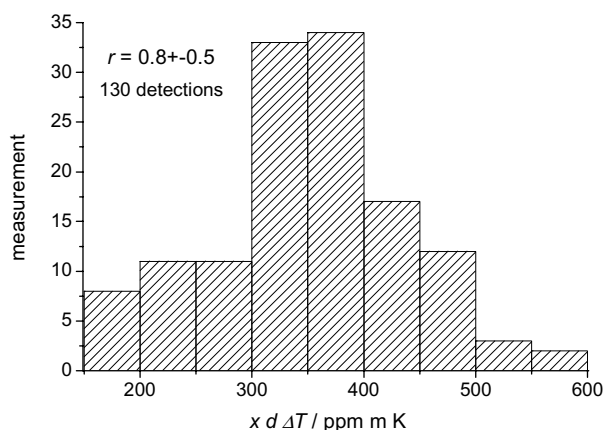
I figur 21A visas en plott av korrelationens (r) beroende av den integrerade ammoniaksignalen ($\int dT$). Alarmgränsen är den prickade linjen och var vald till korrelationen 0,75, dvs om korrelationen var högre än 0,75 så gav instrumentet detektionslarm. Den ideala funktionen från laborieförsök visas med en

heldragen linje. På grund av störningar från atmosfären och strålningsbakgrunden så blir fältförsökens detektionsresultat fördelade runt den ideala funktionen. Systemets brusnivå uttryckt i ekvivalent ammoniaksignal visas i figur 21B och fastställdes för mätområdet (FOR) innan ammoniakutsläppet påbörjades. Notera att värdena inte överstiger 100 ppm m K.



Figur 21A. Korrelation vs ammoniaksignalens intensitet. **Figur 21B.** Systemets brusnivå uttryckt i ekvivalent ammoniaksignal.

För att kunna uppskatta detektionsgränsen för ammoniak har fördelningen av detekterade $x d \Delta T$ värden vid 130 mätpunkter beräknats vid $r=0,80\pm0,05$, se figur 22A. Figuren visar att $x d \Delta T$ värdena varierar mellan 50 till 600 ppm m K med ett signifikant maximum mellan 300 och 400 ppm m K. I figur 22B visas distributionen $x d$ med samma korrelation (r) och ett maximum vid omkring 250 ± 50 ppm m kan avläsas. Detta motsvarar 170 ± 35 mg/m².



Figur 22A. Detektionsgränser för ammoniak uttryckt i $x d \Delta T$.

Figur 22B. Detektionsgränser för ammoniak uttryckt i $x d$.

Vid utsläppspunkten, på 700 meters avstånd ifrån instrumentet, täcker FOV på 45 mrad en yta av 780 m². Detta ger att $c d$ -detektionsvärdet på 170 ± 35 mg/m² motsvarar en total massa av 130 ± 30 g ammoniak.

Tidigare visades att $T > 1$ K verkar vara rimligt vid utomhusförsök. Vi kan vidare anta att ett verkligt moln av ammoniak skulle ha dimensionen $d > 100$ meter i observerad riktning eftersom källstyrkan skulle vara högre än den vi erhöll från våra förhållandevis små gasflaskor.

Från dessa antaganden kan vi uppskatta detektionsgränsen för ammoniak till 2.5 ± 0.5 ppm vilket motsvarar koncentrationen (c) 1.7 ± 0.4 mg/m³. Om koncentrationen är lägre än så kommer förmodligen en positiv detektion vara osannolik.

Från laboratoriemätningarna gjorda 1999 och detta utomhusförsök med ammoniak har uppskattade detektionsgränser i fält beräknats för tabun, sarin, soman (G-ämnen) och senapsgas (HD), se tabell 1. För detektionsgränserna angivna i tabellen har antagandet gjorts att $T > 1$ K och molnbredd $> FOV$ samt ett avstånd < 3 km mellan instrument och utsläpp.

Tabell 2. Detektionsgränser för tabun, sarin, soman (G-ämnen) och senapsgas (HD) i fält.

Ämne	x/ppm ($p=1013$ mbar, $T=298$ K)	$c/mg\ m^{-3}$
<i>G-ämnen</i>	0,4 till 0,8	3 till 5
<i>Senapsgas</i>	0,7 till 1,0	6 till 9
<i>Svavelhexafluorid</i>	0,05	0,3
<i>Ammoniak</i>	2,5	1,7

6.5 Passiv avståndsindikering av svaveldioxid och propan

Vid det första försöket med svaveldioxid och propan släpptes ca 4 kg (2 minuter) av respektive ämne ut på ett avstånd av 400 m till RAPID. Eftersom varken svaveldioxid eller propan kunde detekteras på detta avstånd så minskades avståndet till 50 meter för att verifiera att ämnena går att detektera om högre koncentrationer finns i molnet samt vid kortare avstånd. Vid de senare försöken kunde båda ämnena detekteras genom att skanna genom molnplymen. De konstaterade detektionsgränserna är dock mycket höga, 18 ppm för svaveldioxid och 300 ppm för propan, vilket kan jämföras med detektionsgränsen för ammoniak med denna teknik, vilket är 2,5 ppm. Det förklarar varför vi tvingades gå väldigt nära utsläppet, koncentrationen i genererat moln var inte tillräckligt hög. Vid en olycka med svaveldioxid eller propan kommer sannolikt koncentrationen i molnet att vara högre än vid våra försök och därför blir ämnena detekterbara på betydligt större avstånd.

6.6 Passiv avståndsindikering av tårgas

Trots misstanke om att passiv IR-teknik inte fungerar på fasta partiklar så utfördes ett försök med tårgasfacklor (CS). Indikering skedde på endast 10 m avstånd och resultatet var negativt. Detta resultat tyder på att det endast är ämnen i gasfas (och i viss mån vätskefas) som kan indikeras med denna teknik.

7 Diskussion

Försöken gav värdefull erfarenhet av passiv avståndsindikering för alla deltagare. Väderleken varierade under försöksperioden, allt ifrån blå himmel och sol till moln med hot om regn, vilket var värdefullt eftersom vi önskade studera vädrets inverkan på passiv IR-teknik.

Analysen av temperaturdifferensen mellan bakgrund och luft visade att RAPID vid dessa mätningar kunde detektera ammoniak om differensen var större än ca 1°C. Temperaturdifferensen varierar över scenen men också med väderlek och tid på dygnet. En närmare kartläggning av denna differens för olika förhållande bör kunna belysa tillgängligheten för ett instrument av RAPIDs typ för nordisk och annan miljö. Mätningarna i denna rapport och tidigare mätningar pekar dock på att man ofta har en temperaturdifferens på åtminstone 1°C i någon del av scenen. Vid proven erhöles den största temperaturdifferensen mot himmel i samband med utsläppen från punkt A på höjden.

Gasmolnets utbredning bestämdes under dessa prov inte med någon annan metod än med RAPID. Inga utbredningsberäkningar har heller gjorts eftersom den lokala topografin och vegetationen gör kvantitativa spridningsberäkningar alltför osäkra. Den glesa skogen och de relativt höga buskarna gjorde också att gasmolnet rörde sig slumpvis runt i området. Detta har gjort att någon kvantitativ bedömning av känsligheten och effektiviteten hos RAPID inte har låtit sig göras. Framgången för RAPID varierade under försöket och detta berodde sannolikt inte bara på låg temperaturdifferens i scenen utan också på att gasen inte blåste dit operatören trodde. I vissa fall drog gasen troligen in i skogen där den doldes av lövverket.

Uppskattade detektionsgränser för kemiska stridsmedel under fältförsöken kan jämföras med resultat som insamlades på labb under 1999. Då användes en icke skannande motsvarighet till RAPID som kallas OPAG 22. Under dessa försök så användes en svartkroppsstrålare som IR-källa och agens genererades i en mätcell med diametern 10 cm (motsvarar molnet). Detektionsgränserna för tabun, sarin, soman och senapsgas var då i storleksordningen 10 ggr lägre än de vi nu beräknat skulle gälla för RAPID i fält.

I december 2001 utfördes försök med RAPID på FOIs säkerhetslaboratorium men dessa resultat har inte utvärderats ännu utan kommer så att göras under 2002. Syftet var dels att jämföra prestandan mellan OPAG 22 och RAPID, dels att samla in spektra för fler agens till instrumentbiblioteket. En preliminär bedömning tyder på att skillnaden i känslighet mellan RAPID och OPAG 22 är en faktor 2 när resultaten från laborieförsöken jämförs, resten kan hänföras till skillnader mellan laboriet och utomhusmiljön.

Ytterligare praktisk erfarenhet av passiv FTIR kommer att erhållas framöver i och med framtagningen av indikeringsfordon, med bland annat passiv FTIR, till NBC-kompani 2004. FOI har varit delaktiga i studierna och kommer att vara delaktiga i de fortsatta studieförsöken.

8 Referenser

8.1 FOI rapporter

- 1) Å. Fällman, M. Strömqvist, P. Nilsson, *Avståndindikering av C-stridsmedel med FTIR, laborativa försök*, FOA-R--00-01501-862--SE, 2000.
- 2) Å. Fällman, C. Nelsson, G. Olofsson, M. Strömqvist, *Passiv avståndindikering av riskkemikalier och kemiska stridsmedel*, FOA-R--00-01638-862--SE, 2000.
- 3) Claes Nelsson, Pär Nilsson (redaktörer), *Measurement Equipment at the Department of IR Systems*, FOA-R--99-01111-615--SE, 1999.
- 4) Claes Nelsson, *Avståndindikering av NH₃ och SO₂ - en studie av atmosfärens inverkan med hjälp av Modtran och Hitran-PC*, FOA-R--00-01443-862--SE, 2000.

8.2 Övrig litteratur

- 5) Allison R. Piper, Lori A. Todd and Kathleen Mottus, *A Field Study Using Open-Path FTIR Spectroscopy to measure and MAP Air Emissions from Volume Source*, Field analytical Chemistry and Technology 3(2) (1999), 69-79.
- 6) A. Beil, R. Daum, G. Matz, R. Harig, *Remote sensing of atmospheric pollution by passive FTIR spectrometry*, Spectroscopic Atmospheric Environmental Monitoring Techniques, Klaus Schäfer, Editor, Proceedings of SPIE Vol. 3493 (1998), 32-43.
- 7) A. Beil, R. Daum, and T. Johnson, *Detection of chemical agents in the atmosphere by passive IR remote sensing*, Internal Standardization and Calibration Architectures for Chemical Sensors, Ronald E. Shaffer, Radislav A. Potyrailo, Editors, Proceedings of SPIE Vol. 3856 (1999), 44-56.
- 8) A. Beil, *Field tests with the Rapid - 5-7 September 2001, FOI Test Area at Umeå, Sweden*, Test report Bruker Saxonia Analytik GmbH, Leipzig. 2001.
- 9) A. Beil et. al. *Real time remote detection and cloud imaging of CWA and TIC using high speed FTIR systems*, 5th Joint Conference on Standoff Detection for Chemical and Biological Defense, Williamsburg, Virginia, USA, 24-28 September 2001.
- 10) Jack Demirgian and Susan Macha, *Collection of Quantitative Chemical Release Field Data*, Field analytical Chemistry and Technology 3(2) (1999), 95-104.
- 11) D. F. Flanigan, *Prediction of the limits of detection of hazardous vapors by passive infrared with the use of modtran*, Applied Optics 35 (1996), 6090-6098.
- 12) R. Harig and G. Matz, *Toxic Cloud imaging by Infrared Spectrometry: A Scanning FTIR System for Identification and Visualization*, Field analytical Chemistry and Technology 5(1-2) (2001), 75-90.
- 13) Jean-Marc Thériault, *Passive Remote Monitoring of Chemical Vapor Concentration: Method and Results for Ammonia*, EOS/SPIE Symposium on Remote Sensing, Proceeding of SPIE Vol. 4168 Barcelona Spain, 25-29 September 2000.

Bilaga 1 Notes for Thermovision 900 and Video camera

Cameras

LWIR S/N 976017

MWIR S/N 966001

Time

THV setting Garmin GPS

Video camera Garmin GPS –1s

(Magellan GPS = Garmin GPS – 1s)

Ambient air reference

Funnel with Pt 100 sensors.

Tempmaster reader

Wednesday 5 September

THV and Rapid positions at point A on the hill.

Time	Action	Comment	File (SW+LW)
10.15	Ambient air ref	T=12.95°C (distance abt. 5 m)	UME010905_00
10.25	Smoke release	Release point not far from to point B, close to the old house. B1. The smoke appeared in front of the open field of point B and above the forest. The smoke not visible in the THV.	UME010905_01
10.35	Ammonia release	At bit delayed in the start. Release time abt. 2 min. The condensed ammonia was visible as a dark cloud on THV. Rapid IRIS mode.	UME010905_03
13.10	Ambient air ref	T=16.32°C	UME010905_04
13.15	Smoke	Pos B1	
13.25	Ammonia release	2 min Rapid Control	UME010905_05
13.35	Ammonia release	1min30s Rapid IRIS mode	UME010905_06
14.15	Smoke	New position W1. Close to weather station, on the road.	
14.23	Ambient air ref	T=14.94°C	UME010905_07
14.40	Propane release	2 min. No detection with Rapid.	UME010905_08
15.00	Smoke	Pos W1	UME010905_09
15.10	Sulphur dioxide release	Only a very weak detection with Rapid	UME010905_10
16.10	Smoke	Pos W1	
16.20	Ammonia release	Detection towards the ground with Rapid.	UME010905_11
16.26	Ambient air ref	T=14.35°C	UME010905_12

Thursday 6 September

Time	Action	Comment	File (SW+LW)
9.30	Smoke	Position C1 which is located on the road between point B and C. Abt. 50 m from C	
10.15	Smoke		
10.22	Ambient air ref	T=15.80-16.00°C	UME010906_00
10.25	Ammonia release	Rapid Control. Weak detection first but some detections a long time after the release stopped. The ammonia cloud stayed for a long time around the truck. Some false alarms of SF6 (not related to the release).	UME010906_01 UME010906_02
10.40	Ammonia release	Rapid Control, no detections	UME010906_03
12.11	Ambient air ref	T=17.56°C	UME010906_04
12.36	Smoke		
12.45	Ammonia release	Abt 5 kg. Demo with Rapid Control. A lot of alarms.	UME010906_05
13.45	Smoke		
13.50	Ambient air ref	T=17,69°C	UME010906_06
13.55	Ammonia release	2 minutes. IRIS Nice pictures of the cloud.	UME010906_07
15.25	Smoke	New position for release and instrument. On the field east of the weather station. Abt 45-50 m between release and instruments.	
15.40	Propane release	IRIS. Detection in absorption. Gas cold from the release?	UME010906_09
15.46	Ambient air ref	T=18.19°C	UME010906_10
16.05	Sulphur dioxide release	IRIS. Detection	UME010906_11

Friday 7 September

Release from point A on the hill. THV position along the road between B and C. Position named C2. Rapid was mounted on the "terrängbil 13" and performed on-the-move measurements along the road between B and C.

Time

THV = Garmin GPS - 2 s

Video = Garmin GPS - 1s

Time	Action	Comment	File (SW+LW)
11.00	Smoke	At position A	
11.15	Ammonia release	THV and Video started later. Rapid on-the-move	UME010907_00
11.50	Ammonia release	Rapid on-the-move	UME010907_01
12.07	Ambient air ref.	T=14.25°C	UME010907_02
12.10	Ammonia release	Abt 1 kg	UME010907_03
12.25	Ammonia release	Just a small amount. No detection with Rapid	UME010907_04
12.30	Ambient air ref.	T=16.34°C	UME010907_05

Positions

From Magellan 315, Swedish grid

A: 171717 E
709527 N
80-90 m elevation

B1: 171767 E
709546 N
50-60 m elevation
536 m from A

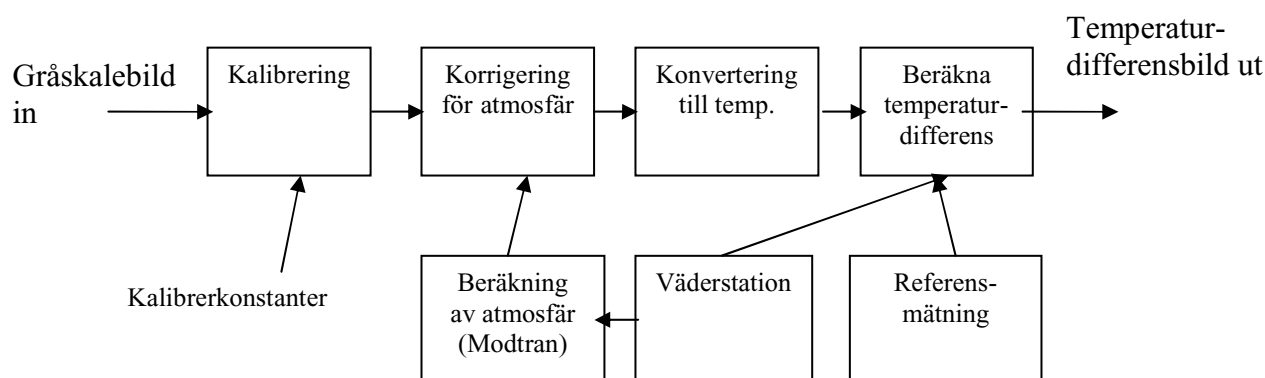
W1: 171748 E
709536 N
55-60 m elevation
324 m from A

C1:	171783 E	N 63° 53,718
	709501 N	E 20° 14,801
	54 m elevation	
	710 m from A	

C2: N 63N 63° 53,740 (from Garmin GPS)
E 20° 14,510
52 m elevation
7 m accuracy
627 m from point A

Bilaga 2 Beräkning av temperaturdifferens mellan bakgrunden och luften

Thermovision 900 lämnar gråskalebilder som lagras på hårddisk. Dessa bilder har sedan räknats om till temperaturdifferensbilder, se figur 1 nedan. Kalibrering skedde med kalibrerkonstanter som beräknats tidigare i samband med kalibrering av Thermovision 900 i februari 2000 och gav radiansbilder. Atmosfärens transmission och egenstrålning beräknades med atmosfärsprogrammet Modtran (PcModWin 3.7) utgående från väderdata som registrerades i samband med försöket. Dessa två moment är närmare beskrivna i referens 3. Eftersom atmosfärskorrigeringen gjordes för radiansbilder konverterades sedan dessa till temperaturbilder. Dessa korrigerades sedan för resultatet från mätningen av lufttemperaturreferensen. Korrigeringen medförde att en offset på 0,28°C lades till temperaturbilderna. Slutligen subtraherades den med väderstationen uppmätta lufttemperaturen.



Figur 1. Blockschema över beräkningsgången.

Osäkerheten i temperaturdifferensen har uppskattats utifrån kända osäkerheter. Lufttemperaturreferensen har tidigare kalibrerats vid FOI i Linköping och väderstationen har också kalibrerats på vederbörligt sätt. Den kombinerade osäkerheten har bestämts till 0,15°C (k=2) utifrån sambandet:

$$T = T_{\text{THV}} + T_{\text{tratt}} - T_{\text{THVtratt}} - T_{\text{luft}}$$

En sammanställning av osäkerhetsbidragen finns i tabell 1 nedan.

Tabell 1. Osäkerhet hos temperaturdifferensen T .

Storhet	Osäkerhet
$T_{\text{THV scen}}$	0.01
T_{tratt}	0.03
$T_{\text{THV tratt}}$	0.01
T_{luft}	0.07
Totalt	0.07746
Totalt k=2	0.15