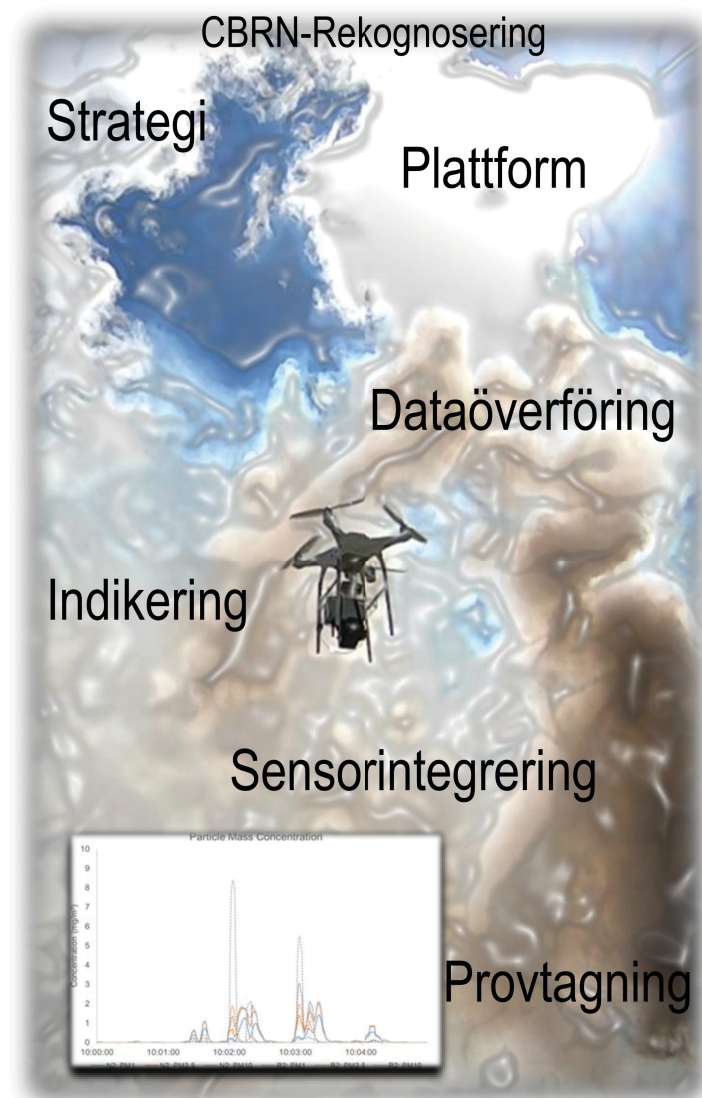


HÅKAN WINGFORS, PER-ÅKE GRADMARK,
TOBIAS TENDEL, TORBJÖRN TJÄRNHAGE, PÅR WÄSTERBY,
MICAEL GRANSTRÖM, KENNET LIDSTRÖM, GÖRAN ÅGREN,
STEFAN NORD, ERIK BERGQVIST



Håkan Wingfors, Per-Åke Gradmark, Tobias
Tengel, Torbjörn Tjärnhage, Pär Wästerby, Micael
Granström, Kennet Lidström, Göran Ågren, Stefan
Nord, Erik Bergqvist

Omvärldsbevakning, CBRN- sensorer och RPAS

Titel	Omvärldsbevakning, CBRN-sensorer och RPAS
Title	CBRN-sensors and RPAS, a survey
Rapportnr/Report no	FOI-R--5393--SE
Månad/Month	Januari
Utgivningsår/Year	2023
Antal sidor/Pages	46
ISSN	1650-1942
Uppdragsgivare/Client	FMV
Forskningsområde	CBRN-frågor
FoT-område	Inget FoT-område
Projektnr/Project no	E41491
Godkänd av/Approved by	Niklas Brännström
Ansvarig avdelning	CBRN-skydd och säkerhet
Exportkontroll	Innehållet är granskat och omfattar ingen information som är underställd exportkontrolllagstiftningen

Bild/Cover: Håkan Wingfors, FOI

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk, vilket bl.a. innebär att citering är tillåten i enlighet med vad som anges i 22 § i nämnd lag. För att använda verket på ett sätt som inte medges direkt av svensk lag krävs särskild överenskommelse.

This work is protected by the Swedish Act on Copyright in Literary and Artistic Works (1960:729). Citation is permitted in accordance with article 22 in said act. Any form of use that goes beyond what is permitted by Swedish copyright law, requires the written permission of FOI.

Sammanfattning

På uppdrag av Försvarets materielverk har en omvärldsbevakning genomförts avseende potential att montera CBRN-sensorer på drönare eller RPAS (eng. Remotely Piloted Aircraft Systems), med syfte att användas av CBRN-grupper under rekognoseringsuppdrag. I den här rapporten har aktuell kunskap och teknikutveckling sammanställts avseende drönarplattformar, sensorintegrering samt indikerings- och mättekniker för C, B och RN-området. Drönare av typen multirotor har de mest mångsidiga egenskaperna avseende nyttolast och manövrerbarhet, trots en begränsning i flygtid jämfört med typen med fast vinge. De snabba, energisnåla och lätta sensorerna för gammastrålning ger goda tekniska och metodologiska förutsättningar för både RPAS-integrering och indikering av eventuella strålkällor i ett område. Likaså är förutsättningarna lovande för indikering av kemiska ämnen i gasform och vätskor med högre flyktighet. För B-området har dagens mättekniker för låg specificitet men en strategi som även gynnar C och RN bygger på flygburen aerosolprovtagning där efterföljande fältanalysmetoder kan ge svar med högre verifikationsgrad. Det nuvarande läget avseende teknikfronten ger skäl för oss att förespråka plattformar med separata moduler för C, B och RN där en enhetslösning troligtvis ger begränsningar i flygtid på grund av totalvikt. Även bristen på en gemensam mätstrategi talar också för separata sensormoduler. Redan utvecklade saneringstekniker för känslig utrustning kan vara tillämpbara om inte destruktion är ett alternativ.

Nyckelord: drönare, CBRN-sensorer, indikering, scintillationsdetektor, provtagning, jonrörlighetsspektroskopi, fluorescence, sanering

Summary

At the request by the Defence Materiel Administration (FMV), the potential utility of mounting CBRN sensors on RPAS (remotely piloted aircraft systems) for CBRN groups to carry out reconnaissance missions was analysed. In this report, current knowledge and developments of RPAS platforms, sensor integration technology and detection techniques for the C-, B- and RN-fields have been compiled. Multirotor type drones have the most versatile features in terms of payload and maneuverability, despite some limitations in flight time compared to fixed-wing drones. Quick, energy-efficient and lightweight sensors for detection of gamma radiation provide great technical and methodological advantages for both RPAS integration and for detection and monitoring of gamma radiation of areas. Likewise, the prerequisites are promising for measurement of chemicals in gaseous form and liquids with higher volatility. For B-agents, the current measurement techniques lack adequate specificity, but a strategy relying on aerosol sampling combined with verification analysis on ground could be useful. This practical strategy, also applicable for C and RN, can provide data of higher confidence. The current state regarding the front of technology favours platforms with separate modules for C, B and RN, where a fully consolidated product likely results in limitations in flight time. The lack of a common measurement strategy also justifies separate modules. Already developed decontamination techniques for sensitive equipment can be applicable unless destruction is a possible choice.

Keywords: drone, detection, sampling, scintillation, ion mobility spectroscopy, fluorescence, decontamination

Innehållsförteckning

1	Inledning	8
1.1	Försvarsmaktens behov	9
1.2	Försvarsmaktens mål och vision	9
2	Drönartyper och sensorintegrering	10
2.1	RPAS möjliga för CBRN-sensor integrering	10
2.2	Multirotor	10
2.3	Fast vinge.....	11
2.4	Hybrid - Vertical Take Off and Landing (VTOL).....	12
2.5	Sensorintegrering och drönaren som plattform	13
2.6	Grad av integrering.....	13
2.7	Placering av sensorenhet.....	14
2.8	Summering.....	15
3	Drönare med C-indikeringsförmåga	16
3.1	Historia och bakgrund	16
3.2	Kemiska stridsmedel och relaterade ämnen	16
3.3	Kemiska och fysikaliska egenskaper.....	17
3.4	Önskvärt detektionsintervall för C.....	17
3.5	Sensorer och detektionstekniker	18
3.5.1	Sensorer för kemiska ämnen i luft anpassade för drönare..	19
3.5.2	Sensorer för kemiska stridsmedel anpassade för drönare..	19
3.5.3	Mättekniker för aerosoler med hjälp av drönare.....	20
3.6	Provtagningsförmåga	21
3.7	Mätmetod och mätstrategi.....	21
3.7.1	Metodik för övervakning av områden	21
3.7.2	Övriga tekniker och tillvägagångssätt	22
3.8	Summering C	22
4	Drönare med B-indikeringsförmåga	24
4.1	Inledning och historia	24
4.2	Metoder för B-indikering	25
4.2.1	Ljusspridning.....	25
4.2.2	Fluorescens och atomemission	25
4.2.3	Provtagning.....	27
4.2.4	Analysmetoder kopplade till insamlat prov.....	27
4.3	Tillämpningar B-indikeringsinstrument i samband med drönare.....	27
4.4	Summering B	27
5	Drönare med RN-detektionsförmåga	29
5.1	Bakgrund och historia.....	29
5.2	Taktisk och möjlig praktisk användning av CBRN-RPAS	29
5.3	RN-sensorer.....	29

5.3.1	Gasfyllda detektorer	30
5.3.2	Halvledardetektorer	30
5.3.3	Scintillationsdetektorer	31
5.3.4	Neutrondetektorer.....	31
5.4	Provtagning.....	31
5.5	Tillämpningar RN	31
5.5.1	Kartläggning av dosrat.....	32
5.5.2	Sökning efter lokala platser/strålkällor med joniserande strålning	32
5.5.3	Lägesbestämning, identifiering och kvantifiering av enskilda radionuklider genom spektrometriska mätningar	32
5.5.4	Provtagning	32
5.6	Scenariobaserat RN-exempel	33
5.7	Summering RN	34
6	Färdiga system	35
6.1	Integrering för färdiga system	36
7	Sanering av drönare använda i CBRN-kontaminerad miljö.....	37
7.1	Sanering av känslig utrustning, C och B-agens	37
7.2	Sanering av känslig utrustning – RN.....	38
7.3	Förslag på metodik	38
8	Diskussion och rekommendationer.....	39
9	Referenser	41

1 Inledning

Indikering eller detektion av CBRN-agens tjänar primärt syftet att i tillräckligt god tid upptäcka förekomst och ge beslutsunderlag för att ta på skyddsutrustning, söka skydd, byta anfallsriktning eller marschväg. I den nya arméorganisationen (AO25) för Totalförsvarets skyddscentrum anges att drönare, UAV (unmanned aerial vehicle) eller så kallade RPAS (Remotely Piloted Aircraft Systems) med indikeringsförmåga för CBRN, ska ingå som en utökad förmåga. Indikering på avstånd kombinerat med en överblicksbild ger möjligheter att inhämta information i kontaminerad miljö utan närvaro av personal.

Bakgrunden till den här rapporten är att det har skett en stor utveckling inom två teknikområden. Det ena teknikområdet rör miniaturisering av billiga och lätta sensorer där det sker framsteg inom indikering, sensorintegrering och realtidsmätning av kemiska och biologiska agens samt joniserande strålning. Det andra teknikområdet omfattar RPAS, drönarsystem, där utvecklingen visar på en allt bättre flygprestanda, men också ett större fokus på sensorintegrering med fjärrövervakning av data i realtid. Sammankopplat ger detta en potential att snabbare mäta och indikera förekomst av CBRN-agens över större områden, något som fler forsknings- och försvarsorganisationer än FOI har noterat[1, 2].

Traditionellt har de flesta indikeringsmetoder för CBRN varit handburna eller platsbundna för mätning i direkt närmiljö där ett visuellt eller auditivt larm erhålls i närvaro av ämnen i vissa koncentrationer. De är ofta designade så att de tål fältmässiga förhållanden och kan handhasas med tjocka skyddshandskar i kontaminerade miljöer. En typisk strategi för mätning är stegvis framryckning där detektorresponsen övervakas, alternativt att detektorn förs mot misstänkta objekts ytor för att maximera möjligheten för omslag. Oavsett svar från detektorn har informationen en lokal och platsbunden giltighet och ger primärt momentan och taktisk vägledning.

När sensorer och instrument istället monteras på en fjärrstyrd mobil enhet med kamera, lämnas det traditionella tillvägagångssättet att enbart punktvist mäta i närmiljön. Nu öppnas möjligheter att visuellt övervaka större områden och samla information om förekomst av hotämnen på en mer operativ nivå. CBRN-rekognoseringsuppdrag kan effektiviseras eftersom misstänkta objekt kan kontrolleras på säkra avstånd och besvärlig terräng kan överkommas. Ytterligare kan fler objekt undersökas per tidsenhet eftersom soldatgrupper med indikeringsinstrument inte fysiskt behöver förflytta sig. På grund av att teknikutvecklingen är snabb och potentiella tillämpningar är flertaliga finns det nu behov av en aktuell tekniköversikt och kunskapsmanställning.

I den här rapporten sammanställs aktuell kunskap och teknikfront inom både drönar- och sensorområdet för att utreda potentialen, samt identifiera kunskapsluckor och utvecklingsområden, för användning vid CBRN-händelser. Ett avsnitt beskriver teknikutvecklingen av drönarsystem som idag kan anses lämpliga för applikationer där fjärrstyrd mätning och provtagning kan genomföras. Där beskrivs även generella tekniska lösningar för sensorintegrering och datakommunikation. Rapporten fortsätter med separata C-, B- och RN-kapitel där exempel på mätuppdrag sätts i ett sammanhang med befintliga sensortekniker utifrån behov och prestanda. Teknikframsteg, deras potential för miniaturisering och möjlig användbarhet på drönare beskrivs likaså. Förmågan att fjärrstyrt ta prover för mer noggrann retrospektiv och konfirmerande analys på ett laboratorium (mobilt eller reach-back) behandlas också för respektive område. Vidare behandlas marknadsläget utifrån tillgänglighet, mognad och i viss mån prisnivå. En för CBRN-området ej betydelselös faktor är tekniker för att sanera kontaminerad utrustning och annan materiel som kontaminerats i het zon. Detta beskrivs i ett gemensamt avsnitt. Sammantaget utgör ovan angivna information grunden för att kunna bedöma potentialen och peka ut en framtida inriktning för anskaffning av förmågan CBRN-sensorer integrerade med drönare.

1.1 Försvarsmaktens behov

I NATOs uppdaterade officiella försvarspolicy avseende CBRN nämns att omvärldsläget är komplext och att de ser att den potentiella användningen av CBRN-material alltjämt utgör en central och föränderlig risk för NATO och deras allierade[3]. Sverige har från att vara partner idag status som ansökarland i NATO, vilket innebär en ytterligare gradvis integrering i NATOs strukturer. Den nya arméorganisationen (AO25) anger en markant tillväxt av Försvarsmaktens CBRN-skyddsförmåga där en CBRN UAV-pluton kommer att ingå som en del av ett CBRN-kompani. Första CBRN-kompaniet kommer att växa, såväl i numerär som i kvalitet. Kompaniet ska kunna lösa uppgifter, såväl nationellt som internationellt, inom ramen för t.ex. EU-, NATO- och FN-operationer. I den fortsatta utvecklingen förväntas även CBRN RPAS ingå i alla relevanta CBRN-underrättelse-grupper inom Försvarsmakten.

CBRN RPAS ska kunna användas under utbildning, övning, utveckling, beredskap och samtliga konfliktnivåer inom Försvarsmakten. En CBRN-RPAS-grupp ska bestå av ca åtta personer med fordon. Hotbilden där CBRN RPAS ska verka i omfattar konfliktnivåerna normalläge, säkerhetspolitisk kris och väpnat angrepp. Väpnat angrepp är dimensionerande för val av utrustning, uppträdande och metod. Därutöver bör CBRN RPAS kunna nyttjas vid stöd till det civila samhället under svåra påfrestningar som olyckor, natur- eller miljökatastrofer. Användningen kommer att styras av den fastslagna CBRN-hotnivån. Hotnivån baseras på en riskbedömning av sannolikheten för utsläpp genom olyckshändelse, vådabekämpning och medvetet utsläpp eller en attack.

CBRN RPAS bör kunna verka i en miljö där det utöver hot om konventionell bekämpning förekommer specialförbandshot, telekrigsinsatser (elektronisk störning inklusive störning av navigationssystem och elektronisk spaning), cyberhot, EMP (elektromagnetisk puls), CBRN, underrättelsehot, vilseledning samt fysisk bekämpning från obemannade farkoster, attackhelikopter, attackflyg samt fjärbekämpning med missiler och robotar. Till hotbilden hör även en ökad förmåga att upptäcka, identifiera och fastställa läge för ett mål. En ökad integration av underrättelse- och bekämpningssystem minskar tiden mellan upptäckt och bekämpning. Detta ställer i sin tur stora krav på rörlighet, skydd och signaturanpassning. Flygplan, helikoptrar och drönare kan övervaka, upptäcka och leda egen eller annans vapeninsats mot markstridsförband. Som en framtida ambition finns en ökad förmåga till markmålsbekämpning med hög precision.

1.2 Försvarsmaktens mål och vision

Anskaffning av CBRN RPAS-förmåga ska i största möjliga mån inriktas mot ett färdigutvecklat och beprövat system med ett minimum av egen utveckling. Förmåga till att använda CBRN RPAS kommer succesivt att öka och behov om utveckling kommer att ske på 1:a CBRN kompaniet. Senare kan samtliga CBRN-plutoner i Försvarsmakten få CBRN RPAS tillförd.

CBRN RPAS kommer att minska riskerna för personal vid underrättelseinhämtning genom att färre antal personer behöver beträda kontaminerat område. Förmågan kommer att medge snabbare rekognosering samt att en större yta kan täckas på kortare tid. En CBRN-RPAS-enhet ska vara möjlig att transportera med CBRN-UAV-gruppens fordon samt med flyg och till sjöss. CBRN-RPAS ska kunna hanteras av såväl värnpliktig som anställd personal, vilket ställer särskilda krav på enkelhet och kort utbildningstid. I tabell 1 ges en översikt av den förmåga en CBRN-RPAS bör ha i framtiden för framgångsrik underrättelseinhämtning på C,B och RN.

Tabell 1. Önskad målbild för förmåga hos en CBRN-RPAS

Önskad förmåga	C	B	RN
Indikera	<i>ja</i>	<i>ja</i>	<i>ja</i>
Provta luft	<i>ja</i>	<i>ja</i>	<i>ja</i>
Provta mark	<i>ja</i>	<i>ja</i>	<i>ja</i>

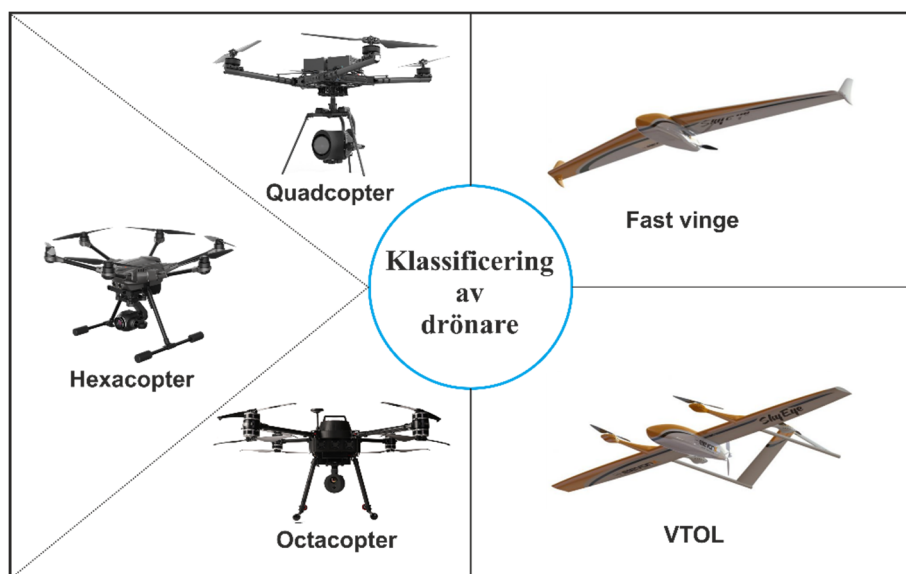
2 Drönartyper och sensorintegrering

För CBRN-uppgifter med drönare ska geografiskt förankrad information i realtid kunna avläsas från en annan plats i icke kontaminerad miljö. Det här avsnittet beskriver aktuell teknik och möjligheter för ändamålsenliga plattformar och systemkrav avseende sensoranpassning och datakommunikation. Inom militär verksamhet förekommer ett stort antal bestyckade drönartyper för exempelvis attack och skydd där Israel, USA, Turkiet, Iran och Kina har utvecklat flera system med avsevärd lyftkapacitet[4]. För den här rapporten har fokus riktats mot mindre drönare som är kompatibla med konventionella/modifierade mätsystem som används inom CBRN-detektion och samtidigt förenliga med de krav en CBRN-underrättelsegrupp eller likvärdig rörlig grupp kan ställa. Detta innebär krav avseende hanterbarhet, manövrerbarhet, flygtider, framdrivnings-system, sensorer och kommunikation men också förutsättningar avseende fältpassning, underhåll och transportmöjligheter.

En drönarplattform ställer specifika krav på sensorenhetens utformning och på dess ingångsparametrar och behöver systemanpassas för den tänkta uppgiften med avseende på drifttid, strömförsörjning, användargränssnitt och storlek/vikt.

2.1 RPAS möjliga för CBRN-sensor integrering

Flera kriterier kan användas för att klassificera drönare, såsom storlek, modelltyp, flygtid, räckvidd, lyftkraft etc. [5-7]. I den här beskrivningen väljer vi att klassificera drönare i tre olika kategorier: multirotor, fastvinge och hybrid (Vertical Takeoff and Landing, VTOL), figur 1, och i huvudsak fokusera på miniatyrdronare dvs. drönare som kan transporteras och manövreras relativt enkelt med begränsat manuskap och har en vikt under 15 kg.



Figur 1. Klassificering av drönare baserat på rotorer, fast vinge eller hybrid-VTOL. (foton med tillstånd från leverantörer).

2.2 Multirotor

Den vanligaste typen av drönare är multirotor, t.ex. quadcopter, hexacopter och octocopter. Dessa drönare har fyra, sex respektive åtta propellrar där den vanligast förekommande är quadcoptern. Flygegenskaperna för drönare med flera rotorer liknar de för helikoptrar vilket möjliggör att de kan lyfta från små ytor, hovra, göra skarpa svängar, och utföra snabba förändringar av hastigheten i alla riktningar, inklusive aktiv inbromsning och undvikande av hinder. Detta gör att de är väl lämpade för många olika mätuppgifter och noggranna platsundersökningar. Andra fördelar med drönare med flera

rotorer inkluderar högre nyttolastkapacitet, vilket bättre möjliggör integrering med sensorer och god stabilitet vid kraftig vind. Alla dessa funktioner kostar i strömförbrukning vilket påverkar flygtid eller behov av batteribyten. Multirotorer kräver mycket kraft för att upprätthålla lyftkraften. En genomsnittlig industriell multirotor-drönare har idag flygtider som sträcker sig från tjugo till sextio minuter (utan extra sensorer monterade). Andra nackdelar med multirotorer är deras komplexitet, där skada på en motor eller rotorblad är kritisk för fortsatt framfärd, liksom relativt hög ljudvolym (upptäckt) samt risk för sekundärsador från exponerade propellrar. I tabell 2-3 presenteras fördelar, nackdelar och egenskaper för modellen.

Tabell 2. Fördelar respektive nackdelar med drönare av typen multirotor.

Typ	Fördelar	Nackdelar
Multirotor (quadcopter, hexacopter, och octacopter)	<ul style="list-style-type: none"> • Pris • Enkel användning • Möjlighet att hovra • Vertikal start och landning • Möjliggör flygning i alla riktningar • Högre nyttolast 	<ul style="list-style-type: none"> • Begränsad flygtid • Begränsningar i areal som kan undersökas • Hög ljudvolym

Tabell 3. Egenskaper för ett urval av drönare av typen multirotor.

Typ	Flygtid (min)*	Maximal startvikt (kg)	Maximal last (kg)	Pris (SEK)	Mätuppslag
Tarot T810	15	6,5	1,2	15k	
DJI S1000	15	11	7	20k	[8]
DJI Phantom 4	30	1,4	0,6	22k	[9]
Foxtech Hover 2	70	8	3	33k	
Foxtech Swan S-720	70	6,7	2,5	35k	
DJI Matrice 300	55	9	2	90k	[10]
Sony Airpeak S1	22	7	2,5	100k	
Foxtech Naga	90	8,0	2,6	106k	
Foxtech NAGA Pro	80	15	5	113k	
RHEA 160	90	25	7,7	136k	
Freefly Alta X	50	35	15,3	240k	
Thea 200MP	45	140	70	660k	
Skyranger R70	40	12	3,5	800k	
Easy Aerial Falcon	45	5,5	2,0	900k	
Easy Aerial Osprey	55	8,5	3,0	900k	
Geodrone X4L	74	6,4	2,5	N/A	[11]

* Utan last

2.3 Fast vinge

De flesta drönare som hittills används för uppdrag inom underrättelse, övervakning, målidentifiering och rekognosering (ISTAR) inom flera länders försvarsmakter bygger på fast vinge (Israel, USA, Ryssland, Tyskland, Frankrike, Turkiet etc.) [12]. De har en stor lyftkapacitet (50-250 kg), har generellt långa flygtider (2-20 timmar) och är anpassade för informationsinhämtning på hög höjd. Vissa av dessa system används även i civila applikationer. Drönare med fasta vingar har vanligtvis en eller två propellrar och förlitar

sig på att deras vingar ger lyftkraft[13]. De kan med kameror visuellt kartlägga betydligt större ytor jämfört med en multirotor (ca 10 gånger större areal)[14]. Den maximala hastigheten är 100-130 km/h för drönare presenterade i tabell 4. Dessa drönare lyfter, landar och flyger ungefär som konventionella flygplan vilket kräver plats för start och landning. Alternativet är att de skjuts iväg med en katapult vilket minskar behovet av startbana, kravet på landningsbana kvarstår dock. De flesta drönare med fast vinge är mycket lättare än multirotorer (i samma storlekssegment) och propellrarna är vanligtvis skyddade av flygkroppen, vilket gör dem mindre farliga i händelse av en kollision. På grund av detta är fasta vingar också mindre komplicerade och det finns större möjligheter att ”mjuklanda” med mindre skador till följd. Färre propellrar, vilka roterar i lägre hastighet, gör att drönare med fasta vingar är tystare jämfört med multirotorer. Den största nackdelen med den här typen av drönare är att de inte kan hovra eller göra skarpa svängar, vilket gör dem ineffektiva för vissa typer av uppdrag. I tabell 4-5 presenteras fördelar, nackdelar och egenskaper för modellen.

Tabell 4. Fördelar respektive nackdelar med drönare av modellen fast vinge.

Typ	Fördelar	Nackdelar
Fast vinge	<ul style="list-style-type: none"> • Utökad flygtid • Utökad areal som kan undersökas • Tysta 	<ul style="list-style-type: none"> • Kan endast röra sig framåt • Kan inte hovra • Dyrare än multirotor • Horisontal start och landning vilket kräver utrymme • Begränsad nyttolast • Kräver extra träning

Tabell 5. Egenskaper för ett urval av drönare av modellen fast vinge.

Typ	Flygtid (tim)*	Vingbredd (m)	Maximal startvikt (kg)	Maximal last (kg)	Pris (SEK)
Aeronautics Albatross	4	2	10	1,8	130 k
Ageagle eBee X	1,5	1,16	1,6	0,8	250k
Alevon SkyEye Delta	2,5	2,29	6,3	2	340k
Eos Strix 300	3	2,99	5	1	500k
Eos Strix 400	5	4,25	8	2,5	-

* Utan last

2.4 Hybrid - Vertical Take Off and Landing (VTOL)

Hybrid-drönare (VTOL) är en plattform som ökat i popularitet inom vissa branscher på grund av deras speciella flygegenskaper. Ambitionen med en hybrid-drönare är att kombinera det bästa av både multirotor och fast vinge i en drönare med fasta vingar som kan lyfta och landa vertikalt precis som multirotor-RPAS. Vertikal start är den största fördelen med hybrid-drönare, men de har också längre flygtider än multirotor-drönare, med typiska flygtider som sträcker sig från 60 minuter och uppåt, se tabell 6. Hybrider är dock inte lika väl lämpade för handassisterad start/landning och de har begränsningar avseende precisionsmanövrering (höjdläsflyttning och hovring). Dessutom tenderar hybrider att ha mindre nyttolastkapacitet än multirotorer. Hybrider är en kompromiss, inte lika mångsidiga som multirotorer, men de har bättre flygtider, minimalt utrymme behövs för start, men flyguthålligheten är mindre än för en konventionell fast-vinge. I tabell 6-7 presenteras fördelar, nackdelar och egenskaper för modellen.

Tabell 6. Fördelar respektive nackdelar med drönare av modellen VTOL.

Typ	Fördelar	Nackdelar
VTOL	<ul style="list-style-type: none"> • Utökad flygtid • Utökad areal som kan undersökas • Vertikal start och landning 	<ul style="list-style-type: none"> • Dyrare än multirotor • Större och svårare att transportera än multirotor • Begränsad nyttolast • Begränsad förmåga att hovra

Tabell 7. Egenskaper för ett urval av drönare av modellen VTOL.

Typ	Flygtid (tim)*	Vingbredd (m)	Maximal startvikt (kg)	Maximal last (kg)	Pris (SEK)
Foxtech Loong 170	1,5	1,7	4,5	1	39k
Foxtech Loong 2160	1,5	2,2	8	0,8	24k
Foxtech Pegasus 230	1,8	2,3	8	1	60k
Foxtech Baby Shark 260	2,5	2,5	13	1,6	107k
SkyeEye Sierra	3	3,1	12,5	3	460k
SkyeEye Tango	2,5	3	19	5	N/A
JOUAV CW-007	1	2,2	6,8	0,8	N/A

* Utan last

2.5 Sensorintegrering och drönaren som plattform

Den avgörande skillnaden mot traditionella radiostyrda farkoster, där en fjärrpilot direktstyr motorer och vingklaffar, är att drönare har en stor grad av självreglering i sin flygförmåga. Med hjälp av en elektronisk styrenhet och integrerade rörelse- och positionssensorer finjusteras styrsignalerna från fjärrpiloten, och drönaren kan själv kompensera för fluktuerande vind, undvika kollisioner, och hålla sin position.

Vid kombination av drönare och CBRN-sensor behöver avvägningar göras vid design av mätsystemet, beroende på vilken mätstrategi man valt. Centrala grundparametrar är sensorns responstid, vikt, framdrivningsteknik och systemkostnad. Kort responstid hos sensorn är viktigt vid användande av fastvinge-drönare, som kräver en minimi-hastighet för sin framdrivning (40-60 km/h för drönarna presenterade i tabell 4 och 6). Här får en avvägning göras mellan räckvidd och spatial upplösning av mätdata. Multirotor-drönare, å andra sidan, ger en betydligt större flexibilitet i detta avseende och säkrare data kan fås med längre mättider. Här finns även möjligheten att stanna upp och samla mätvärden från en position i rummet, antingen genom hovrande i luften eller genom att landa tillfälligt. Drönarens framdrivningsmetod kan i sig komma att påverka en mätning negativt, t.ex. i kombinationen C-sensor och avgaser från en förbränningsmotor.

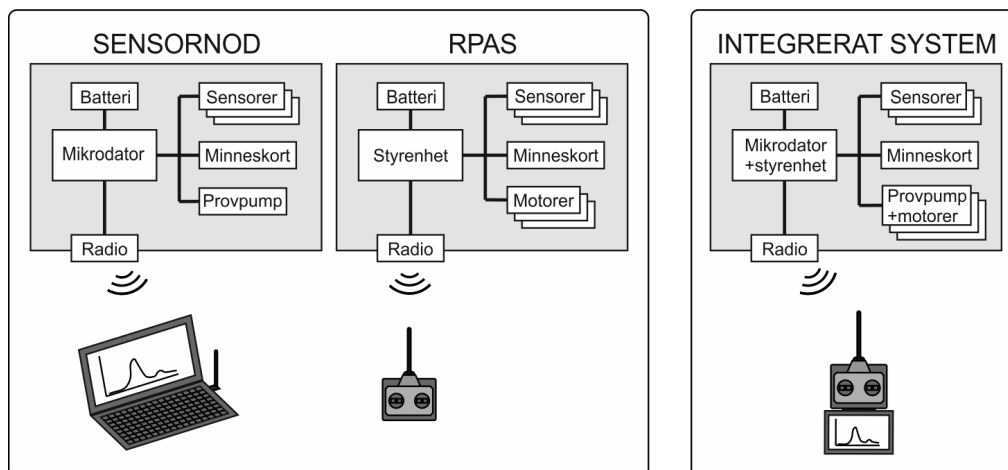
2.6 Grad av integrering

Det finns ännu inga standardiserade gränssnitt för sensorintegrering på drönare – varken elektroniskt, mjukvarumässigt eller med avseende på radiokommunikation.

Vad sensorintegrering på drönare innebär är heller inte entydigt. I sin allra enklaste form kan det innebära att man hänger på en kommersiell handburen detektor, som loggar mätvärden lokalt under flyguppdraget för att analyseras och utvärderas i ett senare skede.

Nästa nivå är att integrera sensorn i en sensornod, bestående av mikrodator, radiomodul och eget batteri[15, 16]. De flesta handburna mätinstrument inom CBRN-området har standardiserade dataportar kompatibla för detta, liksom uttag för extern strömförsörjning. Sensornoden hanterar då all instrumentering samt bearbetar, paketerar och lagrar mätdata,

som kan avläsas från en markstation över radiolänken. Detta är en förutsättning för att kunna presentera realtidsdata från detektorn för en operatör eller ett centralt datainsamlingssystem, och även för att kunna fjärrinitiera start och stopp av en ansluten provtagare. Det finns kommersiella sensorer byggda enligt denna modell[11], och litteraturen beskriver många enklare sådana prototypsystem som använt drönare som plattform, främst inom jordbruk och miljöövervakning[17, 18], inte sällan med fokus på låg kostnad[19]. Det finns även exempel på sådana system inom CBRN-fältet, där enklare miniatyrsensorer för similiämnen använts med små mikrodrönare[20].



Figur 2: Schematisk representation av två vanliga sensorintegreringsmodeller – till vänster en plattformsoberoende variant, och till höger ett mätsystem helt integrerat med drönaren.

I den högsta graden av inbyggnad är sensorerna integrerade med själva drönaren med avseende på datahantering, strömförsörjning, kommunikation och dataöverföring (telemetri). I kommersiella system (FLIR MUVE R430, UAV Flying Laboratory, etc.) utnyttjas i regel drönarens handkontroll samt batteri, mikrodator och radiolänk för telemetri på detta sätt. Ansatsen medför reducerad vikt och färre komponenter, men minskar också flexibiliteten genom att mätsystemet blir knutet till en viss tillverkare. Systemen kan utgå från mätceller från konventionella handburna sensorer, men där display, tryckknappar, anslutningar och liknande avlägsnats för att reducera storlek, vikt och effektuttag.

Systemen kan antingen vara byggda på en fast sensorkonfiguration, eller ett modulärt system där sensorerna är utbytbara och dockas fast i drönaren via ett generiskt elektromekaniskt gränssnitt. Med ett egenutvecklat system, har användaren full kontroll över konfigureringsmöjligheter, protokoll och sensorutbyggnad. Detta är inte självklart vid användning av ett kommersiellt system där fördelarna istället finns i form av produktsupport.

2.7 Placering av sensorenhet

Det finns vissa givna begränsningar och utmaningar i att ha drönare som plattform för ett mätuppdrag. Placeringen av en extern sensor får naturligtvis inte skymma eller i övrigt ha negativ inverkan på drönarens inbyggda positionssensorer. Beroende på val av sensorplacering kommer också drönarens tyngdpunkt att förskjutas i någon utsträckning, vilket kan ge en negativ påverkan på flygegenskaper och stabilitet. Detta är något som måste utvärderas grundligt vid val av plattform.

Plattformen kan också inverka menligt på sensorn/provtagaren på andra sätt. För multirotor-drönare behöver till exempel hänsyn tas till den spåeffekt som rotorbladen inducerar i form av så kallad *downwash*. Effekten innebär att luftmassan i drönarens

omedelbara närhet omfördelas, med ett betydande nedåtriktad luftflöde under drönaren som resultat. Det är vanligt att man med miniatyrypumpar driver ett provflöde, med luftintag antingen i horisontal, t.ex. Scentroide DR2000 och FLIR MUVE C360, eller från en lång hängande slang, för att komma förbi problematiken med *downwash*[20].

Vind- och turbulensbeteendet kring drönare varierar mellan modeller, och behöver karaktäriseras för vald drönarmodell genom datorstödd modellering och/eller experimentella försök. Sensors optimala orientering kan också behöva utvärderas, för att minimera störningar från denna specifika vindmiljö.

2.8 Summering

Det finns begränsningar i nuvarande system. Utifrån flygtider, nyttolast och hastighet från en typisk multirotor drönare kan ungefär en yta motsvarande en fotbollsplan på 1 km avstånd undersökas med en sensor med 20 meters upplösning (15 punkter à 30 sekunders hovrande). Med inplanerade batteribyten kan flygtiden förlängas. För mätuppdrag med behov av betydligt större areatäckning kan vingförsedda RPAS övervägas, men då på bekostnad av lyftkapacitet och större krav på effektiva sensorer med korta responstider. Här kan areor på flera kvadratkilometer vara aktuella. Det är således svårt att välja en drönarklass som är optimal för samtliga CBRN-sensoruppdrag. Krav på nyttolast och möjlighet att hovra gör emellertid att multirotor är att föredra om man vill begränsa till en gemensam plattform.

Oavsett uppdrag kommer det vara intressant att bevaka utvecklingen av batterier och alternativa framdrivningssystem, såsom bränsleceller. Man behöver också göra ett val mellan ett obundet respektive ett helt integrerat system. Ett obundet system med fristående sensornoder ger flexibilitet genom möjlighet att enkelt kunna byta drönarplattform eller sensorer i takt med teknikutvecklingen. Nackdelen med ett obundet system är att strömförsörjning och kommunikation både måste finnas för sensornoder och drönarplattform, vilket gör att systemet blir något större och tyngre. En helt integrerad lösning blir antingen låst till en teknisk lösning som erbjuds av en tillverkare av ett färdigt system, eller också krävs en relativt stor utvecklingskostnad. Den totala kostnaden för systemet kan också vara avgörande faktorer både avseende uppskalning men också, i CBRN-sammanhang, möjligheten att välja en destruerande saneringsmetod.

3 Drönare med C-indikeringsförmåga

3.1 Historia och bakgrund

I ett historiskt perspektiv finns flera fall beskrivna där kemiska ämnens toxiska, retande och irriterande egenskaper har utnyttjats för att vinna fördelar vid krigföring och försvar [21, 22]. Användningen under första världskriget saknar dock fortfarande motstycke i termer av antal attacker, använda mängder och således också antal skadade och dödade. Under mellankrigstiden och det kalla kriget utvecklade stormakterna C-vapenprogram med stora lager av kemiska stridsmedel som skulle kunna användas i konventionella granater och bomber. Enligt de doktriner som var kända skulle dessa ämnen användas för att bekämpa fienden utan att förstöra viktig infrastruktur, såsom hamnar och flygfält eller med syfte att begränsa fiendens möjlighet att röra sig. Den då militärt drivna forskningen ledde inte bara till utvecklandet av nya ämnen med högre toxicitet, längre kvarliggningstider och vapensystem med effektivare spridning, utan ledde också fram till framtagandet av motåtgärder såsom skydd (andningsfilter och skyddskläder), medicinska motmedel och tekniker för detektion och upptäckt[22-24]. Idag har i stort sett alla länder ratificerat kemvapenkonventionen[25] som innebär ett förbud för användning av kemiska stridsmedel i krig.

3.2 Kemiska stridsmedel och relaterade ämnen

Organisationen för förbud mot kemiska vapen, OPCW (Organisation for the Prohibition of Chemical Weapons)[25], har upprättat listor i kemvapenkonventionen över särskilt toxiska ämnen och deras prekursorer (ursprungsämnen), som dels klassas som kemiska stridsmedel och/eller är förbjudna att använda, tillverka, lagra samt överföra. Dessa ämnen delas ofta in i kategorier efter deras verkan såsom nervgifter (t.ex. sarin, VX), blodagens (t.ex. vätecyanid), hudskadande (t.ex. senapsgas), kvävande (t.ex. fosgen), tårgaser (t.ex. CS), inkapaciterande (t.ex. BZ, fentanyl) och kräkämnen (t.ex. adamsit). Dessa har varierande egenskaper i termer av kokpunkt, flyktighet, vattenlöslighet, stabilitet, och toxicitet. I tabell 8 ges några exempel på ämnen, med uppgifter om ångtryck, toxicitet och typiska symtom. Enligt OPCWs definition utgörs egentligen alla kemiska ämnen som avsiktligt sprids för att orsaka skada som kemiska stridsmedel, och därför finns det också intresse att övervaka andra skadliga ämnen som går under benämningen toxiska industrikemikalier, TIC (Toxic Industrial Chemicals). Dessa ämnen är inte framtagna för att användas som kemiska stridsmedel men förekommer i samhället i stora mängder och har tillräckligt toxiska egenskaper för att potentiellt kunna utgöra en risk vid ett utsläpp eller en terrorhändelse.

Tabell 8. Översiktstabell över typiska kemiska ämnen med fysikaliska och toxikologiska egenskaper.

Grupp	Vanliga ämnen	Ångtryck (Pa) @20°C	form	AEGL2 (30 min), mg/m ³	Air-MEG (Significant 10 min) mg/m ³	Typiska symtom
Nervgifter	Sarin (GB), VX	279, ~0,09	Vätska	0,035 0,0042	0,087 0,0072	Små pupiller, salivering, kramper, andnings-svårigheter, död
kvävande	Fosgen (CG), difosgen (DP)	162120, 1333	Gas, vätska	2,6 , saknas	1,2 (1 h), saknas	Nysning, tryck över bröst, kvävning
blod	Vätecyanid (AC) cyanklorid (CK)	98900, 133000	Gas	12	7,8 mg/m ³ (1h)	Huvudvärk, hjärtklappning, andnöd
Hud-skadande	Senapsgas (HD), kvävesenapsgas (HN-1, HN-2), lewisit (L)	15, 33, 57, 77	Vätska	0,6	0,09	Klåda, blåsor, kemisk brännskada,
Toxiska industri-kemikalier (TICs)	Klorgas Ammoniak	778800 857100	Gas	8,7 165	5.8 (1h) 54 (1h)	hosta, sveda, andnings-svårigheter
Partiklar, okänt innehåll	Luftburna fasta och vätskeformiga partiklar	noll	fast	saknas	10 (TLV-TWA, 8h)	hosta

3.3 Kemiska och fysikaliska egenskaper

Generellt behöver ett ämne vara gasformig för att detekteras med sensorer. Ur ett detektions-perspektiv är därför flyktighet och ångtryck av avgörande betydelse för vilken teknik och strategi för mätning som väljs. Ett högflyktigt ämne är initialt enklare att detektera i luft än ett lågflyktigt, som till mindre del återfinns i luftfasen. Lågflyktiga ämnen har längre kvarliggningstider och blir därmed beroende av anpassade mätstrategier för upptäckt där uppkoncentrering eller ytdetektion (indikeringspapper) används. Ämnen som är fasta eller vätskeformiga kan spridas som aerosoler, dvs. som luftburna partiklar/droppar, och dessa deponerar mot ytor i olika grad efter deras storlek men även beroende på vind och väderförhållanden. Det är svårt att förutsäga vilken koncentration i luft som uppstår vid en kemhändelse eftersom det beror ämnets fysikaliska egenskaper, utspridd mängd, hur spridningen skett/sker och på grund av miljö- och väderförhållanden. Flyktigheten (mg/m³), här definierad som den totala mängden (mg) av ett ämnes ånga i jämvikt med dess fasta eller flytande fas i 1 m³ vid en viss temperatur (ofta 25 °C), brukar användas som ett mått på ämnets förekomst och detekterbarhet i luft. En hög flyktighet är också förknippad med ett högt ångtryck vilket uttrycks i enheten Pascal (Pa) (se tabell 8).

Ett annat centralt begrepp är ämnets kemiska stabilitet. Många kemiska stridsmedel är reaktiva och kan därför ha relativt korta halveringstider i miljön (timmar till dagar) på grund av att de bryts ned av fukt, UV-ljus eller oxidation[26]. Detta, i kombination med advunsthastigheten, påverkar hur länge det går att upptäcka ett ämne efter utspridning. Gasformiga ämnen kommer att spridas, spädas och försvinna relativt snabbt om det inte är ett kontinuerligt utsläpp, medan de kemiska stridsmedel som är vätskor utgör ett hot under en längre tid.

3.4 Önskvärt detektionsintervall för C

Allvarlighetsgraden eller toxiciteten av en kemisk exponering är relaterad till dos vilket förenklat är produkten av exponeringstid och koncentration. Toxiciteten har varit grunden för framtagandet av toxikologiskt bedömda rikt- eller gränsvärden för olika

exponeringstider. Bakgrunden och syftet till dessa värden kan skilja men arbetsmiljöhänsyn, beredskapsplanering vid kemikalieolyckor och krigsscenarioer är exempel. Den amerikanska vetenskapsakademien (National Academy) har tagit fram internationellt erkända riktvärden för akuta exponeringsnivåer i tre nivåer (AEGL 1,2 och 3) som används vid beredskapsplanering. Värden finns för de flesta TIC men även för många CWA. AEGL 1-värden innebär exponeringsdoser där en allmänbefolkning förväntas uppleva milda men övergående besvär, och AEGL-2 värden motsvarar allvarliga och ofta irreversibla eller långvariga effekter som kan begränsa en persons förmåga att genomföra utrymning. De högsta värdena, AEGL-3, kan innebära livshotande eller dödliga effekter. Värden finns normalt framtagna för flera exponeringstider (10 min, 30 min, 1 h, 4 h och 8 h). För militär personal som ofta anses utgöra ett friskare eller tåligare urval av befolkningen, har amerikanska armén tagit fram militärt anpassade gränsvärden (US Air-MEGs) för många kemiska stridsmedel och flertalet TIC. Ett urval av dessa värden finns i tabell 8.

I fredstid och under arbetsmiljöliknande förhållanden förs resonemang om att 10 min AEGL 1 är lämpliga larmnivåer för nya detektorer[23] då detta anses som en tillräckligt skyddande nivå. Under mer akuta eller stridslignande scenarier kan även larmnivåer för AEGL 2 eller 3 övervägas vid kortare exponeringstider. I scenarier där kemiska stridsmedel är aktuellt är också kortvarig och enstaka exponering mest relevant.

För den här rapporten valdes därför värden baserade på AEGL 2 och 30 minuter då det är koncentrationer som ur ett taktiskt/operativt perspektiv kan krävas av en detektor som används på avstånd[23]. Nivåerna är tillräckligt låga för att skydda de flesta från allvarliga symptom under korta tidsförlopp, för att hinna ta på personlig skyddsutrustning (PSU), omgruppera eller söka skydd. Trots att AEGL- och US Air-MEG-värden inte är kompletta, helt jämförbara eller anpassade för detta syfte, utgör de en grund att utgå ifrån. Luftburna fasta och vätskeformiga partiklar kan bestå av en rad olika ämnen och det saknas generella gränsvärden för akuta effekter, men vid partikelhalter över 5 mg/m³ blir siktförhållandena sämre. För att sammanfatta ovanstående resonemang behöver den lägsta detektionsnivån vara i låga ppb-området (exempelvis. ~ 0,035 mg/m³ för sarin) och mätområdet kan behöva täcka minst fyra tiopotenser.

3.5 Sensorer och detektionstekniker

Trots en pågående och mycket omfattande forskning av nya tekniker för att mäta gasers, vätskors och partiklars förekomst i luft är de små, handburna och kommersiellt tillgängliga instrumenten baserade på ett fåtal mättekniker[27]. Förutom de allmänt förekommande kemiska sensorer som används inom industriell säkerhet, räddningstjänst och utsläppskontroll för TIC, finns det också speciellt framtagna sensorer och detektorer för kemiska stridsmedel. Den stora skillnaden mellan den första och andra kategorin är deras känslighet men även selektivitet/specifitet för just kemiska stridsmedel. Beroende på syfte med att inhämta signaler från kemiska sensorer monterade på drönare beskrivs sensorer för allmänna kemiska ämnen separat från de som är mer inriktade på kemiska stridsmedel. Avsnittet fokuserar på sensorer med tillräckligt låg vikt (< 3 kg), som har monterats på drönare, med förmåga att ge analytisk information baserad på en elektriskt mätbar signal (spänning, ström eller resistivitet) och med responstider lämpliga för realtidsövervakning (< 30 sekunder). I tabell 9 ges en översikt av förekommande mättekniker som har monterats på drönare.

3.5.1 Sensorer för kemiska ämnen i luft anpassade för drönare

Den första kategorin utgörs av de billiga kemiska sensorer som ofta är grunden för de fyrgasvarnare som används i industri och räddningstjänst för att varna om hälsofarliga atmosfärer. Här återfinns **amperometrisk gassensorer (AGS)**[28-31], **kemoresistiva sensorer baserade på metalloxider (MOX)**[32, 33], **icke-dispersiv infraröda sensorer (NDIR)**[34, 35] och **fotojonisationsdetektorer (PID)**[32, 36, 37]. För AGS kan elektrokemiska celler konstrueras så att oorganiska gaser såsom kolmonoxid, svaveldioxid, nitrösa gaser, ammoniak och svavelväte specifikt kan mätas i ppb-området. De något mindre specifika MOX-sensorerna används ofta för att generellt mäta flyktiga organiska gaser (eng. VOC) i låga ppm-områden, men selektiviteten för vissa gaser kan optimeras[38]. MOX-sensorer arbetar oftast vid höga temperaturer 200-400 °C[39]. Små NDIR-sensorer bygger på absorption av ljus från en IR-lampa (exempelvis LED) och användning av optiska filter. Många gaser kan också joniseras av en UV-lampa, vanligtvis på 10,6 eV, och detta utnyttjas i en PID där elektroner och positiva joner detekteras som en ström proportionerlig mot gaskoncentrationen.

Stora fördelar med ovanstående små och lätta sensorer (ofta i hand eller tumstorlek) är att de är effektiva (< 100 mW), är billiga i inköp (100-3000 SEK) och ofta kan detektera ett brett urval av gasformiga industrikemikalier i låga koncentrationer (ppm-nivåer)[33]. Många fungerar genom att de passivt registrerar gaser via diffusion men de kan monterats så att en pump aktivt drar provluft genom en provkammare så att mätvolymen snabbt byts ut. Selektiviteten och specificiteten varierar däremot stort beroende på sensor och gas men flertalet av teknikerna har viss respons för kemiska stridsmedel och relaterade ämnen[23, 40, 41].

I en del fall finns intresse att mäta flera gaser samtidigt och då kan många av ovanstående tekniker integreras i multigasvärmare som kan monterats på RPAS[42, 43]. Förutom de kommersiellt förekommande flergasvarnarna finns flera skräddarsydda varianter där olika sensorerna integreras med enheter och funktioner, för att samla in, processa och sända data till en operatör. Här finns flera kommersiellt tillgängliga produkter där en del har möjlighet till fjärravläsning[44]. En speciell typ av multigasvärmare som bör nämnas är s.k. elektroniska näsor, där data från flera sensorer används för att identifiera avvikande mönster och dessa har också använts på RPAS[30, 45].

Ytterligare en variant är avståndsindikering från drönaren. Miniaturiserade optiska analys-tekniker kan dra nytta av mätning av återspridd ljus från eget utsänt ljus från en inställbar ljuskälla. Den stora fördelen är att problem med lokala vindflöden (*downwash*) kan minimeras då en integrerad koncentration mäts över ett längre avstånd[36]. Detta har utprovats framförallt för att upptäcka metangasläckor i ppm-området vid industrier och oljeplattformar, med hjälp av instrument integrerade med RPAS[46-49]. I en variant där man drar nytta av känslig kavitets-avklingnings-spektroskopi kan mätområdet flyttas ned i ppb-området för att från en RPAS på avstånd mäta ca 60 meter bort[50].

3.5.2 Sensorer för kemiska stridsmedel anpassade för drönare

En av de mer känsliga teknikerna för att indikera kemiska stridsmedel med portabla instrument är **flamfotometrisk detektion (FPD)** där ämnen som exempelvis innehåller svavel, fosfor, arsenik och/eller har vissa bindningar till kväve kan mätas efter excitation i en vätagasflamma. Detta åstadkoms genom att specifika våglängder mäts, ofta på separata kanaler (med optiska filter), efter förstärkning av signalen med en fotomultiplikator. Många av de giftigaste kända kemiska stridsmedlen innehåller fosfor (nervgaser) och/eller svavel (VX, senapsgas), och vid positiv respons på någon av kanalerna erhålls en tydlig indikation om förekomst. Ämnen som inte innehåller dessa grundämnen ger inget utslag. Inledande försök har startats upp med att montera prototyper baserade på FPD (AP4C) på ett drönarsystem från Novadem[51]. Enligt muntlig uppgift från tillverkaren är vikten på

instrumentet, som inom ett par månader förväntas vara tillgänglig, under 2 kg (~1,6 kg). Teknik och en programvara för signalöverföring från RPAS till en handenhet håller också på att utvecklas och utprovas.

Ytterligare en väl beprövad teknik för indikering av kemiska stridsmedel är **jonmobilitets-spektrometri (IMS)** som bygger på att joniserade ämnen separeras i ett elektriskt fält genom en tub försörd med ett motsatt riktat gasflöde[52, 53]. Jonernas flygtid och intensitet registreras av en detektor och plottas i ett jonmobilitetsspektrum. Reaktionsgaser används för att öka selektivitet och känslighet [54]. För den här tekniken finns flera tillverkare med instrument som både är handburna och fordonsanpassade[55-57]. En del av dessa instrument väger under 0,6 kg med batteri. Det har gjorts flera försök med att montera IMS-tekniken på RPAS för mätning av similiämnen för CWA[15, 58, 59].

Slutligen har det funnits stora förväntningar på att använda en känslig detektionsteknik kallad **surface acoustic wave (SAW)**, där vibrationsförändringar i en mätbar ljudvåg på ett modifierat substrat motsvarar upptaget av en specifik gas[24, 60]. Trots stora fördelar med att de kan göras i små enheter (chipstorlek), hög selektivitet och med en låg ström-försörjning, verkar produktutvecklingen avseende mätning av kemiska stridsmedel avstannat och inga applikationer med RPAS-montering har hittats i litteraturen.

3.5.3 Mättekniker för aerosoler med hjälp av drönare

Miniatyriseringen av mättekniker baserade på optiska partikelräknare har möjliggjort mätning av aerosoler med hjälp av drönare[16, 61-64]. Optiska partikelräknare räknar antalet luftburna partiklar, oavsett kemisk sammansättning, i förutbestämda intervall vanligtvis i storleksområdet ~0,3-20 µm, och ger därmed information om aerosolens storleksfördelning. Ofta förutsätts densitet och form på partiklarna och då kan även en koncentrationsuppskattning erhållas. Några av sensorerna väger kring 100 gram med inbyggd luftflödespump.

Tabell 9. Översikt av mättekniker för kemiska ämnen och partiklar som monterats på drönare.

Sensorteknik	Ämnen	LOD, mätområde	Vikt sensor	RPAS-anpassning	Referenser	Specificitet
FPD, Flamfotometri	CWA + vissa TIC	låga ppb, ~10 ⁵	~2 kg	Påbörjat,	[23, 24, 51]	Hög för CWA
IMS, Jonrörlighet	CWA + vissa TIC	låga ppb, ~10 ³	0,5-1 kg	Påbörjat, konceptstudier	[15, 23, 24, 58, 59]	Hög för CWA + vissa TICs
AGS, Amperometrisk gas sensor	Främst olika TIC	ppm, ~10 ³	< 100 gram	Ja, lovande konceptstudier	[28-31, 65]	Hög för vissa TICs
MOX, metalloxid sensor	Främst olika TIC	ppm, ~10 ²	< 100 gram	Ja, lovande konceptstudier	[32, 33, 66]	medel
NDIR, icke-dispersiv infraröd sensor	Främst olika TIC	ppm, ~10 ²	< 100 gram	Ja, lovande konceptstudier	[34, 35, 67]	medel
PID, Fotojonisations-detektor	Generell gassensor	ppb, ~10 ⁴	< 100 gram	Ja, lovande konceptstudier	[32, 36, 37]	låg
OPC, Partikelräknare	antal partiklar, 0,3-20 µm	µg/m ³ ~ 0 - 10 ⁶ partiklar/s	~ 100 gram	Ja, lovande konceptstudier	[16, 61-64]	medel

CWA=chemical warfare agent, TIC=toxic industrial chemicals, LOD=limit of detection, RPAS=remotely piloted aircraft system

3.6 Provtagningsförmåga

Det finns en stor mängd etablerade och standardiserade tekniker för att samla in både luftburna partiklar och gaser på filter och adsorbenter genom pumpad luftprovtagning. En mer utförlig analys kan då göras på ett framskjutet fältlaboratorium eller efter provtransport till ett dedikerat laboratorium för verifikation. Avvägning står mellan nivå på batteri- och pumpkapacitet och önskad lyftförmåga och flygtid hos drönaren. Luftprovtagning på media för insamling av gas och partiklar har framgångsrikt genomförts med hjälp av RPAS[16, 68-71].

3.7 Mätmetod och mätstrategi

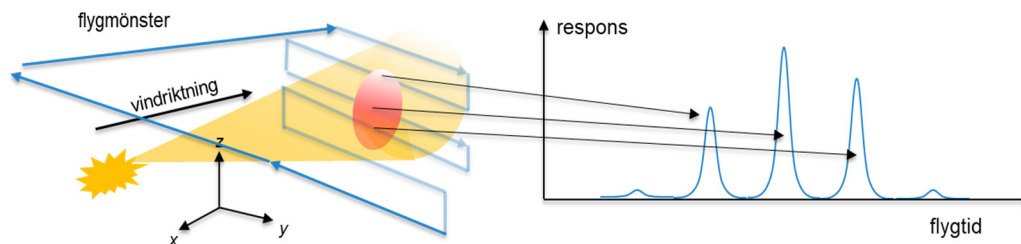
Trots att intresset för mätning av luftburna kemiska ämnen från mobila plattformar har ökat finns det ännu inte allmänt erkända eller standardiserade metoder beskrivna för detta. Detta gäller i synnerhet metoder och strategier för att mäta förekomst av CWA med hjälp av drönare, där inga studier finns öppet tillgängliga. Den ökade tillgången på rapporter och studier inom området härstammar främst från forskning och utvecklingsarbete drivet av säkerhets- och miljöhänsyn från industri, forskningsinstitut, civila företag och myndigheter[36, 70, 72]. Tack vare detta arbete har ett antal mycket viktiga faktorer relaterade till sensorplacering och mätvärdens tillförlitlighet på RPAS identifierats och studerats. Detta gäller i första hand utmaningar avseende flygtekniska, miljöspecifika och plattformsspecifika begränsningar. Det är uppenbart att sensorer och deras respons kan påverkas av vibrationer från en drönare[73] men också av de förändringar i tryck, temperatur och fukt som uppstår under mätning[72]. Vidare har den stora påverkan de lokala luftflödena (downwash) från multirotorsystem har på sensorresponsen studerats relativt flitigt[72, 74, 75]. Detta kan innebära spädning, omblandning men även koncentrerat vilket påverkar möjligheterna att upptäcka och mäta lufthalter. Detta kan delvis hanteras med smart sensorplacering, användning av provtagnings slangar och olika flygmönster.

Att övervaka områden som potentiellt har punkt- eller areakällor som emitterar C-ämnen är en uppenbar uppgift för en CBRN-grupp.

3.7.1 Metodik för övervakning av områden

I det här stycket beskrivs metoder för övervakning med drönare av civila utsläppskällor, eftersom att det saknas litteratur med avseende på kemiska stridsmedel. Vad gäller områdesövervakning (*area mapping*) med hjälp av gas-sensorförsedda RPAS finns det flera exempel där emissioner av metan från olje- och gasproduktion mäts[36, 76, 77]. Där har främst laserbaserade gasdetektorer på RPAS utprovats för att upptäcka läckage av metan.

Även om flygning i områden lä (nedströms vindriktningen) om möjliga utsläppskällor kan vara ett uppenbart första val av strategi blir den undersökta luftvolymen mycket stor. Därför bygger ett första antagandet på att spridningen sker enligt en Gaussisk modell från en utsläppskälla och en uppmätt vindriktning, vilket innebär att i ett tvärsnitt på ett visst avstånd från källan är koncentrationen högst i centrum och avtar symmetriskt på båda sidor. Ett flygmönster i ett plan vinkelrätt från en källa skulle då idealt kunna ge en detektorrespons såsom i figur 3.



Figur 3. En konceptuell bild där en RPAS med en gassensor använder ett flygmönster motsvarande ett vinkelrätt plan nedströms en utsläppskälla. En ideal detektorrespons från det röda området visas till höger i bilden.

Detta angreppssätt har använts i ett flertal studier där utsläppskällan liknar en punktkälla med kontinuerligt utsläpp [78-80], men även från mer diffusa källor såsom industri- och avfallsanläggningar [64, 81, 82]. Om källan är mer okänd, eller utgörs av en yta med diffusa utsläpp, har andra flygmönster såsom spiral- och sicksack-former föreslagits men även tredimensionella rutsystem [30, 82]. Målet med dessa flygmönster är en förväntan att öka area/volym-täckningen eller sannolikheten för att upptäcka ett utsläpp.

3.7.2 Övriga tekniker och tillvägagångssätt

Indikeringspapper för kemiska stridsmedel och nervgasbrickor förekommer på bred front inom försvarsmakten. Dessa kan i princip med enkelhet placeras ut på strategiska platser på förhand och avläsas med kamera från en drönare, med olika tidsintervall. Vidare kan de fästas på landningsställ och ge möjlighet att landa på och indikera en önskad yta. Avläsning sker då vid hemkomst och indikeringen täcker enbart enstaka punkter.

3.8 Summering C

Det stora antalet konceptstudier som publicerats där små och billiga sensorer monterats på RPAS har bidragit till att vissa områden närmar sig en acceptabel tillämpningsfas. Detta gäller exempelvis sökning och kontroll av gasläckor eller utsläpp med kontinuerliga flöden från en punkt eller yta (skorsten, rörledning, avfallsupplag). En antagonistisk C-händelse karakteriseras mest troligt av ett momentant utsläpp av en flyktig gas, vätska eller fast ämne i aerosolform. Om inte mätning sker i direkt närhet (inom ett par minuter upp till en timme) återstår att försöka detektera den luft-koncentration som uppstår från avdunstning och sublimering av ämnen i vätskeform eller fast fas. Kvarliggande ämnen i vätskefas och ämnen i fast form avdunstar sakta och genererar låga koncentrationer i fri atmosfär. För ämnen med låg flyktighet och lång kvarliggningstid finns idag få eller inga studier som visar på lovande resultat där sensorer på RPAS använts i fältmiljö. Detta är en generell begränsning avseende möjligheter till beröringsfri indikering av många kemiska stridsmedel och troligtvis en stor framtida utmaning.

Utifrån tillgängliga sensorer med relativt hög mognadsgrad ser FOI att en väg framåt är att bygga det första C-sensorkonceptet på en kombination av en kandidat för kemiska stridsmedel (IMS eller FPD) och en generell multigasmätare för toxiska industrikemikalier. Kombinationen ger utifrån dagsläget en sannolikhet att upptäcka många relevanta kemikalier i luft i ett stort koncentrationsintervall och vikten på sensorerna kan hållas relativt låg. Deras strömförsörjning är också rimlig för att ge acceptabel påverkan på flygtid.

Denna sensorkombination monterad på en idag tillgänglig RPAS kan börja användas för att genomföra nödvändig metodutveckling anpassad till Försvarsmaktens behov. Exempel på kunskapsbyggande studier är kontrollerade försök med similiämnen och toxiska industrikemikalier på avlysta övningsplatser, för framtagande av strategier och metoder för

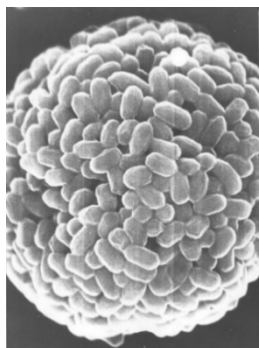
mätning. Idag är kunskapen till stor del bristfällig avseende funktion och nytta av en C-RPAS där några frågor kan formuleras:

- Hur länge behöver en CBRN-RPAS hovra över ett belagt område med simili med låg flyktighet för att erhålla detektorrespons? Avklingningstider för lågflyktiga?
- Var ska sensorn eller provintaget vara placerat utifrån luftströmmar orsakade av rotorena för deponerade ämnen med låg flyktighet? Annan metodik?
- Kan förbättrad utformning av provtagningsmunstycke minska drönarens påverkan på luftströmmarna?
- Vad är effektiviteten av att samla ytprov med RPAS? Finns det andra sätt att utforska avseende ytprovtagning?

4 Drönare med B-indikeringsförmåga

4.1 Inledning och historia

Biologiska vapen definieras som mikroorganismer såsom virus, bakterier, svampar eller toxiska substanser som produceras av levande organismer. Dessa produceras eller sprids medvetet med syfte att orsaka sjukdom och död hos människor, djur eller växtlighet. Flera historiska tillbakablickar i form av översiktsartiklar konstaterar att trots förekomst och utveckling av nationella B-vapenprogram, har dessa vapen inte förekommit i konventionell krigföring [19, 81, 82]. Tänkta offensiva metoder för effektiv spridning kan variera men hotet som avses i denna rapport är spridning i luft. Med B-vapen menas då B-aerosoler, dvs. partiklar som befinner sig svävande i luften, vilka skulle kunna detekteras i luft. I figur 4 visas en bild tagen med ett svepelektronmikroskop på en 13 µm partikel bestående av multipelt aggregerade *Bacillus atrophaeus*-sporer. När B-aerosoler deponeras på marken eller på andra ytor, krävs andra metoder för upptäckt.



Figur 4. Bild på en 13 µm aerosolpartikel bestående av *Bacillus atrophaeus*-sporer – en ofarlig släkting till mjältbrandsbakterien *Bacillus anthracis* (Antrax). SEM bild Lenore Johansson.

I princip kan alla mikroorganismer som orsakar sjukdom eller skada användas som B-vapen, men man brukar hänvisa till ett antal varianter som har funnits med i tidigare vapenprogram. Tabell 10 listar några av dem och dess karakteristiska egenskaper. Toxiner som produceras av biologiska system definieras ofta inom klassen B-vapen, men dess egenskaper påminner till vissa delar om kemiska ämnen och gör att de också i vissa sammanhang är att betrakta som ett C-vapen (exempelvis saxitoxin).

Tabell 10. Översikt av potentiella B-hot.

Grupp	Vanliga ämnen	Infektionsdos (antal organismer)	Person till person- smitta	Inkubationstid (antal <u> dagar</u> från exponering till symptom)	Dödlighet (om obehandlad)
Bakterier	Anthrax	~20000	Nej	1-6	100 %
	Brucella	~1000	Nej	5-60	5 %
	Francisella	~10	Nej	3-5	4-50 %
	Pest	~100	Ja	1-6	100 %
Virus	Smittkoppor	~10-100	Ja	4-19	30 %
	VEEV (Venezuleansk hästencephalit)	~10	Nej	2-6	<1 %
	Marburg virus	~10	Ja	2-21	23-90 %
		Toxisk dos (mängd/kg kroppsvikt som krävs för effekt)		Inkubationstid (antal <u> timmar</u> från exponering till symptom)	
Toxiner	Botulinumtoxin	0,001 µg	-	12-72	Mycket hög
	Ricin	343 µg	-	4-24	Mycket hög
	Enterotoxin B	0,03 µg	-		<1 %

4.2 Metoder för B-indikering

Att upptäcka och varna för biologiska ämnen brukar, utifrån det operativa användningssättet, delas in i indikering och identifiering/analys där indikering innebär snabb påvisning av möjliga B-hot i operativ miljö. Med identifiering/analys avses förmågan att fastställa en mer detaljerad bild över hotets art och dess eventuella ursprung. Ett vanligt begrepp är DIM (detection, identification and monitoring) som används både inom EDA (European Defence Agency) och NATO. Beroende på syfte används olika teknologier som har sina för- och nackdelar. Indikering (eng. detection) kännetecknas av ett önskemål om snabba svar, inom sekunder, och en hög grad av mobilitet. Den absolut största utmaningen med B-indikering är störande förekomst av naturliga eller icke sjukdomsframkallande biologiska aerosoler. Identifiering eller en mer avancerad analys kräver för B-agens mer resurser i form av provtagning och tidskrävande analys med genetiska metoder på mobila eller stationära laboratorier.

Oftast bygger indikeringsmetoder för B-aerosoler på fysikaliska aspekter såsom ljusspridning, fluorescens och atomemission, som ger indikation om partiklar med biologiskt ursprung. Fysikaliska metoder har den fördelen att de kan utföras snabbt och kontinuerligt, men till priset av lägre specificitet.

Ett antal operativa B-indikeringsystem finns från kommersiella tillverkare (se exempel nedan) och systemen reagerar på förekomst av biologiskt material i luften. De underliggande fysikaliska mätmetoderna, ofta spektroskopiska, ger en signal korrelerad till någon markör för biologiskt ursprung. Det kan t.ex. vara aminosyror, molekyler kopplade till biologisk metabolism, kvot mellan några relevanta grundämnen, eller proteinsammansättning. De fysikaliska mätmetoderna ger B-indikeringsystem en förmåga till kontinuerlig operativ indikering av B-ämnen i nära realtid. B-indikeringsystem fungerar bäst som ett första varningssteg om förhöjda halter tillsammans med någon form av efterföljande provtagnings- och identifieringssteg. En operatör av ett B-indikeringsinstrument behöver vara medveten om förekomst av falska positiva larm och vara observant på övriga observationer. Mer avancerade system som kan utföra en första klassificering av hotet börjar lanseras på marknaden[83] och i gynnsamma fall kan preliminär klassificering av B-hot göras. Omvänt kan ett B-indikeringsinstrument också avlasta resurser i ett identifieringssteg, om inget misstänkt indikeras i luften.

Ett antal fysikaliska principer har använts för B-indikering och nedan summeras de vanligast förekommande. Utförligare beskrivning av teknikerna finns i en samlingsbok som koordinerats av FOI[84].

4.2.1 Ljusspridning

Den enklaste formen av detektor som kan användas i B-indikerings syfte är olika former av ljusspridnings-baserade instrument. När en luftburen partikel passerar en laserstråle sprids ljuset i sidled och partiklarnas antal och storlek kan mätas med en ljussensor. Mer avancerade ljusspridningsinstrument kan även ge en bild av hur symmetriska partiklarna är. Utifrån situationen kan denna information som samlas in också ge larm vid förhöjda halter av partiklar i luften. Dock är selektiviteten mycket låg. Grundtanken är att tekniken kan se en förändring av normalläget i luftens bakgrundsinnehåll av naturliga aerosolpartiklar och på så sätt detektera en anomali. Det kan t.ex. vara upptäckt av en helt ny storleksfraktion som antyder förekomst av källor med artificiellt genererade partiklar. Denna typ av partikelräknare kan vara lämpliga att använda i ett simuleringssammanhang eller om man vill testa koncept med att bära en lätt sensor på en drönare.

4.2.2 Fluorescens och atomemission

Ett fluorescensbaserat system bygger vidare på ljusspridningsprincipen, men ljusets våglängd som belyser partikeln anpassas så att den kan inducera fluorescens i vissa

molekyler bundna till partiklarna. Det innebär att ljuset som sänds ut från partiklarna har ändrats till ett spektrum av längre våglängder. Om man då mäter det utsända (emitterade) ljuset spektroskopiskt, fluorescensresponsen, kan detta indikera aminosyror och enzymer relaterade till biologiskt material. Fluorescensbaserade instrument har därför en indirekt specificitet mot biologiska ämnen och baseras på kunskapen att icke-biologiska aerosoler ger låg respons[83]. Det B-indikeringsinstrument som sitter på CBRN-indikeringsfordonen är FLAPS (> 25 kg). MAB (14 kg), TAC-7 (4,5 kg) och IBAC1 och 2 (3,4 respektive 5,5 kg) är andra exempel på B-indikeringsinstrument, se figur 5. De är alla för tunga för att monteras på små drönare (se kapitel 2). Ett exempel på ett system anpassat för drönare är MUVE B330 från FLIR med en vikt på 1,6 kg, vilket också visas i figur 5.



Figur 5. Exempel på fluorescensbaserade instrument (från vänster): IBAC-2 (5,5 kg), IBAC-1 (3,4 kg) och ett ompaketerat fluorescensbaserat instrument (MUVE B330, 1,6 kg) anpassat för RPAS (alla från Teledyne FLIR). Ett instrument baserat flamemissionspektrometri från Proengin, MAB (Moniteur Alarme Biologique), vikt 14 kg.

Även om fluorescensbaserade system är mer specifika än partikelräknare ger de fortfarande en hög grad av falska positiva larm på grund av förekomst av ett stort antal naturligt förekommande biologiska ämnen i luften. Den spektroskopiska skillnaden mellan en farlig patogen bakterie och en ofarlig nära släkting är liten. Fluorescensbaserade system kan byggas relativt små men är beroende av kraftiga ljuskällor (laser) och känslig optik.

Atomemission bygger på principen att partiklarna upphettas så att elektroner exciteras i atomerna varefter ljus med specifika våglängder emitteras. Spektrumet för det utsända ljuset ger information om vilka grundämnen som finns i provet. Det kan ske genom en het låga, t.ex. en brinnande syre/vätgaslåga, eller genom en fokuserad kraftig laser. En spektrometer mäter det utsända ljuset och kan ge en uppfattning om halten av några utvalda grundämnen, ex. vis. Na, K, och Ca[85]. Olika mikroorganismer kan ha olika kvoter eller förhållanden mellan de uppmätta grundämnena, vilket ger en viss indikation på förekomst av biologiskt material[83]. Exempel på instrument är MAB från Proengin som använder samma mätprincip som instrument för kemisk indikering.

Gemensamt för fluorescens- och emissionsbaserade detektorer är att de i de nuvarande markbaserade systemen har ett viktspann på 4-10 kg (som *stand-alone*-instrument med ev. batteri) samt funktionella detektionsgränser på ca 100 biologiska partiklar per liter luft.

4.2.3 Provtagning

Även om det i dag finns tekniker som möjliggör en viss B-indikeringsförmåga på drönare är kanske den lättaste vägen framåt för att skapa en B-förmåga att utrusta en drönare med en partikelprovtagare med efterföljande analys[86]. Principen för en provtagare är att genom aktiv pumpning eller genom passiva luftströmmar samla in partiklar på en filteryta eller i en vätska. Provtagare kan i många fall göras väldigt små och lätta genom miniatyrypumpar och filterhållare[16]. Mer avancerade provtagare kan utrustas med flödesmätning och högre pumpkapacitet[87].

4.2.4 Analysmetoder kopplade till insamlat prov

Efter provtagning av aerosoler finns ett antal fältanalysmetoder som kan ge en större grad av säkerhet i huruvida provet består av biologiskt innehåll. Här kan nämnas masspektrometri, ramanspektroskopi och biosensorer. I dagsläget har de alla antingen en alltför lång analysid, hög vikt eller är i behov av så stor provmängd att de inte bedöms kunna ge en ändamålsenlig integrering på en mindre CBRN-RPAS. Som mättekniker för fältanalys eller i framskjutet laboratorium har de större potential. Masspektrometri kan ge hög grad av molekylär och strukturell information av provets komponenter[88]. Ramanspektrometri är en spektroskopisk teknik som kan ge kompletterande information om provets innehåll av biologiskt material[89]. Biosensorer är ett samlingsnamn för system som använder ett biologiskt igenkänningslager som är placerat på en yta av en fysikalisk sensor som kan avläsa om något binder in till det biologiska systemet. Ett exempel är antikroppar som binder selektivt till utvalda mikroorganismer. När inbindning sker uppstår en fysikalisk förändring som kan mätas. Andra exempel på igenkännande biosystem är enzymer, hela celler, aptamerer eller DNA-segment[90]. Biosensorsystem kräver normalt att provet först insamlas i en vätska som får flöda över sensorytan.

4.3 Tillämpningar B-indikeringsinstrument i samband med drönare

Litteratursökningar med kombinationen ”UAV/UAS” och ”aerosoler”, ger framför allt träffar på beskrivna system för miljöövervakning. Ofta är det mätningar av olika partikelstorleksfraktioner PM_{2.5}, PM₁₀ eller ultrafina partiklar (< 100 nm) som kopplas till olika typer av fenomen (iskristallbildning, molndroppar) eller olika hälsorisker. De sensorer som finns beskrivna är olika typer av partikelräknare som enbart kan analysera partiklar utifrån antal och storlek och inte ge information om biologiskt innehåll[91]. Om det också är ”biologiska” aerosoler som ska mätas, är merparten fortfarande inom miljöområdet, där man t.ex. samlar in aerosolprover ovanför vattentäcker[92], eller övervakning av algblooming[93]. Antalet publikationer som beskriver B-tillämpningar är inte frekventa, men de förekommer. En av de tidigaste publikationerna inom området är från 1999 [94] där en provtagare samlar prov till ett biosensorsystem som placerats i drönare av typen fast vinge.

I det översiktmaterial som insamlats omnämns de normalt markbaserade B-indikeringsinstrument och provtagare som har en rimlig vikt, som möjliga kandidater att montera på drönare även om det inte beskrivs i faktiska försök.

4.4 Summering B

En stor osäkerhet avseende B-indikeringsinstrument på drönare är att det saknas studier och rapporter som kan ge tillräckligt stöd för en analys av området. Det är därför svårt att bedöma potential, lämpliga mätstrategier och användbar utvärderingsmetodik. B-

indikeringsinstrument har inte använts i stor skala inom försvarsmakten eller civila samhället och de faktiska användningsområdena är inte fullt undersökta. En B-aerosol är enbart mätbar då den befinner sig som en aerosol i luften. Vind och turbulens kan snabbt föra ett aerosolmoln vidare och deponerade partiklar fångas inte upp annat än genom ytprovtagning. Det betyder att en drönare måste träffa av aerosolmolnet, som dessutom mest troligt är helt osynligt för blotta ögat. Mättekniker med större säkerhet att indikera aerosol med biologiskt innehåll (idag fluorescens och atomemission) är alla möjliga, speciellt efter ompaketering, att använda för den kategorin mindre drönare som den här rapporten fokuserat på. Den realistiska strategin är att använda drönare för visuell informationsinhämtning eventuellt kombinerat med enklare ospecifika partikelräknare och provtagning.

5 Drönare med RN-detektionsförmåga

5.1 Bakgrund och historia

Förutom utsläpp av radioaktivitet från kärnvapen har det skett händelser med större utsläpp av radioaktivitet vid två kärnkraftsolyckor. Det finns så här långt endast två fall där kärnvapen faktiskt har använts, förutom vid provsprängningar, och det är över Hiroshima och Nagasaki i slutskedet av andra världskriget. Omvärldsläget pekar dock mot en ökad hotbild avseende nukleära hot[3]. Eftersom radioaktivitet är omöjligt att upptäcka med mänskliga sinnen är man helt beroende av instrument/sensorer för att detektera förekomsten. Utvecklingen av instrument har under de senaste åren främst skett på handinstrument. Många handburna varianter av det som kallas Radioisotope Identification Device (RIID) har dykt upp på marknaden. I kombination med obemannade farkoster kan sådana system både söka, kartlägga och i viss utsträckning identifiera joniserande strålning.

Obemannade farkoster, både flygande och landbaserade, för mätningar av joniserande strålning finns beskrivna i ett flertal rapporter.

5.2 Taktisk och möjlig praktisk användning av CBRN-RPAS

Vid en kärnenergiolycka eller vid en kärnvapenexplosion kan det lokalt bli stora områden med markkontaminering av radioaktiva ämnen. I dessa områden kan strålningsnivåerna vara så höga att den erhållna dosen överskrider nivåer där det är lämpligt att skicka in personal. Den tillåtna nivån för räddningsarbetare i radiologiska nödsituationer ska så långt det är möjligt hållas under 20 mSv[95] även om man i livräddande situationer, eller för att förhindra katastrofartade förhållanden, kan medge upp till 500 mSv i stråldos. Även i situationer där civila lagar inte tillämpas kan 500 mSv vara en högsta stråldos att hålla sig under, då ett överskridande medför risk för akuta strålningsrelaterade skador. En obemannad farkost, som t.ex. en drönare, med förmåga att detektera och även analysera ett radioaktivt nedfall ger möjligheter att kartlägga områden med höga strålningsnivåer och även områden som är svårtillgängliga för människor av andra anledningar, t.ex. i oländig terräng, ras- eller brandhärjade områden. I områden med rasmassor och halvraserade byggnader kan det vara stora variationer i dosratsnivåer p.g.a. skärmning av strålkällan, vilket ytterligare ökar riskerna för höga stråldoser. För denna situation kan en första kartläggning med hjälp av obemannade farkoster vara en effektiv första åtgärd för att identifiera sådana risker. Även vid situationer med radioaktivitet i luft kan obemannade farkoster vara ett sätt att avgöra vilken koncentration och aktivitetsfördelning som råder i plymen, utan att dosbelastning behöver ske till piloter/operatörer.

Vid en militär operation blir möjligheterna att skicka en drönare med RN-sensorer på spaning eller rekognoscering framför trupp ett tydligt användningsområde. Det bidrar till att hitta vägar med mindre beläggning, eventuellt heta områden, platser man bör undvika samt identifiera utrymmen som skulle kunna utgöra ett skydd från joniserande strålning. Detta utan att utsätta personal för onödiga stråldoser.

5.3 RN-sensorer

Definitionen av joniserande strålning är att det är strålning som växelverkar med omgivande materia genom att slå ut elektroner och därmed göra om atomer i materia till joner. För att mäta joniserande strålning krävs instrument (RN-sensorer) eftersom den inte går att upptäcka med mänskliga sinnen. Generellt brukar man prata om fyra olika strålslag: alfa-, beta-, gamma- och neutronstrålning. De är olika i sin fysikaliska natur vilket

påverkar hur de kan mätas och vilken information som kan erhållas vid mätning. Utan att ta ett prov och skicka till ett laboratorium för analys kan alfa- och betastrålning inte identifieras i fält. För alfastrålning gäller också att även indikering är svår då strålningen bara har enstaka centimeters räckvidd i luft. Betastrålning har längre räckvidd men sällan längre än några meter i samma medium. Gammastrålningen har avsevärt längre räckvidd med detektionsmöjlighet på tiotals, eller upp till hundratals meter beroende på aktivitet. Med vissa instrument kan också energin hos gammastrålningen avgöras vilket medger möjlighet till identifiering. Även neutronstrålning är möjlig att detektera på avstånd men det går inte att identifiera vilket ämne som sänder ut neutronstrålningen. På forskningsnivå har det också visats att det går att detektera jonisation av omgivande luft runt radioaktiva ämnen på långt håll (upp till kilometer) med radiovågor, men det är inga tekniker som idag finns kommersiellt tillgängliga[96]. Det finns idag en del olika tekniska lösningar för strålningsdetektion. En typ av instrument påvisar att det finns förhöjda nivåer av joniserande strålning och registrerar intensiteten av denna i omgivningen. Andra instrument ger information om vilken dos- eller dosrat (doshastighet) som den joniserande strålningen ger. Slutligen finns instrument som i fält kan ge information om den inkommande gammastrålningens energi, vilket skapar en bild av vilket eller vilka ämnen som genererar denna strålning. Förmågan hos olika tekniska lösningar varierar. För skydd av människa, då stråldos från externstrålning är den viktiga parametern, finns idag detektions- och mätinstrument som kan upptäcka, för Försvarsmakten, relevanta dosnivåer med korta responstider (sekunder).

Således är det av vikt att bestämma vilket behov som finns av förmåga och hur den tänkta användningen ska ske. Storleken på en RN-sensor är sällan en begränsande faktor för användning på drönare och det kan till och med vara en fördel att ha en liten sensor, i de fall där det är hög strålningsintensitet.

Det finns många exempel på små detektorer som går att anpassa för montering på drönare, t.ex. CdZnTe-detektorer från KROMEK (halvledardetektor)[97], SPIR-explorerer från MIRION (scintillationsdetektor), GAMON Drone från CAENSyS (scintillationsdetektor) eller NuEM DRONES G (moduler med GM-rör eller scintillationsdetektor)

Vid en mätning, oavsett om dosraten eller aktivitetskoncentrationen ska mätas, krävs en kalibrering av detektorsystemet. En sådan kalibrering beror flera faktorer, förutom på effektiviteten hos detektorsystemet även på flyghöjd, topografi, fördelning av aktivitet på eller i mark. En genomgång av principerna för kalibrering av detektorsystem för flygmätningar återfinns i IAEA Techdoc 323[98]. Generellt kan sägas att detektorsystem kan kalibreras med hjälp av strålkällor på mark men idag finns också möjligheten att kalibrera med statistiska Monte Carlo metoder[99-101]. Då sker kalibrering genom att mäta dosraten vid mark och på aktuell flyghöjd, kombinerat med spektrala mätningar av bakgrunden.

Förhållandet mellan faktisk aktivitetskoncentration vid mark och uppmätt värde ovan mark kommer att förändras över tid efter ett nedfall, eftersom aktiviteten successivt omfördelas. Detta kräver antingen en omkalibrering av systemet, eller användande av verifierade metoder/modeller som, åtminstone till del, korrigerar för detta.

5.3.1 Gasfyllda detektorer

För att mäta strålningsintensitet används idag ofta gasfyllda detektorer, t.ex. GM-rör. De är enkla, robusta instrument och relativt billiga att tillverka och storleken kan lätt anpassas för drönare. Försvarsmaktens intensimetrar bygger på den principen (t.ex. I-27, I-28). Denna typ av instrument ger dock ingen information om energin hos den infallande strålningen.

5.3.2 Halvledardetektorer

Vill man ha förmåga att, förutom att mäta strålningsintensitet och dos/dosrat, även få möjlighet till identifiering av vilket radioaktivt ämne det rör sig om, krävs spektrala data.

De idag vanligaste teknikerna för det ändamålet är byggda på antingen scintillation eller halvledarteknik. Halvledardetektorer baserade på germaniumkristaller (HPGe) är idag ”state of the art”. Upplösningen på spektrumet är hög vilket gör att man i princip kan göra korrekta identifieringar av alla förekommande gammastrålande nuklider. En nackdel är att germaniumdetektorer måste kylas till låga temperaturer (-170 °C) för att fungera. Detta innebär att systemen blir tyngre och de väger i de flesta fall några kilo. Det har de senaste åren kommit nya halvledarmaterial som inte kräver kylning. Ett exempel är CdZnTe-detektorer. Dessa detektorer är ofta små, enstaka cm³, även om det har börjat komma större modeller. Dock är deras spektrala förmåga (energiupplösning) inte lika bra som för en germaniumdetektor, men förmågan är bättre än för en scintillationsdetektor. CdZnTe-kristaller finns både som små detektorer för olika tillämpningar och i handburna RIID, och passar utmärkt att använda tillsammans med drönare. Det finns kommersiellt tillgängliga färdiga system med CdZnTe-detektorer, både för drönare och UGV (unmanned ground vehicle).

5.3.3 Scintillationsdetektorer

De vanligast förekommande scintillationsdetektorerna är baserade på NaI-kristaller. De finns i storlekar från enstaka cm³ upp till flera dm³. För drönerapplikationer passar de mindre givetvis bättre. En nackdel med scintillationsdetektorer i allmänhet är att upplösningen är begränsad. Det finns risk för att man missar toppar i spektrumet p.g.a. överlapp eller bakgrundsbrus. Fördelarna med NaI-detektorer är att de är relativt billiga och fungerar bra i ett brett temperaturområde. Många företag marknadsför handburna RIIDs med NaI-kristaller som kan placeras på en drönare. System med scintillationsdetektorer används ofta i handburna instrument, tillsammans med algoritmer, för att tillåta automatisk utvärdering av spektra och identifiering av radionuklider. Generellt kan sägas att detta fungerar bra så länge det inte är för många radionuklider. Det finns även scintillationsdetektorer baserade på CsI eller LaBr-kristaller men skillnaderna i mätformåga mot NaI är marginella.

5.3.4 Neutrondetektorer

För att kunna detektera klyvbara ämnen kan det vara en stor fördel om man även kan mäta neutroner. Normalt sett behövs det ytterligare en sensor för att göra det. Det är relativt vanligt med ett He³-rör för den funktionen. Men nya typer av scintillationsdetektor som kommit på senare tid kan även detektera neutroner. Kristallen i dessa material är LaBrCl (LBC) eller CsLaLiBrCl (CLLBC).

5.4 Provtagning

Provtagning av radioaktiva ämnen kan behöva göras, t.ex. i de fall man misstänker alfa- eller betastrålande ämnen, eftersom de är svåra att detektera på avstånd. Provtagning av radioaktiva ämnen går ofta att göra på samma sätt som för B- eller C-aerosoler, genom insamling av partiklar på ett filter. Specifikt för luftprovtagning lämpar sig drönare väl då de kan flyga rakt genom plymen och provta utan att det riskerar stråldos till personal. Även någon form av markprovtagning kan kanske genomföras. Men för den senare applikationen krävs sannolikt att farkosten landar vilket ger en ökad risk för kontamination av drönare och detektorer.

5.5 Tillämpningar RN

Drönarsystem för mätning och kartläggning av joniserande strålning har redan utvecklats och testats skarpt för olika användningsområden. Dessa kan indelas i fyra kategorier:

5.5.1 Kartläggning av dosrat

Studier för att kartlägga av dosrat (doshastighet) i syfte att skapa en bild av stråldosnivå och variationer av denna över ytor är en tänkbar rekognoseringsuppgift. Sådana insatser sker dels för att undersöka om det finns stråldoser som innebär risk för personal att befinna sig i området. Andra aspekter är att söka genomfarts- eller evakueringsvägar, eller att hitta lämpliga områden för t.ex. upprättande av lägerplats eller platser som erbjuder strålskydd. För dosratsmätningar kan enklare gasfyllda detektorer räcka om dosraten är tillräckligt hög, men också scintillationsdetektorer är testade för att flyga med. Vid ett test flögs tre olika scintillationsdetektorer, monterade på en större drönare över ett fält för att bestämma koncentrationen av naturliga radionuklider[102, 103]. Resultatet från sådana mätningar kan också räknas om för att motsvara dosrat. Sanada et.al mätte dosrat och koncentration av Cs-137 med hjälp av en obemannad flygande helikopter runt Fukushima[103]. Även där användes scintillationsdetektorer och ytor upp emot 30 km² kunde mätas. Scintillationsdetektorer skulle dock ha för dålig energiupplösning vid ett färskt nedfall från ett kärnvapen eller en olycka i ett kärnkraftverk. Vid kartläggning av radioaktiva belägningsfält krävs system där flygrutter kan automatiseras. IAEA har tagit fram en modell för kartläggning av radioaktivt nedfall som testats skarpt i Fukushima[104]

5.5.2 Sökning efter lokala platser/strålkällor med joniserande strålning

Här kan detektorer som har högre effektivitet behövas, exempelvis halvledardetektorer eller scintillationsdetektorer. Även här finns försök gjorda med scintillationsdetektorer tillsammans med drönare[105, 106]. Resultaten visar på att systemen går att använda för att söka och hitta punktkällor, även om flyghöjden måste begränsas till enstaka meter. Det finns också exempel på system som går att använda inne i byggnader (t.ex. kärnkraftverk). Här kan system behövas som har högre grad av intelligens än bara att flyga bestämda rutter. Systemen kan på egen hand behöva söka upp och bestämma läget och nivån på hotspots[107].

5.5.3 Lägesbestämning, identifiering och kvantifiering av enskilda radionuklider genom spektrometriska mätningar

Detta användningsområde kan vara av intresse såväl vid kartläggning av ytor som vid identifiering av lokalt förekommande strålintensiteter (strålkällor). Här behövs detektorer som ger hög upplösning av energifördelningen hos den joniserande strålningen, t.ex. HPGe-detektorer. Mindre HPGe-detektorer finns utvecklade som är möjliga att flyga med drönare som har kapacitet att lyfta upp mot 10 kg. Lakovlevs et.al.[108] använde två olika system med HPGe-detektorer, en kyld med Stirling-teknik och en mer traditionellt fylld med flytande kväve. De visade att båda systemen fungerar att använda med kommersiellt tillgängliga drönare. För mätningar med system med högre energiupplösning ställs också krav på nivån av vibrationer hos bärare och om källan ska kvantifieras krävs dessutom tillförlitliga data gällande avstånd mellan källa och detektor.

5.5.4 Provtagning

I första hand avses här luftprovtagning. Utrustningen kan utgöras av en passiv provtagare som beskrivs i två artiklar av Pöllönän et.al.[109, 110], eller en provtagare utrustad med pump[111]. Annan provtagning, som t.ex. vattenprovtagning, finns framtaget för annat än radioaktiva ämnen[112], men fungerar även för att kontrollera radioaktiv kontamination t.ex. i sjöar.

5.6 Scenariobaserat RN-exempel

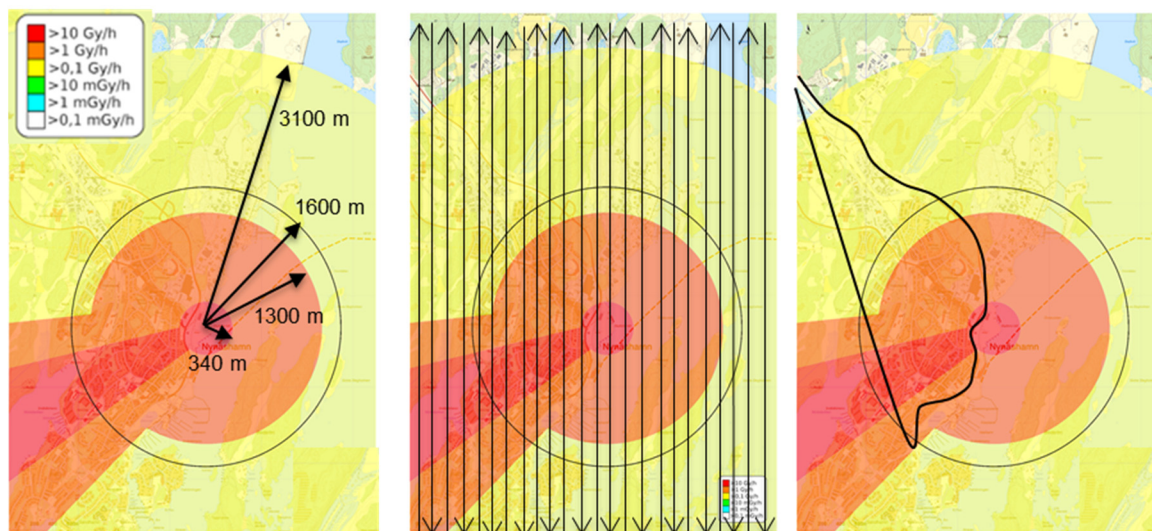
Som exempel har två olika fall av användning av drönare för mätning av ett radioaktivt belägningsfält, beskrivits nedan. Dessa baseras på ett scenario som tidigare finns beskrivet [113] där ett 100 kilotons kärnvapen exploderar i Nynäshamn (markexplosion). I figur 6A åskådliggörs den beräknade dosraten i området en timme efter explosion.

Två tänkbara uppgifter har identifierats: 1) kartlägga nivå och fördelning av dosraten i området (figur 6B) eller 2) rekognosera om en tänkt marschväg går att använda (figur 6C). Den svarta ringen (radie 1600 m) motsvarar nivån 0,5 Gy/h.

I det första fallet är syftet att kartlägga dosraten inom området för att undersöka fördelning och dosratsnivå orsakad av den radioaktiva markbeläggningen, samt eventuella möjligheter till lägerplats, gruppering eller marsch på bred front. En systematisk kartläggning över området med 26 flyglinjer (200 m mellanrum) ger en ungefärlig total flygsträcka på ca 140 km.

I det andra exemplet har en möjlig marschväg valts, men inför passage behöver dosraten uppmätas. Detta med syfte att uppskatta vilken dosrat som gäller på vägen och vilken dos denna skulle generera till gruppen vid en eventuell passage. Här blir den totala flygsträckan ca 10 km.

För båda scenarierna kommer ett enkelt GM-rör eller scinitillationsdetektor med insamlingsfrekvens av 0,2 Hz (var femte sekund) möta mätbehovet. Instrumentet kommer heller inte behöva väga mer än 0,5 kg exklusive teknik för dataöverföring. Den stora skillnaden mellan scenarierna återspeglar sig i behovet av plattform, där en betydligt snabbare och energieffektivare drönare kommer vara nödvändig i det första exemplet. Med genomsnittliga marschfarter och flygtider (100-150 km/h uppemot 2 h) kommer enbart vingförsedda drönare vara ett realistiskt val (se kapitel 2). Däremot kan en multirotor fungera väl för det andra exemplet, där en marschhastighet på 50 km/h ger en flygtid på 12 minuter, vilket är väl inom dess kapacitet.



Figur 6. I vänstra bilden (A) ges dosratnivåer efter en beräkning av en kärnvapenexplosion i centrala Nynäshamn [113]. Bilden i mitten (B) ger flyglinjer för en drönare motsvarande en systematisk kartläggning av ett område 5×5 km. Den högra bilden (C) motsvarar flygrutten för undersökning av en tänkt marschväg.

5.7 Summering RN

Dagens teknikutveckling pekar på att RN-sensorer integrerade med RPAS har nått en relativt hög mognadsgrad, där nyttan redan har konkretiserats i flertalet applikationer. Men för att Försvarsmakten ska kunna tillämpa dessa system krävs, förutom tester och försök, även utveckling av metoder och tekniker som uppfyller kraven på relevans, noggrannhet och tillförlitlighet. Det återstår ett antal viktiga frågor att utreda avseende, t.ex. maximering av areatäckning, lämplig flyghöjd och flygmönster. För användning av drönare i kombination med RN-sensorer är detta möjligt idag. Men om enstaka enheter ska sammanföras (system av system) och mätdata integreras tillsammans med andra tillkommer även behov av utvecklad kommunikations- och databehandlingsförmåga.

6 Färdiga system

Ett antal färdiga multigasmätare för mätning av kemiska ämnen finns för drönare på marknaden, där Scentroid Flying Lab DR1000 har funnits sedan 2016[114]. Det är nu ersatt av DR2000, figur 7. Under senare år har FLIR tillverkat en multigassensor, MUVE C360[115], och Soarability har en modell vid namn Sniffer4D v2[116], figur 7. Dessa tre system har liknande övergripande mätegenskaper även om vissa enskilda sensorer skiljer sig åt. Gassensorerna är av typen PID för mätning av VOC, NDIR för mätning av LEL (Lower Explosive Limit) och det finns också ett antal elektrokemiska gassensorer, tabell 11. DR2000 och Sniffer4D mäter även PM-halter, en funktion som saknas på MUVE C360, där det istället är fler gassensorer installerade. Mätning av radioaktiv strålning är möjlig som tillval för produkterna från Scentroid och Soarability, där även provtagning med t.ex. gastät påse finns som alternativ. Under det senaste året har FLIR också utvecklat en B-sensor (MUVE B330)[117] samt en R-sensor (MUVE R430)[118] för integrering på deras drönarplattform[119].

Autonomous Airborne Radiation Monitoring system (AARM) från Kromek[97] är en fristående RIID-sensor (CsI eller CZT), anpassad för mätning av radioaktivitet med olika drönare. Det finns även fler företag som har marknadsfört färdiga system för strålningsmätning. till exempel Aretas Aerial (Kanada) och Berkeley Nucleonics Corporation (USA).



Figur 7. Från vänster till höger: Scentroid Flying lab DR2000 monterad på en DJI Inspire 2, Soarability Sniffer4D monterad på en monterad på en DJI Matrice 300 och FLIR MUVE C360 monterad på en DJI Matrice 210.

Tabell 11. Översikt och exempel på färdiga drönarsystem för CBRN-mätning.

Modell	C-mätning	PM	B-mätning	RN - mätning	Prov	Vikt (kg)	Pris (SEK)
Scentroid Flying Lab DR2000	8 C-sensorer (4 EC, 1×CO ₂ , 1×PID, 1×LEL (NDIR), 1×PM) ^b	1/2.5/4/10	-	GM-rör ^d	Ja	<0,60	185k
Soarability Sniffer4D V2	8 C-sensorer (5 EC, 1×PID, 1×LEL, 1×PM) ^c	2.5/10	-	GM-rör ^e	Ja	<0,59	170k
FLIR MUVE C360	8 C-sensorer (6 EC, 1×PID, 1×LEL) ^a	-	-	-	-	0,68	185k
FLIR MUVE B330	-	-	LIF	-	Ja	1,44	430k
FLIR MUVE R430	-	-	-	NaI + GM-rör	-	0,9	190k
Flying UAV Laboratory	IMS	-	LIF+ OPC	NaI +2 GM-rör	Ja	~1-5 kg	-
Kromek AARM [97]	-	-	-	CsI eller CdZnTe	-	Ja	X

^a Fast konfiguration (CO, Cl₂, O₂, NO₂, H₂S, SO₂ samt LEL och PID). ^b Fyra olika gaser kan väljas för detektion med elektrokemiska sensorer (EC). ^c Fem olika gaser kan väljas för detektion med EC. ^d Upptar en plats dvs. en gas färre kan mätas. ^e Tillval som monteras externt, ingen annan sensor behöver tas bort.

De olika multigassensorerna är av liknande storlek: DR2000, 23 x 10,8 x 10,3 cm; Sniffer4D, 15,7 x 10,3 x 8,7 cm och MUVE C360, 16,5 x 5,8 x 5,1 cm. De har jämförbara vikter, tabell 11 (snorkeln för gasinsug ej medräknad).

Flying UAV Laboratory från CBRN International marknadsförs som ett färdigt system med sensorer för C, B och R. Även en provtagare och IR-kamera finns i systemet. Enligt produktbladen är deras större system av fastvinge-typ, men de marknadsför också ett mindre system baserat på en multirotorplattform. Flera av ovanstående system är tänkbara kandidater för FM:s CBRN-grupper.

6.1 Integrering för färdiga system

De kommersiella systemen har olika lösningar för integrering. Scentroid Flying lab DR2000 är oberoende av drönartyp, med eget batteri och datalänk till handenheten.

Den modulbaserade FLIR MUVE-serien är helt integrerade med drönaren, både avseende batteri och datalänk. Samtliga moduler (C360, B330 och R430) är kompatibla med drönaren FLIR Skyranger R70/R80D, och C360 är också kompatibel med DJI Matrice 210.

Soarability Sniffer4D är utvecklad för att fungera med drönare från DJI av Enterprise serien, t.ex. DJI Matrice. Strömförsörjning och sensorkommunikation sköts då via drönaren. Integrering av Sniffer4D mot andra plattformar ska vara möjlig, enligt dokumentationen.

7 Sanering av drönare använda i CBRN-kontaminerad miljö

En av de stora fördelarna med att använda sensorer och provtagare på RPAS är att piloten eller soldatgruppen under hela insatsen kan befinna sig i ren miljö. Detta innebär att en mer omfattande och tidsödande person- och materialsanering kan undvikas, vilket skulle kunna behövas vid en konventionell rekognoscering eller informationsinhämtningsuppdrag. Det här avsnittet kommer istället beröra behov och möjliga tekniker för att sanera den eller de RPAS-enheter med dess tillhörande sensor- och provtagningsutrustning som potentiellt blivit kontaminerade. Detta gäller i de fall det finns en misstanke om att enheten kontaminerats och behov finns av fortsatt användning. Det finns inga kända standardprocedurer eller studier som presenterar data avseende saneringseffektivitet för RPAS. RPAS har vidare inte utvecklats för att vara saneringsbara efter en CBRN-händelse, men området har identifierats som prioriterat för ändamålsenlig RPAS-implementering[1, 120].

Med sanering menas att genom behandling eller andra åtgärder minska risken för faror relaterade till CBRN-agens. Detta åstadkoms vanligtvis genom fysiska saneringsmetoder (t.ex. bortförel, värmebehandling eller inbindning) eller kemiska saneringsmetoder (förstörande, avdödande eller neutraliserande). Även om vissa saneringsmetoder är extremt effektiva i vissa testsystem beror en lyckad operativ sanering på flera faktorer. Framgångsfaktorer är tidigt fastställande av saneringsbehov för att möjliggöra åtgärder i rätt tid[121].

Trots att en RPAS och tillhörande sensorutrustning är väderskyddad såtillvida att den är funktionell under rimliga omgivningsförhållanden (nederbörd, UV-ljus och temperaturer i intervallet -20 °C till + 50 °C) utgör många klassiska saneringsmetoder en sådan kraftig påverkan på känsliga ytor och utrustning att de är destruerande. En RPAS-enhet består av vitala delar för hög funktionalitet inom framdrivning, aerodynamik, optik, sensorteknik och kommunikation. Dessa delar behöver inte vara anpassade för saneringsmetoder som bygger på mycket höga temperaturer, höga spoltryck, behandling med reaktiva lösningar (basiska, sura, oxiderande och reducerande). Det pågår viss NATO-ledd forskning och utveckling av saneringsmetoder som är lämpliga för känslig utrustning, och de kan utgöra en grund för utprovning inom RPAS-området[121]. Om det uppstår ett behov att sanera en kontaminerad RPAS har följande tekniker och metoder identifierats som möjliga inom respektive ämnesområde.

7.1 Sanering av känslig utrustning, C och B-agens

Fysiska saneringsmetoder som kan klassas som milda bygger på absorption såsom mekanisk avtorkning med fiberduk (swipes) och kan kombineras med olika absorptionsmedel (t.ex. pulver) och wipes (torkdukar) doppade i milda lösningsmedel. Dessa fungerar för bortförel av vätskor och deponerade partiklar. Eftersom det inte sker någon nedbrytning finns det behov av att hantera risker med sekundär kontaminering från materialen efteråt. Det finns ett flertal produkter i form av vätskor med surfaktanter och vätskor med tillsatser av nedbrytande funktion.

Konventionell vädring är en mild och effektiv metod för att reducera mängden högflyktiga ämnen men mindre effektiv för svårflyktiga vätskor och partiklar som deponerat på en yta[122]. Uppvärmad luft (70-110 °C) har en positiv effekt för desorption av flyktigare nervgaser såsom sarin (kokpunkt 158 °C) och en viss effekt för soman (kokpunkt 198 °C) och senapsgas (kokpunkt 217 °C). Uppvärmad luft (< 93 °C) i kombination med fukt (75-90 %) har också en positiv effekt för avdödning av biologiska agens.

Att exponera känslig utrustning för genererad ånga eller dimma av väteperoxid i koncentrationsområdet 100-400 ppm har utprovats för att sanera kemiska stridsmedel på ytor[122, 123]. Effekten var bättre mot senapsgas och VX men sämre mot G-ämnen. Metoden är dock mycket effektiv för avdödning av virus, bakterier och svampar och de negativa effekterna på känslig utrustning är i regel låga[122].

7.2 Sanering av känslig utrustning – RN

Kontaminering av drönare med RN-ämnen utgör troligtvis inte ett hälsoproblem. Däremot innebär kontaminerade drönare och sensorer att känsligheten i detektorresponser minskar eftersom kontamineringen i sig ger ökade bakgrunds nivåer. Det innebär att när en drönare använts i ett område där risken för luftburen kontaminering är stor blir känsligheten för sensorerna sämre, vilket kan leda till felaktiga mätvärden och slutsatser. När och var en kontamination sker kan vara svår att avgöra. Ett sätt att försöka kontrollera kontaminationsnivån är att regelbundet mäta på en plats som anses vara stabil med avseende på intensiteten av joniserande strålning.

Vilken design som väljs för flygfarkosten kommer att påverka benägenheten för kontamination och även förmågan till självsanering under flygning.

Sanering av utrustning kontaminerad med RN-ämnen behöver inte skilja sig från sanering av C-ämnen. Det är de kemiska egenskaperna som i första hand styr vilken saneringsmetod som fungerar bäst. En del RN-sensorer har den fördelen att de är hermetiskt tillslutna vilket underlättar sanering. Dessutom kan man i många fall plasta in detektorn, vilket gör att man ”slipper” saneringssteget, man byter bara ut plasten.

7.3 Förslag på metodik

Efter en flygning kommer saneringsbehovet inledningsvis enbart begränsas till drönaren, om någon av sensorerna larmat. Den bör alltså inledningsvis betraktas som kontaminerad och med fördel landas i lä om piloten eller på ett avstånd som ger möjlighet att stegvis kunna undersöka drönaren med indikerings- och detektionsinstrument.

Vid kraftig kontaminering kan destruering övervägas. I annat fall kan landningsställ, rotorblad och flygkropp torkas av med swipar för bortförsl av partiklar och vätskedroppar. En anpassad förvaringslåda i beständigt material med möjlighet att ansluta genereringsutrustning för väteperoxidånga kan vara en framkomlig lösning. Oavsett effektiviteten av saneringsåtgärderna bör lådan inte förvaras inuti ett fordon. Lösningar där transport- och förvaringslådor för CBRN-drönare monteras utanpå fordon har presenterats[124].

8 Diskussion och rekommendationer

Den stora tekniska utvecklingen avseende mindre RPAS och integrering av sensorer har varit till nytta för utveckling av många nya applikationsområden. Ett av dessa områden är möjligheten att genomföra militära uppdrag med hjälp av CBRN-sensorer monterade på drönare. Området är nytt även om behovet har uttryckts länge. Rapportens syfte är att beskriva dagens kunskapsläge avseende potential samt tekniska och metodologiska förutsättningar för inkorporering av tekniken i en mindre rekognoseringsgrupp.

Då en av de stora fördelarna med drönare är att områden kan undersökas på avstånd, är det viktigt att veta den effektiva arean som kan undersökas med nuvarande flygtider och tekniska lyftkapacitet. Störst användbarhet och popularitet har drönare med multirotorer där lyftkapacitet och manövrerbarhet passar många tillämpningsområden. Deras nuvarande areatäckning är dock relativt liten, där ett enkelt beräkningsexempel visar att ytor motsvarande en fotbollsplan kan mätas upp med en typisk C-sensor (responstid 30 sek, 1 km avstånd och 15 punkter). För större areatäckning, alternativt behov av större avstånd, kan vingförsedda RPAS övervägas, men på bekostnad av lyftkapacitet och större krav på sensorers effektiva responstid.

Anpassning av befintliga sensorer är ofta avgörande för en lyckad integrering, till exempel ompaketering och signalöverföring. Ett system där sensorer är helt integrerade med drönarens styr- och radiosystem är att föredra men på bekostnad av möjlighet till modifiering och uppgradering av enskilda komponenter. I rapporten visas dock på aspekter som talar emot en helt bokstavsgemensam lösning där sannolikt separata moduler kan vara mer fördelaktiga. Detta skulle gynna systemets totalvikt, minska komplexiteten och förenkla valet av mätstrategi. Det finns som beskrivits i de separata C-, B- och RN-avsnitten ämnesrelaterade förutsättningar, specifika anspråk och utmaningar. För C-området utgör den stora bredden av kemiska ämnen med olika fysikaliska och kemiska egenskaper en stor utmaning för effektiv detektering i luft. Detta gäller i synnerhet de ämnen som är lågflyktiga vätskor eller fasta ämnen som enbart till liten del återfinns i luft efter en spridningshändelse. På grund av kemiska ämnens inneboende toxicitet sträcker sig de önskvärda detektionsområdena över många tiopotenser, vilket också ställer krav på operativt mätområde. Trots den intensiva utvecklingen av miniaturiserade och mer specifika sensorer utgör låga koncentrationer alltså en stor utmaning. Responstider för många gassensorer kan även i gynnsamma fall vara på tiotalet sekunder eller mer. Mätning av kontinuerliga utsläpp av gasformiga ämnen med C-sensorer på drönare har visats ge bättre resultat. En antagonistisk C-händelse kan visserligen resultera i ett primärmoln men har annars en olikartad temporal och spatial utbredning än en jämnt flödande utsläppskälla. Här behöver framtida studier ge bättre underlag för att öka kunskapen.

För biologiska agens är utmaningarna stora på grund av en ofta hög bioaerosolbakgrund i kombination med låg specificitet hos indikeringsinstrument, vilket potentiellt medför hög frekvens av falsk positiv respons. B-indikering har därför historiskt lutat sig på en metodik där avvikelser från det normala har triggat ett behov av utökad provtagning och analys på laboratorium. Detta angreppssätt kan till viss del ur teknisk hänsyn också implementeras på drönare idag.

Detektionsinstrument för radioaktiva ämnen vilar i regel på mätning av gammastrålning där både lång räckvidd och snabba responstider ger en mycket hög tillämpbarhet för RPAS-applikationer. Förekomsten av små och relativt billiga sensorer i kombination med validerade fältförsök tyder på en hög grad av realiserbarhet. Inom detta fält är inte valet av plattform begränsat till multirotorer utan en större areatäckning/flygsträcka kan erhållas med till exempel fast vinge.

En för CBRN-området gemensam provtagningsförmåga där gas- och partikelfas samlas in är tekniskt en relativt lätt förmåga att integrera med RPAS. Behovet av provtagningskapacitet kan dock skilja beroende på ämne, analysmetod och omständigheter vid aktuell situation.

De delvis olika utmaningarna och lämpliga angreppssätten för respektive delområde pekar på att det är svårt att förespråka en gemensam drömlösning för CBRN-rekognosering idag. Komplexiteten och vikten på sensorerna blir alltför stor (> 3 kg). Därför förespråkar vi någon form av modulbaserad lösning där vinster kan vara att nyttja kombinationer av förmågor. Detta kan vara aerosoldetektion med filterprovtagning, vilket delvis uppfyller ett CBR-indikeringssyfte och samtidigt ger prover för verifieringsanalys. En mer övergripande och inledande områdesbevakning kan uppfyllas med lätta sensorer för R och några generella sensorer för toxiska industrikemikalier med viss kapacitet att upptäcka CWA.

Marknadsläget avseende färdiga CBRN-RPAS sträcker sig till att omfatta ett fåtal leverantörer med system baserade på teknik beskriven i denna rapport. Däremot har de separata lösningar för sensorintegrering vilket gör en köpare låst till vissa sensorer, mjukvaror och modulpaket styrda av leverantören. Den snabba teknikutvecklingen kan emellertid göra att en enhetslösning snabbt blir föråldrad och det kan då vara svårt och dyrt att göra nödvändiga uppdateringar av sensorer, drönare och mjukvarulösningar.

Med fokus på den behovsformulering och kravställning (se Mål och Vision 1.2) som presenterades i inledningen är vår bedömning att teknikområdet och kunskapen om lämpliga metoder inte är tillräckligt mogna för att uppfylla alla kriterier. Utifrån nuvarande omvärldsbild avseende teknik och kunskap gör FOI en förmågebedömning i tabell 12.

Tabell 12. En översikt om bedömd CBRN-RPAS-förmåga.

Önskad förmåga	C	B	RN
Indikera	<i>ja (gas) nej (lågflyktiga)</i>	<i>nej*</i>	<i>ja γ och neutroner nej α och β</i>
Provta luft	<i>ja</i>	<i>ja</i>	<i>ja</i>
Provta mark	<i>nej</i>	<i>nej</i>	<i>nej</i>

* En viss förmåga att upptäcka aerosoler med möjligt biologiskt innehåll existerar.

Som rekognoseringsverktyg kommer inte CBRN-RPAS kunna ersätta alla förmågor en CBRN-grupp har. Detta gäller framförallt förmågor att ta fysiska prover (objekt, ytprov, vätskor, miljöprov) där det tekniskt finns vissa utmaningar att utveckla en sådan förmåga. Här kan istället en markgående plattform vara mer lämplig. Övriga intressanta förmågor för RPAS, som inte närmare har utretts i den här rapporten, kan vara provtransport eller för placering av sensorer på särskilda platser.

Vi vill därför betona att den stora fördelen med CBRN-RPAS är att snabbare och på säkrare avstånd få en visuell överblick på områden och platser. Undersökningsmetodiken för CBRN-kontaminerade miljöer med hjälp av RPAS är i dagsläget inte tillräckligt väl dokumenterad för att kvantitativt kunna bedöma reell effektivitet. För strålkällor och momentant höga halter av hälsofarliga gaser och partiklar finns det stöd för en mer optimistisk syn. Genom att exempelvis integrera etablerad sensorteknik för radioaktiv strålning kommer viss indikation om mark- och luftkontaminering påvisas. För områden och händelser med höga nivåer av CB-kontaminerad luft kan sensorer för hälsofarliga atmosfärer (typ flergasvarnare) och aerosolförekomst (partikelräknare) i realtid potentiellt ge tillförlitliga indikationer som underlag för avlysning. För mer komplicerade rekognoseringsuppdrag, där kontamineringen kan utgöras av en heterogen markbeläggning av virus, bakterier, lågflyktiga ämnen eller fasta ämnen i partikelform, är metodiken däremot inte färdigutvecklad.

9 Referenser

1. Marques, M.M., et al., *GammaEx project: A solution for CBRN remote sensing using Unmanned Aerial Vehicles in maritime environments*. Oceans 2017 - Anchorage, 2017.
2. Wingfors, H., *Reserapport Fact Finding Mission, Aberdeen Proving Ground, Edgewood, USA 20220823*. 2022.
3. NATO. *NATO's Chemical, Biological, Radiological and Nuclear (CBRN) Defence Policy*. 2022 [2022-10-28]; Available from: https://www.nato.int/cps/en/natohq/official_texts_197768.htm?selectedLocale=en.
4. *Market for Military Drones will Surge*. 27 October 2016.; Available from: <https://insideunmannedsystems.com/market-military-drones-will-surge/>.
5. Cai, G., J. Dias, and L. Seneviratne, *A Survey of Small-Scale Unmanned Aerial Vehicles: Recent Advances and Future Development Trends*. Unmanned Systems, 2014. **02**(02): p. 175-199.
6. Ghazbi, S.N., et al., *Quadrotors Unmanned Aerial Vehicles: A Review*. International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems, 2016. **9**(1): p. 309-333.
7. Shraim, H., A. Awada, and R. Younes, *A survey on quadrotors: Configurations, modeling and identification, control, collision avoidance, fault diagnosis and tolerant control*. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2018. **33**: p. 14-33.
8. Su, W., et al., *Determining the retrieving parameters of corn canopy LAI and chlorophyll content computed using UAV image*. Nongye Gongcheng Xuebao, 2020. **36**(19): p. 66-73.
9. Wivou, J., et al., *Air quality monitoring for sustainable systems via drone based technology*. 2016 IEEE International Conference on Information and Automation for Sustainability (ICIAfS), 2016: p. 1-5.
10. Pólka, M., S. Ptak, and Ł. Kuziora, *The Use of UAV's for Search and Rescue Operations*. Procedia engineering, 2017. **192**: p. 748-752.
11. Saarinen, M., *Unmanned Chemical Reconnaissance White Paper: ChemProX Drone Case*. 2021.
12. *A guide to military drones*. 2017; Available from: <https://www.dw.com/en/a-guide-to-military-drones/a-39441185>.
13. Cai, G., et al., *A brief overview on miniature fixed-wing unmanned aerial vehicles*. IEEE ICCA 2010, 2010: p. 285-290.
14. *Foxtech drones*. Available from: <https://www.foxtechfpv.com/>.
15. Di Giovanni, D., et al., *Design of Miniaturized Sensors for a Mission-Oriented UAV Application: A New Pathway for Early Warning*. International Journal of Safety and Security Engineering, 2021. **11**(4): p. 435-444.
16. Tengel, T., et al., *Realtidsövervakning av aerosolmoln med drönburen provtagare*. 2021: FOI.
17. Madokoro, H., et al., *Development of Drone-Mounted Multiple Sensing System with Advanced Mobility for In Situ Atmospheric Measurement: A Case Study Focusing on PM2.5 Local Distribution*, in *Sensors*. 2021.
18. Roldán, J.J., et al., *Mini-UAV Based Sensory System for Measuring Environmental Variables in Greenhouses*, in *Sensors*. 2015. p. 3334-3350.
19. Pochwala, S., et al., *Developing of Low-Cost Air Pollution Sensor — Measurements with the Unmanned Aerial Vehicles in Poland*, in *Sensors*. 2020.
20. Kim, J.-S., et al., *Indoor and Outdoor Tests for a Chemi-capacitance Carbon Nanotube Sensor Installed on a Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle for Dimethyl Methylphosphonate Detection and Mapping*, in *ACS Omega*. 2021. p. 16159-16164.
21. Szinicz, L., *History of chemical and biological warfare agents*. Toxicology, 2005. **214**(3): p. 167-181.
22. Robinson, J.P., *The problem of chemical and biological warfare*. The Rise of CB Weapons. Vol. 1. 1971, Stockholm, Gamla Brogatan 26: Almqvist&Wiksell.
23. Sun, Y. and K.Y. Ong, *Detection Technologies for Chemical Warfare Agents and Toxic Vapors*. 2005, USA: CRC Press LLC.

24. Sferopoulos, R., *A Review of Chemical Warfare Agent (CWA) Detector Technologies and Commercial-Off-The-Shelf Items*, A. Department of Defence, Editor. 2009, DSTO Defence Science and Technology Organisation, Victoria 3207 Australia.
25. OPCW, *CHEMICAL WEAPONS CONVENTION, Convention on the Prohibition of the Development, Production, Stockpiling and Use of Chemical Weapons and on their Destruction*, OPCW, Editor. 2020: https://www.opcw.org/sites/default/files/documents/CWC/CWC_en.pdf.
26. Munro, N.B., et al., *The sources, fate, and toxicity of chemical warfare agent degradation products*. *Environmental Health Perspectives*, 1999. **107**(12): p. 933-974.
27. Huffman, C. and L. Ericsson, *Assessment of Portable HAZMAT Sensors for First Responders*. 2014, US Department of Justice: <https://www.ojp.gov/ncjrs/virtual-library/abstracts/assessment-portable-hazmat-sensors-first-responders>.
28. Kaliszewski, M., et al., *The Multi-Gas Sensor for Remote UAV and UGV Missions-Development and Tests*. *Sensors*, 2021. **21**(22).
29. Mawrence, R., S. Munniks, and J. Valente, *Calibration of Electrochemical Sensors for Nitrogen Dioxide Gas Detection Using Unmanned Aerial Vehicles*. *Sensors*, 2020. **20**(24).
30. Araujo, J.O., et al., *Experimental Flight Patterns Evaluation for a UAV-Based Air Pollutant Sensor*. *Micromachines*, 2020. **11**(8).
31. Guan, R.Q., et al., *Preparation of electrochemical sensor assisted unmanned aerial vehicles system for SO₂, O₃, NO₂, CO and PM_{2.5}/PM₁₀ detection in air*. *International Journal of Electrochemical Science*, 2021. **16**(10).
32. Fumian, F., et al., *Development and performance testing of a miniaturized multi-sensor system combining MOX and PID for potential UAV application in TIC, VOC and CWA dispersion scenarios*. *European Physical Journal Plus*, 2021. **136**(9).
33. Burgues, J., et al., *Smelling Nano Aerial Vehicle for Gas Source Localization and Mapping*. *Sensors*, 2019. **19**(3).
34. Reuter, M., et al., *Development of a small unmanned aircraft system to derive CO₂ emissions of anthropogenic point sources*. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2021. **14**(1): p. 153-172.
35. Liu, Y.S., et al., *Improvements of a low-cost CO₂ commercial nondispersive near-infrared (NDIR) sensor for unmanned aerial vehicle (UAV) atmospheric mapping applications*. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2022. **15**(15): p. 4431-4442.
36. Burgues, J. and S. Marco, *Environmental chemical sensing using small drones: A review*. *Science of the Total Environment*, 2020. **748**.
37. Pang, X.B., et al., *A lightweight low-cost and multipollutant sensor package for aerial observations of air pollutants in atmospheric boundary layer*. *Science of the Total Environment*, 2021. **764**.
38. Korotcenkov, G. and B.K. Cho, *Engineering approaches for the improvement of conductometric gas sensor parameters Part 1. Improvement of sensor sensitivity and selectivity (short survey)*. *Sensors and Actuators B-Chemical*, 2013. **188**: p. 709-728.
39. Lagutin, A.S. and A.A. Vasil'ev, *Solid-State Gas Sensors*. *Journal of Analytical Chemistry*, 2022. **77**(2): p. 131-144.
40. Smith, P.A., et al., *Hand-held photoionization instruments for quantitative detection of sarin vapor and for rapid qualitative screening of contaminated objects*. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2007. **4**(10): p. 729-738.
41. Kim, J.S., et al., *Indoor and Outdoor Tests for a Chemi-capacitance Carbon Nanotube Sensor Installed on a Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle for Dimethyl Methylphosphonate Detection and Mapping*. *Acs Omega*, 2021. **6**(24): p. 16159-16164.
42. Galle, B., et al., *A multi-purpose, multi-rotor drone system for long-range and high-altitude volcanic gas plume measurements*. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2021. **14**(6): p. 4255-4277.
43. Stix, J., et al., *Using Drones and Miniaturized Instrumentation to Study Degassing at Turrialba and Masaya Volcanoes, Central America*. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 2018. **123**(8): p. 6501-6520.
44. pksafety.com. *Wireless Gas Detection for First Responders*. 2022-10-18].
45. Pobkrut, T., et al., *Sensor Drone for Aerial Odor Mapping for Agriculture and Security Services*. 2016 13th International Conference on Electrical

- Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (Ecti-Con), 2016.
46. Neumann, P.P., et al., *Aerial-based gas tomography - from single beams to complex gas distributions*. European Journal of Remote Sensing, 2019. **52**: p. 2-16.
 47. Corbett, A. and B. Smith, *A Study of a Miniature TDLAS System Onboard Two Unmanned Aircraft to Independently Quantify Methane Emissions from Oil and Gas Production Assets and Other Industrial Emitters*. Atmosphere, 2022. **13**(5).
 48. Frish, M.B., et al. *Low-cost lightweight airborne laser-based sensors for pipeline leak detection and reporting*. in *Conference on Next-Generation Spectroscopic Technologies VI*. 2013. Baltimore, MD.
 49. Yang, S.T., et al., *Natural Gas Fugitive Leak Detection Using an Unmanned Aerial Vehicle: Measurement System Description and Mass Balance Approach*. Atmosphere, 2018. **9**(10).
 50. Martinez, B., T.W. Miller, and A.P. Yalin, *Cavity Ring-Down Methane Sensor for Small Unmanned Aerial Systems*. Sensors, 2020. **20**(2).
 51. Valpolini, P. *Teamworking: Novadem NX 160 with Proengin AP4C+ chemical detector, but not only*. 2021 [2022-10-05].
 52. Borsdorf, H. and G.A. Eiceman, *Ion mobility spectrometry: Principles and applications*. Applied Spectroscopy Reviews, 2006. **41**(4): p. 323-375.
 53. Borsdorf, H., et al., *Recent Developments in Ion Mobility Spectrometry*. Applied Spectroscopy Reviews, 2011. **46**(6): p. 472-521.
 54. Puton, J. and J. Namiesnik, *Ion mobility spectrometry: Current status and application for chemical warfare agents detection*. Trac-Trends in Analytical Chemistry, 2016. **85**: p. 10-20.
 55. Bruker. *RAIDM100Plus*. 2022-10-19].
 56. detection, S. *LCD 3.3 (LCD4)*. 2022-10-19].
 57. Environics. *Environics ChemProX*. 2022-10-19].
 58. Fumian, F., et al., *Application of Miniaturized Sensors to Unmanned Aerial Systems, A New Pathway for the Survey of Polluted Areas: Preliminary Results*. Atmosphere, 2020. **11**(5).
 59. Marinelli, W.J., et al. *Cooperative use of standoff and UAV sensors for CBRNE detection*. in *16th Meeting of the Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, and Explosives (CBRNE) Sensing part of the SPIE Defense, Security plus Sensing Symposium*. 2015. Baltimore, MD.
 60. Bielecki, M., Z. Witkiewicz, and P. Rogala, *Sensors to Detect Sarin Simulant*. Critical Reviews in Analytical Chemistry, 2021. **51**(4): p. 299-311.
 61. Girdwood, J., et al., *Simulation and field campaign evaluation of an optical particle counter on a fixed-wing UAV*. Atmospheric Measurement Techniques, 2022. **15**(7): p. 2061-2076.
 62. Liu, Z.X., et al., *Characterizing the performance of a POPS miniaturized optical particle counter when operated on a quadcopter drone*. Atmospheric Measurement Techniques, 2021. **14**(9): p. 6101-6118.
 63. Buteau, S., et al. *Biological Detection, Identification and Monitoring (Bio DIM) in Contested Urban Environment: leveraging standoff, point and UAS mounted particle counter/collector payload*. in *Conference on Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, and Explosives (CBRNE) Sensing XXI held at SPIE Defense + Commercial Sensing Conference*. 2020. Electr Network.
 64. Pochwala, S., et al., *Developing of Low-Cost Air Pollution Sensor-Measurements with the Unmanned Aerial Vehicles in Poland*. Sensors, 2020. **20**(12).
 65. Stetter, J.R. and J. Li, *Amperometric gas sensors - A review*. Chemical Reviews, 2008. **108**(2): p. 352-366.
 66. Dey, A., *Semiconductor metal oxide gas sensors: A review*. Materials Science and Engineering B-Advanced Functional Solid-State Materials, 2018. **229**: p. 206-217.
 67. Dinh, T.V., et al., *A review on non-dispersive infrared gas sensors: Improvement of sensor detection limit and interference correction*. Sensors and Actuators B-Chemical, 2016. **231**: p. 529-538.
 68. Ruiz-Jimenez, J., et al., *Aerial drone as a carrier for miniaturized air sampling systems*. Journal of Chromatography A, 2019. **1597**: p. 202-208.

69. Lan, H.Z., et al., *Quantitative analysis and spatial and temporal distribution of volatile organic compounds in atmospheric air by utilizing drone with miniaturized samplers*. Chemosphere, 2021. **282**.
70. Li, C.Q., et al., *An Unmanned Aerial Vehicle-Based Gas Sampling System for Analyzing CO₂ and Atmospheric Particulate Matter in Laboratory*. Sensors, 2020. **20**(4).
71. Chen, Y., et al., *Volatile Organic Compound Sampling through Rotor Unmanned Aerial Vehicle Technique for Environmental Monitoring*. Atmosphere, 2022. **13**(9).
72. Stewart, M.P. and S.T. Martin, *Atmospheric Chemical Sensing by Unmanned Aerial Vehicles*, in *Unmanned Aerial Vehicles*, N. Barrera, Editor. 2021, Nova Science Publishers, Inc. : Nova Science Publishers, Inc.
73. Martin, S., J. Bange, and F. Beyrich, *Meteorological profiling of the lower troposphere using the research UAV "M(2)AV Carolo"*. Atmospheric Measurement Techniques, 2011. **4**(4): p. 705-716.
74. Do, S., M. Lee, and J.S. Kim, *The Effect of a Flow Field on Chemical Detection Performance of Quadrotor Drone*. Sensors, 2020. **20**(11).
75. Hedworth, H.A., et al., *The effectiveness of drones in measuring particulate matter*. Journal of Aerosol Science, 2021. **152**.
76. Nathan, B.J., et al., *Near-Field Characterization of Methane Emission Variability from a Compressor Station Using a Model Aircraft*. Environmental Science & Technology, 2015. **49**(13): p. 7896-7903.
77. Burgues, J., et al., *Aerial Mapping of Odorous Gases in a Wastewater Treatment Plant Using a Small Drone*. Remote Sensing, 2021. **13**(9).
78. Vinkovi, K., et al., *Evaluating the use of an Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-based active AirCore system to quantify methane emissions from dairy cows*. Science of the Total Environment, 2022. **831**.
79. Andersen, T., et al., *Quantifying methane emissions from coal mining ventilation shafts using an unmanned aerial vehicle (UAV)-based active AirCore system*. Atmospheric Environment-X, 2021. **12**.
80. Morales, R., et al., *Controlled-release experiment to investigate uncertainties in UAV-based emission quantification for methane point sources*. Atmospheric Measurement Techniques, 2022. **15**(7): p. 2177-2198.
81. Liu, S.W., X.F. Yang, and X.B. Zhou, *Development of a low-cost UAV-based system for CH₄ monitoring over oil fields*. Environmental Technology, 2021. **42**(20): p. 3154-3163.
82. Shaw, J.T., et al., *Methods for quantifying methane emissions using unmanned aerial vehicles: a review*. Philosophical Transactions of the Royal Society a-Mathematical Physical and Engineering Sciences, 2021. **379**(2210).
83. Huffman, J.A., et al., *Real-time sensing of bioaerosols: Review and current perspectives*. Aerosol Science and Technology, 2020. **54**(5): p. 465-495.
84. *Bioaerosol detection technologies*. 2014, New York: Springer.
85. Saari, S., et al., *Identification of single microbial particles using electro-dynamic balance assisted laser-induced breakdown and fluorescence spectroscopy*. Aerosol Science and Technology, 2016. **50**(2): p. 126-132.
86. Bieber, P., et al., *A Drone-Based Bioaerosol Sampling System to Monitor Ice Nucleation Particles in the Lower Atmosphere*. Remote Sensing, 2020. **12**(3).
87. Brechtel. *UAV Sampling*. 2022-11-10]; Available from: <https://www.brechtel.com/solutions/applications/uav-sampling/>.
88. Liu, S.Y., et al., *Direct bacteria analysis using laserspray ionization miniature mass spectrometry*. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2019. **411**(18): p. 4031-4040.
89. Ghimire, P.S., et al., *Linking the conventional and emerging detection techniques for ambient bioaerosols: a review*. Reviews in Environmental Science and Biotechnology, 2019. **18**(3): p. 495-523.
90. Gavrilas, S., et al., *Recent Trends in Biosensors for Environmental Quality Monitoring*. Sensors, 2022. **22**(4).
91. Kezoudi, M., et al., *The Unmanned Systems Research Laboratory (USRL): A New Facility for UAV-Based Atmospheric Observations*. Atmosphere, 2021. **12**(8).

92. Powers, C.W., et al., *Coordinated Sampling of Microorganisms Over Freshwater and Saltwater Environments Using an Unmanned Surface Vehicle (USV) and a Small Unmanned Aircraft System (sUAS)*. *Frontiers in Microbiology*, 2018. **9**.
93. Kemppinen, O., et al., *Imaging atmospheric aerosol particles from a UAV with digital holography*. *Scientific Reports*, 2020. **10**(1).
94. Anderson, G.P., et al., *Biological agent detection with the use of an airborne biosensor*. *Field Analytical Chemistry and Technology*, 1999. **3**(4-5): p. 307-314.
95. Kock, P., et al., *Strålskyddsåtgärder vid radiologiska nödsituationer*. 2020: Strålskyddsmyndigheten, Stockholm.
96. Kim, D., et al., *Remote detection of radioactive material using high-power pulsed electromagnetic radiation*. *Nature Communications*, 2017. **8**.
97. *UAV radiation mapping drone and AARM system*. 2018; Available from: www.kromek.com/product/aerial-radiation-mapping-drone/.
98. Agency), I.I.A.E., *Airborne Gamma Ray Spectrometer Survey*, in *Technical reports series 323*. 1991.
99. Ågren, G., *Kalibrering av flygburet detektorsystem*. 2019: FOI, Totalförsvarets Forskningsinstitut.
100. Geelen, S., et al., *Radiological Surveillance Using a Fixed-Wing UAV Platform*. *Remote Sensing*, 2022. **14**(16).
101. van der Veeke, S., et al., *Footprint and height corrections for UAV-borne gamma-ray spectrometry studies*. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2021. **231**.
102. van der Veeke, S., et al., *Footprint and height corrections for UAV-borne gamma-ray spectrometry studies*. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2021. **231**: p. 106545.
103. Sanada, Y. and T. Torii, *Aerial radiation monitoring around the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant using an unmanned helicopter*. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2015. **139**: p. 294-299.
104. IAEA, *MID TERM SUMMARY REPORT, Executive Summary*. 2020: Vienna/Fukushima.
105. Ardiny, H. and A.M. Beigzadeh, *Pre-flight experiments for the unmanned aerial monitoring system (UAMS) radioactive detection under its limitations*. *Journal of Nuclear Research and Applications*, 2022. **3**: p. 23-28.
106. Vale, A., R. Ventura, and P. Carvalho, *Application of unmanned aerial vehicles for radiological inspection*. *Fusion Engineering and Design*, 2017. **124**: p. 492-495.
107. Newaz, A.A.R., et al., *Fast Radioactive Hotspot Localization Using a UAV*. 2016 Ieee International Conference on Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots (Simpar), 2016: p. 9-15.
108. Jakovlevs, O., et al., *Development of miniaturized HPGe spectrometers for unmanned aerial vehicles*. *Journal of Instrumentation*, 2018. **13**.
109. Pollanen, R., et al., *Radiation surveillance using an unmanned aerial vehicle*. *Applied Radiation and Isotopes*, 2009. **67**(2): p. 340-344.
110. Pollanen, R., et al., *Performance of an air sampler and a gamma-ray detector in a small unmanned aerial vehicle*. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2009. **282**(2): p. 433-437.
111. Pfannenstien, A., *Evaluation of a Continuous Air Monitoring System on an Unmanned Aerial Vehicle for Measurement of Airborne Radioactive Material*, in *Department of Health Physics and Diagnostic Sciences*. 2018, University of Nevada, Las Vegas.
112. Graham, C.T., et al., *Drones can reliably, accurately and with high levels of precision, collect large volume water samples and physio-chemical data from lakes*. *Science of the Total Environment*, 2022. **824**.
113. Goliath, M., et al., *Kärnvapenscenario för räddningstjänst*. 2021: FOI, Umeå.
114. *Amazon delivery may be years away, but Scentroid Drones are Ready to Go!* 2016; Available from: <https://scentroid.com/amazon-delivery-may-be-years-away-but-scentroid-drones-are-already-in-the-sky-to-take-sample-and-analyze-ambient-air-and-monitor-more-than-50-chemicals/>.
115. *MUVE 360*. 2019; Available from: <https://www.flir.eu/products/muve-c360/>.
116. *Sniffer4D v2*. 2019.

117. *Teledyne FLIR MUVE B330*. 2022; Available from: www.flir.com/products/muve-b330.
118. *Teledyne FLIR MUVE R430*. Available from: www.flir.com/products/muve-r430.
119. *Teledyne FLIR Skyranger R70*. 2013; Available from: www.flir.com/products/skyranger-r70.
120. Rabajczyk, A., et al., *Monitoring of Selected CBRN Threats in the Air in Industrial Areas with the Use of Unmanned Aerial Vehicles*. *Atmosphere*, 2020. **11**(12).
121. NATO, *Sensitive Equipment Decontamination*, in *TR-HFM-233*. 2017.
122. Bell, W., A. Judd, and J. Phillips, *Gaseous Decontaminants and their Applications*, in *Handbook of Chemical and Biological Warfare Agent Decontamination*, G. Bizzigotti, Editor. 2012, ILM Publications: Great Britain. p. 315-329.
123. Wagner, G.W., et al., *Decontamination of VX, GD, and HD on a surface using modified vaporized hydrogen peroxide*. *Langmuir*, 2007. **23**(3): p. 1178-1186.
124. Bunja, J. *Collaboration made NBCRV's sensor suite upgrade possible*. 2019-2022-11-28]; Available from: https://www.army.mil/article/230806/collaboration_made_nbcrvs_sensor_suite_upgrade_possible.

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Förvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

Tel: 08-55 50 30 00
Fax: 08-55 50 31 00

www.foi.se