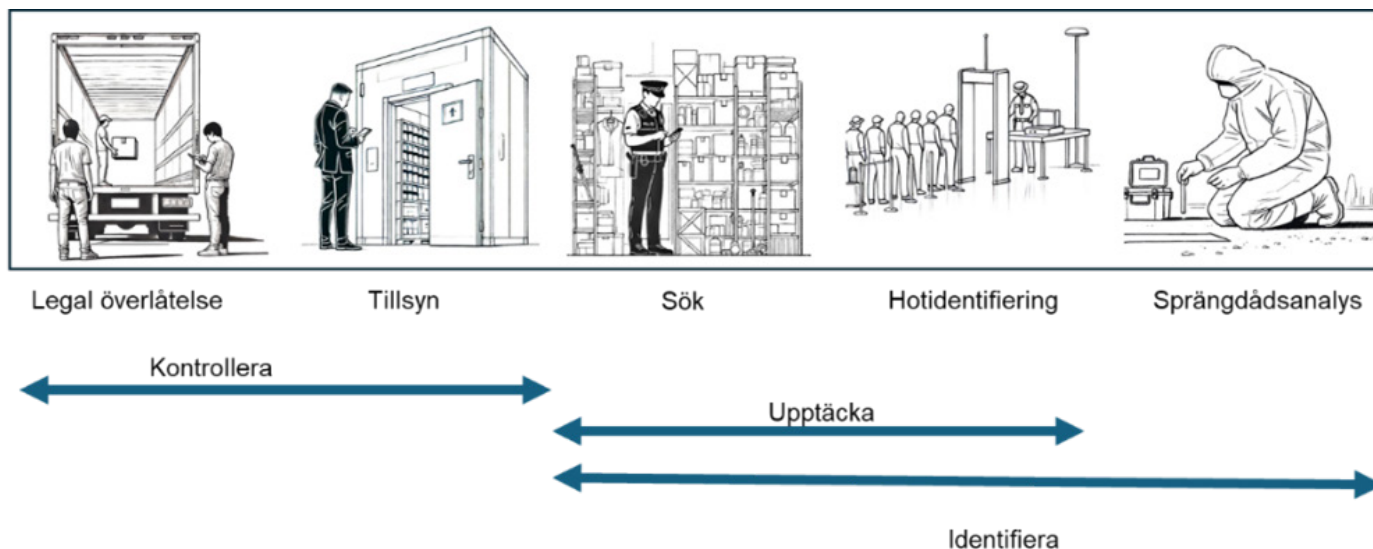


Märkning av civila sprängämnen – en översikt

Från egenkontroll inom den legala hanteringen till
brottsplatsanalys efter bombdåd

EMMA LUNDELL, LARS LANDSTRÖM, JOHAN GIDHOLM, ANNA PETTERSSON



Emma Lundell, Lars Landström, Johan Gidholm,
Anna Pettersson

Märkning av civila sprängämnen – en översikt

Från egenkontroll inom den legala hanteringen till
brottsplatsanalys efter bombdåd

Titel	Märkning av civila sprängämnen – en översikt – Från egenkontroll inom den legala hanteringen till brottsplatsanalys efter bombdåd
Title	Tagging of civilian explosives – an overview – From trade self-monitoring to post blast forensic analysis
Rapportnr/Report no	FOI-R--5921--SE
Månad/Month	Juli
Utgivningsår/Year	2026
Antal sidor/Pages	19
ISSN	1650-1942
Uppdragsgivare/Client	Regeringskansliet
Forskningsområde	Vapen, skydd och säkerhet
FoT-område	Inget FoT-område
Projektnr/Project no	I2401220
Godkänd av/Approved by	Malin Kölhed
Ansvarig avdelning	Vapen, skydd och säkerhet

Bild/Cover: 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

Denna rapport sammanfattar översiktligt ett antal märkningstekniker som på kortare eller längre sikt kan användas för att försvåra det illegala nyttjandet av kommersiella sprängämnen, samt ytterligare stärka förutsättningarna för bakspårning, både före och efter bombdåd. Rapporten belyser kortfattat frågeställningen och kontexten samt ger en översiktlig och överskådlig bild av märkningstekniker. Några tekniker identifieras, utifrån ett tekniskt och kontextuellt perspektiv, som särskilt lovande att ta vidare mot utveckling, utvärdering och implementering.

Nyckelord:

Märkning, sprängmedel, sprängämnen, tändmedel, sprängdåd, bombdåd

Summary

This report provides an overview of a number of technologies that can serve as markers and/or taggants for commercial explosives and blasting components. The purpose being to obstruct the illegal use of these products, and to provide further requisites for tracking the source of each explosive item upon encounter, pre- as well as post blast. The report briefly describes the context and relevance, and provides a schematic description of different marking/tagging technologies. A few technologies are, from a technological and contextual perspective, deemed specifically interesting to study further and to evaluate with a view to future implementation.

Keywords:

Marker, taggant, explosive, blasting cap, bombing

Innehållsförteckning

1	Inledning	6
2	Teknikkrav.....	8
3	Märkningstekniker.....	9
3.1	Etsning	9
3.2	Radio Frequency Identification (RFID)	9
3.3	Mikropartiklar.....	10
3.3.1	Microtaggant® Identification Particles.....	10
3.3.2	Explotracer.....	11
3.3.3	Polymerpartiklar med metalloxider.....	11
3.4	DNA.....	12
3.5	Fluorescensbaserade markörer.....	12
3.6	Grundämnen som markörer	13
3.6.1	Nuclear barcode	13
3.6.2	Isotopmärkning	13
3.7	Sammanfattning av bedömningar av märkningstekniker.....	15
4	Utblick och möjligheter	16
5	Referenser.....	18

1 Inledning

FOI erhöill under 2023, tillsammans med ett antal andra myndigheter, ett uppdrag av regeringen att intensifiera och utveckla arbetet med att stoppa illegala sprängningar^a. Uppdraget gavs med bakgrund mot den allt allvarligare och frekventa användningen av explosiva varor i kriminell miljö i Sverige. Uppdragets slutsatser och föreslagna åtgärder rapporterades genom MSB:s slutredovisning av regeringsuppdraget i oktober 2024^b.

En av arbetsgrupperna inom ramen för uppdraget fokuserade på märkning av sprängämnen. Under 2023 togs flera ton tänd- och sprängmedel i beslag från kriminell miljö, antingen i sin ursprungliga form eller som en del i en explosiv anordning. Ett EU-gemensamt krav på märkning av enskild sprängmedelsartikel tillsammans med krav på registerhållning har skapat förutsättningar för att spåra artikeln till den sista legala ägaren i samband med att tänd- och sprängmedel beslagtas ifrån en kriminell miljö. När spårning kunnat genomföras har det visat sig mycket värdefullt, både för den enskilda förundersökningen, för utvecklingen av den nationella lägesbilden och för förståelse av problemen.

Det märkningssystem som nyttjas idag har som huvudsakligt syfte att utöva kontroll av den legala hanteringen av tänd- och sprängmedel genom att möjliggöra spårbarhet och på detta sätt förhindra att dessa produkter hamnar i orätta händer. Den märkning som idag stipuleras kan dock med enkelhet avlägsnas vilket också ofta sker inom den illegala hanteringen.

Förutsättningarna för att spåra tillbaka till senaste legala ägaren, och därmed när eller genom vem som överföring av den explosiva varan till kriminell miljö skett, skulle uppenbart gynnas av en märkning som är mer beständig och svår att manipulera. Bakspårning *efter* ett genomfört bombdåd är inte möjligt med den märkningsteknik som rådande EU-direktiv (2008/43/EG^c) anvisar idag.

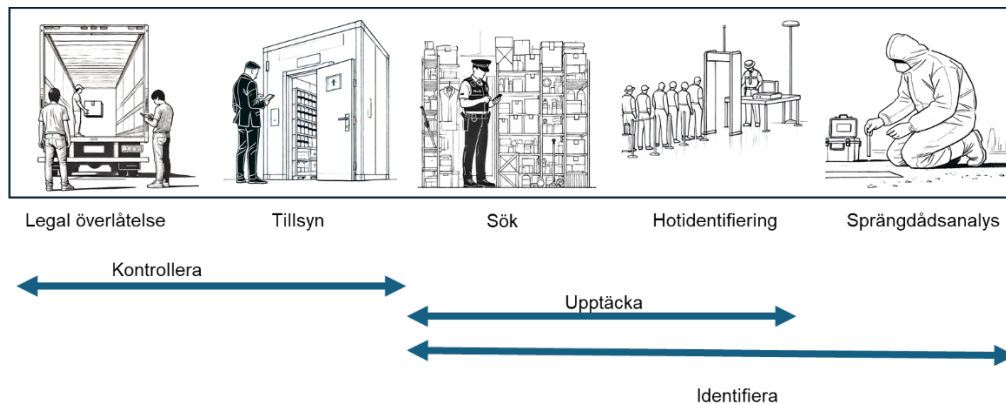
Utifrån målbilden att stoppa den illegala hanteringen av sprängmedel och förhindra bombdåd finns således anledning att överväga ett mer robust märkningssystem, i syfte att både stärka och bredda nyttjandet av märkning. I huvudsak behöver tre perspektiv adresseras (se även Figur 1):

- **Kontrollera**
- **Upptäcka**
- **Identifiera**
 - Före bombdåd ("pre-blast")
 - Efter bombdåd ("post-blast")

^a Fö2023/01615

^b Rapportering av regeringsuppdrag Fö2023/01615, MSB ärendenummer 2023-14190

^c Genomfört i MSB:s föreskrifter MSBFS 2016:5 (märkningskrav) och 2019:1 (krav på registerhållning).



Figur 1. Märkningstekniker kan anbringas i syfte att fungera brottsförebyggande eller för att underlätta brottsutredning utifrån perspektiven kontrollera, upptäcka och identifiera.

Att märka ett objekt för att ge den ett ID är något som redan görs i stor utsträckning inom flera vitt skilda branscher. Dyrbara varor märks för att kunna kopplas till en specifik ägare eller förhindra förfalskning, råmaterial märks för att kunna följas genom hela produktionskedjan och upptäcka otillåtna additiv, stölbegärliga och potentiellt farliga varor märks för att möjliggöra spårning av dess ursprung. Trots den breda användningen av kommersiella märkningstekniker finns få beskrivna inom den akademiska litteraturen, sannolikt eftersom upphovsrättsinnehavarna vill skydda sina varuskyddade eller patenterade tekniker men även för att öka märkningens integritet och förhindra att den kopieras, manipuleras eller avlägsnas från produkten. [1] ,[2]

Forensiska märkningstekniker delas vanligen in i två grupper;

- 1) *Detektion*, som avser tekniker för att finna ett objekt samt
- 2) *Identifiering*, där märkningen syftar till att ge objektet en identitet.

Detektionsteknikernas främsta syfte är således att upptäcka kriminell aktivitet medan unika identifieringskoder kan vara till stöd i brottsutredningar för att spåra och kartlägga kriminell hantering. När det kommer till märkning av sprängämnen skulle båda typerna av märkning vara användbara. Detektions- och identifieringsmärkningen kan underlätta och förbättra kontroll av den legala hanteringen av kommersiella sprängämnen vid inventering av lager, tillsyn, överföring och transport (**Kontrollera**). En detektionsmarkör som kan avläsas på avstånd ger möjlighet att upptäcka otillåten utförsel av sprängämnen från exempelvis en arbetsplats, samt vara användbar vid genomsökning av en byggnad vid ett tillslag (**Upptäcka**). När kommersiella sprängämnen hittas i illegal kontext kan en identitetsmärkning ge information om var det brustit i den legala hanteringen genom att spåra källan (**Identifiera**). För detta finns märkningsmetoder som teoretiskt sett skulle kunna avläsas både innan och efter en detonation har ägt rum. Följande avsnitt går in mer i detalj på teknikernas kravparametrar samt ger förslag på ett flertal märkningstekniker som skulle kunna nyttjas i ovan nämnda situationer.

Föreliggande rapport beskriver utifrån dessa tre perspektiv teknikkrav och ett antal metoder för märkning som studerats vid en översiktlig genomgång av öppen litteratur.

2 Teknikkrav

Det finns sannolikt idag ingen universal markör tillgänglig som kan användas både för detektion och identifiering av kommersiella sprängämnen i samtliga steg av den legala hanteringskedjan samt för spårning före och efter bombdåd. Olika krav ställs på märkningstekniken beroende på tillämpningen och de tekniker som idag är under användning eller utveckling har olika för- och nackdelar.

En märkningsteknik som ska användas i detektionssyfte (*Detektion*) bör snabbt detektera markören på tillfredsställande långt avstånd med låga falsklarmsnivåer samt gärna vara användarvänlig och kostnadseffektiv. Här är det fördelaktigt med ett handhållet detektionsinstrument som kan användas av operatörer i fält. På liknande sätt ska avläsnings- eller analysmetoden för en identifieringsmarkör (*Identifiering*) helst vara snabb, smidig, noggrann och ekonomisk, men här finns sannolikt mer tidsutrymme när det rör sig om att exempelvis spåra den sista legala innehavaren av sprängämnet. Ska markören kunna identifieras efter en detonation tillkommer kravet att den ska överleva explosionen och vara lätt att finna och samla in.

Om märkningen ska uppfylla sitt syfte måste den även vara beständig och svår att manipulera eller avlägsna från explosivämnet (*Manipulerbarhet*). Ska den implementeras i samtliga kommersiella sprängämnen där varje ny sats eller till och med varje enskild patron/kapsel får en unik kod behöver även biblioteket av koder vara tillräckligt stort (*Kodningskapacitet*). Om markören kommer i kontakt med explosivämnet måste även kompatibilitetsstudier göras för att säkerställa att explosivämnets känslighet och prestanda förblir oförändrade (*Kompatibilitet*). Markören i sig bör heller inte vara skadlig för människa eller miljö (*Toxicitet*). Slutligen behöver formen för markörens implementering i produktionskedjan (*Implementering*) beaktas.

Ovanstående parametrar har betydelse för hur en märkningsteknik bedöms för olika tillämpningar. För att skapa en överblick över teknikers styrkor och utmaningar sammanställs dessa parametrar, eller egenskaper, i en lista (se rutan till höger) där varje parameter färgkodas efter hur väl egenskapen är uppfylld.

Färgkodningen utgår från en övergripande bedömning av teknikens förutsättningar där **grön** = goda förutsättningar, **gul** = tveksamma förutsättningar, **röd** = dåliga förutsättningar och svart = information saknas för att göra en bedömning.

Detektion
Identifiering
Manipulerbarhet
Kodningskapacitet
Kompatibilitet
Toxicitet
Implementering

Utöver de tekniska kraven finns även en avvägning mellan kostnad och nytta som kan påverka valet av märkningsteknik. En ekonomisk och användarvänlig avläsnings- eller analysmetod krävs för produkter som kontinuerligt ska screenas – exempelvis vid registerhållning – medan en mer komplex kan tillåtas för produkter som behöver identifieras vid specifika händelser.

3 Märkningstekniker

Idag märks kommersiella sprängämnen och sprängkapslar med pappersetiketter försedda med unika streckkoder. Etiketterna, som syftar till att uppfylla rådande EU-direktiv om märkning och registerhållning av varje enskild sprängämnesartikel, läses av manuellt med en streckkodsläsare. Viss svårighet att avläsa etiketterna kan förekomma, exempelvis om de har vikt sig eller blivit fuktiga, vilket komplicerar registerhållningen. Då etiketterna sitter utanpå sprängämnets förpackning eller på kablarna till sprängkapseln är möjligheten att manipulera (förstöra eller avlägsna) märkningen uppenbar. Smidigare och modernare märkningstekniker vore således fördelaktigt för att underlätta den legala hanteringen och förenkla registerhållningen. Ett exempel på en lovande kandidat är RFID-märkning, en mogen teknik som beskrivs kortfattat nedan.

I syfte att öka möjligheterna för spårning av beslagtagen, illegal materiel vore en mer permanent märkning med lägre manipulerbarhet att föredra. Om denna märkning även kan överleva en detonation öppnas möjligheter till bakspårning även efter bombdåd. I detta kapitel presenteras en rad möjliga tekniker med olika mognadsgrad som möjligen kan innebära olika förbättringar relativt dagens etikettsystem. I de flesta fall har även en bedömning eller klassificering gjorts med avseende på tidigare nämnda parametrar och egenskaper.

3.1 Etsning

Etsning
Detektion Identifiering Manipulerbarhet Kodningskapacitet Kompatibilitet Toxicitet Implementering

En uppenbar lösning för att göra märkningen mer permanent vore att etsa in en kod istället för att trycka den på etiketter. Detta bedöms vara särskilt användbart för sprängämneskapslar som både har metallhölje och kablage där en märkning enkelt skulle kunna etsas eller graveras in. Det finns idag mogen lasertechnik som möjliggör etsning eller gravering av specifika koder i metall och polymera material. Denna lösning skulle därmed öka märkningens beständighet, men sannolikt inte underlätta metoden för identifiering relativt etiketter.

3.2 Radio Frequency Identification (RFID)

RFID
Detektion Identifiering Manipulerbarhet Kodningskapacitet Kompatibilitet Toxicitet Implementering

Radio Frequency Identification (RFID) är en märkningsteknik som baseras på en så kallad RFID-tag som lagrar information och en beröringsfri läsare som kan avläsa informationen. Tekniken nyttjas för olika tillämpningar i samhället idag, exempelvis i accesskort, pass, bokningssystem, stöldskydd, vägtullar och andra betalstationer. Det finns en uppsjö av taggar på marknaden som skiljer sig åt avseende storlek, räckvidd och pris. Tekniken har potential att användas både i detektions- och identifieringssyfte vilket gör den till en stark kandidat för märkning av sprängämnen där båda dessa tillämpningar är önskvärda. Tekniken tillåter beröringsfri detektion

på avstånd (tiotals meter) och vidare kan automatiserad och dold, vid behov, detektion vara möjlig. Ytterligare en fördel med tekniken är att både detektion och identifiering kan ske i "fält" med enkla, handhållna instrument. Antalet koder som kan genereras är i stort sett oändlig vilket möjliggör märkning av kommersiella sprängämnen med mycket hög upplösning. En nackdel är att det finns möjlighet att koda om taggarna med rätt utrustning och kunskap. För att förhindra detta finns dock säkerhetsskydd och krypteringssystem utvecklade, men dessa innebär sannolikt en ökad kostnad. Beroende på taggarnas storlek och placering hos förpackningen eller i explosivämnet - finns även varierande risk att de avlägsnas av illegala förövare.

En studie som gjorts i Kanada syftade till att undersöka hur RFID-tekniken kan användas för just inventering och hantering av sprängkapslar och sprängämnen samt detektion och lokalisering av dessa vid gruvdrift för att upptäcka eventuella icke-detonerade laddningar. Ett flertal moderna RFID-system undersöktes och utvärderades för att komma förbi begränsningar såsom otillräcklig räckvidd och svårigheter att läsa av taggarna genom olika material. Här diskuteras även säkerhetsaspekten gällande oavsiktlig initiering vilket måste tas i beaktning när RFID-taggar ska användas ihop med ett explosivämne. Detta är särskilt viktigt för *aktiva* taggar, som innehåller ett batteri, vilket *passiva* taggar saknar. Utvärderingen visar att det finns stor potential för användning av RFID-teknik för att detektera och lokalisera sprängämnen samt att de moderna systemen kan möta behov gällande taggarnas storlek, kostnad och räckvidd. [3] Taggarnas placering är något som behöver utredas vidare och om de kommer i kontakt med explosivämnet behöver en kompatibilitetsstudie utföras. Då RFID är en mogen teknik finns dock goda förutsättningar för en relativt snabb och enkel implementering.

I skrivande stund genomförs en studie i det EU-finansierade projektet INHERIT där möjligheten att använda RFID som en identifieringsmetod även *efter* detonation utvärderas. Ett flertal detonationstester har gjorts med två vanligt förekommande industriella sprängämnen - dynamit och ANFO (ammoniumnitrat och bränsleolja) - där olika typer av taggar blandats in direkt i sprängämnet. Preliminära tester visar att flera kommersiella taggar kan överleva en detonation av en mindre laddning. Det gäller främst mekaniska taggar såsom mikropunkter (för dynamit och ANFO) men i någon omfattning även taggar med RFID-funktionalitet (för ANFO). Det finns dock många fler taggar att utvärdera och eftersom RFID-tekniken används flitigt i industriella sammanhang så är mer värme- och stryktåliga taggar under utveckling. För en slutgiltig bedömning av användbarheten i samband med detonation av större laddningar krävs därför en mer omfattande studie med fler kommersiella och specialtillverkade taggar. [4]

3.3 Mikropartiklar

Att integrera inerta, små partiklar i explosivämnen i syfte att kunna identifiera dess ursprung efter detonation är en metod som undersökts under en längre tid. Viss användning förekommer i exempelvis Schweiz som införde ett lagkrav redan 1980 om märkning av kommersiella, paketerade sprängämnen. Enligt en amerikansk studie som gjordes 1997 om märkning av explosivämnen så använde schweiziska tillverkare sig av tre olika typer av markörer vid denna tidpunkt; 3M microchip, HF6-taggar och Explotracer. (Märkningspartikeln HF-6 är liknande 3M-mikropartikeln men denna är framtagen av Swiss Blasting och används endast i deras egna produkter vilket gör att väldigt lite öppen information finns tillgänglig.) [5] Samtliga markörer är polymerbaserade partiklar med en diameter kring 1,2 µm.

3.3.1 Microtaggant® Identification Particles

Microtaggant®

Detektion
 Identifiering
 Manipulerbarhet
 Kodningskapacitet
 Kompatibilitet
 Toxicitet
 Implementering

Utvecklades av det amerikanska företaget 3M Corporation men tillverkas sedan 1984 av företaget Microtrace som döpt dem till "Microtaggant® Identification Particles" (MIP:s) och består av polymermaterial.

MIP:s unika identitet uppnås genom att variera tio färgkodade lager som de är uppbyggda av och innehåller även ett magnetiskt samt ett fluorescerande lager för att underlätta insamlingen efter detonation. Analys och identifiering av partiklarna kan enligt företaget enkelt utföras på plats med mikroskop och behöver inte transporteras till laboratorium för undersökning. [6] Det föreligger

dock tveksamheter kring hur väl dessa markörer överlever detonation samt möjligheten att finna och analysera dem i fält efteråt, då endast bristfällig dokumentation förekommer av de få detonationstester som genomfördes i slutet på 70-talet. Testerna tyder på att partiklarna

överlever detonation under ideala förhållanden men kanske inte klarar sig vid brand eller fördämning av explosivämnet (exempelvis inneslutning av explosivämnet i ett stålrör vilket leder till ökad sprängverkan). Hur väl mikropartiklarna går att hitta och samla in verkar även bero på under vilka förhållanden explosionen har ägt rum, yttre förutsättningar, samt hur väl utbildad personalen är i insamlings- och analysmetoden. [7] Då partiklarna är inblandade i explosivämnet blir det mycket svårt att manipulera dess unika kod. Biblioteket av koder som kan genereras är enligt företaget stor, men minsta sats av sprängämnen märkta med en unik kod uppges vara 3,75 kg. Då märkningstekniken har använts under ett flertal decennier är förutsättningarna för implementering goda, även om en kompatibilitetsstudie med det aktuella explosivämnet kan behövas.

3.3.2 Explotracer

Explotracer
Detektion Identifiering Manipulerbarhet Kodningskapacitet Kompatibilitet Toxicitet Implementering

Explotracer är en Schweiztillverkad markör för sprängämnen som produceras av Axalta Polymer Powders och är en polyetylenbaserad partikel innehållandes fluorescerande färgämne, järnpartiklar och oxider av sällsynta jordartsmetaller. [8] Denna mikropartikel lokaliseras genom dess fluorescerande och magnetiska egenskaper liksom de som nämnts ovan, men denna partikels unika kod baseras på smältpunkt och sammansättning av sällsynta jordartsmetaller. Således kan denna mikropartikel ej analyseras i fält men kräver relativt enkla instrument för analys i ett kemiskt laboratorium. Enligt National Research Council i USA bör inte Explotracer användas i plastbaserade explosivämnen eller explosivämnen med höga detonationstemperaturer då överlevnadsgraden vid höga temperaturer är låg. Det finns även frågetecken kring huruvida kodningskapaciteten för denna märkningsmetod är tillräcklig för att kunna ge sprängämnen en unik identitet på satsnivå. [9]

3.3.3 Polymerpartiklar med metalloxider

Polymerpartiklar med metalloxider
Detektion Identifiering Manipulerbarhet Kodningskapacitet Kompatibilitet Toxicitet Implementering

Vetenskapliga studier och detonationstester kring andra mikropartiklar för identifiering av sprängämnen har även genomförts i närtid. Ett exempel på detta är en polsk studie från 2008 av mikropartiklar som består av en polymermatris där varierande tillsatser av metalloxider ger den unika koden. Ett detonationstest genomfördes under kontrollerade förhållanden där mikropartiklar blandades med explosivämne som detonerades i en stålbehållare fylld med sand. Även dessa mikropartiklar har tillsatser som gör dem magnetiska och fluorescerande (likt de som används i Schweiz) vilket möjliggjorde separation av partiklarna från sanden efter detonation. Efter partiklarna brutits ner med en specifikt framtagen metod kunde den unika sammansättningen av metalloxider korrekt analyseras. Nackdelen med dessa mikropartiklar är att provupparbetning krävs innan analys, men analysmetoden är relativt enkel, billig och finns i de flesta analytiska laboratorier. [10]

Samma typ av mikropartikel utreddes vidare i en studie 2014 som fokuserade på att optimera polymermatrisens termiska och mekaniska egenskaper för att göra partikeln mer robust och lämpad för användning som markör efter detonation. Genomfört detonationstest beskrevs som lyckat då 20% av identifieringspartiklarna kunde återfinnas och karakteriseras med korrekt sammansättning metalloxider. [11] I båda studierna användes fyra metalloxider och om fler kan implementeras i varierande koncentration har märkningsmetoden en lovande kodningskapacitet. Mer omfattande studier behöver dock göras gällande kompatibilitet med olika typer av sprängämnen samt hur märkningspartiklarna överlever och sprids vid en större detonation under mer verklighetstroga förhållanden.

3.4 DNA

DNA
Detektion Identifiering Manipulerbarhet Kodningskapacitet Kompatibilitet Toxicitet Implementering

DNA är en polymer som håller information gällande struktur och funktion av levande celler. Möjligheten att tillverka syntetiskt DNA har funnits länge och användningen av DNA som märkningsmetod har studerats sedan tidigt 1980-tal. DNA-märkning förekommer inom ett flertal marknader och det finns en rad företag som erbjuder tekniska lösningar för implementering av DNA för att förse objekt med unika koder. Några exempel där DNA-märkning tillämpas är på konstföremål eller andra dyrbara föremål, dokument, läkemedel i syfte att förhindra stöld och förfälskning, i mat- och textilindustrin, vid kontanthantering och mycket mer. Det finns därmed välutvecklade metoder för tillverkning av unika DNA-strängar, implementering och avkodning av dessa. Den mest välanvända analysmetoden är PCR (polymerase chain reaction) som kräver analyslaboratorium och är en relativt kostsam och tidskrävande metod. Det förekommer dock mycket forskning som fokuserar på att ta fram enklare analysmetoder för DNA som ska kunna genomföras fältnära med mobila laboratorier. [12]

Den största fördelen med DNA-märkning är att kodningskapaciteten är i princip obegränsad. Detta krav uppfylls även av andra märkningsmetoder såsom RFID eller QR-koder, men dessa tekniker kan inte mäta sig med DNA när det kommer till markörens storlek – DNA-molekylen kan lagra otroligt mycket information i en extremt liten volym vilket är en av anledningarna till att metoden redan tillämpas i så många branscher. Att tekniken ska kunna användas för märkning av sprängämnen är därmed troligt. [12]

En nackdel med DNA är molekylens känsliga karaktär, vilket innebär att inkapsling ofta krävs. Denna egenskap talar emot användning för spårning efter bombdåd, men det finns studier som fokuserar på att ta fram inkapslingsmetoder som ska göra DNA mer beständig mot värme och industriella miljöer. Man har visat att DNA i kiseldioxidpartiklar får en ökad termisk och kemisk stabilitet vilket kan möjliggöra DNA-märkning i kemiska och biologiska material. [13] [14] Någon studie där inkapslat DNA implementerats i explosivämnen har dock inte hittats, vilket skulle behöva genomföras både gällande kompatibilitet och gällande partiklarnas överlevnad i explosivämnet under förvaring samt vid detonation.

3.5 Fluorescensbaserade markörer

Fluorescens-baserade markörer
Detektion Identifiering Manipulerbarhet Kodningskapacitet Kompatibilitet Toxicitet Implementering

En annan vanlig märkningsteknik som redan förekommer kommersiellt för olika syften är användningen av markörer med ”unika” fluorescenssignaturer. Dessa inkorporeras ofta i partiklar gjorda av plast, glas eller keramiskt material för ökad stabilitet och lokalisering. Den mest frekventa markören av denna typ är fluorescerande organiska färgämnen som ger unika spektra när de analyseras med enkla, spektroskopiska metoder som finns i de flesta kemiska laboratorier samt med handhållna instrument som möjliggör avläsning i fält. Färgämnena är billiga, lättillgängliga och genom att kombinera flera olika genereras unika signaturer. Kodningskapaciteten kan dock vara begränsad då färgämnena ger breda spektra som överlappar med varandra. Andra tekniker försöker

bemästra detta problem där markörerna istället utgörs av kvantprickar som är halvledande nanokrystaller med unika optiska och elektroniska egenskaper. Kvantprickarna har generellt mer specifika (smalare) spektra och genom att variera deras storlek, som påverkar spektrumet, erhålls distinkta koder. En utmaning med kvantprickarna är dock att de ofta utgörs av ämnen som är cytotoxiska och har låg kemisk stabilitet. [2]

Så kallade *metal-organic frameworks* (MOF) har också undersökts för implementering och märkning i sprängämnen. MOF är en sorts porösa material där metallatomer binder till organiska molekyler i ett nätverk. Porösa strukturer tenderar att motstå höga tryck vilket gör

MOF:s intressanta som potentiella markörer efter bombdåd. Exempelvis så undersöktes MOF-baserade mikropartiklar där lantanoider inkorporeras för att erhålla fluorescerande egenskaper och ge partiklarna en unik kod. ANFO med markörer inblandade placerades i tomma datorkabinetter för att simulera detonation i en bankomat (ett återkommande samhällsproblem i Brasilien där studien genomfördes). Resterna av de sprängda datorkabinetterna svabbades och markörerna kunde återfinnas och identifieras. [15]

En fördel med att använda fluorescerande markörer är att de ofta kan lokaliseras och i vissa fall avläsas med relativt enkla analysmetoder i fält, vilket gör dem intressanta som forensiska märkningstekniker. Exempelvis kan de inkorporeras i pistolkrut för att kunna spåra krutrester på en brottsplats med en UV-lampa, men även för att ge ammunitionen unika koder. [16] Om det går att få till ett tillfredställande stort bibliotek av koder kan dessa typer av markörer vara intressanta för implementering i sprängämnen. Då det redan finns en rad färdiga, kommersiella märkningstekniker liknande dessa bör det finnas förutsättning för implementering, även om ytterligare tester är nödvändiga gällande kompatibilitet och identifiering före och efter bombdåd.

3.6 Grundämnen som markörer

En stor fördel med att använda grundämnena som markörer i sprängämnen är att de inte bryts ner vid en eventuell detonation såsom molekyler och partiklar kan göra. Utmaningen med grundämnena blir istället att säkerställa att de kommer från märkningen av explosivämnet och inte redan fanns i den naturliga miljön innan explosionen – något som går att komma runt genom att använda kombinationer av sällsynta ämnen eller isotoper.

3.6.1 Nuclear barcode

Nuclear barcode

Detektion
 Identifiering
 Manipulerbarhet
 Kodningskapacitet
 Kompatibilitet
 Toxicitet
 Implementering

En amerikansk forskargrupp har studerat en märkningsmetod för explosivämnen där den unika koden ska baseras på varierande sammansättning av sällsynta jordartsmetaller. De kallar metoden för "Nuclear barcode" som syftar på den analys de använder sig av för att identifiera ämnena efter explosionen – neutronaktiveringsanalys (NAA). Detonationstester genomfördes under 2017 där samarium och holmium blandades in direkt i ett kommersiellt explosivämne. Efter detonation svabbades ytor följt av analys med NAA som kunde identifiera båda ämnena. Nackdelen med denna analysmetod är att den är avancerad, dyr, tidskrävande och ej tillgänglig i vanliga

analyslabb då en kärnreaktor krävs. En fördel är analysmetodens höga känslighet vilket möjliggör inkorporering av ytterst liten mängd markör vilket är fördelaktigt kostnadsmässigt och lovande ur ett kompatibilitetsperspektiv. Denna märkningsmetod är dock i ett tidigt utvecklingsstadium och det finns troligtvis andra analysmetoder som kan användas för att identifiera de sällsynta jordartsmetallerna (fast sannolikt med lägre känslighet). Innan det går att utvärdera kodningskapaciteten behöver fler tester göras för att säkerställa möjlig identifiering av flera sällsynta jordartsmetaller i olika koncentrationer. [17], [18]

3.6.2 Isotopmärkning

Isotopmärkning

Detektion
 Identifiering
 Manipulerbarhet
 Kodningskapacitet
 Kompatibilitet
 Toxicitet
 Implementering

En annan märkningsteknik som baseras på rena grundämnena är isotopmärkning vilket innebär att stabila eller radioaktiva isotoper tillsätts i olika fraktioner. Isotoper är varianter av ett grundämne där antalet neutroner i atomens kärna skiljer sig åt (men antalet protoner är lika). I naturen förekommer grundämnena med en naturlig isotopfördelning och genom att berika en eller flera isotoper får ämnet en avvikande isotopfördelning som kan fungera som en unik typ av märkning. I Spanien gjordes en studie 2011 som utvärderade isotopmärkning som identifieringsmetod för sprängämnen. Detonationstester genomfördes där två isotoper berikades i en

blandning av aluminium, kaliumperklorat och svartkrut. Koncentrationsfraktionerna av isotoperna kunde analyseras korrekt både innan och efter detonation. En stor fördel med isotopmärkning är att ämnen redan förekommande i explosivämnet kan användas vilket är lovande för kompatibiliteten. En nackdel är att sällsynta isotoper oftast är dyra material. [19]

3.7 Sammanfattning av bedömningar av märkningstekniker

	Etsning	RFID	Microtaggant®	Explotracer	Polymer-partiklar med metalloxider	DNA	Fluorescens-baserade markörer	Nuclear barcode	Isotop-märkning
Detektion									
Identifiering									
Manipulerbarhet									
Kodningskapacitet									
Kompatibilitet									
Toxicitet									
Implementering									

Nyckel till figur:	Goda förutsättningar	Tveksamma förutsättningar	Dåliga förutsättningar	Bedömning kan inte göras
--------------------	----------------------	---------------------------	------------------------	--------------------------

Figur 2. Översiktlig sammanställning av för- och nackdelar med de studerade märkningsteknikerna.

4 Utblick och möjligheter

De märkningstekniker som inkluderats i denna rapport spänner från välutvecklade tekniker som används eller skulle kunna användas för märkning av sprängämnen, till tekniker eller metoder i olika stadier av utveckling. Polisen har under senare år beslagtagit stora mängder tänd- och sprängmedel, vilket belyser att kommersiella sprängmedel idag når den illegala och organiserade brottsligheten. Därför har huvudsyftet med denna tekniköversikt varit att framförallt belysa märkning av sådana tänd- och sprängmedel genom den legala hanteringen och efter att kommersiella varor kommit på avvägar (eller brukats i en illegal kontext). Samtidigt är det viktigt att ha i åtanke att modus kan skifta över tid, och att frågeställningen om märkningsalternativ kan komma att handla om andra produkter, kommersiella eller icke-kommersiella, samt andra kontexter. Det finns anledning att följa och försöka förutsäga hur hotbilden förändras samt att överväga bland annat märkning som ett medel att motverka den förändrade hotbilden.

En av de mer mogna tekniker som belysts är RFID som har goda förutsättningar för implementering inom den legala hanteringen. Potentiella applikationer är snabb och beröringsfri in- och utcheckning av sprängmedelsprodukter - i form av patronerat sprängmedel såväl som sprängkapslar - lagersaldouppdateringar samt för att underlätta tillsyn av sprängmedel. För denna tillämpning är tekniken mogen idag.^d Det finns även potential för detektion och identifiering av explosivämnen i kriminell kontext givet att räckvidden på nyttjad tagg är tillräcklig samt att modellen och anbringandet tillsammans resulterar i hög integritet. Enklare "överlevnadsstudier" för RFID i sprängmedel har genomförts 2024 och de preliminära resultaten pekar mot att de taggar som undersökts endast klarar detonation under gynnsamma förutsättningar. Frågor kvarstår dock kring om mer robusta taggar finns på marknaden alternativt kan utvecklas. Den vida tillämpningen av RFID skapar i sig förutsättningar för utveckling av robustare och mer temperaturbeständiga taggar. Ytterligare studier skulle även kunna ge insikt om inkapslingsmöjligheter samt ifall extern avläsning av information på chip kan utföras efter detonation. Potentiellt skulle då RFID kunna fungera som märkningsteknik i samtliga perspektiv som översikten belyst; **kontrollera, upptäcka och identifiera** (både före och efter bombdåd).

RFID har potential att i framtiden fungera i samtliga perspektiv; kontroll, upptäckt, identifiering (före och efter bombdåd) och är ur det hänseendet mycket intressant – utveckling och utvärdering behövs.

Laseretsning alternativt "imprinting" av plastdelar (kablage) i syfte att märka sprängkapslar och höljen/patroner är också implementerbart idag och möjliggör med relativt enkla medel en märkning som är mer beständig än dagens alternativ. Det är rimligt att branschen själv kan utreda implementeringsaspekter såsom optimal placering, möjlighet till kodningsupplösning och kostnader kopplat till detta.

Mikropartiklar har implementerats i Schweiz i syfte att möjliggöra bakspårning efter bombdåd och är därmed den enda beprövade och mogna markören för identifiering efter detonation som scanningen fångat upp. Detta till trots finns fortfarande många frågetecken kring hur väl dessa presterar. Om ett omedelbart införande av märkningsteknik med tillämpning efter bombdåd övervägs bör metoden först utvärderas. Ytterligare kontakt med

Mikropartiklar används idag i Schweiz och är därmed den enda implementerade märkningstekniken för tillämpning efter bombdåd som identifierats. Den kan tekniskt sett introduceras här på relativt kort tid. Utvärdering behövs.

^d En implementering av denna teknik för ovan tillämpning är möjlig att införa redan idag på frivillig basis inom ramen för rådande EU-direktiv (explosivvarudirektivet avses EU-direktiv 2014/28/EU). Det är också den enda av samtliga beskrivna märkningstekniker som är tillåten idag.

schweiziska myndigheter skulle sannolikt resultera i nyttig information kring erfarenheter och kostnader. En rimlig målsättning vore också att införskaffa mikropartiklar för egen utvärdering av prestanda.

Av de metoder som i övrigt kan nyttjas för identifiering (även efter bombdåd) bedöms märkning med DNA besitta hög potential då den bland annat har mycket hög kodningskapacitet och integritet. Utmaningar finns både med DNA-molekylens stabilitet i samband med detonation samt med den idag kostsamma och komplicerade analysen. Dock sker en hastig utveckling inom båda dessa områden drivet av det breda spektrumet av tillämpningar som finns kopplat till DNA. Med tanke på den snabba utvecklingen inom genmanipulering och sekvensering, vore det intressant att studera metoder för insamling och avkodning med de senaste miniaturiserade sekvenseringsinstrumenten. Även studier av metoder för att öka sannolikheten att finna intakt DNA efter detonation bör utföras.

DNA har mycket hög integritet och kodningskapacitet, vilket gör den väldigt intressant för identifiering. Utvecklingen inom DNA-sekvensering och det breda tillämpningsområdet driver på teknikutvecklingen vilket kan göra denna metod tillämpbar efter bombdåd inom kort. Bevakning och utvärdering behövs.

Vissa övriga tekniker som presenterats har möjligheter att göra märkningen mer beständig och därmed möjliggöra identifiering och spårning av explosivämnets ursprung, förhoppningsvis både innan och efter en detonation har ägt rum. Oavsett mognadsgrad skulle en mer omfattande undersökning behöva göras av de tekniker som verkar mest lovande, så att samtliga kravparametrar kan bedömas eller verifieras genom grundliga studier, beräkningar och tester.

5 Referenser

- [1] J. Gooch, B. Daniel, V. Abbate, and N. Frascione, "Taggant materials in forensic science: A review," *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, vol. 83. Elsevier B.V., pp. 49–54, Oct. 01, 2016. doi: 10.1016/j.trac.2016.08.003.
- [2] D. Paunescu, W. J. Stark, and R. N. Grass, "Particles with an identity: Tracking and tracing in commodity products," *Powder Technology*, vol. 291. Elsevier, pp. 344–350, Apr. 01, 2016. doi: 10.1016/j.powtec.2015.12.035.
- [3] P. K. Mishra, M. Bolic, M. C. E. Yagoub, and R. F. Stewart, "RFID technology for tracking and tracing explosives and detonators in mining services applications," *Journal of Applied Geophysics*, vol. 76. pp. 33–43, Jan. 2012. doi: 10.1016/j.jappgeo.2011.10.004.
- [4] D 4.1 - Feasibility study for markers and their detection, D 4.4 - Test results on markers and their detection, D 4.2 - Annex to D 4.4 Test results on markers and their detection, GA No. 101021330 – INHERIT: FOI-2022-460 2024
- [5] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. "Marking, Rendering Inert, and Licensing of Explosive Materials: Interim Report", Washington, DC: The National Academies Press 1997.
<https://doi.org/10.17226/5755>.
- [6] <https://www.microtracesolutions.com/technologies/implement-independently/microtaggant-identification-particles>.
- [7] I. Security and C. Program, "Taggants in Explosives," 1980.
- [8] https://www.axalta.com/polymerpowders_global/en_US/specialty-powder-additives/explotracer.html.
- [9] National Research Council, *Containing the Threat from Illegal Bombings*. Washington, DC, 1998.
- [10] L. Husáková *et al.*, "Characterization of industrial explosives based on the determination of metal oxides in the identification particles by microwave digestion and atomic absorption spectrometry method," *Forensic Sci Int*, vol. 178, no. 2–3, pp. 146–152, Jul. 2008, doi: 10.1016/j.forsciint.2008.03.009.
- [11] M. Večeřa, J. Machotová, O. Vodochodský, L. Prokůpek, J. Šňupárek, and Z. Akštein, "Rubber Modified Epoxy-Cyanate Ester Composites as Matrices for Tagging of Explosives," *Polymer - Plastics Technology and Engineering*, vol. 53, no. 12, pp. 1205–1214, 2014, doi: 10.1080/03602559.2014.886120.
- [12] A. Kuzdraliński, M. Miśkiewicz, H. Szczerba, W. Mazurczyk, J. Nivala, and B. Książkowski, "Unlocking the potential of DNA-based tagging: current market solutions and expanding horizons," *Nature Communications*, vol. 14, no. 1. Nature Research, Dec. 01, 2023. doi: 10.1038/s41467-023-41728-2.
- [13] D. Paunescu, M. Puddu, J. O. B. Soellner, P. R. Stoessel, and R. N. Grass, "Reversible DNA encapsulation in silica to produce ROS-resistant and heat-resistant synthetic DNA 'fossils,'" *Nat Protoc*, vol. 8, no. 12, pp. 2440–2448, 2013, doi: 10.1038/nprot.2013.154.
- [14] R. N. Grass, R. Heckel, M. Puddu, D. Paunescu, and W. J. Stark, "Robust chemical preservation of digital information on DNA in silica with error-correcting codes," *Angewandte Chemie - International Edition*, vol. 54, no. 8, pp. 2552–2555, Feb. 2015, doi: 10.1002/anie.201411378.
- [15] F. G. M. Mauricio, A. Z. Pralon, M. Talhivini, M. O. Rodrigues, and I. T. Weber, "Identification of ANFO: Use of luminescent taggants in post-blast residues," *Forensic Sci Int*, vol. 275, pp. 8–13, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.forsciint.2017.02.029.
- [16] M. A. M. Lucena, C. Ordoñez, I. T. Weber, M. Torre, C. García-Ruiz, and M. López-López, "Investigation of the use of luminescent markers as gunshot residue indicators," *Forensic Sci Int*, vol. 280, pp. 95–102, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.forsciint.2017.09.013.

- [17] J. Seman, C. Johnson, and C. Giraldo, "Holmium and samarium detectability in post-blast residue," in *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics Inc., Jul. 2018. doi: 10.1063/1.5044990.
- [18] J. Seman, C. H. C. Giraldo, and C. E. Johnson, "Reactive not Proactive: Explosive Identification Taggant History and Introduction of the Nuclear Barcode Taggant Model," *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, vol. 44, no. 4. Wiley-VCH Verlag, pp. 397–407, Apr. 01, 2019. doi: 10.1002/prep.201800322.
- [19] I. Carames-Pasaron, J. Á. Rodríguez-Castrillón, M. Moldovan, and J. I. García Alonso, "Development of a dual-isotope procedure for the tagging and identification of manufactured products: Application to explosives," *Anal Chem*, vol. 84, no. 1, pp. 121–126, Jan. 2012, doi: 10.1021/ac201945g.

