

Anna Pettersson

# Översikt över hur laser och NQR kan användas i minröjningssammanhang

Anna Pettersson

# Översikt över hur laser och NQR kan användas i minröjningssammanhang

<b>Utgivare</b> Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Vapen och skydd	<b>Rapportnummer, ISRN</b> FOI-R--0301--SE	<b>Klassificering</b> Teknisk rapport
	<b>Forskningsområde</b> 5. Bekämpning	
	<b>Månad, år</b> December 2001	<b>Projektnummer</b> E2003
	<b>Verksamhetsgren</b> 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	<b>Delområde</b> 51 VVS med styrda vapen	
	<b>Författare/redaktör</b> Anna Pettersson	
<b>Projektledare</b> Lena Sarholm		
<b>Godkänd av</b>		
<b>Uppdragsgivare/kundbeteckning</b> FM		
<b>Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig</b>		
<b>Rapportens titel</b> Översikt över hur laser och NQR kan användas i minröjningssammanhang		
<b>Sammanfattning (högst 200 ord)</b> En översikt över det internationella forsknings- och utvecklingsläget vad gäller laserneutralisering av minor och OXA, samt NQR som detektionsmetod för minor.  Utvecklingen inom laserneutralisering delas in i tre områden: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Neutralisering av främst OXA med högeffektlaser, utvecklat för att användas vid röjning av flygbasers övningsområden.</li> <li>• Neutralisering av minor i plasthölje.</li> <li>• Materialbearbetning/skäring av explosivämne utan termisk påverkan.</li> </ul> NQR är en ämnesspecifik detektionsmetod som kan särskilja olika sprängämnen. Tekniken är lovande, men lågt signal/brus-förhållande gör ett problem.		
<b>Nyckelord</b> Minröjning, laser, mindetektion, NQR		
<b>Övriga bibliografiska uppgifter</b>	<b>Språk</b> Svenska	
<b>ISSN</b> 1650-1942	<b>Antal sidor:</b> 16 s.	
<b>Distribution enligt missiv</b>	<b>Pris:</b> Enligt prislista  <b>Sekretess</b>	

<b>Issuing organization</b> FOI – Swedish Defence Research Agency Weapons and Protection	<b>Report number, ISRN</b> FOI-R--0301--SE	<b>Report type</b> Technical report
	<b>Research area code</b> 5. Combat	
	<b>Month year</b> December 2001	<b>Project no.</b> E2003
	<b>Customers code</b> 5. Contracted Research	
	<b>Sub area code</b> 51 Weapons and Protection	
<b>Author/s (editor/s)</b> Anna Pettersson	<b>Project manager</b> Lena Sarholm	
	<b>Approved by</b>	
	<b>Sponsoring agency</b> FM	
	<b>Scientifically and technically responsible</b>	
<b>Report title (In translation)</b> Overview of laser and NQR for the purpose of clearance and detection of mines		
<b>Abstract (not more than 200 words)</b> An overview of international research and development of laser neutralization of mines and UXO, and NQR as a method of detecting mines.  The development in laser neutralization is divided into three different areas: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Neutralization of UXO with high power lasers, meant for clearing airbase test- and training ranges.</li> <li>• Neutralization of mines in plastic envelopes.</li> <li>• Cutting of explosives without thermal interaction.</li> </ul> NQR is a detection method that is specific for the chemistry of different explosives. The method is promising, but the low signal-to-noise ratio poses a problem.		
<b>Keywords</b> mine clearance, laser, mine detection, NQR		
<b>Further bibliographic information</b>	<b>Language</b> Swedish	
<b>ISSN</b> 1650-1942	<b>Pages</b> 16 p.	
	<b>Price acc. to pricelist</b>  <b>Security classification</b>	

<b>Inledning.....</b>	<b>5</b>
<b>Neutralisering av minor och OXA med laserljus.....</b>	<b>5</b>
<b>DEN PÅGÅENDE UTVECKLINGENS INRIKTNING, FÖR- OCH NACKDELAR MED</b>	
<b>LASERRÖJNING .....</b>	<b>5</b>
<b>RÖJNING AV OXA MED METALLHÖLJE.....</b>	<b>6</b>
<b>RÖJNING AV MINOR MED PLASTHÖLJE .....</b>	<b>8</b>
<b>Interaktion Nd:YAG-laser och TNT .....</b>	<b>8</b>
<b>Interaktion mellan CO<sub>2</sub>-laser och TNT .....</b>	<b>9</b>
<b>LASERBEARBETNING AV EXPLOSIVÄMNEN.....</b>	<b>9</b>
<b>Nd:YAG- och Excimerlasrar .....</b>	<b>10</b>
<b>Femtosekundlaser, kortvågig IR .....</b>	<b>10</b>
<b>SAMMANFATTNING - RÖJNING MED LASER.....</b>	<b>10</b>
<b>Nuclear Quadropole Resonance – en teknologi för detektion av landminor</b>	
<b>.....</b>	<b>11</b>
<b>BAKGRUND.....</b>	<b>11</b>
<b>GRUNDEN FÖR NQR.....</b>	<b>11</b>
<b>PROBLEMATIKEN - SNR .....</b>	<b>12</b>
<b>ATT FÖRBÄTTRA SNR .....</b>	<b>12</b>
<b>INTRESSETER OCH PÅGÅENDE VERKSAMHET.....</b>	<b>14</b>
<b>SAMMANFATTNING, NQR.....</b>	<b>15</b>
<b>Referenser .....</b>	<b>16</b>

## **Inledning**

Detektion och rövning av minor är idag svårbemästrade och viktiga uppgifter. Världen över finns krigshärjade områden där stora mängder minor och annan OXA lämnats kvar (OXA=OeXploderad Ammunition). Vid fredsbevarande insatser med egna styrkor, för att röja väg och säkra terräng, är pålitlig och effektiv mindetektion och minrövning viktiga komponenter. Utvecklingen av detektions- och rövningmetoder drivs på inte minst av behovet att röja egna områden som kontaminerats, t ex militära övningsfält. Konventionella rövningmetoder är personalkrävande, ofta förenade med stor fara, tidsödande och i en del fall med stor negativ inverkan på närmiljön.

Denna rapport berör det aktuella internationella forsknings- och utvecklingsläget inom två högst specifika områden – neutralisering av minor med laserljus, samt detektion av minor med NQR-teknik (Nuclear Quadropole Resonance). Sammanställningen är uppdelad i två separata delar.

Utgångspunkten i denna rapports första del, som berör neutralisering av minor med laserljus, är att se minor som en delmängd av OXA, även om det ibland finns påtagliga skillnader. Minor har ofta en mycket liten eller obefintlig andel metall, detta gäller i synnerhet truppminor, medan bomber och subammunition från bomber som släppts från flygplan ofta är försedda med helt metallhölje. Detta ger naturligtvis upphov till skilda behov vad gäller både neutralisering och detektion. Trots detta finns även synergieffekter som kan utnyttjas, speciellt för laserrövning.

## **Neutralisering av minor och OXA med laserljus**

### **Den pågående utvecklingens inriktning, för- och nackdelar med laserrövning**

I omvärlden pågår på olika håll forskning och utveckling inom laserrövning av OXA och minor. Verksamheten kan delas upp i tre närbesläktade inriktningar.

Den första är neutralisering medelst en laserstråle med hög effekt. Det primära målet här är olika typer av klusterbomber som får gå till deflagration/detonation på plats, men metoden kan även användas för att neutralisera annan OXA.

Den andra inriktningen är mot laserneutralisering av trotylbaserade minor i plasthölje. Verkansförloppet är här en stillsam förbränning av minans hela explosiva innehåll.

Den tredje inriktningen är mot skärning och bearbetning av olika explosivämnen. Genom att registrera bearbetningsförloppet med spektroskopiska metoder kan man skära genom både ett ytterhölje och den explosiva laddningen utan att orsaka deflagration/detonation. Här är inriktningen inte direkt mot neutralisering av minor, men området bedöms ändå höra hemma i denna sammanställning på grund av de gemensamma bakomliggande principerna.

Skillnaden i förlopp ligger i olika egenskaper hos de belysta objekten, men även i skillnader på laserljusets våglängd, effekt och pulslängd.

Att använda en laser för att neutralisera minor har vissa uppenbara fördelar, bland dessa märks:

- Røjningen kan ske från säkert avstånd.
- Røjningen är snabb.
- Det går fort att växla mellan de objekt som skall neutraliseras.
- Marken/omgivningen förblir opåverkad, negativ miljöinverkan minimeras då extra laddningar inte behöver användas vid neutraliseringstillfället.
- Metoden fungerar oberoende av minans utlösningmekanism.

Till nackdelarna hör:

- Det krävs hög effekt från lasern.
- Det krävs ett tungt, specialiserat fordon.
- Teknologin är sofistikerad och dyrbar.
- Minan måste, åtminstone till viss del, vara frilagd.
- Tiden för bestrålning är beroende av typ av OXA/mina.

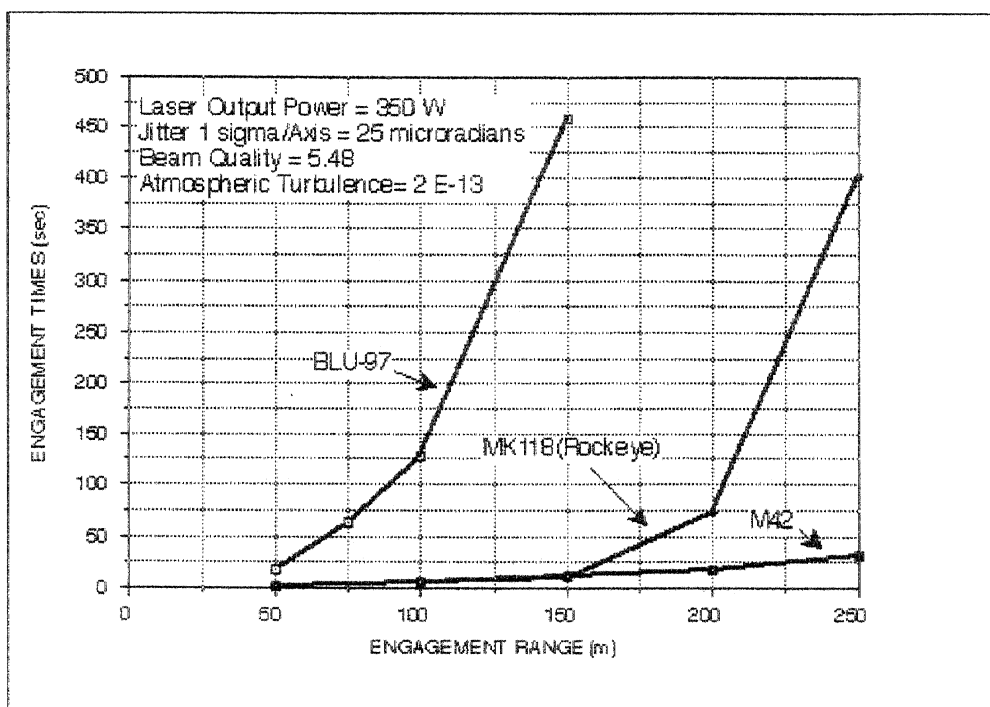
### **Røjning av OXA med metallhölje**

Under 1990-talet har man i USA demonstrerat funktionen av en fordonsmonterad kraftfull Nd:YAG-laser. I ett program som finansierats av US Air Force vid Eglin AFB tog man fram ett sådant system, MODS (Mobile Ordnance Disrupter System), vilket demonstrerades 1994. Detta har senare vidareutvecklats i ett samarbete mellan US Navy och Sparta Inc, och lett fram till ett förbättrat system, ZEUS, som nu finns kommersiellt tillgängligt och även används operativt på Nellis AFB<sup>[1], [2], [3], [4]</sup>.

Huvudsyftet med systemet, och även den finansiella drivkraften, har varit att öka säkerheten och minska arbetsinsatserna vid røjning av flygbasens övningsområden. Genom att utnyttja det fordonsbaserade lasersystemet behövs mindre personal, insatsen går fortare, riskerna är mindre och man sparar stora mängder plastiska sprängmedel som konventionellt används för att detonera kvarlämnad OXA. Med den nya metoden blir det också betydligt mindre påverkan på miljön.

Verkansmetoden för systemet är termisk. Metallhöljet som omger den explosiva laddningen upphettas av laserstrålningen. Värmen sprids till explosivämnet, som då det når reaktionstemperatur antingen deflagrerar eller detonerar. Om objektet ifråga är försett med plasthölje sker en förbränning av höljet tills även laddningen antänds och brinner upp.

I dagsläget används en diodpumpad Nd:YAG-laser (fundamental våglängd 1.064  $\mu\text{m}$ ) med 500 W nominell uteffekt<sup>[5]</sup>. Detta ger 350 W vid 50 meters avstånd, och med en stråldiameter på ca 6 mm är effekttätheten på målet ca 2400 W/cm<sup>2</sup>. Systemet är verksamt inom avstånden 50-250 m, men på grund av egenskaper hos strålprofilen och absorption i luften minskar effekttätheten med avståndet. Vid 250 m är stråldiameteren beräknad till ca 32 mm, effekttätheten ca 90 W/cm<sup>2</sup>. Den tid OXAn bestrålas varierar därmed mellan ett fåtal sekunder upp till 7-8 minuter, naturligtvis även beroende på vilket det specifika objektet är. Testade objekt med positivt resultat är åtminstone BLU-97, M42 och Rockeye.



Belysningstiden för tre olika objekt som funktion av avståndet. Diagram hämtat ur ref 1.

De tillämpningar för ZEUS-systemet som tillverkaren, Sparta Inc., nämner är följande<sup>[5]</sup> :

Röjning av aktiva områden:

- Röja luftfälda landminor och bomber från aktiva skjutfält.
- Röja ytlagda landminor
- Röja artilleriutskjutna landminor och -granater från skjutfält.
- Röja gevärsgranater från skjutfält.

Minbekämpning:

- Röja luftfälda, artilleriutskjutna eller på annat sätt ytlagda landminor för eget behov. Röja huvudleder, broar, samt landningsbanor för flyg i krigssituationer.
- Röja OXA och minor vid fredsbevarande uppdrag.

Ammunitionsröjning:

- Röja OXA efter krig
- Röja försätsminerade minor eller minor med snubbeltråd efter krig.
- Röja OXA på slagfält.

Återställande av miljö:

- Röja nedlagda skjutfält, FUDS (Former Used Defense Sites) och BRAC (Base Realignment and Closure).

Humanitär minröjning:

- Röja ytlagda/ytexponerade landminor och OXA.



Systemet kommer att uppgraderas till en 1000W laser, vilket ger kortare bestrålningstider och längre räckvidd.

Lasersystemet finns monterat på ett tilläggsarmerat fordon, HMMWV (High Mobility Multipurpose Wheeled Vehicle), med plats för en förare och en laseroperatör med tillgång till färgkamera och laserpekare. I dagsläget pågår utveckling av ett GPS-baserat system som skall underlätta för operatören att få en överblick över området och hitta de aktuella objekt som finns inom räckhåll för lasern<sup>[6]</sup>.

Det finns uppgifter som tyder på att Sparta Inc. är involverade i ett nytt utvecklingsprojekt tillsammans med U.S. Army Corp of Engineers<sup>[7]</sup>. Syftet är att utnyttja en kraftfull diodlaser med optisk fiber för att genom deflagration neutralisera OXA som ligger på och i marken. Fördelen med optisk fiber är att den kan användas för OXA som ligger bakom träd, stenblock eller längst ner i ett hål där man frilagt en minimal del av OXAn. Systemet kommer att användas på såväl aktiva övningsfält som FUDS (FUDS=Formerly Used Defense Sites). Lasern kommer att monteras på en John Deere "Gator" 4X6 terrängfordon med släp. Den fiberoptiska kabeln kommer att ha en längd på 100-200 m. Uppgifter om laservåglängd och – effekt saknas.

### **Röjning av minor med plasthölje**

Vid ISL (French-German Institute of Saint-Louis) studerar man neutralisering av TNT-baserade minor med PVC-hölje. De har inriktat sig på studier av interaktion mellan CO<sub>2</sub>-laser- eller Nd:YAG -laserstrålning och TNT<sup>[8], [9], [10]</sup>. TNT är vanligt förekommande i minor. Man har studerat laddningar som är frilagda eller inneslutna i PVC-hölje. Energiöverföringen från laserenergi till explosiv laddning skiljer sig åt mellan det tidigare beskrivna fallet då laddningen är försedd med metallhölje, och fallet då laddningen har PVC-hölje. Då laddningen har metallhölje är det fråga om en rent termisk process- sprängämnet upphettas till reaktionstemperatur. Ett PVC-hölje bränns snart igenom (pyrolyseras) och laserljuset interagerar direkt med sprängämnet. Detta gör att sprängämnets optiska egenskaper får stor betydelse för reaktionsförloppet.

### **Interaktion Nd:YAG-laser och TNT**

Experimentella studier har genomförts med en Nd:YAG-laser vid den fundamentala våglängden 1,064  $\mu\text{m}$ . De studerade objekten var både pressad och gjuten TNT, antingen utan inneslutning eller med PVC-hölje. De olika bearbetningsmetoderna för TNT ger väsentliga skillnader i de optiska egenskaperna – gjuten TNT har en diffus reflektion vid den aktuella våglängden på ca 50%, medan pressade TNT har närmare 97% diffus reflektion p g a spridning vid kristallytorna. Den högre reflektionen ger upphov till en högre kritisk lasereffekt (energi per tidsenhet) för initiering. Även transmissionen vid denna våglängd har betydelse – trots att den kan beskrivas som semitransparent med ett absorptionsdjup av storleksordningen flera mm, vilket gör att laserenergin absorberas även inuti objektet. Reflektions- och transmissionsmätningar har inkorporerats i en beräkningsmodell (Kubelka-Munk) som numeriskt skall beskriva initieringsförloppet.

I de inledande försöken har man utnyttjat en pulsad Nd:YAG som ger en effekttäthet av 40-300 W/cm<sup>2</sup> vid provet. Provet bestod av 30 g TNT i PVC-behållare, fritt liggande eller i pyrexkäril. TNT-provet har varit antingen gjutet eller pressat.

Då provet varit förslutet i en PVC-behållare har denna först bränts igenom via pyrolys, därefter har provet smält och en självbärande förbränning uppstått i ångorna ovanför provet. Om lasern stängs av pågår förbränningen under flera minuter, tills allt sprängämne är förbrukat. En högre effekttäthet minskar tiden det tar att bränna igenom höljet, medan provets förbränningstid är av samma storleksordning oberoende av effekttätheten.

Vid försök med friliggande prov har detta smält och runnit undan ifrån laserstrålen. Då provet istället placerats i glaskäril har det först smält fullständigt, sedan har en självbärande förbränning uppstått och pågått under 1-2 minuter.

Eventuella sotpartiklar har stor inverkan på tidpunkten då förbränningen startar - dessa absorberar laserljuset väl och ger en "hot spot" som påskyndar antändningsförloppet. Sotiga restprodukter från PVC-höljet underlättar därmed antändningen av den smälta trotylen.

### **Interaktion mellan CO<sub>2</sub>-laser och TNT**

Vid dessa försök har man utnyttjat en kontinuerlig CO<sub>2</sub>-laser (10,6 µm) med en högsta effekttäthet vid provet på 300 W. Provet, bestående av pressat eller gjutet TNT, har varit inneslutet i PVC. Två olika förlopp beroende på effekttätheten har noterats.

Vid höga effekttätheter (>200 W) fås ablation av såväl hölje som prov, men då lasern stängs av avstannar processen och självbärande förbränning uppstår ej (Ablation är en förångning/plasmabildning av materialets yttersta skikt). Vid lägre effekter (<100 W) fås däremot ofta en självbärande förbränning när lasern stängs av, förbränningen pågår tills provet bränts igenom.

Förklaringen till dessa fenomen är sannolikt det för denna våglängd korta absorptionsdjupet, av storleksordningen några µm, i kombination med en låg värmeledningsförmåga. Merparten av laserenergin absorberas i ytskiktet, och leds därefter termiskt vidare in i provet. Detta medför att vid höga effekttätheter når temperaturen i ytskiktet snabbt upp till och stabiliseras vid ablationsnivå, och ablationsfrontens hastighet är proportionellt beroende av effekttätheten. Om lasern stängs av avstannar processen. Vid lägre effekttätheter hinner viss del av laserenergin spridas termiskt in i provet, och temperaturstegringen inuti provet kan leda till en sönderfallsprocess – och självbärande förbränning.

Även för 10,6 µm har de optiska egenskaperna studerats och införlivats i den beräkningsmodell som nämnts i samband med Nd:YAG-studierna.

### **Laserbearbetning av explosivämnen**

Experimentella försök att bearbeta/skära explosivämnen, även inklusive metallhöljen, med laser pågår vid Lawrence Livermore och Los Alamos National Laboratories i USA. Användningsområdet sträcker sig ifrån precisionsbearbetning av explosivämneskomponenter till att demontera gamla vapen och störta OXA. Anledningarna till att man tittar på dessa metoder är dels att hitta en effektiv process som inte överför värme till objektet (och därmed

ökar risken för oönskad initiering), dels att minska mängden miljöfarligt avfall från bearbetningsprocessen.

Principen är att den tillförda laserenergin ej skall leda till upphettning av sprängämnet, utan istället ge ablation.

### **Nd:YAG- och Excimerlasrar**

Los Alamos har genomfört experiment där man bl a utnyttjat en Nd:YAG-laser<sup>[11]</sup>. Syftet här var att visa på möjligheten att skära och borra genom metall och explosivämne på ett säkert och effektivt sätt. Försöken har utförts för en rad olika explosivämnen: TNT, Comp B (60% RDX / 40% TNT), PBX 9404 (94% HMX / 3% NC / 3% plast), PBX 9502(95% TATB / 5% Kel-F) och PETN. Man har även skurit genom en inert M75 stridsvagnsmina.

Den fundamentala våglängden 1,064  $\mu\text{m}$  används för att skära genom metallhöljen. Den optiska emissionen under skärningsprocessen registreras i realtid med LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy), på så sätt fås en identifikation av det bearbetade ämnet, och processen avbryts då spår av explosivämnet blir synliga. Härefter väljer man att byta till tredje eller fjärde harmoniska våglängden (355 nm eller 266 nm) för Nd:YAG, vilka båda ligger i UV-området. Laserenergin i dessa våglängdsområden absorberas snabbt företrädesvis i ytskiktet och ger till största delen ablation. En viss förändring, i form av utkast eller smälta, ses på explosivämnets snittyta. Försök med Excimer i UV tyder på att dessa problem minskar vid kortare våglängder (längre ner i UV-området).

Systemet kan göras fältmässigt, och kan då användas för att skära upp OXA, därefter kan en valfri metod användas för att oskadliggöra det explosiva innehållet.

### **Femtosekundlaser, kortvågig IR**

Vid Lawrence Livermore National Laboratory har man experimenterat med en femtosekundlaser som skär genom explosivämnen med eller utan angränsande rostfritt stål-skikt<sup>[12]</sup>. Lasern har en våglängd på 820 nm och pulslängden 100 fs ( $1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$ ). Pulsfrekvensen är 1 kHz och medeleffekten 0,5 W. Man har skurit/borrat genom LX-16 (96% PETN / 4% FPC 461), LX-14 (95,5% HMX / 4,5% Estane), LX-15 (95%HNS / 5%Kel-F), LX-17 (92,5% TATB / 7,5% Kel-F), PBX-9407 (94% RDX / 6% Exon 461) samt TNT utan något synbart tecken på reaktion.

Tekniken ger mycket fina snittytor med hög precision. Anledningen till detta är de extremt korta pulserna som ger en energiöverföring där energin absorberas alltför snabbt för att värmeöverföring skall hinna äga rum i materialet. Det heta plasma som bildas expanderar snabbt och kyls av.

Femtosekundlaser kan även användas för att skära genom andra material, såsom aerogel, keramer och diamant.

### **Sammanfattning - röjning med laser**

Utvecklingen av laser som minröjningsmetod drivs på framför allt av behovet av snabba och säkra metoder att röja övningsfält och flygbaser med stora mängder OXA, t ex klusterbomber. Man är även ute efter ekonomiska och miljömässiga vinster genom att undvika nyttjandet av stora mängder plastiska sprängmedel vid röjningsarbetet. Trots vissa skillnader i

förutsättningar mellan rövning av minor respektive OXA kan metodiken appliceras även på minfältet. Ett exempel på detta är den utrustning Sparta Inc. utvecklat och som nu finns kommersiellt tillgänglig. Viss forskning kring interaktion mellan laser och PVC-inklädda minor pågår. Ett annat område av intresse är materialbearbetning av explosivämnen med hjälp av laser – här är målet att kunna skära genom sprängämnen med minimal termisk påverkan, dvs utan risk för initiering. Metoden kan användas t ex för att störta ammunition och OXA.

Den största fördelen med att utnyttja laser vid rövning är att man kan arbeta på säkert avstånd och att det går snabbt att växla mellan målen. Begränsningen ligger framförallt i den skrymmande utrustningen - som i princip måste vara fordonsmonterad – samt i det faktum att åtminstone någon del av minan måste vara frilagd.

## **Nuclear Quadropole Resonance – en teknologi för detektion av landminor**

### **Bakgrund**

Den vanligaste metoden som används för mindetektion är fortfarande den elektromagnetiska metalldetektorn, som fungerar enligt samma principer som de detektorer som nyttjades under andra världskriget. De fungerar för minor med metallinnehåll, men att detektera en truppmina med kanske enbart 0,5 g metall i slagstiftet är inte helt enkelt. Känsligheten på detektorn måste sättas mycket hög – vilket i sin tur innebär att detektorn reagerar även på spridda metallfragment i marken. Detta ger en hög andel falsklarm. För att skilja minorna från falsklarm används i dagsläget minpikar. En mycket tidsödande och riskabel operation.

Problematiken är liknande även för seismiska detektionsmetoder, röntgentekniker, ”back scatter” osv, och grundas på det faktum att retursignalen inte är unik för minor. Det vore önskvärt att istället finna en detektionsmetod som är unik för minor. Det är här NQR (ibland kallat QR) kommer in - NQR är en metod som är känslig för den specifika kemin hos explosivämnet.

### **Grunden för NQR**

Kvadrupolmomentet är en kärnfysikalisk egenskap som beskriver laddningsfördelningen inom en atomkärna. Enkelt beskrivet är kvadrupolmomentet noll om protonerna (de positivt laddade partiklarna i kärnan) är symmetriskt fördelade. Om laddningarna är förskjutna så att laddningsfördelningen ger kärnan ett elliptiskt utseende är kvadrupolmomentet skilt från noll, dvs kärnan har ett kvadrupolmoment. Endast kärnor som har spinnkvanttalet  $I \geq 1$  uppvisar kvadrupolmoment. För en kärna med  $I = 1$  är spinnstillstånden uppdelade i tre olika nivåer. Avstånden mellan nivåerna, mätt i energi, beror av en elektrostatisk interaktion mellan kärnans laddningstäthet och -fördelning och den elektriska potentialen i det kringliggande elektronmolnet. Speciellt betydelsefullt är kopplingen mellan kvadrupolmomentet och gradienten hos det elektriska fältet, som till stora delar är beroende av kemin runt atomkärnan, och till viss del även den lokala kristallstrukturen. Då radiofrekvent (RF) strålning av rätt frekvens, dvs med energi som passar en godtycklig spinnövergång, träffar kärnan så uppstår en förändring i populationsfördelningen av spinn-tillstånden, en excitation. En pulsad RF-excitation ger upphov till magnetisk oscillation i kärnan vid specifika, resonanta, frekvenser, som kan detekteras med en RF-slinga. Det är dessa frekvenser som utgör NQR-signalen.

Den kärna som är av störst intresse för minapplikationer är  $^{14}\text{N}$ , som har spinnkvanttal  $I = 1$ . Resonansfrekvenserna från  $^{14}\text{N}$  kan variera mellan 0-6 MHz beroende på kemin i den förening

där den förekommer. Detta gör NQR mycket känslig för kemiska egenskaper hos det studerade (explosiv)ämnet. Varje förening har därför en unik resonanssignatur, vilket kan utnyttjas för att särskilja t ex TNT, RDX och tetryl, vilka är de mest intressanta föreningarna i mindetektionssammanhang. Principen för NQR-detektion är enkel – applicera en RF-puls eller serie av RF-pulser vid en frekvens som är resonant för explosivämnen av intresse och registrera eventuell retursignal.

RF-signalen skärmas av metallytor, varför NQR-detektion inte fungerar för metallinklädda explosiva laddningar. NQR-detektorn kan i dessa fall fungera som en metalldetektor, men information om det specifika innehållet kan inte erhållas.

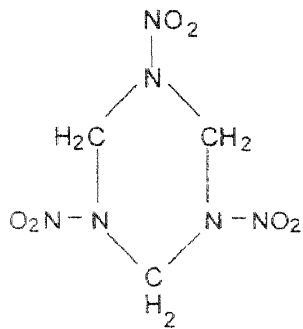
### **Problematiken - SNR**

Det stora problemet med denna i övrigt mycket lovande teknik är det låga signal/brusförhållandet, SNR (Signal to Noise Ratio). NQR-signalerna är mycket svaga. De registreras genom sin påverkan på en slinga som är känslig för RF-signaler. Denna slinga genererar alltid en termisk störning. Även den efterföljande RF-förförstärkaren bidrar med termisk störning, om än i mindre grad. Det är denna störning i kombination med de låga signalnivåerna som ger låga SNR-nivåer, och därmed hittills har begränsat den praktiska användningen av NQR-detektorn.

För större föremål såsom stridsvagnsminor, som kan innehålla 5-6 kg sprängämne, utgör SNR inte något problem. De betydligt mindre truppminorna som kan innehålla 100 g sprängämne är däremot betydligt svårare att hantera. Det finns många signalbegränsande faktorer. Alla  $^{14}\text{N}$ -kärnor bidrar inte till signalen på samma sätt, beroende på hur polarisationen (den elliptiska laddningsfördelningen) är orienterad i förhållande till RF-signalens infallsriktning. För exempelvis ett pulverformigt sprängämne blir signalen 43% av "teoretiskt maximal" signalstyrka. Därefter tillkommer det faktum att kväve typiskt utgör endast 2-10% av ett sprängämne. Tillsammans med de termiska störningarna i detektorn innebär detta en signal som är av samma storleksordning som bruset. Signalen förbättras proportionellt mot  $n^{1/2}$  genom att öka antalet (n) mätningar och sedan medelvärdesbilda resultatet. För att metoden skall vara attraktiv i fält är det dock önskvärt att hålla nere detektionstiden, vilket begränsar antalet mätningar. Det är alltså högt SNR per tidsenhet som är målet, och det är häri utmaningen ligger.

### **Att förbättra SNR**

Det enklaste sättet att mäta NQR är att skicka ut en RF-puls och sedan studera signalen från en resonansfrekvens. På grund av det låga SNR-förhållandet är detta dock ur praktiska perspektiv ej funktionellt. Ett sätt att förbättra SNR är att mäta på flera linjer samtidigt. RDX-molekylen innehåller 6 kväveatomer ( $^{14}\text{N}$ ), och varje atom har tre olika möjliga detektionsfrekvenser – sammanlagt finns 18 olika resonansfrekvenser. Alla är dock inte av intresse i praktiken – valet av mätfrekvenser kan påverkas t ex av de skilda relaxationstiderna (tiden det tar för populationen i de spinnexciterade nivåerna att återgå till ursprungstillståndet), och hur stor spridningen mellan frekvenserna är. SNR-förhållandet ökar med roten ur antalet observerade frekvenser.



*RDX-molekyl. Molekylen innehåller 6 olika kväveatomer som var och en ger upphov till tre unika resonansfrekvenser – totalt 18 stycken.*

NQR-signalen från sprängämnet existerar under mycket korta tidsrymder. Detta ställer till vissa mättekniska problem, eftersom mottagaren behöver en viss tid på sig för att återhämta sig efter den kraftiga RF-pulsen. När mottagaren är redo har NQR-signalen redan avklingat. Det är därför nödvändigt att antingen använda en speciell krets kopplad till slingan för att hastigt avlägsna energin i slingan eller utnyttja ”spinn-eko”-teknik, då NQR signalen skapas som ett eko en viss tid efter RF-pulsen. Denna teknik är också en fördel när det gäller att korta ner den totala mättiden. Med SLSE-teknik (Spin Lock Spin Echo) skapas ett pulståg av ekosignaler med ca 1 ms mellanrum och med en total längd av ca 50 ms. Jämfört med att bara mäta på en enstaka puls utan eko-teknik förbättras SNR teoretiskt med 10 ggr (i praktiken något mindre). Efter att polarisationen i  $^{14}\text{N}$ -atomen återgått till ursprungstillståndet kan en ny RF-puls med efterföljande mätsekvens påbörjas. Den totala relaxationstiden varierar från 11ms för RDX till 4s för TNT. Hittills är ekosekvenser den framkomliga metoden att komma till rätta med de svaga NQR-signalerna från TNT. För RDX, som inte har en lika lång relaxationstid, används ofta en teknik kallad PAPS-NPAPS (Phase Alternated Pulse Sequence-Non-Phase Alternated Pulse Sequence), som ger ungefär tusen signaler per sekund.

Det är också nödvändigt att förbättra designen hos slingan för att kunna förbättra detektionsförmågan och minska kraven på RF-sändaren. Kopplingen mellan slingan och medium med stora elektriska förluster, t ex våt jord, är också av stor vikt då det gäller att maximera NQR-signalen. Maximala sökområdet för en NQR-detektor bestäms i stort av slingans diameter, vanligen 10-100 cm i dessa applikationer. Sökdjupet har i fältförsök visat sig vara 0-15 cm under markytan.

Ett problem som blir uppenbart vid fältanvändning är inverkan av radiofrekventa störningar. Det kan t ex vara frågan om AM-sändare eller kraftaggregat som finns i närheten av området. Sådana störfält kan utgöra stora problem om de lämnas utan åtgärd. Det finns två olika tillvägagångssätt för att motverka dessa störningar – passivt och aktivt skydd. Det passiva skyddet kan åstadkommas genom att utforma slingan på ett specifikt sätt och därmed skärma störsignalerna, något man studerat och prövat på NRL (National Research Laboratory). Det amerikanska företaget Quantum Magnetics har istället utvecklat ett aktivt skydd, bestående av en antenn som utformats för att plocka upp radiofrekventa störningar. Dessa kan sedan digitalt subtraheras från NQR-signalen. En tekniskt krävande men effektiv metod.

Den låga SNR-nivån hos NQR-detektorn kan medföra falsklarm, speciellt vid sökandet efter de relativt små trupperna. Till skillnad från andra detektionsmetoder kan man dock utreda osäkra eller falska signaler med själva NQR-detektorn. Det sporadiska brus som ger upphov till falsksignaler får mindre inverkan på detektionsnoggrannheten ju fler mätningar som utförs. Ett praktiskt sätt att använda NQR är att initialt svepa över området med optimerad hastighet, för att sedan mäta över objektet med förbättrad noggrannhet (dvs under en längre tidsrymd).

## Intressenter och pågående verksamhet

Många forskare över hela världen har bidragit till utvecklingen av NQR som mindetektionsmetod. Föregångaren till NQR är NMR, som utnyttjar ett statiskt magnetfält för att åstadkomma spinnrelaterad orientering av atomkärnor. Metoden ger starka signaler, men kräver ett starkt magnetfält, ca 0,05-20T. NMR upptäcktes samtidigt, 1946, av två skilda forskargrupper, en vid Stanford University i Kalifornien, och en vid Harvard University i Cambridge<sup>[13]</sup>. Den brittiska armén hyste vissa förhoppningar om att kunna utnyttja NMR för detektion av landminor. Detta fungerade under laboratorieförhållanden, men rent fältmässigt är det förenat med stora svårigheter att åstadkomma ett statiskt magnetfält i en mina placerad under markytan. Istället lyckades man påvisa rena NQR-signaler inducerade av RF-signaler, och helt utan pålagt magnetfält. 1951 lyckades man påvisa NQR-signal från <sup>14</sup>N i tre olika föreningar, något man undersökt i syfte att finna en detektionsmetod för explosivämnen.

Därefter har ett stort antal forskargrupper av olika nationaliteter studerat NQR. Förutom USA och Storbritannien märks också Ryssland, Australien, Polen, Tyskland, Kina och Japan. Totalt finns det i dagsläget ca 40 patent och applikationer för NQR som detektionsteknologi.

I USA har NRL (National Research Laboratory) varit involverade i utvecklingen av NQR för explosivämnes- och narkotika-detektion sedan mitten av 80-talet, och en del av teknologin som utvecklats där har licensierats till Quantum Magnetics, ett företag som utvecklat NQR-system sedan 1993, och som erhållit finansiellt stöd av DARPA (Defence Advanced Research Project Agency) för att utveckla en mindetektor<sup>[13]</sup>. Quantum Magnetics gjorde under hösten 1999 ett fälttest av en prototyp för landmindetektion. Prototypen består av en handhållen sensordel som via ett kabelknippe kopplats till ett rack med elektronikutrustning. Den har också ett aktivt störningsskydd i form av en antenn som mäter störningar inom aktuella frekvensband. Man testade detektion av RDX och TNT i stridsvagnsminor och i truppminor. Vid detektionen markerades ett rutnät över testfältet bestående av 15\*15 cm stora celler. Varje cell sveps en gång med NQR i en turordning som motverkar mättnadseffekter från närliggande celler. För båda typerna av sprängämne använde man enkelsvep för att korta den totala detektionstiden. RDX ger en högre SNR-nivå än TNT, varför TNT står för merparten av falsklarmen. Försök med nedgrävda stridsvagnsminor (2-5 cm övertäckning) av typerna TMA-4, Typ 72 och TMM-1 gav 100% detektion med en sannolikhet för falsklarm på 0,25% , eller 0,11 falsklarm per m<sup>2</sup>, för detta specifika försök. Samtliga falsklarm härrörde från TNT-mätningar. Vid ett senare tillfälle gjordes ett fältförsök med truppminor av typerna PMA-1A och VS-50. Detektionsnivån sattes i detta fall lägre, vilket medför ett större antal falsklarm (av storleksordningen 1-3 ggr antalet sanna minor). För att utröna effektiviteten med upprepade mätningar gjordes fullständiga mätningar, enligt samma princip som ovan, i tre separata pass. Genom att jämföra två pass med varandra kunde man utesluta flertalet falsklarm: Pass 1 kombinerat med pass 2 gav 100% detektion och inget falsklarm, pass 2 kombinerat med pass 3 gav samma goda resultat. Pass 3 kombinerat med pass 1 gav 100% detektion och 0,4 falsklarm per m<sup>2</sup>. Resultaten är så goda att Quantum Magnetics fått i uppdrag att producera två olika versioner av NQR-detektorn, en bärbar variant beställd av US Marine Corps, och en fordonsmonterad variant som skall användas av US Army för att svepa vägar<sup>[14]</sup>.

Under ”OXA Countermine Forum 2001” presenterades ett pågående arbete som syftar till att utveckla en matematisk modell som ger information om minans volym och vid vilket djup den är placerad<sup>[15]</sup>. Metoden bygger på ett beroende mellan pulslängden hos RF-pulsen, minans placering och energin i resonanssignalen. Laboratorieförsök har genomförts, och arbetet med att skapa en pålitlig matematisk modell för tillämpning i fält fortskrider. Någon förändring av

NQR-detektorns utformning krävs inte, metoden är kompatibel med Quantum Magnetics utvecklade prototyp. Information om den explosiva laddningens volym och vid vilket djup den är placerad kan vara till stor nytta vid röjningsförfarandet. Det är också möjligt att upptäcka försätsmineringar, såsom en truppminera placerad under en stridsvagnsmina.

Vid UXO/Countermine Forum 2001 presenterades även arbete vid tidigare DERA (Defence Evaluation and Research Agency), Storbritannien, som syftar till utveckling av NQR-tekniken<sup>[16]</sup>. Uppmärksamhet ägnas åt förbättringar på flera plan: Antennens känslighet ökas genom att minska systembruset och minska mottagligheten för brus utifrån, signalbehandlingen utvecklas, vilket leder till ett lägre acceptabelt SNR-förhållande, och pulssekvenserna utformas för att kunna öka hastigheten på signaldetektionen.

### **Sammanfattning, NQR**

NQR-tekniken har gjort stora framsteg under det senaste årtiondet. Principen för NQR är välkänd och väldokumenterad sedan länge, och system för narkotika- och explosivämnesdetektion används i dagsläget t ex vid säkerhetskontroller på flygplatser. Det stora problem som kvarstår att lösa innan systemet kan användas framgångsrikt i fält vid mindetektion är det låga SNR-förhållandet. Här har det skett en kraftig utveckling under det senaste årtiondet, och utveckling pågår på flera håll i världen. I USA har Quantum Magnetics, med finansieringsstöd från DARPA, utvecklat en prototyp för mindetektion som gett goda resultat vid fälttest. Utveckling av färdiga system pågår. Metoden anses som mycket lovande. Dess främsta styrka är dess selektivitet – eftersom varje kväveförening förknippas med ett unikt resonansfrekvensspektrum ger ofarliga material inget utslag på detektorn. NQR kan användas antingen som enda detektionsmetod eller som komplement till andra detektionsmetoder. Räckvidden för NQR-detektorn är av samma storleksordning som RF-slingans diameter – vanligen av storleksordningen 10-100 cm, i djupled är räckvidden 0-15 cm.



## Referenser

1. M. Kolodny, V. Marinelli, E. Lorelli: *OXA Clearance Technology Requirements for Active Test and Training Ranges* UXO/Countermine Forum 1998.
2. E. J. Lorelli: *Laser Neutralization of UXO* UXO/Countermine Forum 1999.
3. Sparta Inc. hemsida <http://www.zeus.sparta.com>
4. *Laser Neutralization of Hazardous Unexploded Ordnance* Ongoing project report, ESTCP (Environmental Security Technology Certification Program 1999)
5. C DeBolt, O. C. Hofer, R. G. Root: *Diode-Pumped Laser* Office of Naval Research – rapport från hemsida.
6. J. J. Schiavone: *Enhancing Laser Neutralization of UXO using GPS Targeting Data* UXO/Countermine Forum 2001.
7. *Diode Laser Neutralization of UXO via Fiber-Optics Delivered Energy* Ongoing project report, ESTCP (Environmental Security Technology Certification Program 2001)
8. R. Joecklé, B. Gautier, F. Lacroix, J.-P. Moeglin: *Ignition of Explosives by Laser Beam* French-German Research Institute of Saint-Louis, PU 314/98
9. F. Lacroix, B. Gautier: *Enhancement of Laser Absorptivity Properties of HEX* French-German Research Institute of Saint-Louis, PU 341/2000
10. B. Gautier: *Neutralisation laser des mines. 2e partie: Irradiation laser d'explosifs nus, caractérisation optique des explosifs* French-German Research Institute of Saint-Louis, R 119/2000
11. T. Rivera, R. Muenchausen, J. A. Sanchez: *Laser Cutting of Energetic Materials* Los Alamos National Laboratory, LA-UR-98-1308
12. F. Roeske, Jr., R. E. Banks, J. P. Armstrong, M. D. Feit, R. S. Lee, M. D. Perry, B. C. Stuart: *Laser Cutting of Pressed Explosives* Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-JC-128373 Rev 1 preprint, 1998
13. N. Garroway, M. L. Buess, J. B. Miller, B. H. Suits, A. D. Hibbs, G. A. Barall, R. Matthews, L. J. Burnett: *Remote Sensing by Nuclear Quadropole Resonance* IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 39, 1108-1118 (2001)
14. *Detection of Landmines by Nuclear Quadropole Resonance at the Naval Research Laboratory (NRL)* NRL Press Release February 22, 2000
15. J. L. Schiano, D. Lieblich, M. D. Ginsberg: *Imaging Explosive Depth and Volume using NQR* UXO/Countermine Forum 2001-12-05
16. A. Burch, R. M. Deas, R. Rutherford: *Overview of UK Mined Area Detection Applied Research Programmes* UXO/Countermine Forum 2001-12-05