

Deteksjon av eksplosivrester i felt ved hjelp av hyperspektral avbildning

Leif Amund Lie, Torbjørn Skauli, Tove Engen Karsrud og Marthe Petrine Parmer

Forsvarets forskningsinstitutt/Norwegian Defence Research Establishment (FFI)

20. november 2009

FFI-rapport 2009/01426

1043

P: ISBN 978-82-464-1720-2

E: ISBN 978-82-464-1721-9

Emneord

Hyperspektral avbildning

Eksplosiver

Forurensning

Godkjent av

Øyvind Sjøvik

Prosjektleder

Stian Løvold

Forskningsjef

Johnny Bardal

Avdelingssjef

Sammendrag

Der er kjent at det i Forsvarets skytefelt ligger rester av eksplosiver, noe som hovedsakelig skyldes ufullstendig detonasjon av ammunisjon. Disse restene er vanskelige å finne, men er ansett å være et miljøproblem blant annet fordi stoffene er giftige i større eller mindre grad.

Hyperspektral avbildning er en teknologi som kan utnytte informasjon i lysets spektrum, eller "farge" i utvidet forstand, til å kartlegge forekomst av forskjellige stoffer. Denne rapporten beskriver innledende eksperimenter med deteksjon av eksplosivrester ved hjelp av hyperspektral avbildning. Resultatene tyder på at eksplosivrester har spektrale signaturer som vil kunne utnyttes. Rapporten danner grunnlag for innledende vurderinger av nyttepotensialet til hyperspektral avbildning for søk etter eksplosivrester.

English summary

Military firing ranges are known to be contaminated by particles of explosives, mainly due to incomplete detonations of munitions. The explosive particles are difficult to find, but are considered to pose an environmental hazard because the substances are poisonous, to a varying degree. Hyperspectral imaging is a technology which exploits the information contained in the spectrum of light, to map the distribution of different materials. This report describes preliminary experiments with detection of explosives using hyperspectral imaging. The results indicate that explosives exhibit spectral signatures that can be exploited for detection. The report forms the basis for an initial assessment of the utility of hyperspectral imaging to identify hot spots of explosives.

Innhold

1	Innledning	7
1.1	Bakgrunn	7
1.2	Eksplosiver	7
2	Hyperspektral avbildning	8
3	Eksperimentelle undersøkelser	9
3.1	Prøver som er undersøkt	9
3.2	Bilder på FFIs gressplen	9
3.2.1	Eksperimentelt	9
3.2.2	Resultat fra analyse av bilder	10
3.2.3	Resultat fra spektromettermålinger	12
3.3	Bildeopptak i laboratorium med kamera for både VNIR og SWIR	12
3.3.1	Eksperimentelt	12
3.3.2	Resultater	14
3.3.3	Diskusjon	15
3.4	Bildeopptak utendørs med kamera følsomt i SWIR-båndet	21
3.4.1	Eksperimentelt	21
3.4.2	Resultat og diskusjon	22
4	Vurdering av praktisk anvendbarhet	27
4.1	Tilgjengelig spektral signatur	27
4.2	Partikkelstørrelse	27
4.3	Dekningsområde	28
4.4	Belysning	28
4.5	Sikt og tildekking	28
4.6	Praktisk realisering og bruk	29
5	Konklusjon og anbefalinger	30
	Appendix A Reflektansspektre i bølgetall	32
	Referanser	35

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

I Forsvarets skyte- og øvingsfelt vil det finnes forurensning av eksplosiver fra ammunisjon. Avhengig av type våpen, ammunisjon og omsetningsgrad vil eksplosivene foreligge i ulike partikkelstørrelser. Partiklene vil være svært heterogent fordelt over store arealer. Store partikler og områder med mye eksplosivrester kan utgjøre både en helseisiko og et miljøproblem på grunn av stoffenes giftighet. Den heterogene fordelingen av partiklene medfører store utfordringer ved prøvetaking og kartlegging. For å sikre tilstrekkelig godt datagrunnlag for risikovurdering, kreves det derfor at det tas et stort antall prøver som må analyseres. Dette vil være tidkrevende og kostbart. Det er derfor nyttig å vurdere/finne andre metoder som kan identifisere sterkt forurensede steder og dermed minimere antall prøver som må tas.

Denne rapporten beskriver innledende forsøk der hyperspektral avbildning er undersøkt som metode for å detektere eksplosivrester i terrenget. Dette er utført ved FFIs gruppe for hyperspektral avbildning der mesteparten av arbeidet er gjort av sommerstudent Leif Lie sommeren 2008.

Det er gjort tre forskjellige eksperimenter som beskrives sammen med tilhørende resultater i hvert sitt kapittel nedenfor. Rådata og alle bilder og filer omtalt i det følgende ligger på Hyperspektralgruppas utenett-område, i brukerkatalogen LaL med mappenavn «Hyperspektral eksplosivrydding». Til slutt diskuteres hyperspektralteknologiens egenskaper og muligheten for å utnytte den for praktisk deteksjon av eksplosivrester.

1.2 Eksplosiver

All ammunisjon inneholder eksplosiver av en eller annen type. Ulike eksplosiver har ulike egenskaper avhengig av hva effekten skal være. Grovt sett kan eksplosivene deles inn i tre typer: sprengladninger, krutt og drivladninger, og pyrotekniske ladninger.

De fleste eksplosivene består av en blanding av flere ingredienser, og hvor hovedingrediensen står for den eksplosive effekten. Sprengstoff som HMX og RDX er i ren form pulver med ulike partikkelstørrelser. Disse er nødt til å bindes sammen til en formbar eller støpbar masse ved hjelp av en voks eller en polymer. Andre stoffer kan også tilsettes for å oppnå en ønsket egenskap for blandingen. De fleste eksplosivrestene vil derfor opptre som en blanding av flere stoffer, og man vil sjelden finne enkeltingredienser i ren form. Unntaket er TNT som kan smeltes og formes, og TNT kan dermed utgjøre hele eksplosivladningen uten innblanding av andre stoffer. Dette er forhold som må tas hensyn til når stoffene ligger ute på bakken og skal detekteres.

2 Hyperspektral avbildning

I hyperspektral avbildning utnyttes det at ulike materialer reflekterer elektromagnetisk stråling forskjellig, og at bølgelengdeavhengigheten til refleksjonen er karakteristisk for det enkelte materialet. Mens et menneskeøye kan se tre primærfarger (rødt, grønt og blått) kan et hyperspektralt kamera typisk se hundrevis av "primærfarger", slik at kameraet registrerer et detaljert spektrum i hver piksel. Dette spekteret trenger ikke begrense seg til det smale bølgelengdeområdet som øyet ser, men går ofte også ut i den infrarøde delen av det elektromagnetiske spekteret. Ulike stoffer kan ha svært forskjellige spektrale egenskaper, slik at spekteret er en karakteristisk signatur for et stoff. Spekteret som et hyperspektralt kamera mottar i en piksel kan betraktes som et fingeravtrykk av materialsammensetningen i pikselen. Figur 3.12 nedenfor viser eksempler på slike spektre fra ulike materialer.

Siden øyet bare kan se tre primærfarger, er det ikke mulig å få full nytte av et hyperspektralt bilde gjennom manuell bildetolkning. Det er nødvendig å bruke datamaskinbasert analyse for å trekke ut det viktige av informasjonen og fremstille det for operatøren. Ved hjelp av bildeanalyse i datamaskin kan man skille materialer som for øyet ser like ut, som for eksempel vegetasjon og kamuflasje. Jo flere spektralbånd, og jo større bølgelengdeområde kameraet dekker, jo større sannsynlighet er det for å finne et betydelig avvik i det spektrale fingeravtrykket til et materiale i forhold til en gitt bakgrunn.

En mulig strategi for å detektere objekter av interesse i et hyperspektralt bilde er *anomalideteksjon* eller "avviksdeteksjon". Prinsippet er at man leter etter "uvanlige" spektre som avviker fra en bakgrunn, for eksempel avvik fra naturlig vegetasjon. Ved FFI har vi programmer for å gjøre anomalideteksjon ved hjelp av statistiske metoder(1). Sluttresultatet er en sannsynlighetsverdi for hver piksel i bildet som essensielt angir "sannsynlighet for bakgrunn". Dette kan visualiseres som et gråtonebilde der lysere områder betyr lavere sannsynlighet for at området er laget av samme materiale som bakgrunnen. Figur 3.8 og flere andre figurer nedenfor viser eksempler på slike sannsynlighetsbilder der piksler med avvikende spektre lyser opp på en mørk bakgrunn. Ved å velge en passende terskelverdi for sannsynlighet kan man ofte i stor grad skille interessante objekter fra bakgrunn. Terskelverdien kan settes manuelt og interaktivt, i tilfeller der man trenger å prøve seg frem, eller den kan settes automatisk etter regler basert på erfaring.

Dersom man leter etter et kjent stoff kan man i stedet søke etter piksler i bildet som er konsistente med stoffets spektrale signatur. Slik *signaturspesifikk deteksjon* kompliseres av at spekteret som kameraet mottar påvirkes av både stoffet som lyset er reflektert fra og av de spektrale egenskapene til den innfallende belysningen. Et eksempel på en forholdsvis avansert metode for signaturdeteksjon er gitt i litteraturreferanse 2, der man tar hensyn til mulig variabilitet i belysning og andre forhold. Signaturspesifikk deteksjon kan kombineres med anomalideteksjon dersom man vet at stoffet man leter etter utgjør en liten andel av bildet. En slik fremgangsmåte vil være aktuell for søk etter eksplosivresten.

Et ideelt deteksjonssystem detekterer alle objekter av interesse, uten feildeteksjoner ("falsk alarm"). En måte å vurdere kvaliteten av bildeanalyse på er ganske enkelt å inspisere sannsynlighetsbildet fra en scene med kjente mål, og se om kontrasten er stor mellom bakgrunn og mål. Et mer håndfast mål på ytelsen vil være å angi falsk alarmrate ved en terskelverdi som er satt slik at man detekterer en gitt type objekt. Falskalarmeringen i vårt tilfelle vil være antallet falske treff per bilde eller per kvadratmeter. Terskelen kan for eksempel velges lik gjennomsnittssannsynligheten for alle pikslene som "ser" en gitt type eksplosiv. Ulike stoffer vil gi forskjellig terskelverdi og dermed forskjellig falsk alarmrate. Dette er det samme som å si, ikke overraskende, at man må regne med å få tydeligere "treff" på noen stoffer enn andre, avhengig av stoffenes spektrale egenskaper. Dessuten vil man få flere falske alarmer dersom man setter terskelen slik at man får høy sannsynlighet for deteksjon.

Hyperspektral avbildning kan gjøres innenfor et stort spenn av bølgelengder fra synlig lys til termisk IR. I dette arbeidet bruker vi kameraer som er basert på dagslys eller eventuelt kunstig belysning. Dagslysets spektralområde går fra omtrent 0,4 til 2,4 mikrometer bølgelengde. Innenfor dette området går det et teknologiskille ved omtrent 1 mikrometer. Dette er den lengste bølgelengden som kan detekteres av bildesensorer basert på silisium. Båndet fra 0,4 til 1 mikrometer refereres ofte til som VNIR for "visible and near-infrared". Bølgelengdene mellom 1 og 2,5 mikrometer kalles SWIR for "short-wave infrared". SWIR-båndet krever bildesensorer basert på eksotiske og dyre materialer som indium-gallium-arsenid (maksimalbølgelengde 1,7 mikrometer) eller kadmiump-kvikksølv-tellurid (valgfri maksimal bølgelengde).

3 Eksperimentelle undersøkelser

3.1 Prøver som er undersøkt

Flere typer eksplosiver er testet, både rene eksplosiver i pulverform og blandinger som inneholder flere ingredienser. De rene eksplosivene er HMX, RDX, PETN, Tetryl og TNT. Ren TNT opptrer i form av små gule flak, mens de andre stoffene er hvite eller lysegule pulvere. Prøven som bare kalles "TNT", er en klump sammensmeltet TNT funnet i et skytefelt. "Krudd fra RFK" og "krudd fra Hjerkin" er ukjente klumper funnet ute i felt og består nødvendigvis ikke av krudd. "Krudd fra artillerifelt" er kruttpelletts fra drivladningen til en 155 mm granat som hovedsakelig består av nitrocellulose og dinitrotoluen (DNT). "Comp B" er en blanding av TNT og RDX i litt voks. "HMX M72" er fra en sprengladning til M72 hvor HMX er i blanding med andre stoffer. Til sist har vi to typer drivstoffblandinger, "krudd DLFN ren" og "krudd RMS-07". Dette er forsøksblandinger som består av en type polymer iblandet ulike pulvere med eksplosiver.

3.2 Bilder på FFIs gressplen

3.2.1 Eksperimentelt

Det første bildet ble tatt med Norsk Elektro Optikk (NEO) hyperspektrale kamera HYSPEX VNIR-1600 som kan se i VNIR-bølgelengdeområdet fra 0,4 til 1 mikrometer, fordelt på 160

bånd, med en romlig oppløsning på 1600 piksler over 17 graders vinkel. Kameraet var i utgangspunktet fokusert i uendelig, så for å få sprengstoffet i fokus, ble det påmontert en linse med fokallengde 3 m. Deretter ble kameraet satt opp så det siktet skrått ned mot sprengstoffprøvene som lå på bakken tre meter unna. Alle kameraene som er omtalt i det følgende er utlånt fra NEO og er linjescannere, hvilket vil si at det tar imot lys fra en linje i scenen av gangen og splitter den opp i ulike bølgelengdekomponenter. Kameraet er derfor montert på et stativ som roterer og leser av en vertikal linje av scenen av gangen.

I figur 3.1 vises et utsnitt av scenen der vi ser de fem eksplosivtypene: TNT, HMX, tetryl, krutt fra Hjerkin og RDX. Alle stoffene utenom drivstoffet er i pulverform og mye renere enn det man vil forvente å finne i et skytefelt. Scenen inneholdt også en hvitreferanseplate som er en nesten ideell diffus reflektor. Lyset som reflekteres fra hvitreferansen er dermed representativt for den totale belysningen av scenen. Ellers inneholder scenen bare friskt, grønt gress.

Bildene ble tatt på ettermiddagen 12. juni, med et lett, skiftende skydekke. Det ble også gjort målinger av reflektert radians fra de fem eksplosivene i bølgelengdeområdet 0,35 – 2,5 mikrometer ved hjelp av FFIs ASD Fieldspec FR spektrometer.



Figur 3.1 Utsnitt av bilde av eksplosiver på gress. Materialprøvene ligger i svartmalte petriskåler. Et håndskrevet notat gjør bildet "selvdokumenterende", men denne delen av bildet er naturligvis utelatt i analysen. Utenfor dette utsnittet lå det også en hvitreferanse.

3.2.2 Resultat fra analyse av bilder

Sannsynlighetsmodellen ble beregnet bare ut ifra bakgrunns pikslene. Dette er på grunn av at eksplosivene og plastikkbeholderne utgjør en relativt stor del av scenen i dette oppsettet. I et realistisk scenario antas eksplosivet å være mye mindre dominerende i scenen, så i prosesseringen av laboratoriebildene tar man seg frihet til å manuelt utelate eksplosivet fra sannsynlighetsfordelingsestimeringen.

For å gjøre datamengden mer håndterlig, er det også gjort en *spektral nedsamling*. Dette innebærer at nærliggende bølgelengdebånd er blitt slått sammen så det bare gjenstår 20. For å begrense innvirkningen fra skygger og varierende belysning, blir alle spektrene normert slik at det er formen på det målte strålingsspekteret og ikke størrelsen som er relevant i sannsynlighetsmodellen. Dette gjøres ved at alle pikselspektrene transformeres til hyperkulekoordinater der radius-delen utelates.

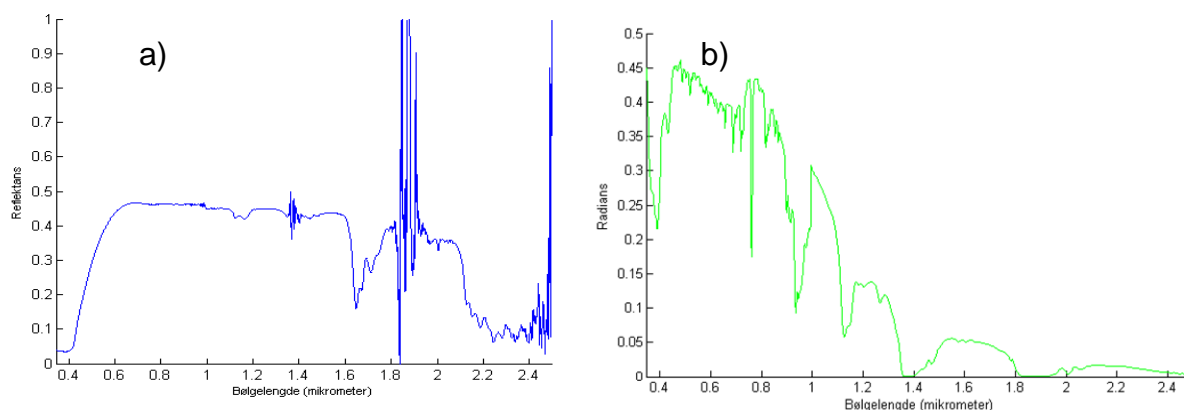
Figur 3.2 viser et utsnitt av det beregnede sannsynlighetsbildet. Vi ser at det er liten forskjell mellom sannsynlighetsverdiene på materialprøvene og bakgrunnen. Figur 3.3 viser et tersklet sannsynlighetsbilde der vi har valgt terskelverdien slik at det meste av eksplosivet blir svart. Vi ser at plastbeholderne og tuststrekene på papiret lyser opp, ved en terskel der materialprøvene knapt detekteres. Resultatet indikerer nokså klart at anomalideteksjon i dette bølgelengdeområdet vil fungere dårlig for deteksjon av disse stoffene.



Figur 3.2 Utsnitt av beregnet sannsynlighetsbilde.



Figur 3.3 Tersklet sannsynlighetsbilde.



Figur 3.4 a) Reflektans til TNT, målt med spektrometer i felt. Kvaliteten på dataene er god for de fleste bølgelengder. b) Spekteret til belysningen, målt ved hjelp av hvitreferansen. Noen bølgelengder absorberes av atmosfæren slik at det er lite lys tilgjengelig. Dette fører til støy ved de samme bølgelengdene i a).

3.2.3 Resultat fra spektromettermålinger

Som eksempel på målte reflektansspektre viser figur 3.4 a) et plott av reflektansen til TNT estimert ut fra målingene. Som vi ser i figur 3.4 a) har TNT en glatt og gradvis spektral variasjon uten veldig karakteristiske trekk i bølgelengdeområdet til kameraet som ble brukt i den første testen, fra 0,4 til 1 mikrometer. Det er kanskje litt overraskende at vi ikke får klarere "treff" på TNT, og dette kunne være verd å undersøke nærmere. På den annen side er flere av de andre stoffene nærmest helt uten spektral signatur i dette spektralområdet. Lenger ut i spekteret er det mer struktur i TNT-spekteret, blant annet et brått minimum rundt 1,6 mikrometer. Vi ser tilsvarende strukturer for de andre eksplosivtypene, utenom kruttet fra Hjerkin. Det er grunn til å tro at disse strukturene vil kunne danne grunnlag for nokså spesifikk deteksjon av eksplosivene. For å utnytte dette spektrale fingeravtrykket trengs imidlertid et hyperspektralt kamera som virker i det aktuelle bølgelengdeområdet.

Figur 3.4 b) viser et plott av spektromettermålingen av reflektert lys fra hvitreferansen, som essensielt måler belysningen av scenen. Av figuren ser vi at det karakteristiske spektrale minimumet sammenfaller med et område av solspekteret som slipper relativt uhindret gjennom atmosfæren.

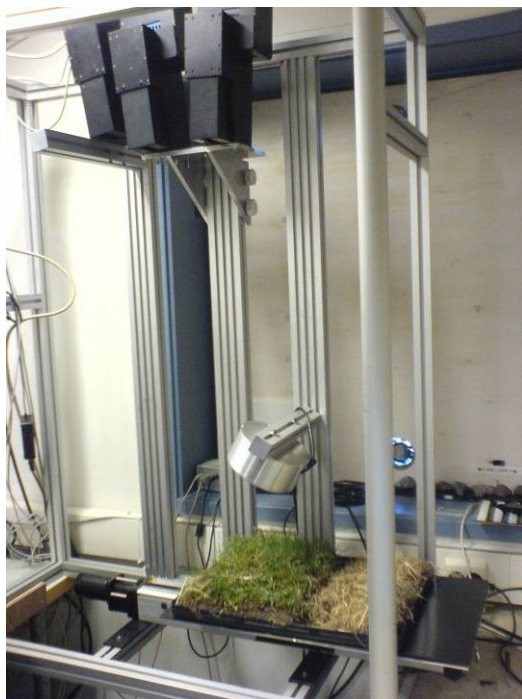
3.3 Bildeopptak i laboratorium med kamera for både VNIR og SWIR

3.3.1 Eksperimentelt

Et nytt eksperiment ble gjort i laboratoriet til Norsk Elektro Optikk, som har en oppstilling med flere hyperspektrale kameraer. Det ble tatt bilder både med et VNIR-1600-kamera og et SWIR-320m-kamera som kan se 239 bølgelengder i SWIR-båndet fra 1,3 – 2,5 mikrometer, med en romlig oppløsning på 320 piksler fordelt på 14 graders vinkel. Kameraoppsettet er vist i figur 3.5.

Kameraene var festet i et stativ ca 1,5 meter fra de kunstig belyste eksplosivprøvene som beveget seg på et translasjonsbord. Prøven ble belyst av kraftige halogenlamper.

Det ble tatt bilder av to "scener" i form av eksplosivprøver og bakgrunnsmaterialer lagt på et fat. I den ene oppstillingen var eksplosivprøver omgitt av jord som vist i figur 3.6. I en annen oppstilling ble prøvene lagt på et underlag bestående av mest gress og litt jord som vist i figur 3.7. Materialprøvene var de samme i begge tilfeller, som listet opp i tabell 3.1.



Figur 3.5 Kameraoppsett for laboriemålinger hos Norsk Elektro Optikk AS. Kameraene står omtrent 1,5 m over et motorisert bord som scanner materialprøver forbi kameraenes synsfelt.



Figur 3.6 Materialprøver på underlag av jord, for bildeopptak i laboratorium.



Figur 3.7 Materialprøver på underlag av gress og jord, for bildeopptak i laboratorium.

Gråreferanse	HMX M72	COMP B	Krutt fra Hjerkinn	TNT	Krutt fra RFK		
	HMX ren	RDX ren	PETN ren	TNT ren	Tetryl ren	Krutt artilleri felt	Krutt DLFN ren

Tabell 3.1 Oversikt over eksplosiver i scenen hos NEO. Rutene i tabellen tilsvarer utlegget av materialer i bildene.

3.3.2 Resultater

Bildene er behandlet på samme måte som bildene fra de innledende forsøkene. Den statistiske bakgrunnsmodellen er også her estimert fra kun bakgrunns piksler ved manuelt å maske bort materialprøvene. VNIR-bilder ga like dårlige resultater som i bildene fra de innledende forsøkene, så de blir ikke behandlet videre i det følgende.

Figur 3.8 og 3.9 viser det beregnede sannsynlighetsbildet for SWIR for de to scenene. Det er vanskelig å få visualisert alle detaljer i et vanlig gråtonebilde, men vi ser tydelig at materialprøvene tenderer til å være lysere enn bakgrunnen.

Figur 3.10 og 3.11 er tersklede versjoner av sannsynlighetsbildene i figur 3.8 og 3.9 henholdsvis. Her har vi valgt en terskelverdi som gjør hele bakgrunnen svart, og da er så godt som samtlige eksplosivprøver godt synlige. Det eneste unntaket er «Krutt fra Hjerkinn». Merk at de falske alarmene i kanten av bildet skyldes plastbrettet scenen ligger på. Det bør forøvrig nevnes at tersklene er forskjellige for de to bildene, og satt slik at de skal gi omtrent like god synlighet for eksplosivene.

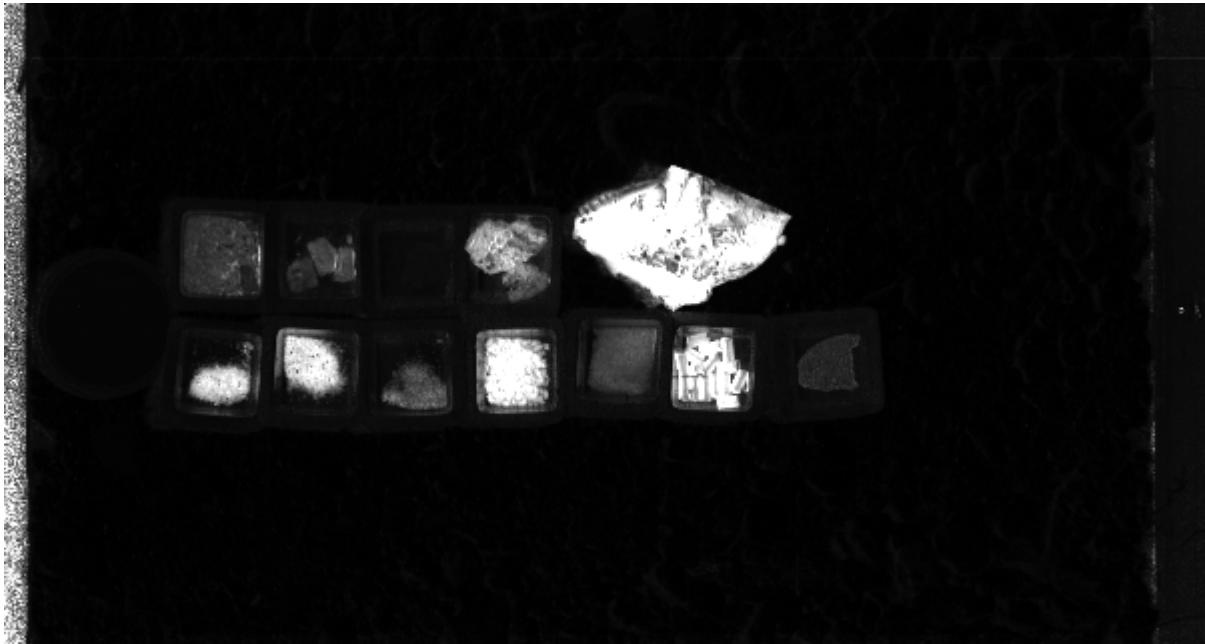
Ved å dele på spekteret fra gråreferansen kan man ut fra bildene få fram et estimat av reflektansspekteret for alle materialene i bildet. Disse spektrene er vist i figur 3.12. Reflektansspektrene gitt ved bølgetall finnes i vedlegg A, for lettere sammenligning med litteratur innen spektroskopi. Hvert av spektrene er midlet over 10 – 15 piksler.

3.3.3 Diskusjon

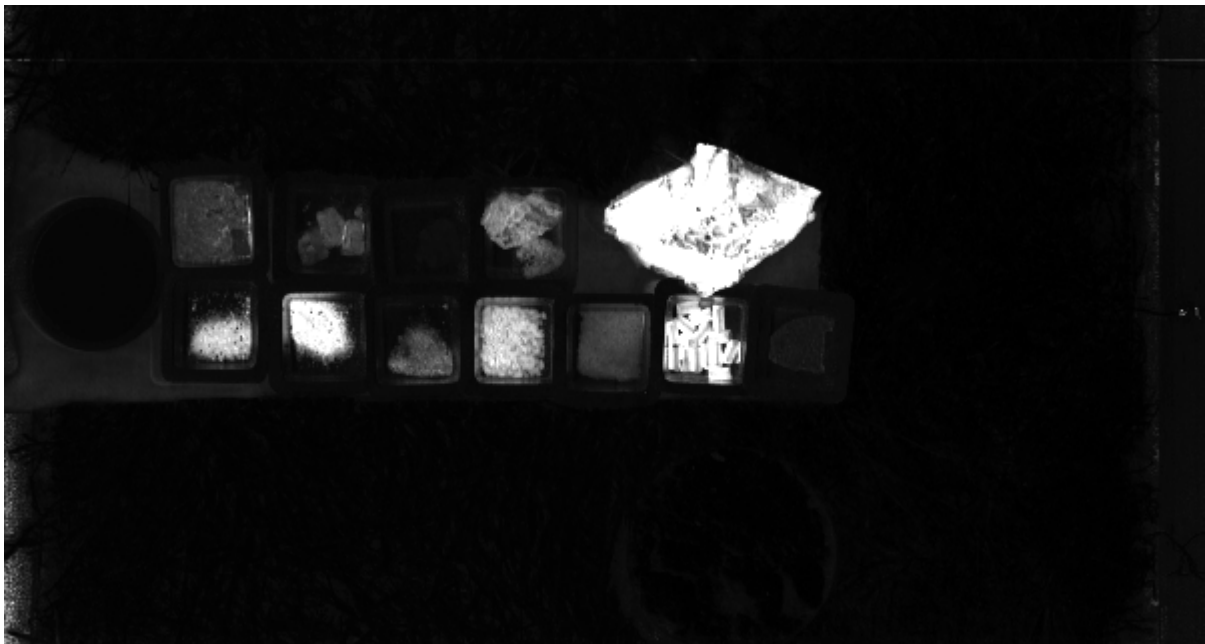
Av sannsynlighetsbildene fra SWIR-opptaket ser vi et tydelig mye bedre resultat enn det vi fikk med VNIR-kameraet, og av reflektansplottene kan vi få en anelse om hvorfor. Som antydning fra de innledende målingene ser vi at alle eksplosivene, utenom de forskjellige typene krutt, har et brått minimum rundt 1,6 mikrometer. Det er naturligvis ikke bare dette minimumet som skiller eksplosivene fra bakgrunnen, men det kan se ut til at det er en viktig kilde til avvik. Vi ser at kruttprøvene generelt detekteres dårligere enn de andre eksplosivtypene, spesielt Krutt fra Hjerkin og Krutt DLFN ren. Av spektrene i figur 3.12 ser vi at de to sistnevnte har få karakteristiske spektrale strukturer og stort sett ser ut som jord. Man må anta at dette er grunnen til at de er så godt som usynlige i sannsynlighetsbildene i figur 3.8 og 3.9.

Figur 3.13 viser en oversikt over karakteristiske absorpsjonsbånd for en del molekylære strukturer. I molekylspektroskopisk sammenheng er 1,6 mikrometer en relativt kort bølgelengde, og absorpsjonen kan se ut til å skyldes første overtone i C-H-strekket i eksplosivene. Av figur 3.13 ser vi at det også kan være en overtone i Ar-CH-strekket, men det er ikke sannsynlig at det står for hele effekten, siden ikke alle eksplosivene inneholder en aromatisk gruppe. Et utvalg av molekylstrukturer er vist i figur 3.14.

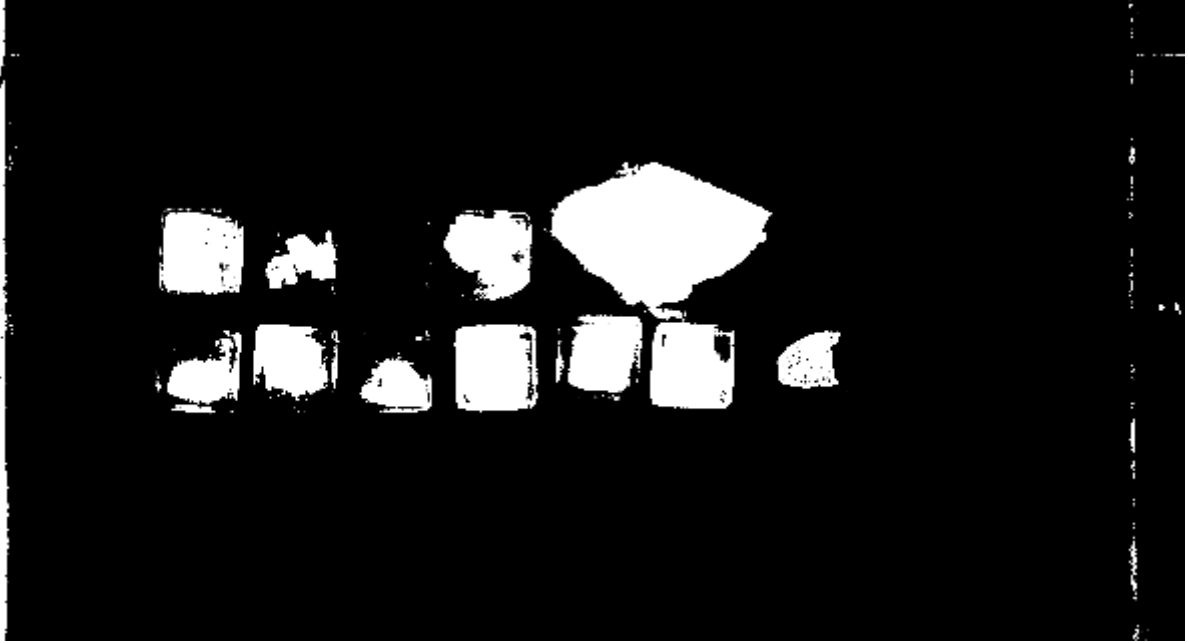
Selv om resultatene fra laboratorieopptakene er gode, er det vanskelig ut fra dette å gi et godt mål på hvor bra anomalideteksjonen fungerer. Det er meningsløst å snakke om en falsk alarmrate når alle eksplosivene utenom Krutt fra Hjerkin detekteres uten noen falske alarmer. Dette gjenspeiler ganske sikkert at eksplosivene har en spektral kontrast til bakgrunnen, men det er grunn til å frykte at resultatet ikke representerer realistiske bakgrunner godt nok på grunn av at bakgrunnen er for ensartet.



Figur 3.8 Sannsynlighetsbilde for SWIR hos NEO, jordscene.



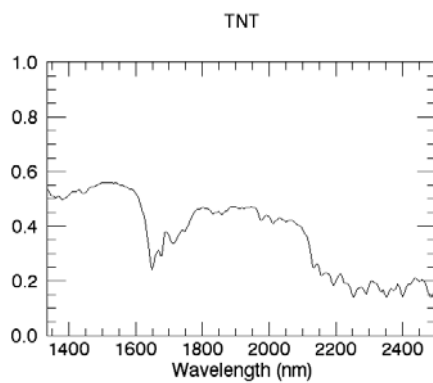
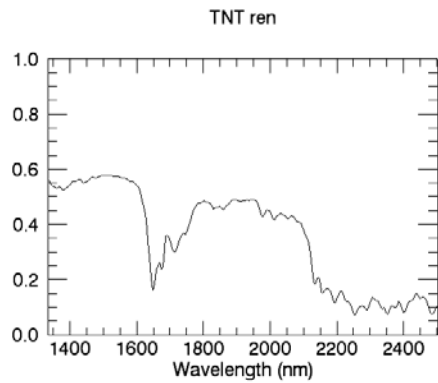
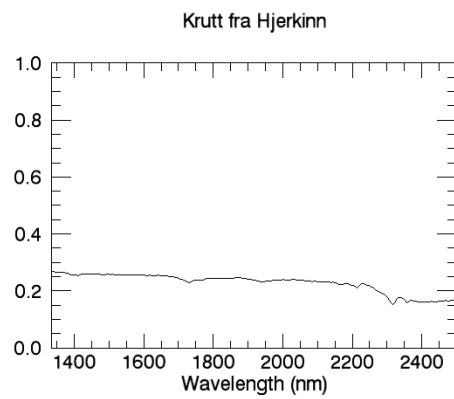
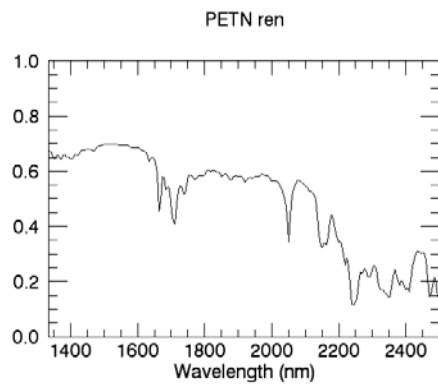
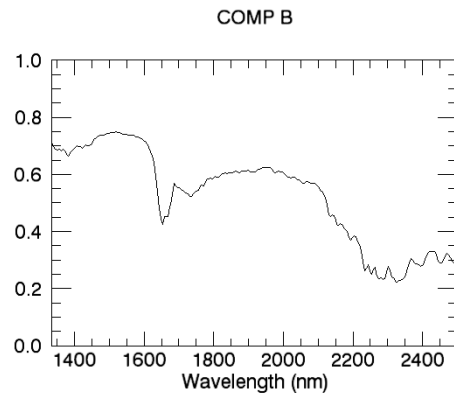
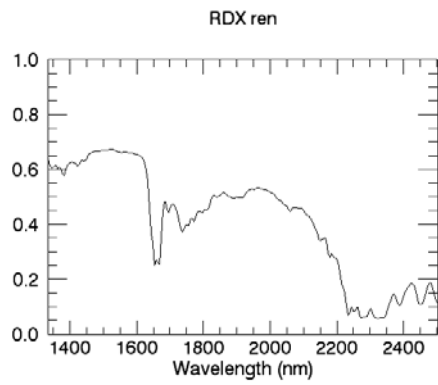
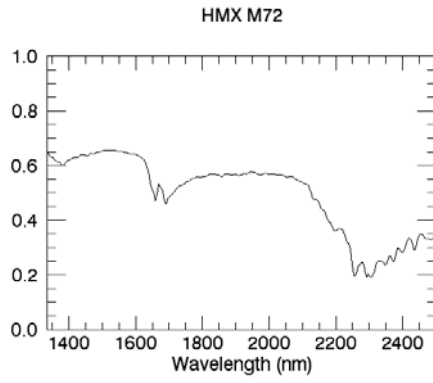
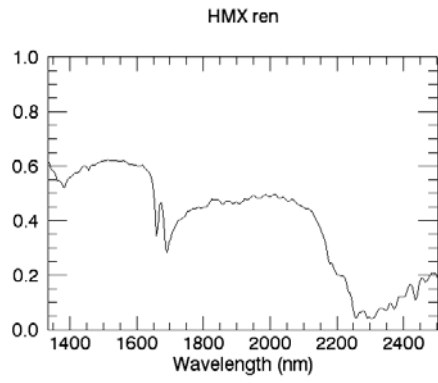
Figur 3.9 Sannsynlighetsbilde for SWIR hos NEO, gressscene.



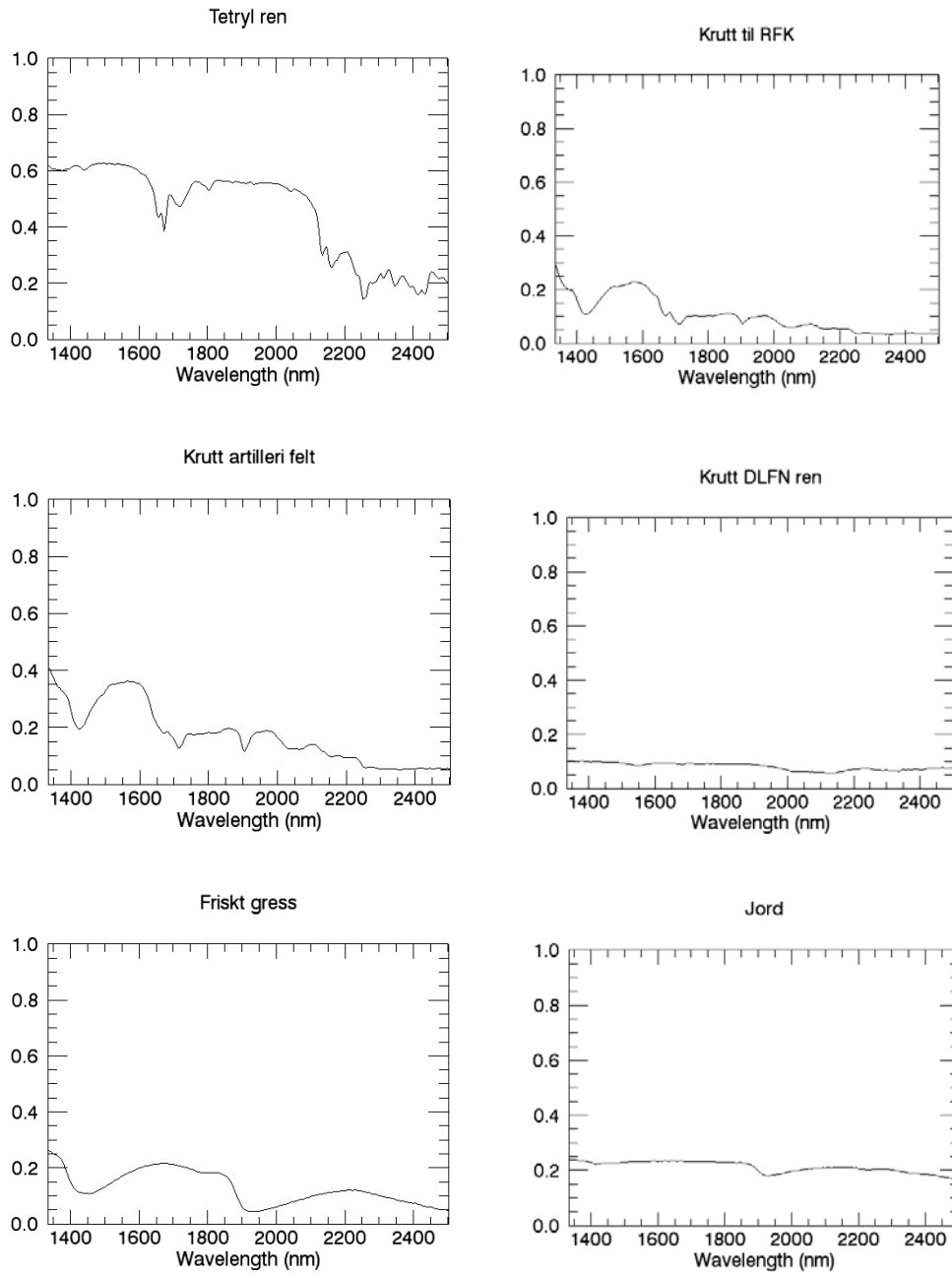
Figur 3.10 Sannsynlighetsbilde for SWIR hos NEO med valgt terskel, jordscene.



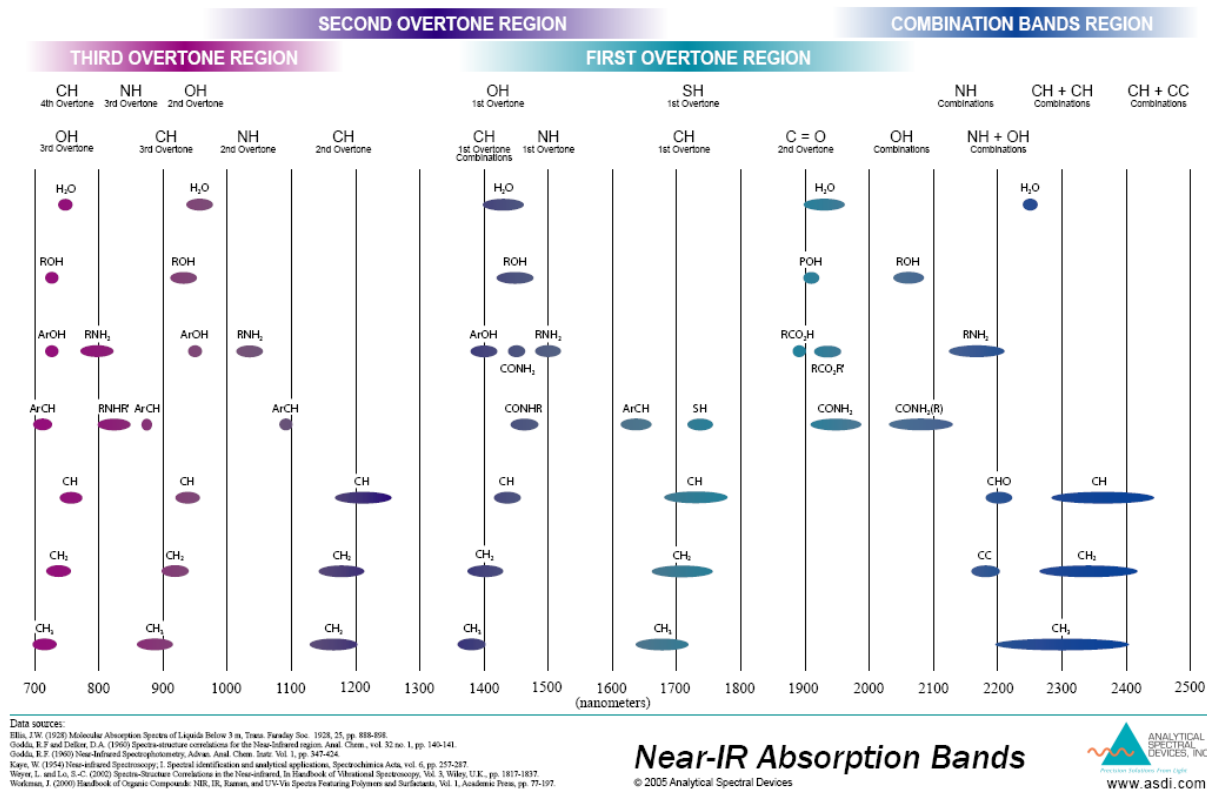
Figur 3.11 Sannsynlighetsbilde for SWIR hos NEO med valgt terskel, gresscene.



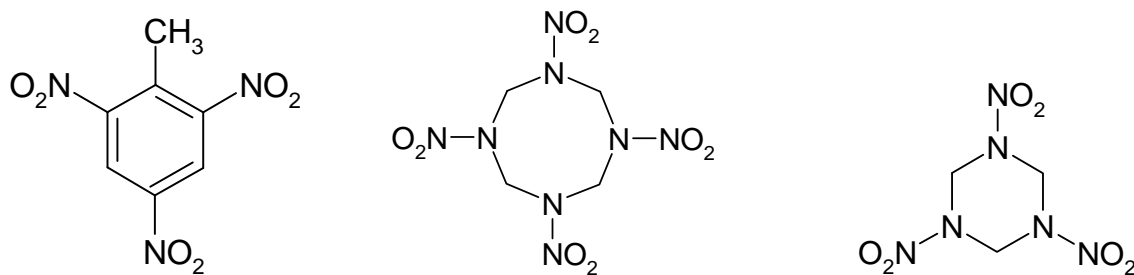
(forts. neste side)



Figur 3.12 Reflektansspektre for eksplosiver og bakgrunnsmaterialer, beregnet fra bildedata.



Figur 3.13 Absorpsjonsbånd for ulike strukturer (ASD inc, http://www.asdi.com/nir-chart_grid_rev-3.pdf).

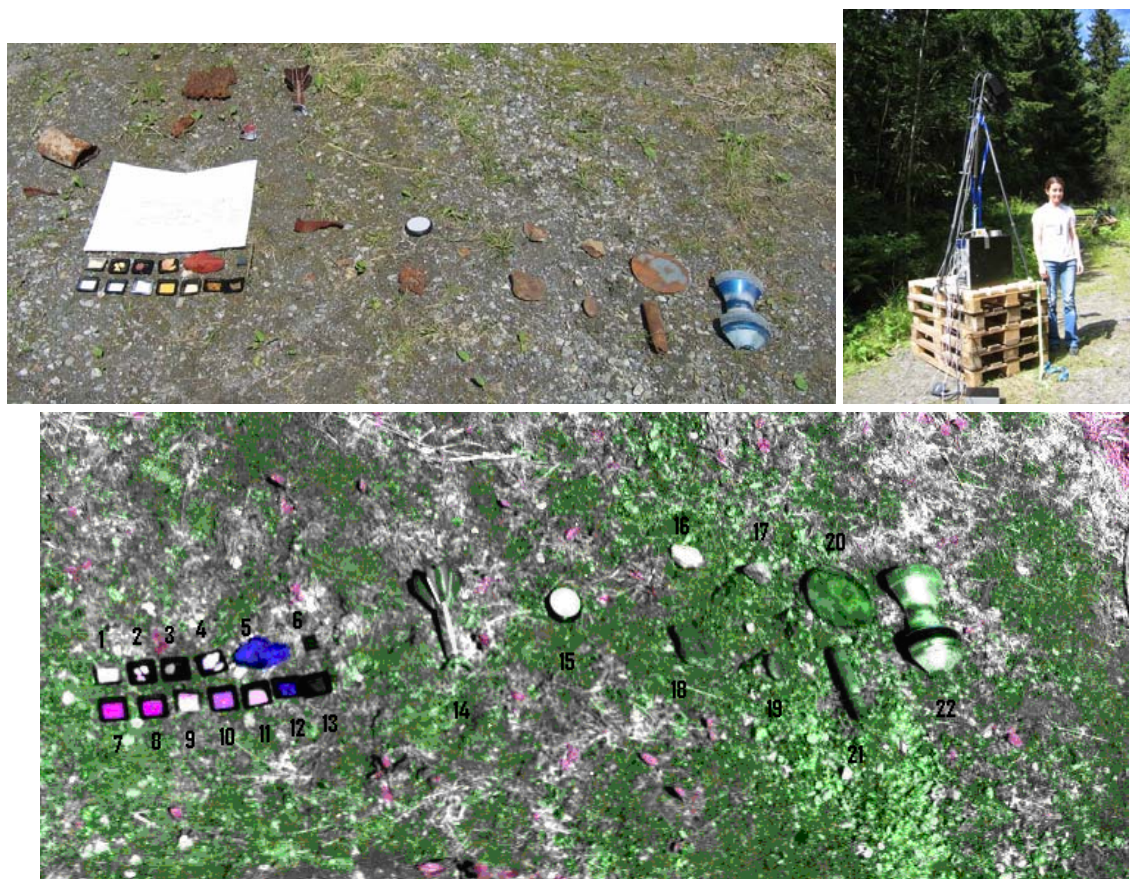


Figur 3.14 Molekylstruktur for henholdsvis TNT, HMX og RDX.

3.4 Bildeopptak utendørs med kamera følsomt i SWIR-båndet

3.4.1 Eksperimentelt

I forsøk på å ha en mer realistisk bakgrunn ble det gjort et nytt opptak utendørs, denne gangen i Domba, et utendørs testområde på FFI. Her finnes det mye variert bakgrunn, med en blanding av gress, jord og grå singel. Som i forrige forsøk ble det brukt et SWIR-320m-kamera, denne gang på stativ 2,5 meter over bakken og 1,5 til siden for scenen, slik det er vist i figur 3.15. Scenen inneholder de samme stoffene som i NEO-bildene, pluss en ny type, krutt RMS – 07, øverst til høyre i feltet med eksplosivprøver. I tillegg er det lagt ut en gråreferanse, og fire steiner og fire metallobjekter hentet fra Hjerkin. Oppsettet er vist i tabell 3.2. Mens bildene ble tatt var det solskinn, og kameraet hadde omtrent samme innfallsvinkel som sollyset for å ha minst mulig skygge i bildet.



Figur 3.15 Bildeopptak med SWIR-kamera i Domba. Prøver av eksplosiver og diverse gjenstander hentet fra Hjerkin er lagt ut i en bakgrunn ("veikant") med grus, jord og litt vegetasjon. Bildet øverst til venstre er et vanlig fotografi av materialprøver og bakgrunn (med et litt annet utlegg enn i hyperspektralbildet). Øverst til høyre er et bilde av kameraet på stativ ca. 2,5 m over bakken. Nederst er et bilde i "kunstig farge" fra hyperspektralbildet, der de ulike gjenstandene er nummerert.

1	HMX M72	12	Krutt artilleri felt
2	COMP B	13	Krutt DLFN ren
3	Krutt fra Hjerkin	14	Haleparti fra bombekaster
4	TNT	15	Gråreferanse (40% grå)
5	Krutt fra RFK	16	Stein 1
6	Krutt RMS-07	17	Stein 2
7	HMX ren	18	Stein 3
8	RDX ren	19	Stein 4
9	PETN ren	20	Rusten jernplate
10	TNT ren	21	Rusten tomhylse
11	Tetryl ren	22	Sko fra pilammunisjon

Tabell 3.2 Oversikt over eksplosiver og objekter i scenen i Dampa.

3.4.2 Resultat og diskusjon

Så fremt ikke annet er oppgitt er bildet behandlet på samme måte som i de tidligere forsøkene. Figur 3.16 viser det beregnede sannsynlighetsbildet. I sannsynlighetsmodellestimeringen ble eksplosivene og metallet masket ut, mens steinene ble inkludert. I figur 3.17 vises det samme bildet etter terskling, med en terskel valgt slik at de fleste eksplosivtypene er synlige. Figur 3.18 viser et sannsynlighetsbilde som er laget uten at det opprinnelige bildet er transformert til sfæriske koordinater og normert. De røde områdene indikerer at pikslene har gått i metning, altså at de har fått sin maksverdi i minst ett av båndene. Tabell 3.3 viser en kvalitativ oversikt over falsk alarmrate for de forskjellige eksplosivene når terskelen settes slik at et gitt stoff akkurat blir detektert.

I figur 3.16 og 3.17 ser vi en ganske sterk kontrast, og man detekterer så godt som alle eksplosivene med relativt få falske alarmer. Fortsatt er det litt vanskelig å se Krutt fra Hjerkin, det samme gjelder de to krutttypene lengst til høyre i eksplosivfeltet, samt HMX M72. I figur 3.17 kan man også se mange falske alarmer i skygger og på den svarte platen i eksplosivbeholderne og på hvitreferansen, samt på det mørkmalte feltet på granaten lengst til høyre. Dette er ikke uventet, siden kameraet her mottar svake signaler og signal/støyforholdet blir lavt. Dermed får spektralmålingen i pikselen stor relativ usikkerhet. I tillegg kan belysningen i skyggeområdet være preget av reflektert lys fra omkringliggende vegetasjon, og fra ikke-naturlige objekter slik som metallobjektene i dette bildet. Dette vil naturligvis påvirke spektrene.

For å unngå disse effektene kan man alternativt la være å normere bildet før anomalideteksjon. Dette gir resultatet vist i figur 3.18. Her ser vi at vi unngår falske alarmer i skyggene, på den svarte platen og på det malte området på granaten til høyre. Til gjengjeld får vi flere falske alarmer på grunn av spekulær refleksjon på de to granatene. Man ser også en vertikal falsk-alarm-stripe, og denne skyldes antageligvis sensorfeil på grunn av den sterke belysningen, der lys fra de godt opplyste båndene lekker over i de svakt opplyste båndene. Når bildet normeres blir dette lekkasjelyset forsterket. Disse falske alarmene burde være lette å eliminere, så kanskje er det alt i

alt best å gjøre deteksjon med unormerte bilder når geometrien er slik at vi ser nesten parallelt med sollyset og det er lite skygge i bildet.

Vi har til nå sett resultater fra anomalideteksjon, der vi beregner et mål på om en piksel tilhører bakgrunnen uten å si noe om egenskapene til stoffet som blir detektert. Det er også interessant å prøve å detektere stoffenes spesifikke spektrale signatur. En enkel måte å måle samsvar med en signatur er "spektral vinkel" (engelsk "spectral angle mapper" eller SAM) der vi for hver piksel regner ut vinkelen i det mangedimensjonale spektralrommet mellom pikselens spektrum og spekteret til en piksel som vi vet inneholder det eksplosivet vi leter etter. Denne metoden er godt egnet når vi kan hente referansesignaturen fra det samme bildet. Figur 3.18 viser spektral vinkel i forhold til spekteret fra TNT. Vi ser at med kjennskap til spektral signatur til stoffer av interesse kan vi få et bra deteksjonsresultat fra signaturspesifikk deteksjon alene.

Det er også gjort forsøk på å kombinere anomalideteksjon og signaturspesifikk deteksjon. Her tar vi forholdet mellom bakgrunnssannsynlighet og spektralvinkel. Et eksempel for TNT er vist i figur 3.20. Her får vi en nokså spesifikk deteksjon av TNT-prøvene. Det er noe falsk alarm fra piksler i metning, men det kan lett filtreres bort. Vi ville da få en svært spesifikk deteksjon av TNT med lav falsk alarmrate.

De fleste av de små falske alarmene rundt i bildet hadde relativt like spektre. Et eksempel er gitt i Figur 3.21. De støybelagte delene av spektrene skyldes at de er beregnet ut ifra et bilde uten kunstig belysning. For sammenligning vises også reflektansspekteret til Krutt RMS-07 i figur 3.22. Spektrene fra de falske alarmene er omtrent periodiske i invers bølgelengde, noe som tyder på at de skyldes en interferenseffekt. Muligens er dette solreflekser fra korn av glimmer eller andre mineraler, men vi vet ikke sikkert. Generelt er det slik at noen typer falsk alarm vil ha karakteristiske signaturer slik at man kan filtrere bort en del uinteressante deteksjoner. Vi har ikke gjort noen slik filtrering i resultatene som vises her.

For å simulere effekten av å ta bildet fra større avstand, kan man *romlig nedsample* bildet ved å slå sammen nabopiksler. Figur 3.23 viser et sannsynlighetsbilde laget ut ifra et slikt bilde, der fire og fire piksler er slått sammen, hvilket tilsvarer en kameraavstand på seks meter. Den romlige nedsamlingen vist i figur 3.23 gir ikke i betydelig grad dårligere resultater. Dette skyldes imidlertid at eksplosivprøvene er så store at man fortsatt har rikelig med piksler som bare inneholder eksplosiver.

Det er også blitt gjort enkle forsøk på å lage sannsynlighetsmodellen ut ifra et utvalg av bånd som har god belysning og som inneholder karakteristiske kjennetegn for de ulike materialene i bildet. Dette viser seg imidlertid å ikke gi noen merkbart bedret effekt.



Figur 3.16 Sannsynlighetsbilde fra Dampa.



Figur 3.17 Sannsynlighetsbilde fra Dampa etter terskling. Rødt indikerer metning.

HMX M72	Dårlig	HMX ren	Veldig bra
COMP B	Middels	RDX ren	Ekstremt bra
Krutt fra Hjerkin	Middels	PETN ren	Bra
TNT	Bra	TNT ren	Ekstremt bra
Krutt fra RFK	Veldig bra	Tetryl ren	Bra
		Krutt artilleri felt	Veldig bra
Krutt RMS-07	Veldig dårlig	Krutt DLFN ren	Dårlig

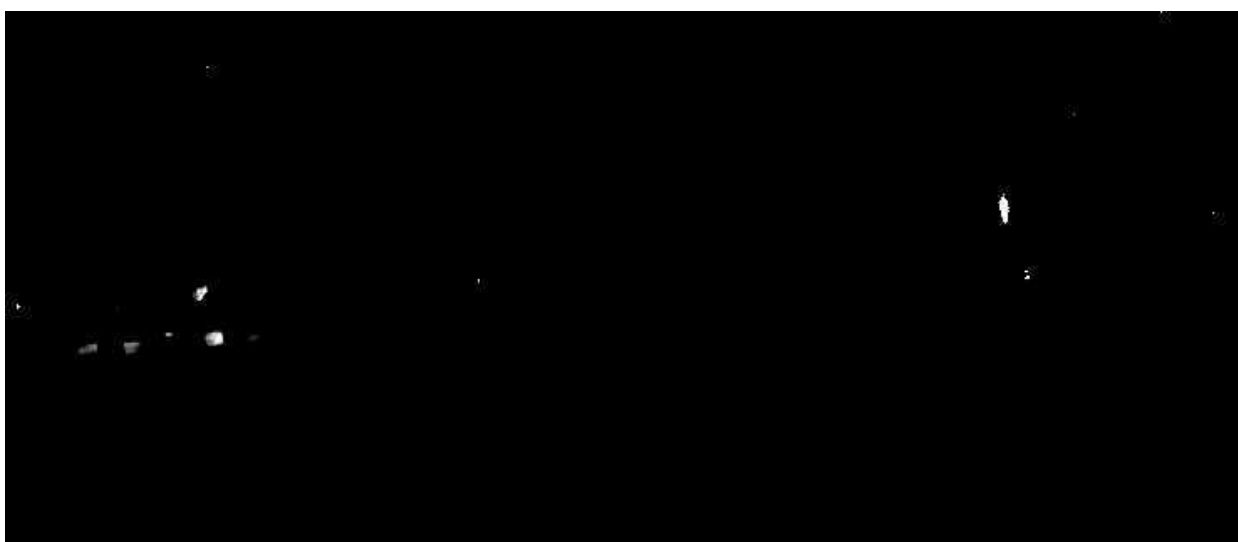
Tabell 3.3 Oversikt over deteksjonsresultater.



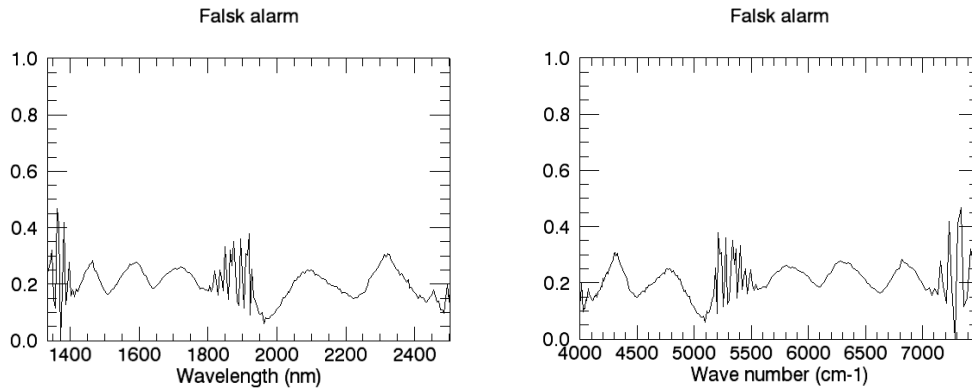
Figur 3.18 Sannsynlighetsbilde fra unormert bilde.



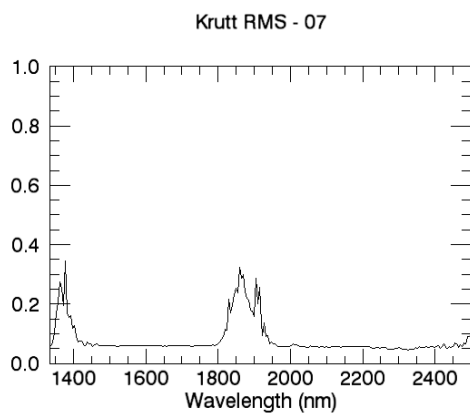
Figur 3.19 Spektralvinkel-kart for TNT.



Figur 3.20 Sannsynlighetsbilde delt på spektralvinkelbilde for TNT.



Figur 3.21 Spektre fra typiske falsk alarm-piksler.



Figur 3.22 Reflektansspektrum for Krutt RMS-07.



Figur 3.23 Sannsynlighetsbilde fra anomalideteksjon med romlig nedsamlet bilde.

4 Vurdering av praktisk anvendbarhet

4.1 Tilgjengelig spektral signatur

Resultatene tyder på at mange typer eksplosiver har spektrale signaturer som skiller dem klart ut fra bakgrunnen. Blant stoffene som er prøvd her finnes imidlertid også noen som ikke har en klar signatur. Klumper og partikler av eksplosiver i ren form er mer synlige enn blandinger der eksplosivet er en bestanddel. Eksplosivrestene vil oftest opptre i form av en blanding og sjelden som ren form. Tilgang på representative rester i form av blandinger har vært liten slik at metodens anvendbarhet må testes ut mer på slike stoffer.

Signaturen vil over tid kunne påvirkes av miljøet. Noen av prøvene i våre forsøk er realistiske prøver funnet i felt, men det er ønskelig å gjøre en mer systematisk studie av i hvilken grad spektrale signaturer endres eller viskes ut når stoffene ligger ute i sol og regn. Hyperspektral avbildning kan ikke trenge dypt inn i stoffet, men ser bare refleksjonen fra overflatesjiktet. Hvis dette overflatesjiktet er dekomponert eller forurenses er det sannsynlig at den spektrale signaturen svekkes. I praksis vil det helt klart være stor variasjon i detekterbarhet mellom ulike stoffer.

Dersom man bruker et system basert på anomalideteksjon vil systemet detektere alle typer fremmedelementer og ikke bare eksplosiver. I forbindelse med opprydding i skytefelt må dette ansees som en bonus heller enn et problem. Et hyperspektralt system vil da også kunne gi bidrag til opprydding av andre typer avfall inklusiv blindgjengere. Det kan om nødvendig være mulig å bruke signaturdeteksjonsteknikker for å undertrykke falske alarmer fra spesifikke typer av fremmedelementer som man ikke er interessert i.

4.2 Partikkelstørrelse

For å bli detektert med lav falsk alarmrate bør eksplosivene ha form av partikler med en viss minimumstørrelse i forhold til pikselstørrelsen. Aller mest pålitelig deteksjon får man når målet fyller en til to piksler helt. Biter av eksplosiver som er mindre enn en piksel vil fortsatt kunne detekteres, men med en falsk alarmrate som øker nokså sterkt i takt med at målets utstrekning reduseres.

Det er kjent at noen forekomster av eksplosiver har form av svært små partikler som er spredt ut over et lite område på bakken. Hvis spredningsområdet har en slik utstrekning at det fyller et antall nabopiksler kan en alternativ analysemetode være aktuell: Man kan begynne med å erstatte hver piksel i bildet med et middel av de omkringliggende pikslene innenfor en nærmere bestemt omkrets. Midlingen vil tendere til å redusere sensorstøy og variabilitet i bakgrunnen. Deretter kan man bruke anomalideteksjon eller signaturspesifikk deteksjon, eventuelt også kjemometriske analysemetoder, for å estimere eksplosivkonsentrasjon innenfor hver midlet piksel. Det må antas at dette vil kunne gi bedre kontrast i de tilfellene der man har "pulver" av sprengstoff innenfor et lite område. Denne analysemetoden er ennå ikke testet.

4.3 Dekningsområde

Pikselstørrelsen (altså "fotavtrykket" til en bildepiksel på bakken) er i utgangspunktet fritt valgbar gjennom valg av kameraobjektiv og avstand fra kameraet til bakken. For et gitt kamera er antall piksler i synsfeltet konstant, slik at hvis pikselstørrelsen reduseres vil også kameraets dekningsområde reduseres. Dette er nokså uproblematisk hvis man ønsker å ta stikkprøver, men en utfordring dersom man ønsker å dekke et stort areal.

Her er et talleksempel: Vi kan anta at det om ikke lenge blir tilgjengelig hyperspektrale kameraer i SWIR-båndet med 640 piksel stripebredde. Vi velger pikselstørrelsen til å være 3 millimeter på bakken, som omtrent tilsvarer helseskadelig størrelse av eksplosivpartikler. Stripebredden på bakken blir da 1,9 meter. Vi antar videre at scan-hastigheten er 150 piksel-linjer per sekund. Med 3 millimeter pikselstørrelse får vi en scan-hastighet langs bakken på 0,45 meter per sekund eller 1,6 km/t, altså krabbefart. Arealdekningsraten blir 3000 kvadratmeter per time.

Hvis terrenget er veldig ulendt kan vi få problemer med at deler av kameraets linjeformede synsfelt kommer ut av fokus. Dette vil føre til en gradvis reduksjon av deteksjonsytelsen med økende defokusering. Kameraets fokusdybde kan i stor grad velges gjennom tilpasning av dets konstruksjon og innstilling, slik at defokusering ikke burde representere noen stor begrensning.

4.4 Belysning

Et hyperspektralt kamera i SWIR-båndet vil i utgangspunktet være basert på dagslys. Direkte sollyis er sterkt foretrukket siden lysnivåene er mye lavere når det er skyet, spesielt i SWIR-båndet. Det er naturligvis upraktisk å være avhengig av sol. Det er mulig å ta bilder i overskyet vær også, men det vil da sannsynligvis være nødvendig å scanne mye saktere.

Ved bruk av sollyis vil det være skarpe skygger i scenen, og deteksjonsresultatene vil være vesentlig dårligere i skyggeområdene. En måte å omgå problemet på er å la kameraets siktlinje gå nesten parallelt med sollyset, slik det ble gjort ved feltmålingen i Dømpa. Kameraets synsfelt vil da med andre ord være nær skyggen av kameraet. Da vil kameraet for det meste se solbelyste flater og gi gode signaler.

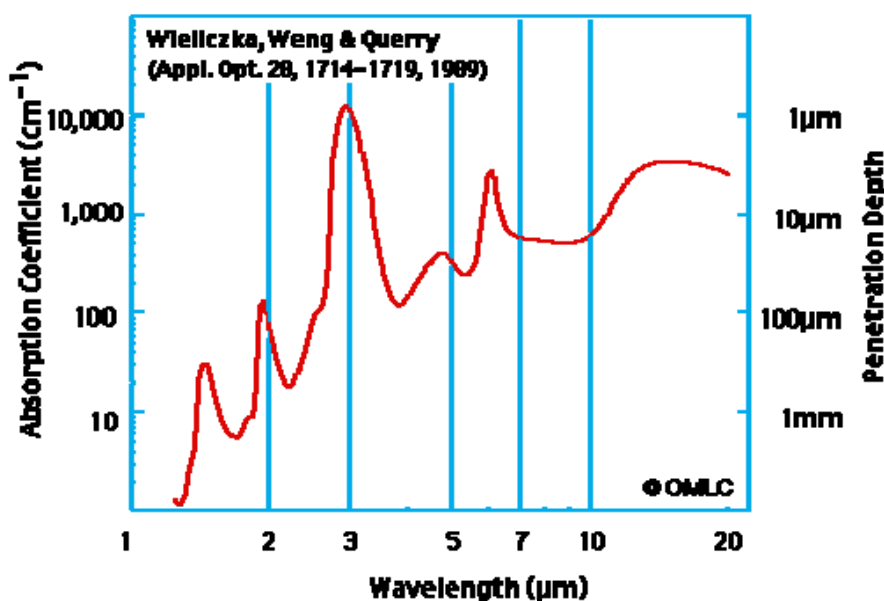
Kunstig belysning ga gode resultater i laboratoriemålingene og vil antakelig kunne være et alternativ til sollyis i felt. Det burde være mulig å lage et godt belysningssystem for feltbruk basert på stavformede halogenpærer som fokuseres inn på den linjen kameraet tar bilde av. Kunstig belysning vil ha fordel av at man kan få signal også i de delene av spekteret der atmosfæren absorberer alt sollyset. Dessuten vil man kunne ha litt mindre problemer med skygger, hvis scenen belyses av flere lamper fra litt ulik vinkel.

4.5 Sikt og tildekking

For å oppdage en eksplosivpartikkel er det hyperspektrale kameraet avhengig av direkte sikt til partikkelen. Partikler som er nedgravd i bakken vil ikke bli oppdaget. Heller ikke partikler som er dekket av vegetasjon vil være synlige. Dette er naturligvis en hovedutfordring for alle

deteksjonsteknikker som er basert på lys (inkludert øyet). Gress og kratt vil for eksempel være nærmest umulige å gjennomse, mens områder dekket av lyng og mose vil være lettere.

Det kan tenkes at fukt i scenen vil være et problem siden vann absorberer lys i SWIR-båndet. Figur 4.1 viser absorpsjonsspekteret til flytende vann. Vann er lyst og "svart" over ca. 2,5 mikrometer. For de bølglengdene der vi ser spektrale signaturer er imidlertid inntrengningsdybden i vann typisk et par millimeter. Dette skulle tilsi at selv om terrenget er fuktig vil vi kunne se de spektrale signaturene fra stoffer av interesse. Dette kan sjekkes eksperimentelt i fremtidige forsøk ved å ta bilde av en scene i tørr og fuktig tilstand.



Figur 4.1 Absorpsjon av lys i vann. Inntrengningsdybden er typisk 1 mm eller mer i de delene av spekteret vi er interessert i.

4.6 Praktisk realisering og bruk

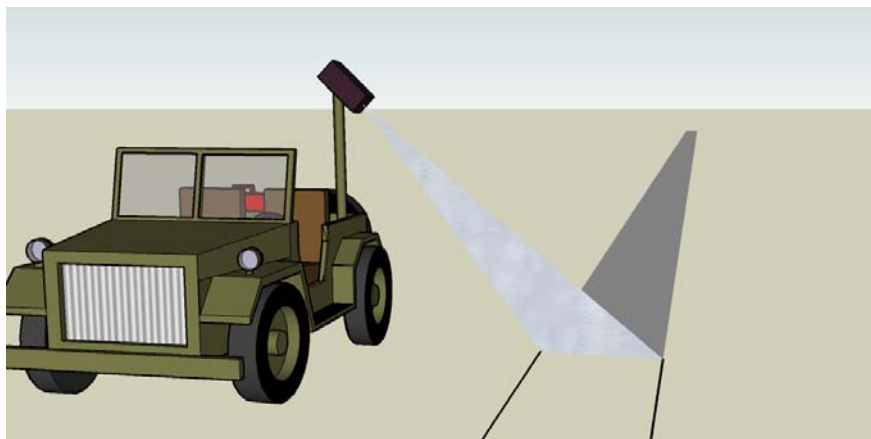
FFI-prosjekt 1043 SPEKTRA utvikler et demonstratorsystem for hyperspektral måldeteksjon i sann tid. Dette systemet vil kunne tilpasses til deteksjon av eksplosiver. FFI er dermed godt posisjonert til å gjøre realistiske forsøk. I konstruksjonen av systemet er det ikke lagt vekt på å minimalisere størrelse, vekt eller effektforbruk. Systemet består av et kamera, navigasjonssensorer og et par datamaskiner, og det vil ha et effektforbruk på antydningssvis et par hundre watt.

I og med at hyperspektral avbildning kan benyttes til deteksjon av eksplosiver, vil det kunne være mulig å benytte et slikt system for deteksjon av eksplosivpartikler i felt. Et slikt system vil kunne brukes til å lokalisere områder i skyte- og øvingsfeltet som inneholder "hot spots" av eksplosiver. Etter som forurensningen av eksplosiver i skyte- og øvingsfelt er veldig heterogent fordelt, vil en slik informasjon være veldig viktig for å sikre en kosteffektiv og representativ prøvetaking.

En hovedutfordring er å etablere en hensiktsmessig plattform for systemet. Det kan synes som om et terrenggående kjøretøy vil være nødvendig. Figur 4.2 viser en prinsippskisse for et kjøretøymontert kamera der kjøretøyets bevegelse scanner kameraets synsfelt. Andre geometrier er også mulige, for eksempel å ha kameraet på enden av en bom som scannes i en sirkel rundt kjøretøyet. I alle tilfelle vil det være svært ressurskrevende å dekke store områder, spesielt om man avgrenser seg til FFIs demonstratorsystem. Et spesialtilpasset system, for eksempel med flere kameraer, vil ha noe større dekningsrate.

Analyseresultatene kan vises på en skjerm, men de kan også projiseres tilbake i scenen slik at detekterte objekter "lyser opp". Dette er et nokså elegant konsept, i alle fall i prinsippet, som er foreslått av prof. Bjørn Alsberg ved NTNU(3). Dersom man bare ønsker statistikk over forekomst av eksplosivrester uten innsamling av detekterte partikler må man likevel etablere statistikk for falsk alarmrate ved manuell granskning av detekterte objekter innenfor avgrensede områder som ansees å være representative.

Selv om spektral signatur kan brukes til å lete ganske spesifikt etter stoffer av interesse må man regne med at et system vil ha en betydelig falsk alarmrate. Terskelen for deteksjon må settes som et kompromiss mellom deteksjonssannsynlighet og falsk alarmrate. I praksis kan det være aktuelt å sette terskelen slik at man får en håndterbar falsk alarmrate, for eksempel begrenset av kapasiteten til manuell granskning av detekterte objekter.



Figur 4.2 Prinsippskisse av mulig oppsett for feltbruk der kameraet monteres på et kjøretøy slik at kjøretøybevegelsen scanner synsfeltet.

5 Konklusjon og anbefalinger

Ekspperimentene har vist at eksplosivrester har en forholdsvis sterk spektral signatur som bør kunne utnyttes. FFIs demonstratorsystem vil kunne tilpasses til eksplosivdeteksjon, noe som gir et godt utgangspunkt for videre eksperimenter og fremtidig anvendelse.

Hyperspektral avbildning har en del åpenbare begrensninger, blant annet behovet for sikt til objekter som skal detekteres og krav til en viss objektstørrelse. Man må regne med at et reelt

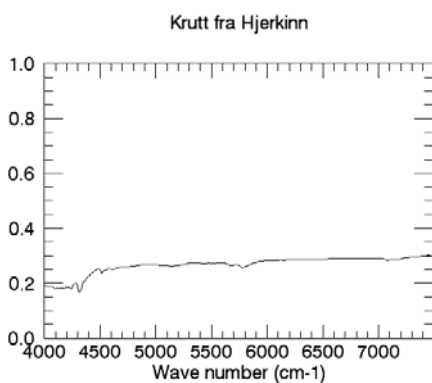
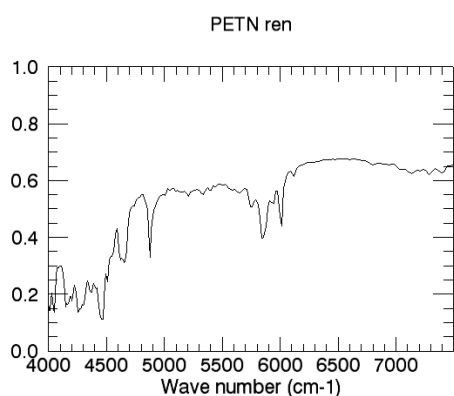
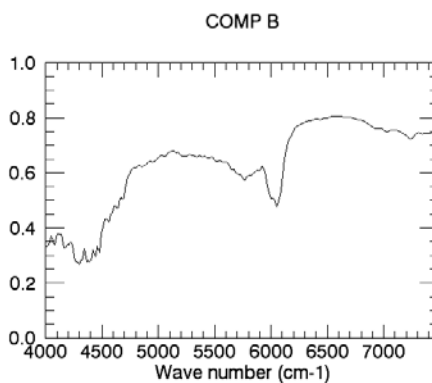
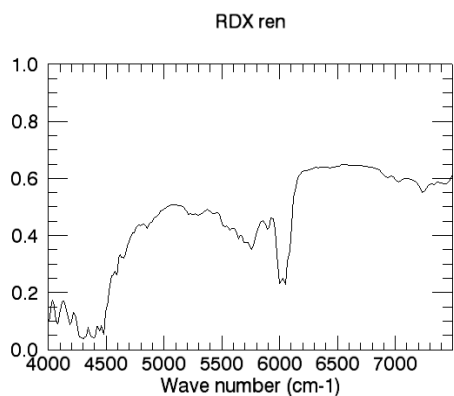
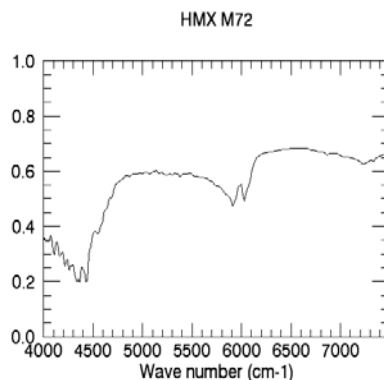
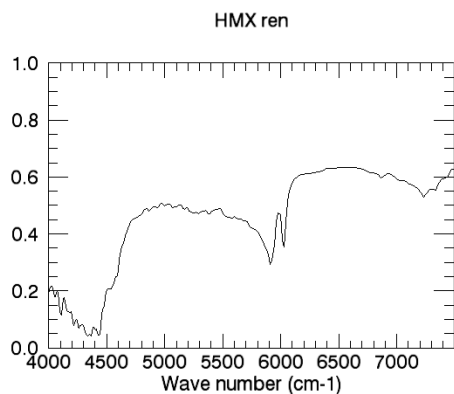
system vil gi en god del falsk alarm og at dette vil sette grenser for deteksjonsytelsen. Det er betydelige muligheter for forbedring av bildeanalysen, men det virker mest realistisk å få god deteksjonsytelse for "lette" objekter, altså partikler av en viss størrelse som ligger åpent og godt belyst. Full dekning av et stort område vil være svært ressurskrevende, mens det synes forholdsvis enkelt å gjøre stikkprøver for å etablere statistikk for forekomst av eksplosivrester.

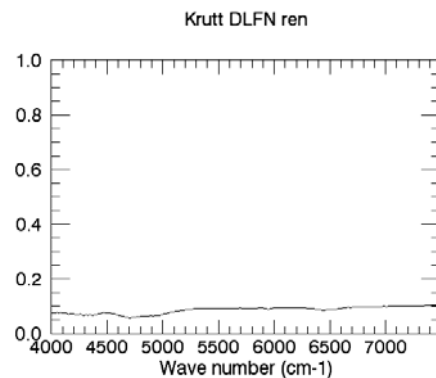
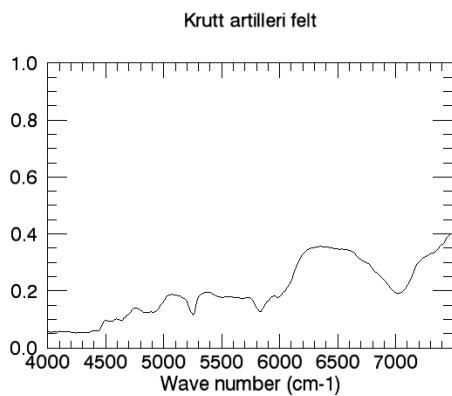
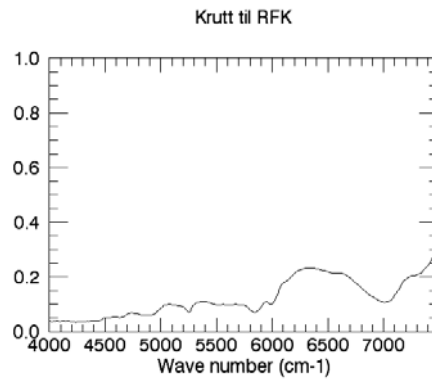
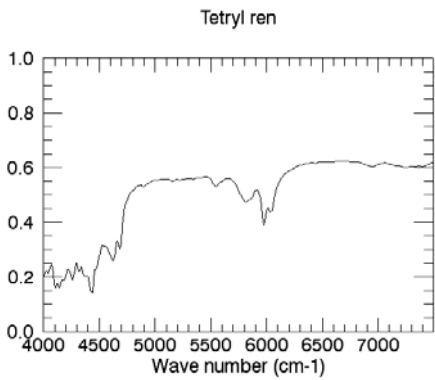
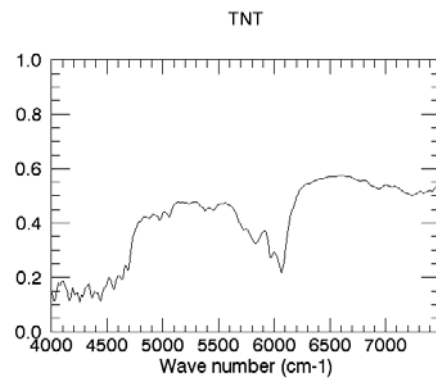
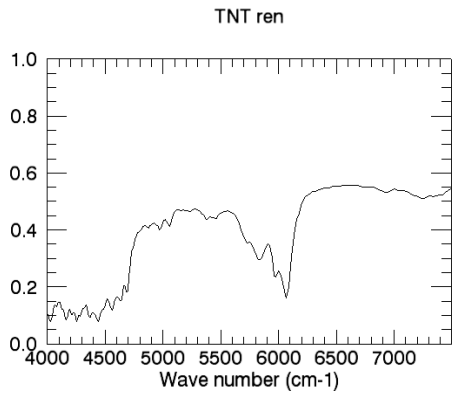
Denne rapporten gir et visst grunnlag for å vurdere hyperspektral avbildning opp mot andre teknikker. Det bør gjøres en analyse med sikte på å definere hva slags ytelse et hyperspektralt system bør ha for å være nyttig som supplement til andre teknikker for deteksjon av eksplosiver i felt. Analysen bør også indikere hva som vil være akseptable kostnader og akseptabelt ressursbehov. Dessuten bør det gjøres vurderinger av hva slags plattform som er best egnet for det hyperspektrale systemet.

Hvis resultatene fra en slik kost/nytteanalyse tilsier at hyperspektral avbildning er et ønskelig hjelpemiddel kan det gjøres mer realistiske feltforsøk for å verifisere ytelsen før man eventuelt etablerer et dedikert system for søk etter eksplosivrester.

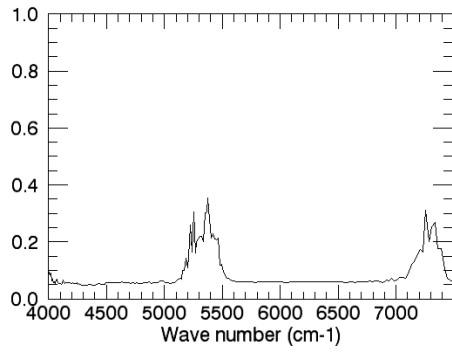
Appendix A Reflektansspektre i bølgetall

Grafene nedenfor viser de samme spektrene som i figur 3.12, men med bølgetall som enhet i stedet for bølgelengde. Disse figurene kan lettere sammenlignes med litteratur innen kjemisk spektroskopi.

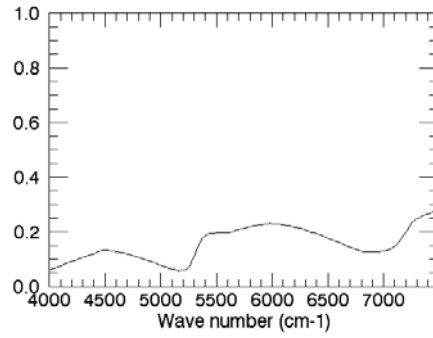




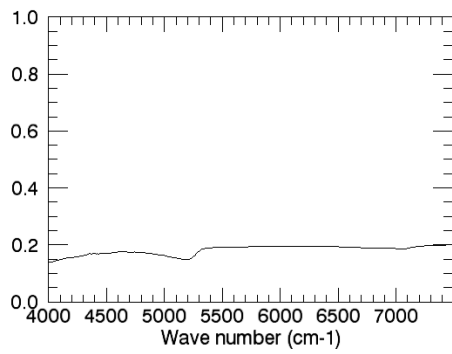
Krutt RMS - 07



Friskt gress



Jord



Referanser

- (1) Ingebjørg Kåsen, Pål Erik Goa, Torbjørn Skauli, "Target detection in hyperspectral images based on multi-component statistical models for representation of background clutter", Proc. SPIE 5612, s. 258 (2004)
- (2) Trym Vegard Haavardsholm, Torbjørn Skauli, Ingebjørg Kåsen, "A physics-based statistical signature model for hyperspectral target detection", Proc. IGARSS 2007
- (3) Bjørn Alsberg, "HYPERSPETRAL CHEMICAL AND PROPERTY IMAGING", Internasjonal patentsøknad PCT/GB2007/000369