

Akustisk detektion av begravda objekt

Sven Ivansson
Niels Jacobsen
Mika Levonen
Bernt Nilsson
Per Morén
Per Söderberg

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Systemteknik 172 90 STOCKHOLM	Rapportnummer, ISRN FOI-R--0324--SE	Klassificering Underlagsrapport
	Forskningsområde Spaning och ledning	
	Månad år December 2001	Projektnummer E2009
	Verksamhetsgren Forskning för regeringens behov	
	Delområde Undervattenssensorer	
Författare (redaktör) Sven Ivansson, Niels Jacobsen, Mika Levonen, Bernt Nilsson, Per Morén, Per Söderberg	Projektledare Paul Ström	
	Godkänd av Carin Lamnevik	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning Försvarsmakten	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Jörgen Pihl	
Rapportens titel Akustisk detektion av begravda objekt		
Sammanfattning <p>Att kunna upptäcka föremål som ligger begravda under sjöbotten är utomordentligt viktigt i flera sammanhang. Som exempel kan nämnas att bottenminor liksom dumpade tunnor med senapsgas kan ha begravts på grund av den pågående ackumuleringen av sediment. De typer av bottenpenetrerande ekolod som idag rutinmässigt används för kartläggning av sedimentstrukturer har som regel inte tillräckligt bra upplösning för att upptäcka små begravda objekt. En parametrisk sonar, med väsentligt smalare lob, har betydligt bättre förutsättningar.</p> <p>I rapporten redovisas resultat från mätningar med en parametrisk sonar, som monterats på en fjärrstyrd undervattensfarkost (ROV). Mätningarna har genomförts i Stockholms skärgård mot ett begrävt testobjekt i lerbotten. För att förbättra upptäcktsförmågan används två olika tekniker, bildbehandling och FARIM-analys.</p> <p>Vid bildbehandling visar det sig att horisontell medianfiltrering ger det bästa resultatet. Störningar i enstaka ping undertrycks effektivt på detta sätt.</p> <p>Med FARIM-analys kan man uppskatta skrovligheten och impedansen för botten. Våra experiment visar att ett begrävt objekt ofta kan upptäckas genom en anomali i impedans-skattningen. Av tre testade centerfrekvenser för utsänd puls, 5, 10 och 20 kHz, visar sig den högsta frekvensen (20 kHz) ge den bästa upptäcktsförmågan. Detta gäller för såväl resultaten efter bildbehandling som efter FARIM-analys.</p> <p>För att karaktärisera ett upptäckt nedgrävt objekt har vi provat s.k. bistatiska mätningar, man skickar ljudpulser mot objektet från en riktning och studerar den spridda energin från en annan. Vi redovisar beräkningsresultat från en nyutvecklad numerisk modell. Det visar sig att det spridda fältet är mycket känsligt för objektets egenskaper.</p>		
Nyckelord parametrisk sonar, lokalisering, vågfältsmodellering, minjakt		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor 24	
Distribution enligt missiv	Pris Enligt prislista Sekretess Öppen	

Issuing organization FOI - Swedish Defence Research Agency Systems Technology SE-172 90 STOCKHOLM Sweden	Report number, ISRN FOI-R--0324--SE	Report type Base data report
	Research area code C ⁴ ISR	
	Month year December 2001	Project No. E2009
	Customers code Research for the Government	
	Sub area code Underwater Surveillance Sensors	
Author/s (editor/s) Sven Ivansson, Niels Jacobsen, Mika Levonen, Bernt Nilsson, Per Morén, Per Söderberg	Project manager Paul Ström	
	Approved by Carin Lamnevik	
	Sponsoring agency Swedish Armed Forces	
	Scientifically and technically responsible Jörgen Pihl	
Report title Acoustic Detection of Buried Objects		
Abstract <p>The capability to detect objects buried in the sea bottom is important for many reasons. For example bottom mines as well as dumped chemical munitions can be expected to have been buried by the sedimentation. Standard sub-bottom profilers that are routinely used for mapping sediment structures do not have good enough resolution to detect small buried objects. A parametric sonar, with a much smaller lobe, is much more appropriate.</p> <p>In the report, we show results from measurements with a parametric sonar, mounted on a ROV (remotely operated vehicle). The measurements were made in the archipelago of Stockholm with a test object buried in clay. Two techniques were used to improve the detection capability, image processing and FARIM analysis.</p> <p>Concerning image processing, median filtering turns out to provide the best results. Isolated noisy pings are effectively suppressed in this way.</p> <p>FARIM analysis can be used to estimate roughness and impedance of the bottom. Our experiments show that a buried object can often be detected by an anomaly in the impedance estimate.</p> <p>Among three tested center frequencies for the emitted pulse, 5, 10 and 20 kHz, the highest frequency (20 kHz) turns out to provide the best detection capability. This is true for the image processing results as well as for the FARIM results.</p> <p>We have tried bistatic techniques to characterize a detected buried object. Sound pulses are emitted towards the object from one direction and the scattered energy is studied at another direction. We show computational results from a recently developed numerical model. The scattered field turns out to be very sensitive to the properties of the object.</p>		
Key words parametric sonar, localisation, wave-field modelling, mine hunting, MCM		
Further bibliografic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 24	
	Price Acc. to pricelist Security classification Unclassified	

Innehållsförteckning

1. Inledning	5
2. Experiment	6
2.1 Försöksbeskrivning	6
2.2 Alternativa signalformer	7
3. Analys	9
3.1 Detektion	9
3.2 FARIM	14
3.3 Modellanalys av bistatiska mätdata	18
4. Slutsatser	21
5. Referenser	22
Appendix 1	23

1. Inledning

Vid internationella operationer där sjöstridskrafter medverkar är mineringar alltid ett allvarligt hot. Speciellt i områden där bottenminor med låg akustisk signatur eller där minor dolda i bottensedimenten kan förekomma är minröjning svår och tidskrävande.

Problemet är inte bara moderna minor, under andra världskriget las det ut mer än 85 000 minor i Östersjön och en mycket stor del av dessa är ännu inte röjda. Till sammans med ett okänt antal blindgångare och torpeder utgör sprängämnet fortfarande, efter 50 år i vatten, ett hot mot industri och sjöfart.

Sedan 1995 har Sverige tillsammans med ett flertal andra europeiska länder medverkat i operationer för minröjning utanför Baltikums kust. Sammantaget har insatserna genom åren resulterat i röjning av hundratalet minor och andra blindgångare. Röjningen har i huvudsak koncentrerats till farleder och de minor som legat synliga på botten, de som ligger dolda i sedimenten är till största delen fortfarande okända.

Helsingforskommissionen, HELCOM, har via en speciell arbetsgrupp, CHEMU, Working group on dumped chemical munition, studerat omfattning och risker med dumpade kemiska stridsmedel i Östersjön, [1]. Man konstaterar att åtminstone 40 000 ton av olika typer av kemiska stridsmedel, där den mest kända är senapsgas, har dumpats efter andra världskriget. En stor del av dessa ligger i dag begravda i sedimenten och är inte synliga vid vanliga bottenundersökningar. Samtidigt är dessa begravda stridsmedel ofta mindre rostangripna och därför mer intakta än de som ligger oskyddade på en hård botten. Man har också rekommenderat utökade undersökningar för lokalisering av kemiskt avfall, speciellt en bestämning av mängden giftigt avfall dolt i sedimenten.

Bottensedimentet inom våra kustnära områden består till övervägande del av leror. De glaciala lerorna överlagras mestadels av mjukare postglaciala leror och senare avsatta (recenta) gyttjeleror. Tjockleken av dessa skikt är högst varierande på grund av lokala förutsättningar vad gäller sedimentation och erosion.

Den pågående ackumuleringen av sediment kan lokalt täcka och på så sätt helt begrava ett objekt. Plötsliga förändringar i erosionsmönstret kan också frilägga tidigare begravda objekt på kort tid och på så sätt blotta dumpat riskavfall. I de fall botten består av sand kan strömmar erodera runt ett objekt och få det att begravas, problem som observerats vid tex Kåseberga och Ravlunda skjutfält.

De typer av bottenpenetrerande standardekolod som i dag rutinmässigt används för kartläggning av sedimentstrukturer har som regel inte tillräckligt bra upplösning för att detektera små begravda objekt. En parametrisk sonar har en väsentligt smalare lob vilket ger den en högre upplösning och därmed bättre förutsättning att detektera små begravda objekt.

I den här rapporten redovisar vi några resultat från mätningar med en ROV-monterad parametrisk sonar som använts för detektion av ett föremål dolt i sedimenten, se figur 1. Försöken genomfördes i Stockholms skärgård där ett betongfyllt traktordäck var begravt i bottenleran. Vid analysen jämför vi hur detektion och detaljupplösning påverkas av olika frekvenser. Dessutom redovisas resultat från en bistatisk mätning där sonaren sänder snett ner mot botten, genom modellinversion försöker vi karaktärisera objektet.



Figur 1. PLUMS (Plattform för Undervattens MätSystem) som användes vid försöken med detektering av begravda objekt. Den penetrerande sonaren sitter monterad i fronten och är här vinklad nedåt.

2. Experiment

2.1 Försöksbeskrivning

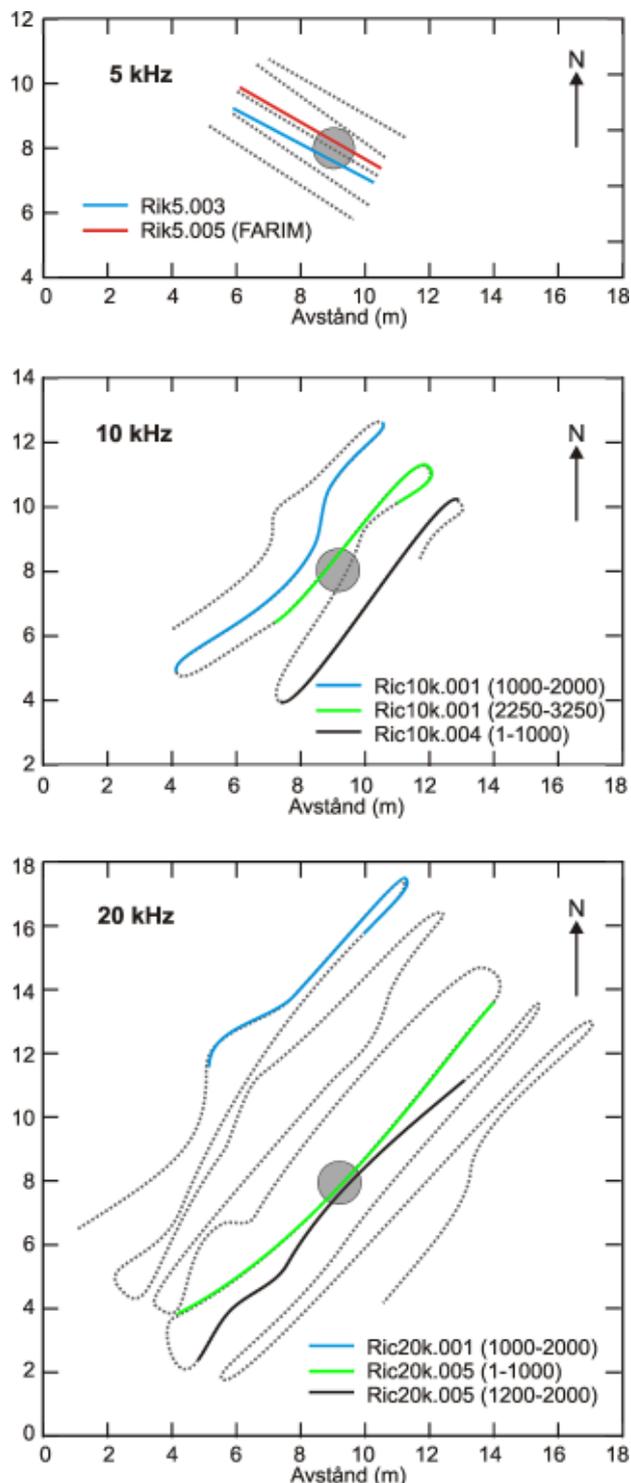
Försöken utfördes i en vik inom Stockholms södra skärgård vid två tillfällen, september 1999 samt maj 2001. Målobjektet bestod av ett liggande betongfyllt traktordäck med en diameter av 1,30 m och en tjocklek av 0,30 m. Objektet är begravt ungefär 0,4 m under den naturliga botten som består av postglacial lera. En parametrisk sonar, TOPAS 120, var monterad på en ROV utvecklad vid FOI, den så kallade PLUMS (PLattform för UndervattensMätSystem). Den parametriska sonaren arbetade med Ricker-pulser där centralfrekvenserna var 5, 10 och 20 kHz. Försöken med 5 kHz Ricker-pulser utfördes i september 1999 och har delvis redovisats i [2].

Vid 10 och 20 kHz-försöken var PLUMS utrustad med ett akustiskt positioneringssystem, ROV-Trak från Sonardyne. En transeiver på PLUMS kommunicerar med fyra transpondrar förankrade runt målområdet, i vårt fall i form av en kvadrat med en sida av 100 m. Systemet kalibreras med hjälp av DGPS. Den relativa noggrannheten är ca 0,3 m. För en utförligare beskrivning av PLUMS och positioneringssystemet hänvisas till [3].

Med hjälp av positioneringssystemet kunde PLUMS köras i ett sökmönster bestående av ett antal parallella linjer med ca 1 m mellanrum. PLUMS backades på varannan linje för att undvika fel p.g.a. att sonaren möjligen inte var riktad helt vertikalt. PLUMS kördes på ett djup av 5 m, d.v.s. ca 15 m över botten. Navigations-systemet stördes till viss del av sonaren, vilket ledde till att enstaka positionsangivelser blev någon meter fel. Styrningen av PLUMS försvårades också. Sökbanorna, som visas i figur 2.1 är filtrerade. Sonarens träffyta på botten är ca 1 m i diameter, dvs nästan lika stor som objektet i figuren.

Under körningar med 10 och 20 kHz svajade PLUMS upp och ner ca 10 cm, troligen p.g.a. de långa sökbanorna i kombination med en provisorisk och därför olämplig kabel. Vid det tidigare försöket i september 1999 var söklinjerna kortare och PLUMS gick på ett stabilt djup.

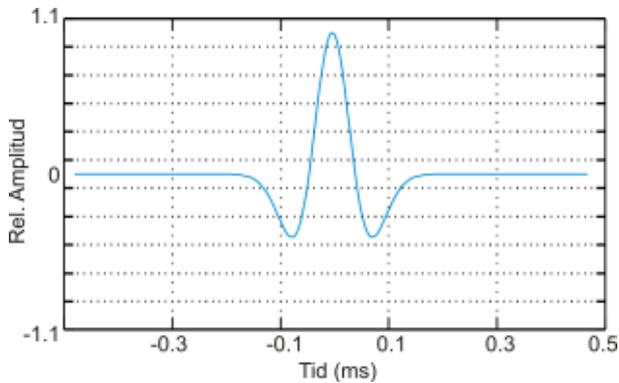
Vattendjupet i försöksområdet är ca 20 meter med en försumbar svag lutning. Bottensedimentet i försöksområdet består av mjuka postglaciala leror och gyttjeleror. Dessa avlagringar är allmänt tämligen inhomogena men inom försöksområdet av en konstant tjocklek av ca 1,5 m. Inom försöksområdet förekommer ingen vegetation på botten.



Figur 2.1. Sökbanor i de olika försöken. Målobjektet visas som en fylld cirkel, med skalriktig storlek. Banorna i 5 kHz-försöket har uppskattats från kompassriktningar. Banorna i 10- och 20 kHz-försöken har registrerats med positioneringssystemet och visas här efter störningsfiltrering och viss redigering. Akustiska störningar från TOPAS gjorde det även svårt att följa en rät linje. Y-axeln pekar mot norr, medan origo är godtyckligt. Filnamn och analyserade pingnummer är markerade.

2.2 Alternativa signalformer

Under experimenten som beskrivits användes nästan uteslutande Rickerpulser. Ett exempel på en Rickerpuls visas i figur 2.2 nedan.



Figur 2.2. Ett exempel på en syntetisk 5 kHz Rickerpuls.

För att kunna lösa upp eller karaktärisera botten på ett bra sätt behöver vi en signal som ger hög upplösning, dvs. den ska ha kort utsträckning i tiden. Det kan vi se med följande enkla exempel. Om vi skickar ut signalen $s(t)$ så är en vanlig modell för den mottagna signalen, $y(t)$,

$$y(t) = \int h(\tau)s(t-\tau)d\tau, \quad (1)$$

där $h(t)$ är kanalens impulssvar. Om vi nu antar att kanalen endast består av ett antal punktreflektorer så kan vi skriva mottagen signal som

$$y(t) = \sum_i a_i s(t-\tau_i), \quad (2)$$

där a_i är dämpningsfaktorer och där τ_i svarar mot tidsförskjutningarna för reflexerna från punktreflektorerna. Den mottagna signalen består av en överlagring av ett antal tidsförskjutna kopior av den utskickade signalen. För att kunna lösa upp punktreflektorerna måste vi då ha en signal som har kort utsträckning i tiden.

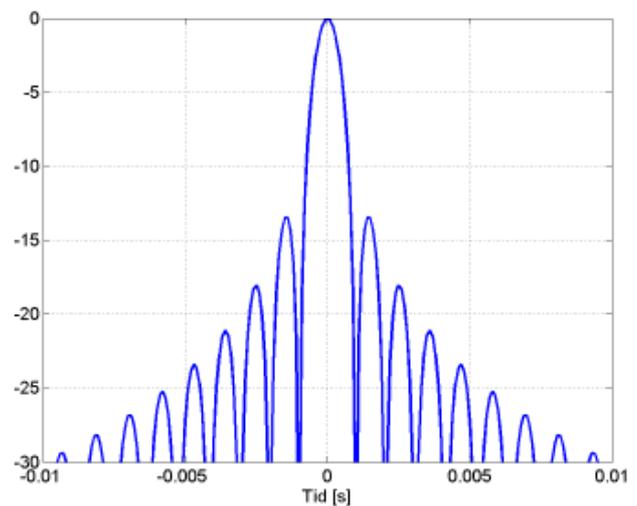
Den korta tidsutsträckningen är Rickerpulsens forte och medför också att den är bredbandig. Den har en bandbredd som är ungefär lika med inversen av dess huvudlobs bredd.

Nackdelen med Rickerpulsen är att den innehåller förhållandevis lite energi eftersom den är kort. Om man har dåligt signal-till-brus-förhållande (SNR), t.ex. vid större vattendjup, och om man vill bibehålla en viss

upplösning, så återstår endast att öka Rickerpulsens amplitud. Här finns det dock normalt en övre gräns i form av effektbegränsning i sändutrustningen.

För att få ut mer energi i vattnet kan man byta signalform och använda ett matchat filter. Här använder man signaler som har lång tidsutsträckning – och därmed högre energi – och som har en korrelationsfunktion med kort utsträckning. Den höga tidsupplösningen uppnås då efter det matchade filtret. Prestanda ges nu inte av signalen själv utan av dess autokorrelationsfunktion.

Ett exempel på en annan signalform är linjärt frekvensmodulerade svep (LFM). I figur 2.3 visas autokorrelationsfunktionen för en LFM-signal med bandbredden 1 kHz.

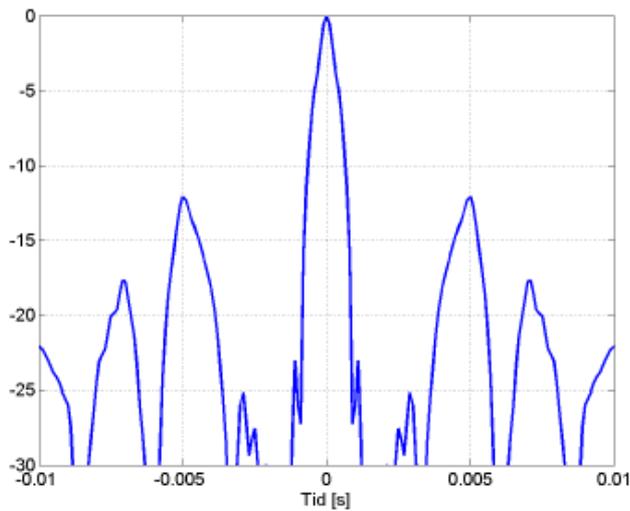


Figur 2.3. Autokorrelationsfunktion för en LFM-signal med bandbredden 1 kHz.

Vi ser att sidoloberna snabbt klingar av och att huvudloben har en bredd som är omvänt proportionell mot signalens bandbredd. En mer bredbandig signal har smalare korrelationsfunktion.

Ett annat exempel på signalform är BPSK (Binary Phase Shift Keying)[4, 5], se figur 2.4, vilken normalt används för datakommunikation. BPSK-signalen har relativt höga sidolobber och framför allt en ganska stökig sidolobsstruktur jämfört med LFM-signalen ovan. Den har dock en något smalare huvudlob.

En annan fördel med BPSK-signalen som inte framgår av figurerna ovan är att den har hög dopplerupplösning *samtidigt* som den har hög tidsupplösning. Det är en viktig egenskap om man inte kan anta att sändaren/mottagaren befinner sig på ett konstant djup under mätningarna, dvs. om vi har dopplereffekt i mätningarna. Vi tittar dock inte närmare på den signalegenskapen här.



Figur 2.4. Autokorrelationsfunktion för en BPSK-signal med approximativa bandbredden 1 kHz.

Vi har sett att genom att öka pulslängden kan vi få ut mer energi i vattnet, och därmed klara lägre SNR. Eftersom mätningar av den här typen normalt är monostatiska finns det en övre gräns för pulslängden. Antag t. ex. att vi vill belysa botten på d meters djup, då kommer de första reflexerna från botten i mottagaren efter

$$t_{\max} = \frac{2d}{c} \quad (3)$$

sekunder, där c är ljudhastigheten i vattnet. Eftersom mottagaren är ”döv” under sändning i en monostatisk konfiguration kan vi inte använda en signal som är längre än t_{\max} . t_{\max} får dessutom ses som en gräns som är omöjlig att uppnå eftersom mottagaren behöver viss tid att hämta sig efter sändning. Den senare tiden kan dock minskas genom att elektriskt koppla bort mottagaren medan vi sänder.

3. Analys

3.1 Detektion

I det här kapitlet kommer vi att jämföra och diskutera detektionsresultaten vid tre olika frekvenser, 5, 10 och 20 kHz. Vi beskriver också några metoder att förbättra möjligheten att detektera föremålen i botten.

Vid mätningarna skickas Ricker-signaler (eller ping), med 0,2 sekunders lucka, vertikalt mot botten samtidigt som mätplattformen PLUMS rör sig längs en horisontell linje. Ekon registreras fortlöpande från olika sedimentskikt och föremål i botten. Där vi har gränsskikt med hög akustisk impedansskillnad kommer vi att få kraftigare ekon än från andra skikt. Vi registrerar alltså en tidsserie efter varje ping. Tiden i tidsserien kommer att motsvara djupet under sändaren sedan vi kompen-serat för tvåvägsutbredningen samt för ljudhastigheten vid tillfället. Vi sätter sedan samman många registreringar till bilder, reflektionsbilder, där ekoenvelopen plottas som funktion av pingnummer (dvs. i princip horisontellt avstånd) och djup under sändaren. Det är denna typ av bild som kommer att presenteras nedan. Observera att djupskalan i bilderna inte är absolut utan endast relativ.

Under mätningarna med frekvenserna 10 och 20 kHz rörde sig PLUMS i höjddled, vilket skapade tvetydighet i djupskalan. Under analysarbetet har vi försökt kompensera för den här rörelsen, för att erhålla målekon som så långt det är möjligt svarar mot målets form. Vi antar att botten är plan över målet och justerar varje ping efter lokal bottenyta. Vi får på så sätt nya ”rektifierade” bilder över bottenstrukturen. Vid de högre frekvenserna har det dock ofta varit svårt att se bottenytan, och de rektifierade bilderna innehåller därför fortfarande delar av PLUMS vertikala rörelse.

Metoder för bildförbättring

I det här avsnittet beskriver vi kort de operationer som utförts på reflektionsbilderna för att underlätta detektionen av begravnade objekt. Flera av dem har använts tidigare [2].

Till att börja med har varje ping bandpassfilterats så att det frekvensområde som spänns av den aktuella signalen framhävs. Här har vi använt intervallen 1-9, 5-15 respektive 15-25 kHz för Rickerpulserna med 5, 10 respektive 20 kHz centerfrekvens. Enkla 5:e ordningens Butterworthfilter har använts.

Vi har även valt att filtrera bilderna i horisontell led. Det blir ofta störningar i enstaka ping och betraktade som konsekutiva pixlar i en bild bildar de transienta störningar. Dessa störningar kan vi mildra med ett lågpasfilter i horisontell led. Vid de här analyserna har vi utslutande använt ett enkelt 5:e ordningens Butterworth lågpasfilter med normerade frekvensen 0,025.

Ett tredje sätt vi valt att filtrera på är en tvådimensionell glättning eller ”smoothing”. I den här metoden bildas medelvärdet, lokalt i bilden, över ett 5x10 pixlar stort område. Vidare har just den här operationen utförts på envelopen av data. De andra filtreringarna har gjorts direkt på rådata, dvs. direkt i tidsserierna.

Ett annat – ofta effektivare – sätt att filtrera i horisontell led är att använda ett glidande medianfilter. I detta får ett fönster glida genom signalen, för varje djup, och som filtrerat värde väljs medianen av samplen i fönstret. Den här databehandlingen ger ett resultat som mycket väl överensstämmer med den ursprungliga bilden, men där störningar i enstaka ping plockats bort. Vi ska visa exempel på detta senare.

Vi har även studerat ett par högre ordningars statistik, skewness (tredjementet eller skevheten) och kurtosis (fjärdementet). Detta bygger på antagandet att amplitudfördelningen för reflexerna i varje ping vanligen är normalfördelade (dvs. beskrivs fullständigt med endast första- och andramomenten) och på förhoppningen att reflexer från nedgrävda objekt skulle bidra till högre ordningars moment. Här definierar vi tredje- och fjärdementen, ρ_3 respektive ρ_4 , enligt

$$\rho_3 = \frac{1}{N\sigma^3} \sum_{i=1}^N (x(i) - \bar{x})^3 \quad (4)$$

$$\rho_4 = \frac{1}{N\sigma^4} \left(\sum_{i=1}^N (x(i) - \bar{x})^4 \right) - 3. \quad (5)$$

Här är \bar{x} medelvärdet och σ standardavvikelsen för de N samplen i det aktuella datablocket.

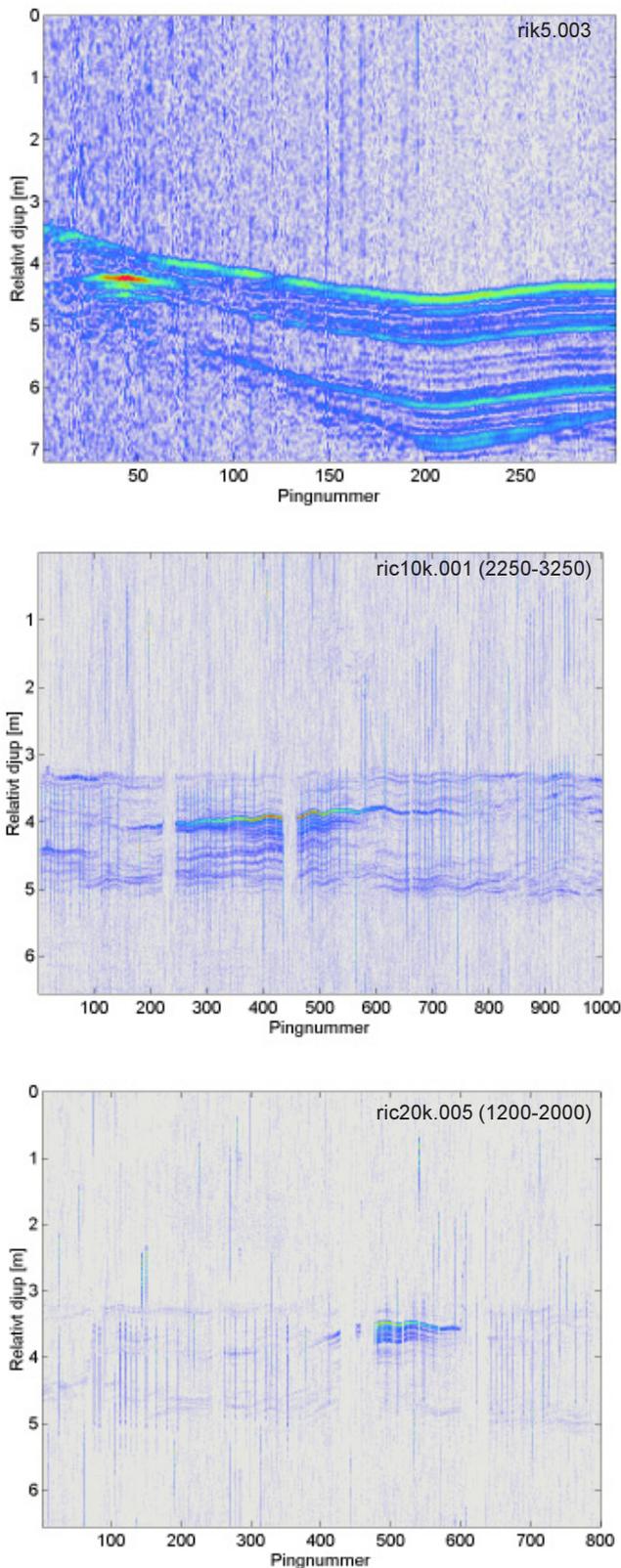
Slutligen visar vi exempel där vi använder waveletteknik för att göra bilderna tydligare. Det är metoder för ”wavelet denoising”, dvs. ungefär brusborttagning med waveletteknik. De tester vi gjort med wavelets är ingalunda uttömmande, utan ska bara ses som exempel.

Mycket forskning numera rör klassificering av objekt begravnade i botten, se exempelvis Boulinguez, m. fl., [6].

En metod som uttryckligen behandlar detektering och med vilken man nått goda resultat presenterades vid Oceans 99 [7]. Här modellerade man reverberationen med ett AR-filter. Den modellerade reverberationen vid en tidpunkt subtraherades sedan från data vid en senare tidpunkt och på så vis lyckades man öka SNR och få bättre detektionsmöjlighet.

Analysresultat

Registreringarna vid 5 kHz gjordes inte vid samma tillfälle som mätningarna vid 10 och 20 kHz. Det är dock av intresse att jämföra resultaten.



Figur 3.1. Reflektionsdata utan behandling, 5 kHz (överst), vid 10 kHz (mitten) och vid 20 kHz (nederst). Reflexerna från målet är starkare – relativt dem från botten – vid de högre sändfrekvenserna. De vertikala strecken är störningar från positioneringssystemet, synliga vid 10 respektive 20 kHz.

I figur 3.1 visas envelopen av annars obehandlade data för 5, 10 och 20 kHz. Vi kan se målet i vänsterkanten av bilden för 5 kHz, och att det har den typiska formen med ”hängande” ändrar, se figur 3.2. Den här effekten uppstår p.g.a. att vi har en viss lobbredd hos sändaren så att målet blir belyst redan innan sändaren befinner sig rakt ovanför målet. Gångvägen blir längre enligt Pythagoras sats, vilket resulterar i de hängande ändarna. I bilderna för 10 respektive 20 kHz-data kan vi inte se den hängande formen, eftersom vi inte lyckats helt med rektifieringen av data. Istället har vi här fått vågformiga ekon av vilka vi inte kan dra några slutsatser om målets form. De vertikala strecken som är synliga i samtliga bilder vid 10 och 20 kHz är störningar som kommer från positioneringssystemet.

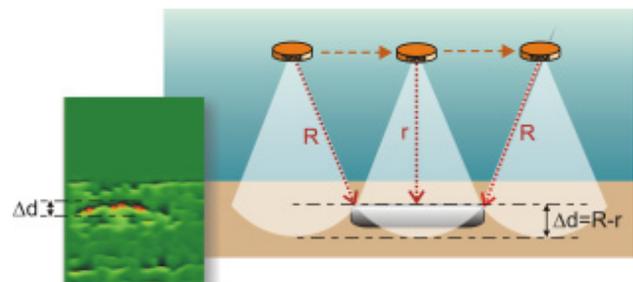
Vi ser i figur 3.1 att vi får kraftigare ekon från målet - relativt botten - vid 10 och 20 kHz jämfört med vid 5 kHz. Vid 20 kHz är ekona från botten nästan obefintliga, se Appendix 1.

Som nämnts tidigare har vi även behandlat bilderna ovan med några enklare filtreringar: vertikal bandpassfiltrering, horisontell lågpasfiltrering och tvådimensionell lågpasfiltrering. Bilderna där de här metoderna applicerats visas i figur 3.3 för registreringarna vid 10 kHz.

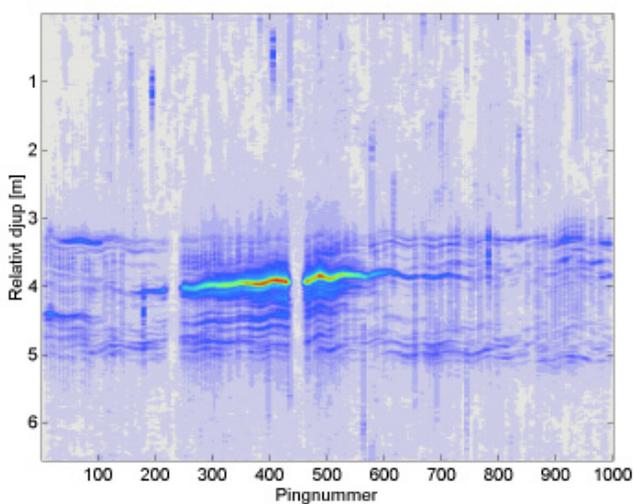
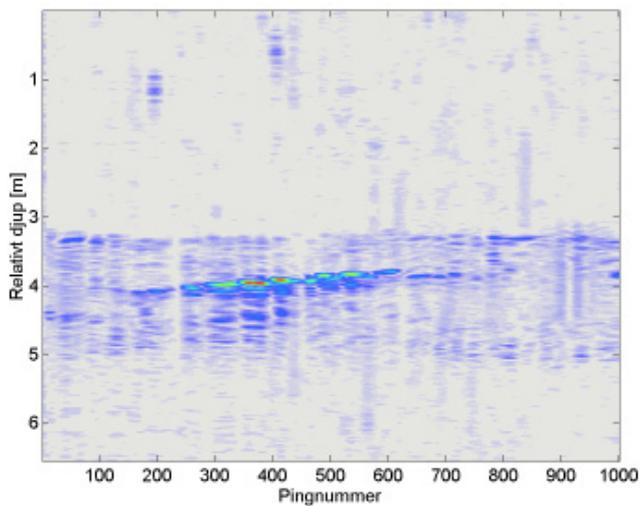
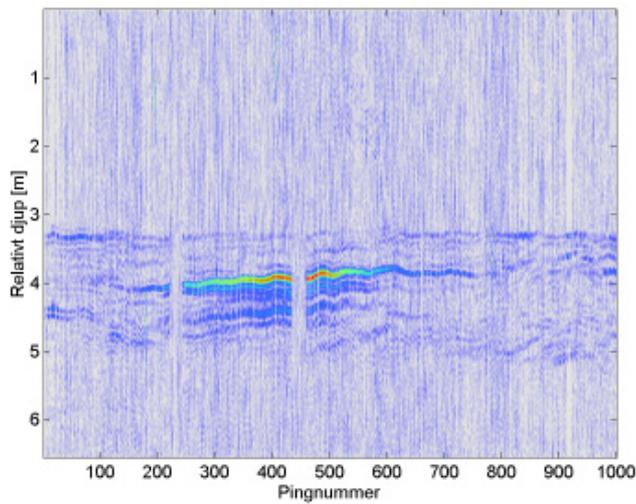
Bandpassfiltret ger en viss breddning av målet jämfört med originalbilden, figur 3.1, och samtidigt har bakgrunden blivit något brusigare. Det horisontella lågpasfiltret ger en uppdelning av målet i flera reflexer vilket är olyckligt. Däremot har det filtret givit en bättre bakgrund att urskilja ekon i. Det tvådimensionella boxfiltret ger fin glättning av originalbilden och det är enkelt att urskilja målet med den här filtreringen. Resultaten vid 5 och 20 kHz är liknande och utelämnas här.

Den metod som har visat sig ge bäst bildförbättring för våra registreringar är horisontell medianfiltrering. I figur 3.4 visas resultaten med ett 5 ping långt medianfilter.

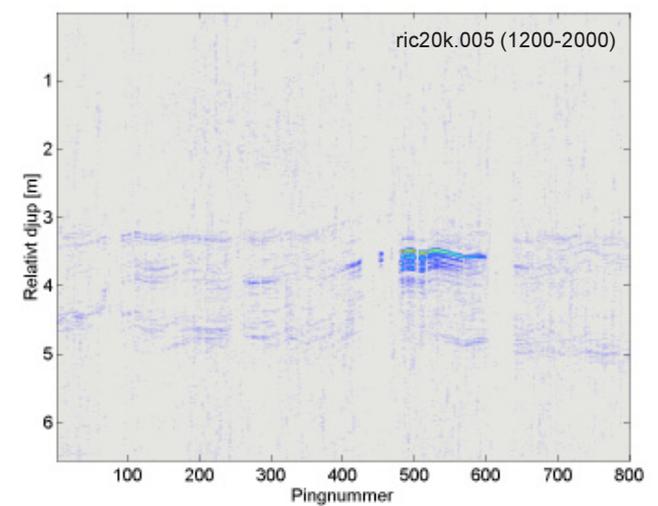
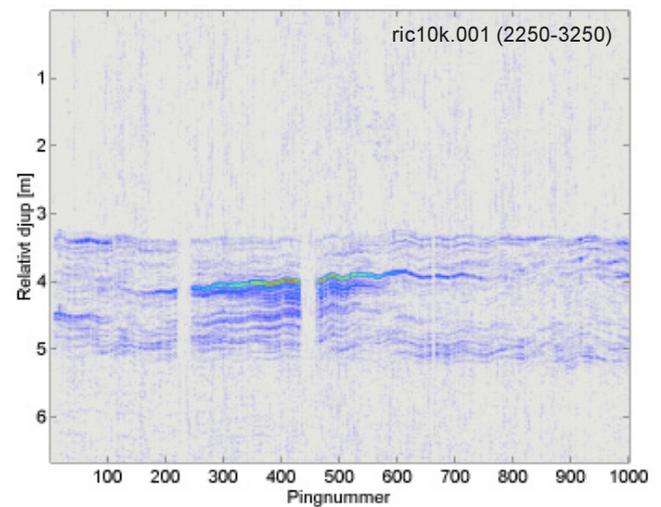
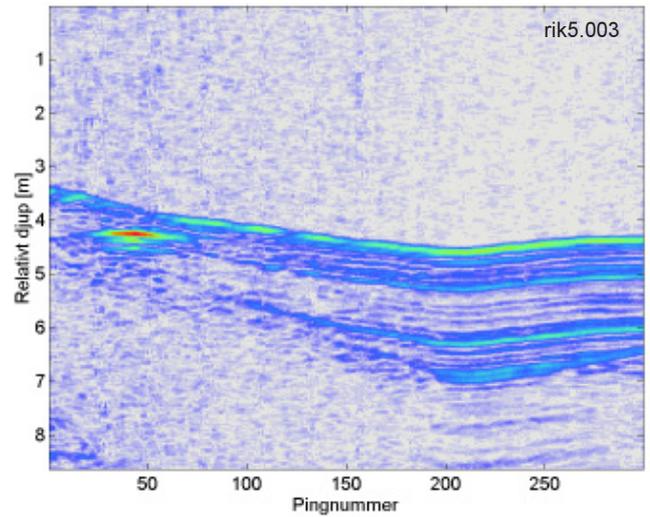
I de här bilderna har i stort sett alla de vertikala störningarna försvunnit. För att riktigt visa på skillnaden mot det ofiltrerade fallet visar vi i figur 3.5 motsvarande bilder i perspektiv.



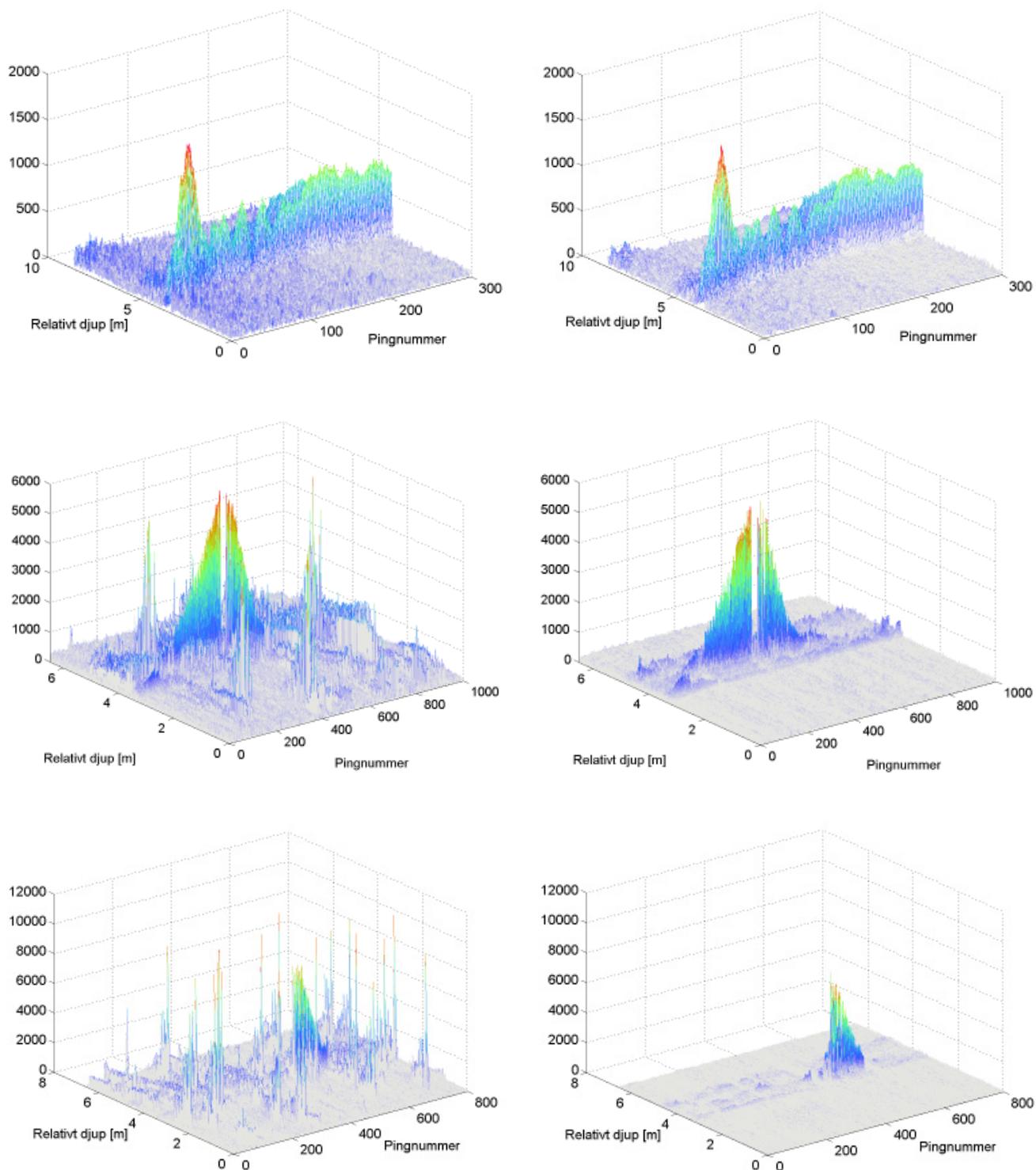
Figur 3.2. Den ändliga lobbredden hos sändaren medför att ett punktmål får hängande ändrar. Effekten uppstår som en följd av att gångvägsskillnaden varierar i olika delar av loben (Pythagoras sats).



Figur 3.3. Resultat vid sändarfrequensen 10 kHz, från fil ric10k.001 (2250-3250), för några olika filter: vertikal bandpassfiltrering 5-15 kHz (överst), horisontell lågpasfiltrering vid normaliserade frekvensen 0.025 (mitten) respektive tvådimensionell boxfiltrering med boxstorlek 5x10 pixel (nederst).



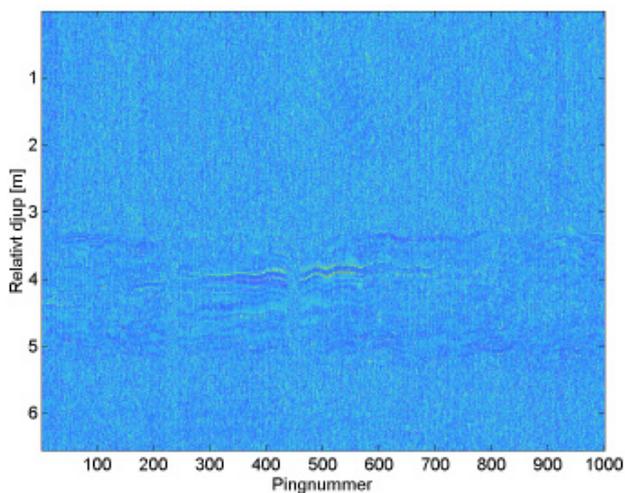
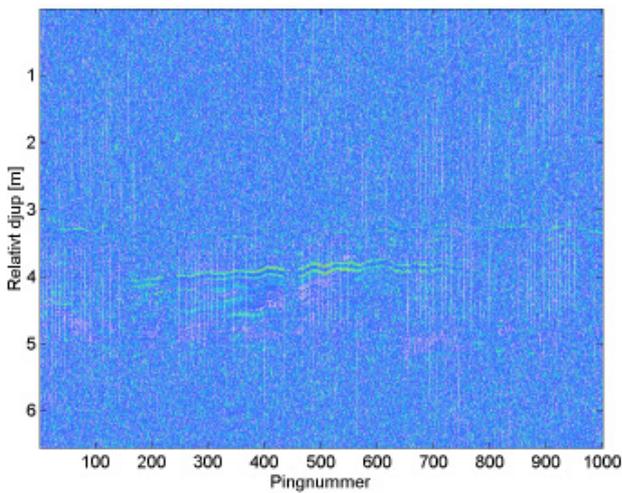
Figur 3.4. Horisontell medianfiltrering med filterlängden 5 pixel av data vid 5 kHz (överst), 10 kHz (mitten) och 20 kHz (nederst).



Figur 3.5. Reflektionsbilder före (vänster) och efter (höger) medianfiltrering för sändfrekvenserna 5 kHz (överst), från fil rik5.003, 10 kHz (mitten), från fil ric10k.001 (2250-3250), och 20 kHz (nederst), från fil ric20k.005 (1200-2000).

Här ser vi tydligt att möjligheten att detektera förbättrats avsevärt. Alla de vertikala störningarna har eliminerats och vi skulle inte få några falsklarm i detektionen vid de här händelserna efter medianfiltrering.

En hypotes vid starten av analysarbetet var att begravda objekt kanske ger bidrag till tredje och/eller fjärde momenten i de registrerade signalerna. Då skulle objekten lättare kunna detekteras i reflektionsbilder där vi – istället för själva registreringarna – plottar tredje-

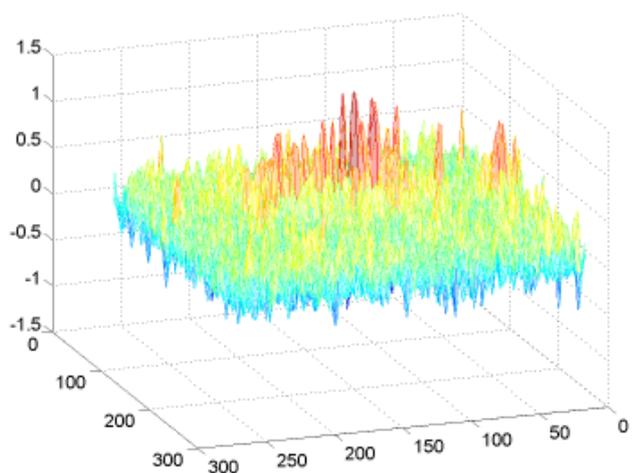
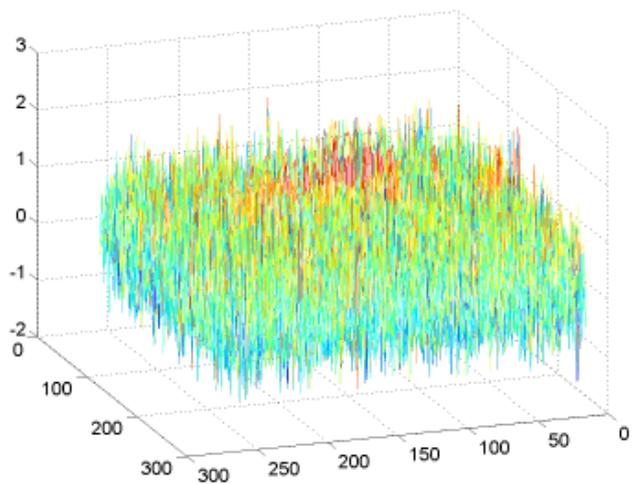


Figur 3.6. Tredje- (överst) och fjärdemomenten (nederst) i glidande vertikala fönster för reflektionsdata vid 10 kHz i figur 3.1, från fil *ric10k.001* (2250-3250).

eller fjärdemomenten av registreringarna. För att undersöka den möjligheten har vi beräknat tredje- och fjärdemomenten för registreringarna och resultaten vid 10 kHz visas i figur 3.6 (jämför med figur 3.1 och 3.4).

Resultaten visar att vi inte har några större tillskott i tredje- eller fjärdemomenten, åtminstone inte i de här registreringarna. Bilderna blir betydligt sämre än motsvarande bilder över obehandlade data. De här analyserna har utförts även vid de andra frekvenserna men de har givit likartade resultat i samtliga fall, och har därför utelämnats här.

Vi har sett att metoderna som bygger på tredje och fjärdemomenten inte gav bra resultat. De ger generellt sett mycket brusiga bilder och i ett försök att förbättra bilderna har vi använt waveletteknik. Det är metoder för ”avbrusning” (eng. ”denoising”) av bilder vi har an-



Figur 3.7. Avbrusning med hjälp av waveletteknik. Överst visas obehandlade och nederst waveletavbrusade data, från fil *ric20k.005* (1200-2000).

vänt [8, 9]. Resultaten finns i figur 3.7. Här har vi skurit ut ett avsnitt ur bilden med tredjemomentsdata för sändfrekvensen 20 kHz. Bildens storlek begränsades för att hålla beräkningskraven nere. Vi ser en tydlig förbättring efter avbrusningen, men resultaten är fortfarande betydligt sämre än de som uppnås med medianfiltrering av rådata ovan.

Sammanfattningsvis ger horisontell medianfiltrering det bästa resultatet. Möjligen kan resultaten förbättras ytterligare något med en påföljande tvådimensionell filtrering. Det är också sannolikt att ytterligare studier av wavelet-kompression eller –avbrusning kan ge bra utdelning. Vi kan också konstatera att vi fått de mest störningsfria reflektionsbilderna vid de högre frekvenserna, 10 och 20 kHz. Här syns reflexer från botten endast svagt jämfört med dem från målet, se Appendix 1.

3.2 FARIM-analys

FARIM är en akronym för Frequency Analysis-based Roughness and Impedance estimation Method. Den utvecklades inom ISACS-projektet [10] för bottenkaraktärisering med en parametrisk sonar. Metoden finns beskriven i [11]. Med dess hjälp kan man uppskatta skrovligheten (i cm, för ytskiktets småskaliga variation) och impedansen (produkten av densitet och ljudhastighet) för botten. I princip kommer ett botteneko att lågpasfilteras om botten är skrovlig, ju skrovligare botten är desto kraftigare blir denna lågpasfiltering. Genom att jämföra spektra för utsänd och reflekterad signal kan man därmed uppskatta skrovligheten. En uppskattning av impedansen kan sedan erhållas ur den reflekterade signalens amplitud efter korrigering för skrovlighetens inverkan.

Här behandlar vi detektion av begravnade objekt och inte bottenkaraktärisering. Våra experiment har visat att ett begravnat objekt kan ge upphov till en anomali i t.ex. den skattning av bottenens impedans, som erhålls med FARIM. På detta sätt blir tekniken faktiskt av intresse även som en detektor av begravnade objekt.

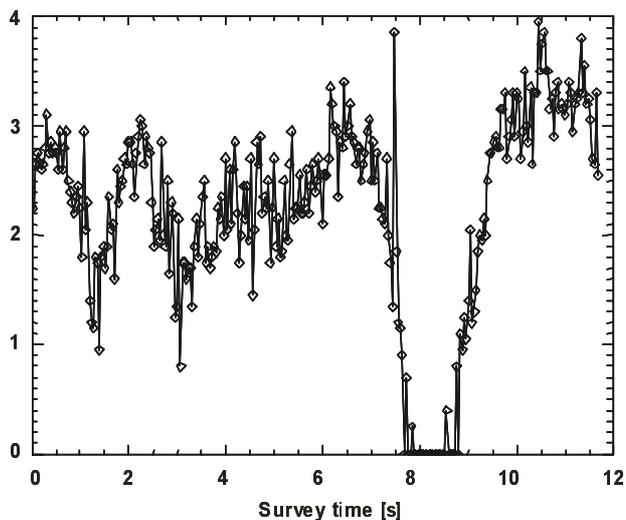
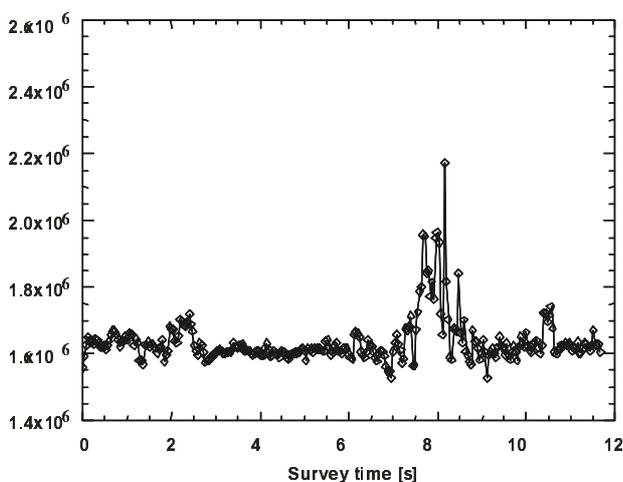
Ett exempel på FARIM-analys ges i figur 3.8. Den avser resultat från en löpa passerande över det begravnade traktordäcket, närmare bestämt rik5.005 i figur 2.1.

Skrovlighet och impedans för den naturliga botten varierar här kring 2 cm resp. $1.6 \cdot 10^6$ kg/m²s. Vi ser dock tydliga anomalier för såväl skrovlighet som impedans vid passagen över det begravnade traktordäcket, som sker vid tiden 8 s i figuren. Att impedans-skattningen ökar kan bero på att det ytligt liggande traktordäcket ger upp-

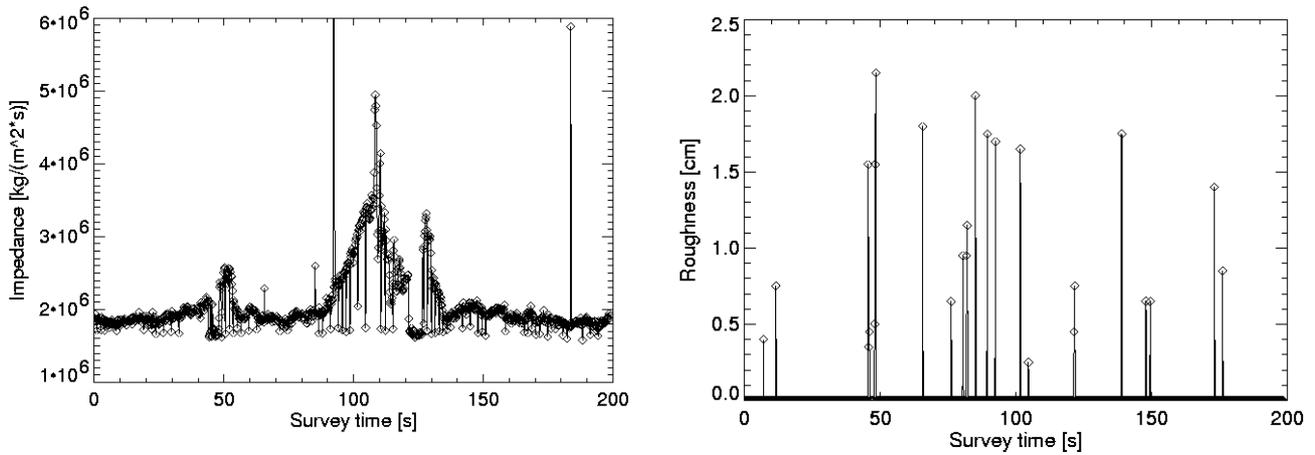
hov till en kraftigare reflex (som kommer med i det analysfönster som här valts för FARIM-metoden). Dessutom kan omrörning i botten, vid nedgrävning av traktordäcket, ha frigjort gasbubblor etc med reflexförstärkning som naturlig följd.

För exemplet i figur 3.8 användes en Ricker-puls med centerfrekvens 5 kHz. Experimenten har tidigare rapporterats i [2]. I avsikt att undersöka om andra centerfrekvenser skulle kunna ge en bättre detektionsförmåga har vi sedan gått vidare med nya experiment. Som beskrivits i avsnitt 2.1 användes 10 kHz och 20 kHz som centerfrekvenser i de nya experimenten, och vi övergår nu till att redovisa motsvarande FARIM-analysresultat.

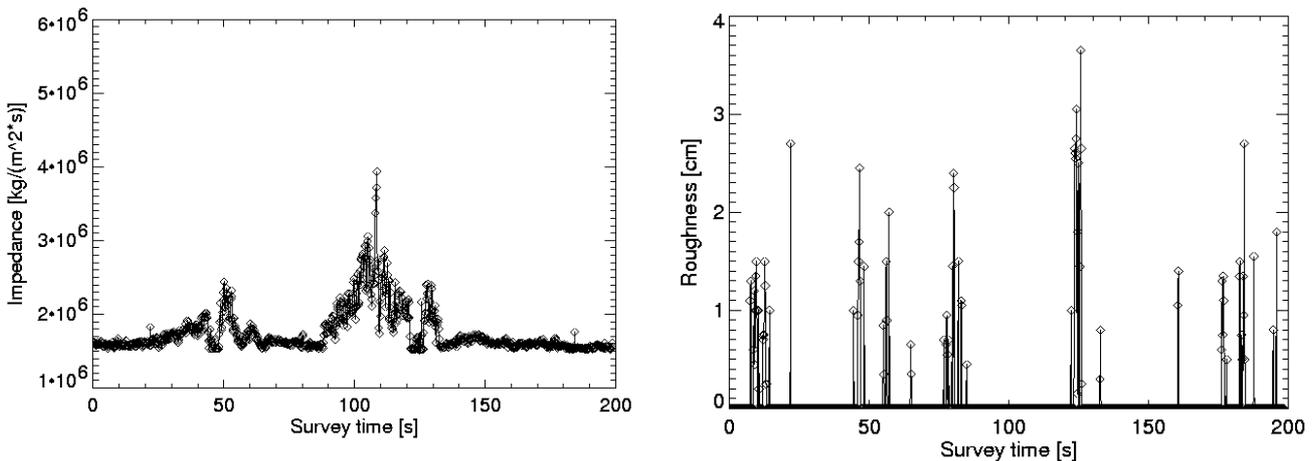
Först ser vi då på tre exempel för centerfrekvensen 10 kHz. För varje exempel visas två figurer: en utan medelvärdesbildning och en där medelvärdet bildats för tre på varandra följande ping. Figurerna 3.9 och 3.10 avser ping 1000-2000 från fil ric10k.001, med passage nära traktordäcket vid tiden 110 s. Figurerna 3.11 och 3.12 avser ping 2250-3250 från samma fil ric10k.001, med en lång passage över traktordäcket runt tiden 80 s. Figurerna 3.13 och 3.14 avser ping 1-1000 från fil ric10k.004, med passage över traktordäcket vid tiden 100 s. I samtliga fall kan vi observera en anomali, en ökning i impedansskattningen, då det begravnade traktordäcket passerar. Naturligtvis blir anomalin mindre efter medelvärdesbildning. En intressant observation är att anomalin är kraftigare än för fallet med centerfrekvens 5 kHz (figur 3.8).



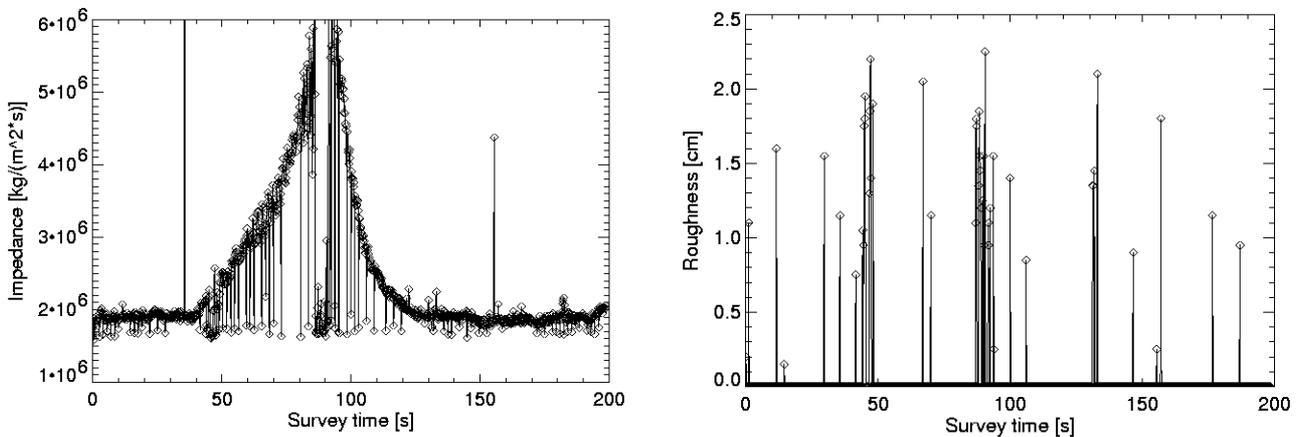
Figur 3.8. Skattning av impedans och skrovlighet med FARIM för mätningar med TOPAS, 5 kHz Ricker-puls. Det begravnade traktordäcket passerar vid tiden 8 s, (fil rik5.005 i figur 2.1).



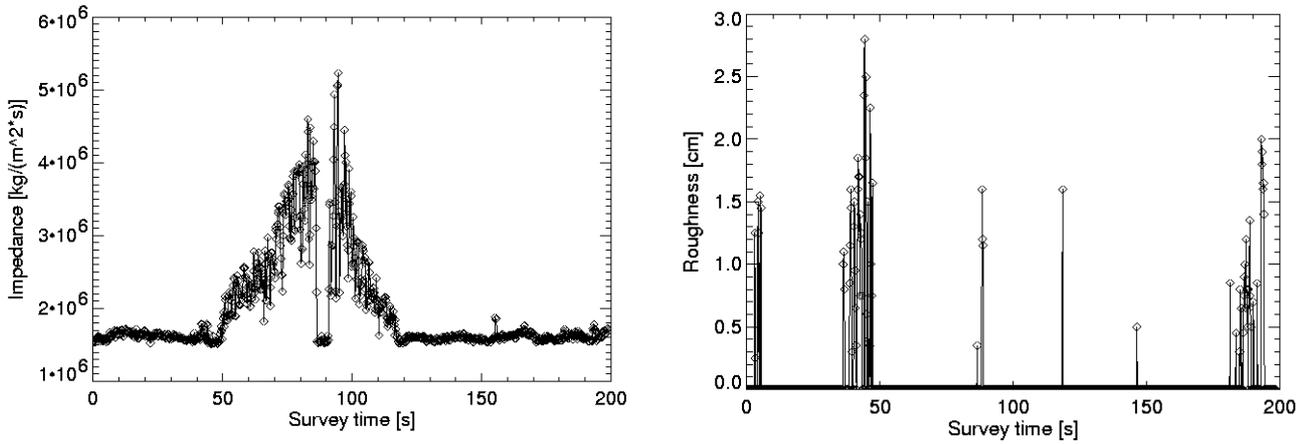
Figur 3.9. Skattning av impedans och skrovlighet med FARIM för mätningar med TOPAS, 10 kHz Ricker-puls. Kanten av det begrävda traktordäcket passeras vid tiden 110 s. Det är ping 1000-2000 från fil ric10k.001 som analyserats, jfr figur 2.1.



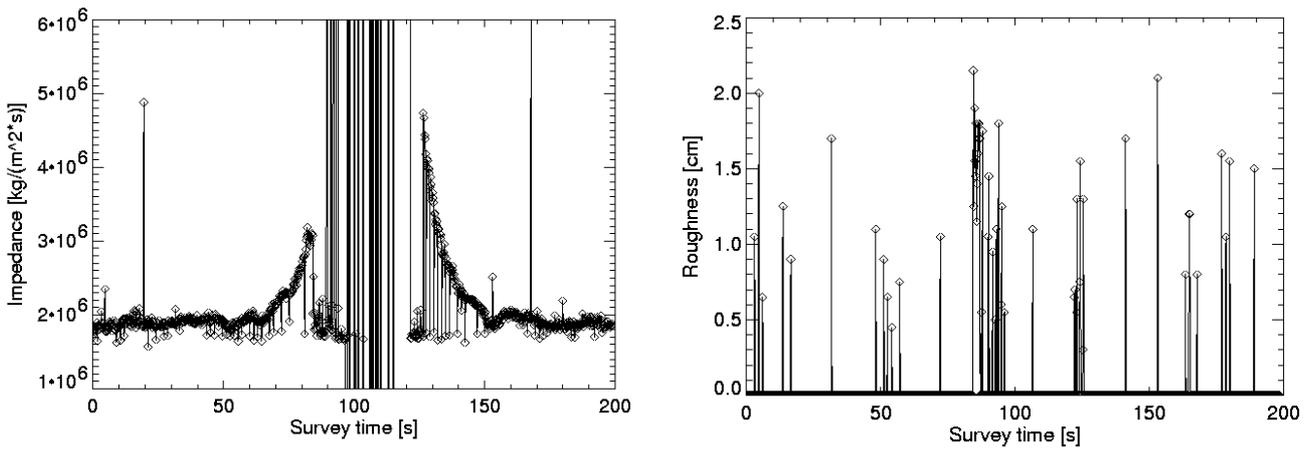
Figur 3.10. Som figur 3.9 men med successiva medelvärden över tre på varandra följande ping.



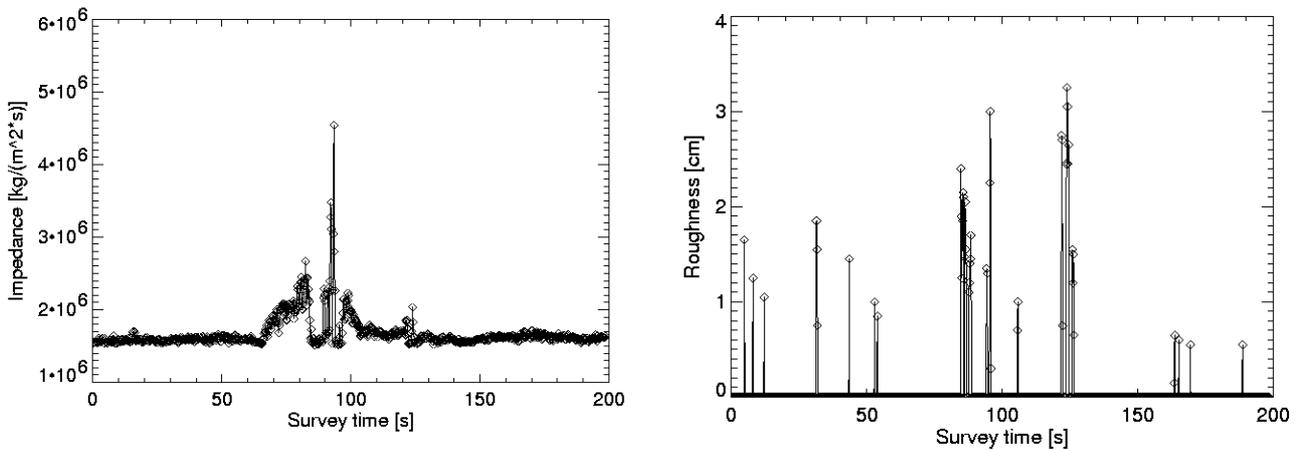
Figur 3.11. Skattning av impedans och skrovlighet med FARIM för mätningar med TOPAS, 10 kHz Ricker-puls. Centrum av det begrävda traktordäcket passeras vid tiden 80 s. Det är ping 2250-3250 från fil ric10k.001 som analyserats, jfr figur 2.1.



Figur 3.12. Som figur 3.11 men med successiva medelvärden över tre på varandra följande ping.



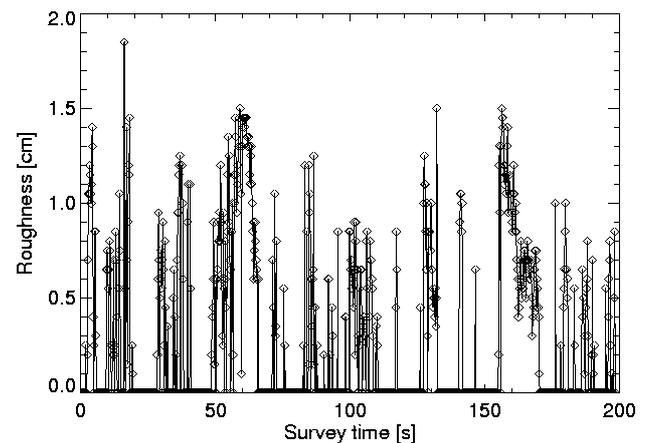
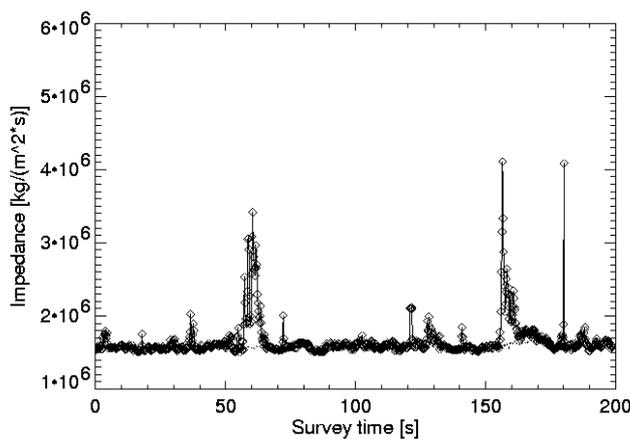
Figur 3.13. Skattning av impedans och skrovlighet med FARIM för mätningar med TOPAS, 10 kHz. Kanten av det begravnade traktor-däcket passeras vid tiden ung. 100 s. Det är ping 1000-2000 från fil ric10k.004 som analyserats, jfr figur 2.1.



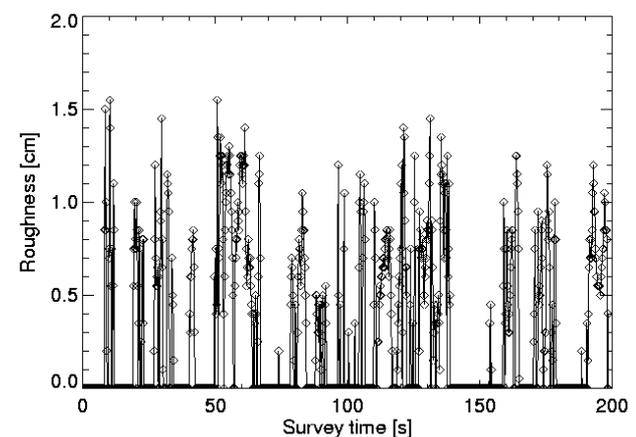
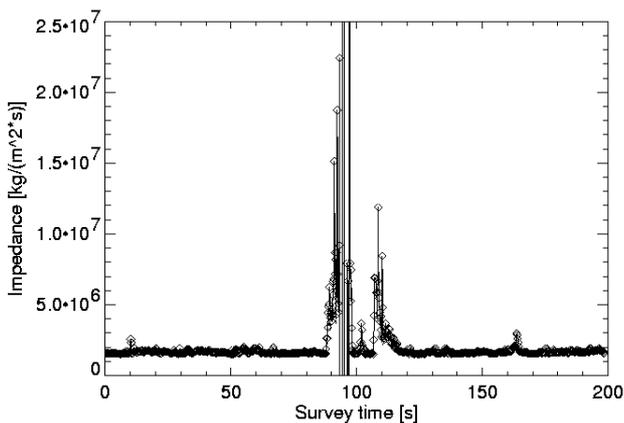
Figur 3.14. Som figur 3.13 men med successiva medelvärden över tre på varandra följande ping.

Resultat för centerfrekvensen 20 kHz redovisas i figurerna 3.15, 3.16 och 3.17. Figur 3.15 visar medelvärden för tre ping, för ping 1000-2000 i fil ric20k.001. Här finns faktiskt ingen passage över traktordäcket. Ändå kan några anomalier noteras i impedans-skattningen. Förmodligen är det smärre föremål på botten som givit upphov till dessa. Om vi däremot betraktar figurerna 3.16 och 3.17, avseende medelvärden för fem ping för ping 1-1000 resp. 1200-2000 från fil ric20k.005, så kan

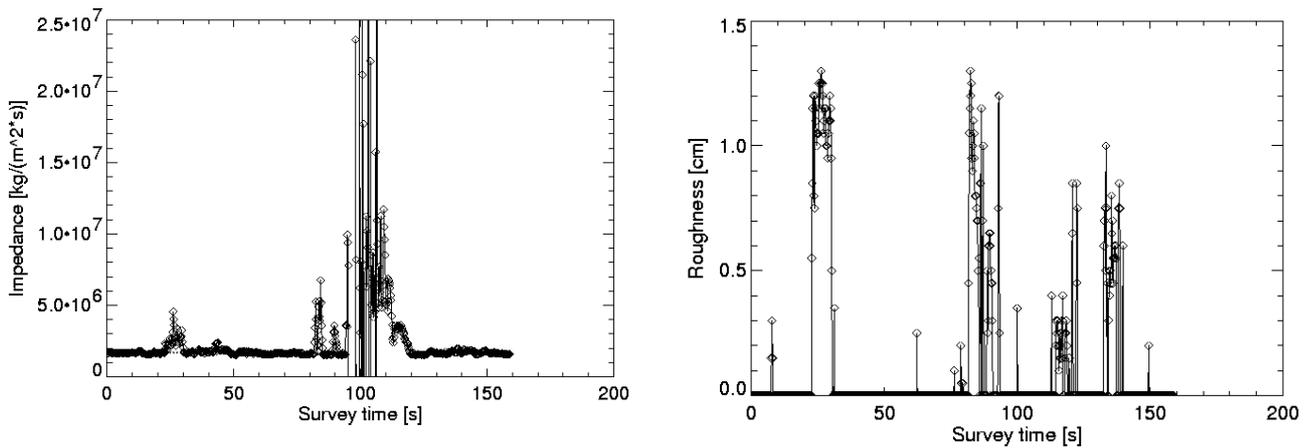
vi observera avsevärt kraftigare impedans-anomalier! Här har centrum av traktordäcket passerats, kring tiderna 100 s i båda fallen. Jämfört med de tidigare resultaten för centerfrekvensen 10 kHz är anomalin kraftigt förstärkt. Av de tre testade centerfrekvenserna för Ricker-pulsen, 5 kHz, 10 kHz och 20 kHz, tycks alltså den högsta frekvensen ge den bästa detektionsförmågan, se även Appendix 1.



Figur 3.15. Skattning av impedans och skrovlighet med FARIM för mätningar med TOPAS, 20 kHz. Successiva medelvärden har bildats över tre på varandra följande ping. Det är ping 1000-2000 från fil ric20k.001 som analyserats, jfr figur 2.1.



Figur 3.16. Skattning av impedans och skrovlighet med FARIM för mätningar med TOPAS, 20 kHz. Successiva medelvärden har bildats över fem på varandra följande ping. Det begravnade traktordäcket passeras vid tiden 100 s. Det är ping 1-1000 från fil ric20k.005 som analyserats, jfr figur 2.1.



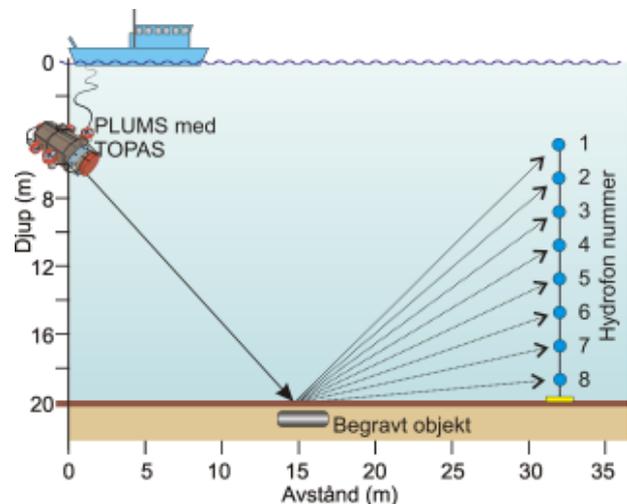
Figur 3.17. Skattning av impedans och skrovlighet med FARIM för mätningar med TOPAS, 20 kHz. Successiva medelvärden har bildats över fem på varandra följande ping. Det begravda traktordäcket passerar vid tiden 100 s. Det är ping 1200-2000 från fil ric20k.005 som analyserats, jfr figur 2.1.

3.3 Modellanlys av bistatistiska mätdata

Hitintills har vi uteslutande tittat på analys av data där sändare och mottagare sitter samlokaliserade på en ROV, ett monostatiskt system, och samtidigt riktade vertikalt ned mot botten. I ett avgränsat undersökningsområde fungerar systemet bra för bottenkartering och detektering/lokalisering av föremål dolda i sedimenten. För en säkrare karaktärisering och klassificering av ett lokaliserat och begravt objekt kan det bli nödvändigt att undersöka föremålet från olika vinklar. En sådan vinkelberoende undersökning kan utföras med ett monostatiskt system genom att hela plattformen vinklas ned mot målet från varierande djup och olika positioner runt målet. Ett alternativt sätt att undersöka ett begravt objekt från olika vinklar är att nyttja bistatisk teknik, där sändare och mottagare är separerade. Till skillnad mot ett monostatiskt system, där endast den reflekterade bakåtspridningen mäts, finns i ett bistatiskt system dessutom möjlighet att mäta volymspridningen. Spridningen beror då av strykningsvinkeln från sändaren mot botten samt spridningsvinkeln mot mottagaren. Ett objekt i botten påverkar spridningsbilden på olika sätt beroende på föremålets form, storlek, material, orientering, etc.

I det här kapitlet visar vi på några resultat från analys av experimentella bistatistiska data för akustisk karaktärisering och klassificering av det begravda traktordäcket. Den parametriska sändaren var vid försöken monterad på vår ROV och den bistatiska mottagaren var en stationär vertikal antenn med åtta hydrofoner, jmf. figur 3.18. Försöket utfördes i Stockholms skärgård under maj 1999 och hade två syften. Det första var

att mäta bistatisk bottenstridning utan begravt objekt, tidigare beskrivet i [12, 13], det andra var fullfältsanalys av en botten med begravt objekt, [14, 15]. De resultat som visas här är exempel som till största delen är hämtade från [15].

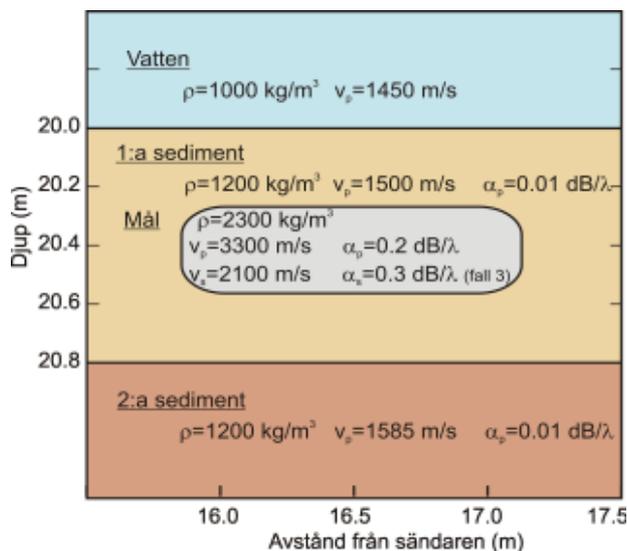


Figur 3.18. Försöksuppställning vid det bistatiska experimentet.

Jämförande modellering

En förutsättning för klassificering av ett begravt objekt är att vi först kan karaktärisera objektets egenskaper, t.ex. storleken, formen och objektets akustiska parametrar. Här görs karaktäriseringen genom modelleringar och inversion baserad på anpassning av det spridande objektets parametrar så att modellberäknade och experimentellt mätta ekon överensstämmer. Vår

datormodell är uppbyggd av tre skikt, vatten över två olika sedimentskikt, samt ett begrävt mål i form av en rotationssymmetrisk superellipsoid med samma mått som det verkliga begrävda målet. De akustiska parametrarna för datormodellen framgår av figur 3.19. För att visa känsligheten för variationer av de akustiska parametrarna i objektet har vi här räknat på tre olika fall. 1; Fluid, objektet betraktas som en homogen och akustiskt genomträngbar kropp som saknar skjuvegenskaper. 2; Stel kropp, akustisk totalreflektion mot ytan. 3; Fast kropp, akustiskt genomträngbar med skjuvegenskaper.

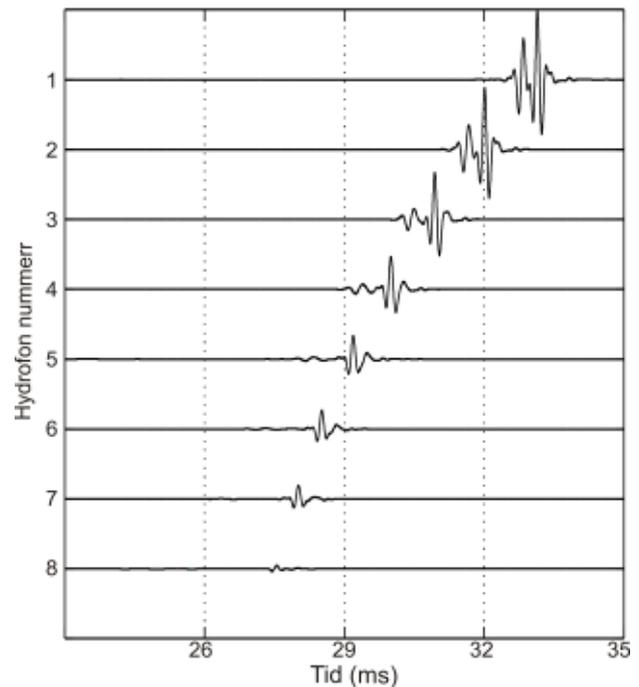


Figur 3.19. Akustiska parametrar för modellen.

Figur 3.20 visar teoretiskt beräknade kurvformer för de åtta hydrofonerna i den vertikala antennen, där nummer 1 är närmast vattenytan och nummer 8 ca en meter ovanför botten, jmf. geometrin med försökupställningen i figur 3.18.

Amplituden vid den översta mottagaren, nummer 1, är i det här fallet störst eftersom strykningsvinkeln mot botten och den reflekterade spridningsvinkeln blir lika stora, 43° , vid just det översta hydrofondjupet. Ju närmare botten en mottagare sitter, desto flackare blir spridningsvinkeln vilket också innebär att den reflekterade energin från bottenytan minskar när sändarens strykningsvinkel är oförändrad. Det begrävda objektet ger däremot akustisk spridning i flera andra vinklar och den reflekterade energin från målet sprids därför på flera mottagare

I figur 3.21 jämförs kurvformer för mottagare 1 i en uppförstorad skala, beräknade kurvformer för de tre olika karakteriserade objekten, heldragen svart, är här överlagrade den experimentellt mätta signalen, rödprickad. I samtliga tre fall är formen på objektet samt



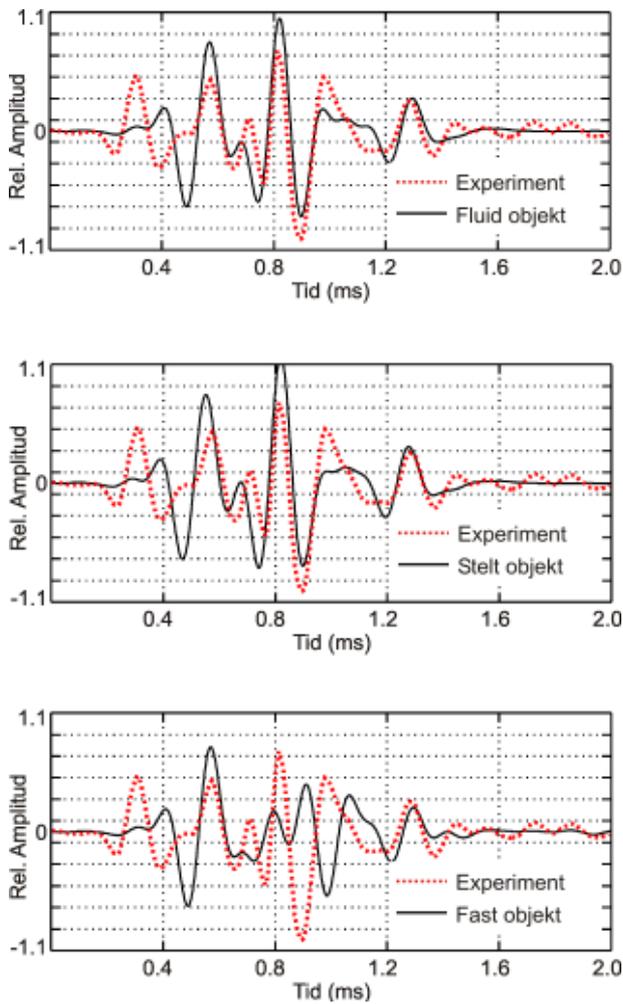
Figur 3.20. Beräknade kurvformer för de åtta mottagarna i antennen.

miljöparametrarna för vattnet och sedimenten desamma, se figur 3.19. Vid ca 0,5 ms framträder en tydlig topp i de experimentella data som helt saknas i modellresultaten. Troligen är denna reflex orsakad av någon del av det referenshydrofonsystem, bl.a. en luftfylld förstärkningsbox och en del kabel, som var placerat på botten över det begrävda målet vid mätfällan. I modellen finns inga motsvarande detaljer inlagda på bottenytan.

Bästa överensstämmelsen mellan den teoretiskt beräknade och den uppmätta kurvformen ses överst i figur 3.21. Objektet betraktas här som en homogen och akustiskt genomträngbar kropp som saknar skjuvegenskaper, dvs. en tung vätskeform. Överensstämmelsen är nästan lika bra i mellersta diagrammet i figur 3.21, där objektet har givits egenskapen av en helt stel kropp. Den sämsta anpassningen ser vi längst ner i figur 3.21 där objektet är en akustiskt genomträngbar fast kropp med skjuvegenskaper.

Energispridning

Figur 3.22 visar hur den reflekterade energin fördelas över de åtta mottagarna i den vertikala hydrofonantennen, den experimentellt uppmätta fördelningen jämförs med resultatet av modellberäkningar, med eller utan ett begrävt objekt. I figurerna framgår tydligt att om ett begrävt objekt saknas så minskar energiinnehål-

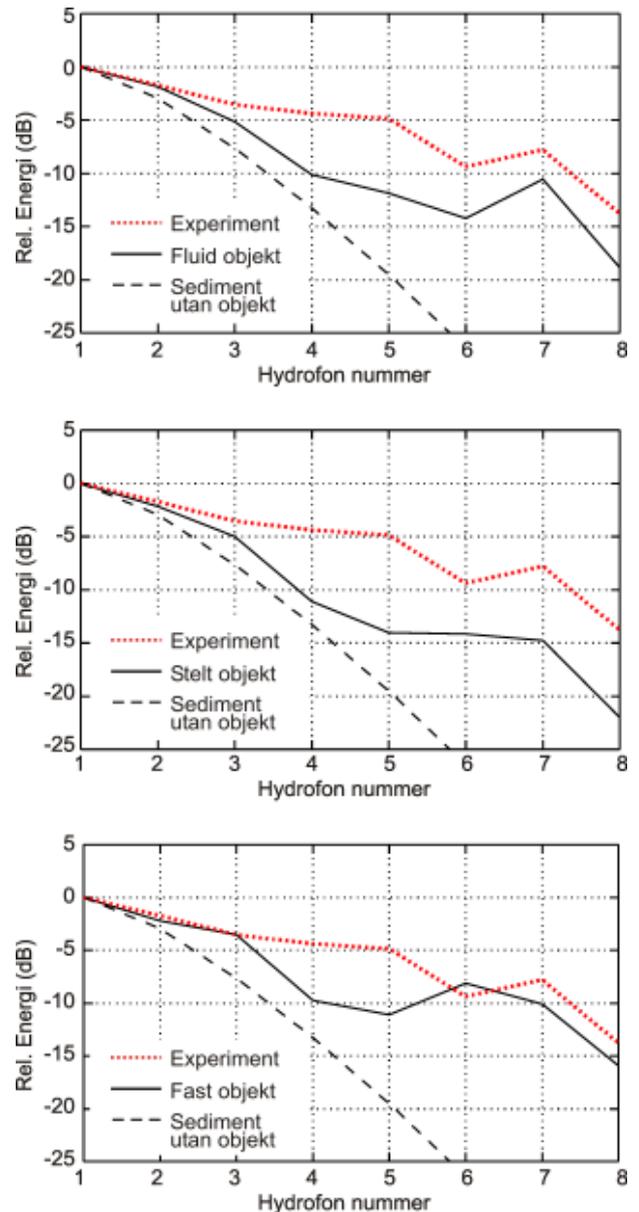


Figur 3.21. Jämförelse mellan tre beräknade kurvformer och den experimentellt uppmätta, samtliga för den översta mottagaren, nummer 1. Det som skiljer de tre teoretiska modellerna är objektets akustiska egenskaper. 1; Fluid, objektet betraktas som en homogen och akustiskt genomträngbar kropp som saknar skjuvegenskaper. 2; Stel kropp, akustisk totalreflektion mot ytan. 3; Fast kropp, akustiskt genomträngbar med skjuvegenskaper.

let för mottagare närmare botten betydligt snabbare än i de fall där ett objekt är inlagt i modellen. Resultatet från en modell utan ett begravnat objekt är också det fall som stämmer sämst med det experimentella resultatet. När man jämför resultaten från de tre modellberäkningarna med olika begravnade objekt inlagda ser man att den vertikala fördelningen av energin skiljer markant beroende på objektets egenskaper. I jämförelsen med det experimentella resultatet är det svårare att säga vilket av de tre fallen som har störst likhet. Man måste här komma ihåg att den uppmätta energifördelningen till viss del är påverkad av den utrustning

som fanns på botten vid mättilfället, detaljer som vi inte kunnat lägga in i modellen.

Analysen har visat att både de bistatiskt uppmätta signalformerna och den vertikala spridningen av energin är mycket känsliga för ett begravnat objekts egenskaper, och att objektkaraktärisering genom modellbaserad inversion är möjlig.



Figur 3.22. Energifördelningen mellan de åtta mottagarna i antennen. Den experimentellt uppmätta jämförs här med tre olika teoretiskt beräknade spridningsfall. Det som skiljer de tre modellerna är objektets akustiska egenskaper. 1; Fluid, objektet betraktas som en homogen och akustiskt genomträngbar kropp som saknar skjuvegenskaper. 2; Stel kropp, akustisk totalreflektion mot ytan. 3; Fast kropp, akustiskt genomträngbar med skjuvegenskaper.

4. Slutsatser

Vi har provat en ROV-monterad bottenpenetrerande sonar för detektering av ett begravt objekt och olika tekniker för att förbättra upptäcktsförmågan.

För att sammanfatta bildbehandlingsavsnittet kan vi konstatera att horisontell medianfiltrering givit de bästa resultaten. Möjligen kan resultaten förbättras ytterligare något med en påföljande tvådimensionell boxfiltrering.

Det test vi gjort med metoder för waveletavbrusning gav lovande resultat. Ytterligare studier av wavelet-tekniker (exempelvis bildkompression) kan därmed förväntas ge bra utdelning.

Vi kan även konstatera att vi fått de mest störningsfria reflektionsbilderna vid de högre sändfrekvenserna, 10 och 20 kHz. Här syns reflexer från den omgivande botten endast svagt jämfört med dem från målet.

FARIM är en metod för bottenkaraktärisering med en parametrisk sonar. Med dess hjälp kan man uppskatta skrovligheten (i cm, för ytskiktets småskaliga variation) och impedansen (produkten av densitet och ljudhastighet) för botten. Våra experiment har visat att ett begravt objekt kan ge upphov till en anomali i t.ex. den skattning av bottenens impedans, som erhålls med FARIM. På detta sätt blir tekniken faktiskt av intresse även som en detektor av begravda objekt. Av de tre testade centerfrekvenserna för Ricker-pulsen, 5 kHz, 10 kHz och 20 kHz, tycks den högsta frekvensen ge den bästa detektionsförmågan.

Från analyserna av de bistatiska mätningarna kan vi dra två viktiga slutsatser. För det första är det möjligt att karaktärisera ett begravt objekt genom modellsimuleringar och inversion. Vi har också visat att den uppmätta rumsliga energifördelningen är en viktig indikator på ett objekts form, storlek och orientering.

4.1 Fortsatt arbete

Vi har sett att man - förutom de korta och därmed högupplösande Rickerpulser som användes under experimenten - kan använda andra signalformer med andra egenskaper. Framför allt är det Rickersignalens låga energiinnehåll som kan bli ett problem då man har dåligt

signal-till-brus-förhållande. Med signaler med stor tidbandbreddprodukt, exempelvis LFM och BPSK, kan vi få ut mer energi i vattnet och samtidigt behålla hög upplösningförmåga. Vi rekommenderar därför att flera typer av signalformer testas vid kommande mätningar.

Vi har vid de aktuella försöken haft väl upplösta mål i horisontell led. Vi har alltså haft många ping på målet. För att täcka stora ytor blir man dock tvungen att minska antalet ping i horisontell led och får då kanske bara några enstaka ping på målet. Det här kommer att ställa nya och hårdare krav på detektions- och bildbehandlingsalgoritmerna (även eventuella klassificeringsalgoritmer), vilket måste beaktas i det fortsatta arbetet.

Fler experiment med FARIM som detektor av begravda objekt vore av intresse. T.ex. bör man undersöka om den omrörning av sedimentet som sker vid nedgrävningen i sig kan ge upphov till en anomali i skattningen av impedansen. Vidare kan man tänka sig försök med olika typer av objekt på olika nedgrävningsdjup.

Kommande tre år kommer en stor del av det fortsatta arbetet med akustisk detektering av begravda objekt att bedrivas som en del i ett nytt EU-finansierat projekt för kartläggning av riskavfall på havsbotten, SITAR (Seafloor Imaging and Toxicity Assessment of Risks caused by buried waste).

Metoder för detektion av små begravda objekt är i dag så tillförlitliga att de kan implementeras i en demonstrator för ett högupplösande sensorsystem, på ROV eller UUV (obemannad farkost).

5. Referenser

1. HELCOM CHEMU – Ad Hoc Working Group on Dumped Chemical Munition, 1994, Report on chemical munitions dumped in the Baltic Sea, report on the 16th meeting of the Helsinki commission.
2. Ivansson S., Karasalo I., Morén P., Pihl J., Söderberg P., ”Acoustical Methods for Detection of Buried Objects”, FOA report FOA-R—00-01616-409—SE, Sept. 2000.
3. J. Pihl, P. Ulriksen, N. Jacobsen, P. Morén, M. Jönsson, Sonarteknik för detektion av begravningsobjekt, FOI-R--0323--SE, December 2001.
4. Jourdain G., Henrioux J.P., ”Use of large bandwidth-duration binary phase shift keying signals in target delay Doppler measurements”, J. Acoust. Soc. Am. **90** (1), July 1991.
5. Mauuary D., Faure B., Essebar A., ”Vertical Synthetic Aperture Sonar for Ocean Acoustic Tomography”, J. Oceanic Eng, vol. 23, no. 1, Jan 1998.
6. Boulinguez D., Quinquis A., Brussieux M., ”Classification of Buried Objects using a Parametric Sonar”, Proceedings of Oceans 98, 1998.
7. Trucco A., Di Serio S., Murino V., ”Buried Object Detection by Auto-Regressive Pre-Whitening”, Proceedings of Oceans99, 1999.
8. Romberg J.K., Choi H., Computer code for wavelet denoising, <http://www-dsp.rice.edu/software/WHMT/>.
9. Romberg J. K., Choi H. and Baraniuk R. G., ”Shift-Invariant Denoising using Wavelet-Domain Hidden Markov Trees”, Proc. 33rd Asilomar Conference, Pacific Grove, CA, October 1999.
10. J. Hovem, et al., MAST III – ISACS Final Report 1997-1999, NTNU, 2000.
11. B. Berntsen, I. Karasalo, M. Levonen, P. Moren och V. Westerlin, Seabed characterization in the Baltic with the SIROB and FARIM methods, FOA-R-99-01237-409—SE, 1999.
12. M. Levonen, S. Ivansson, P. Morén and P. Söderberg, Bottom scattering in shallow water measurements with a parametric source, FOA-R-99-01359-409-SE, December 1999.
13. E. Dalberg, M. Levonen, B. Nilsson, M. Olsson, J. Pihl and P. Söderberg, Geoacoustic sediment properties in the Baltic, FOA-R-00-01466-409-SE, Mars 2000.
14. I. Karasalo, Model analysis of a bistatic scattering experiment, FOA-R-00-01723-409-SE, December 2000.
15. I. Karasalo and K. Otto, Acoustic scattering from submerged elastic objects., FOI-R—0307—SE, December 2000.

Appendix 1.

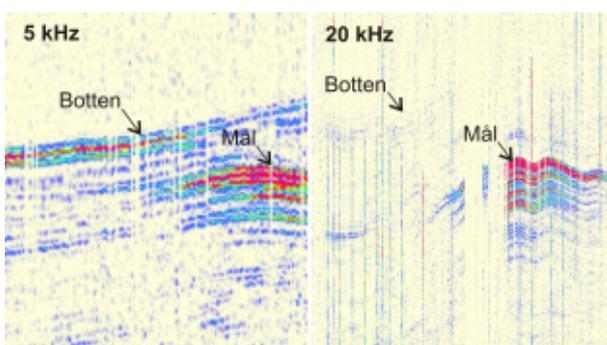
Undersökning av frekvensberoendet för reflexer från begravnade objekt

I detta appendix redovisar vi en undersökning av frekvensberoendet för reflexer mot begravnade objekt. Syftet är att utröna vilken frekvens som är den optimala för detektion av föremål under havsbotten. Vi har undersökt den relativa styrka för reflexer mot botten respektive det begravnade objektet, och vi ger en teoretisk förklaring till variationerna.

A1. Teoretisk analys

Reflektionskoefficienten för reflektion vid gränssytan mellan två homogena halvrum är frekvensberoende. Vid normalt infall, vinkelrätt mot gränssytan, ges den av kvoten mellan skillnaden och summan för halvrummens akustiska impedanser. Det är denna impedanskontrast som detekteras av vanliga ekolod. Dessa opererar oftast på frekvenser mellan 30 - 100 kHz. Bottenpenetrerande ekolod däremot arbetar vid frekvenser runt 5 kHz. Mot denna bakgrund förefaller det egendomligt att bottenreflexen vid 20 kHz är markant svagare än bottenreflexen vid 5 kHz i våra experimentella data, figur A1.

Emellertid är sedimentet alldeles under botten knappast homogent. Vi kan förvänta oss en gradvis övergång från vattenbemängd lera till mer egentligt sediment. Med ett dylikt gränsskikt mellan två homogena halvrum blir reflektionskoefficienten frekvensberoende, eftersom en längdskala (i djupled) har introducerats. För



Figur A.1 Exempel på detektion av ett begravnat objekt från test med FOIs parameteriska sonar monterad på PLUMS. 5kHz Ricker-puls (vänstra bilden) och 20 kHz Ricker-puls (högra bilden). Sektionerna är ca 3 m långa. Som synes fås goda ekon från det begravnade föremålet vid båda frekvenserna, men bottenytan detekteras inte lika bra vid 20 kHz. De vertikala ljus ränderna är störningar från positioneringssystemet. Jämför med figur 3.1.

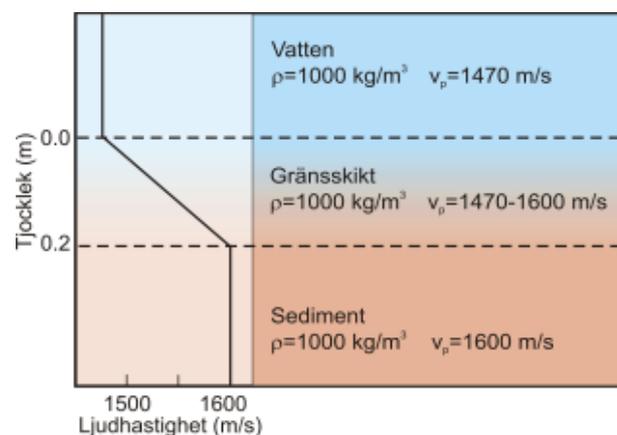
höga frekvenser, så att den relativa ändringen i ljudhastighet över en våglängd är liten, kan man förvänta sig att reflektionskoefficienten blir omvänt proportionell mot frekvensen. Detta följer av en analys utgående från WKBJ-approximationen, se Box 9.3 i (Aki, 1980) och (4.21) i (Abrahamsson och Kreiss, 1994).

Låt oss anta att gränsskiktet har en tjocklek (i djupled) av 0,2 m varöver ljudhastigheten kontinuerligt och linjärt ökar från 1470 m/s till 1600 m/s, se figur A.2. De två homogena halvrummen får då ljudhastigheterna 1470 m/s respektive 1600 m/s. För enkelhets skull antar vi att densiteten är konstant (1 kg/dm^3) i hela mediet. En numerisk beräkning ger vid handen att reflektionskoefficienten blir 0,0086 vid 5 kHz och 0,0017 vid 20 kHz. Detta stämmer tillfredsställande väl med det WKBJ-baserade resultatet ovan, som ju indikerar en reduktion med faktorn fyra då frekvensen ändras från 5 till 20 kHz.

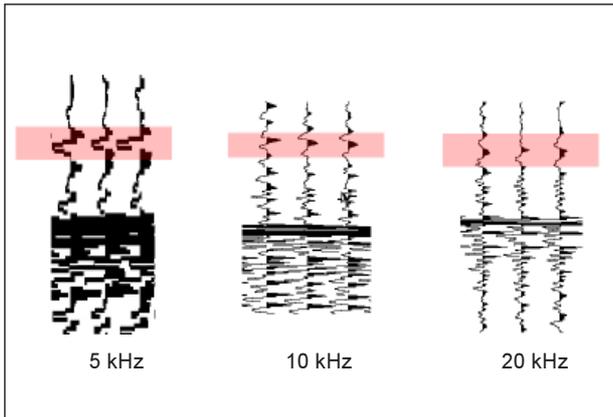
Ett gränsskikt av ovanstående typ kan alltså förklara att bottenreflexen i våra experimentella data blir så mycket sämre vid 20 kHz än vid 5 kHz.

A2. Experimentella resultat

Om vi jämför registreringar med 5, 10 respektive 20 kHz ser vi att bottenreflexerna är starkast vid 5 kHz, figur A.3. De uppmätta relativa amplituderna stämmer kvalitativt med den teoretiska analysen. Observera att skalan i figur A.3 är hälften av det övriga, dvs. amplituden för 5 kHz ska dubbleras vid en jämförelse.

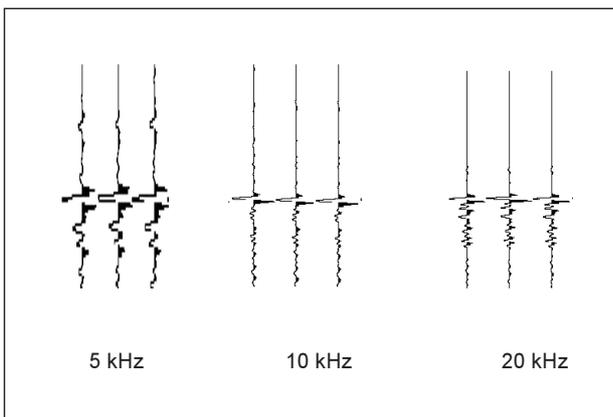


Figur A.2 Modell av vatten ovanpå ett 0,2 m tunt gränsskikt över ett sedimentärt halvrum.



Figur A.3 Jämförelse av signaler från 5, 10 och 20 kHz Rickerpuls. Skalan för 5 kHz är hälften av de övriga. Ekon från botten är markerat med rött. I signalerna med 5 kHz puls syns bottenekon tydligast, och sämst vid 20 kHz, i enlighet med teorin. I denna figur är ekon från det begravnade föremålet överstyrda.

Reflexerna från det begravnade föremålet är kraftiga för alla frekvenser, figur A.4, men är dock relativt bottenkot starkast för den högsta frekvensen.



Figur A.4 Jämförelse av signaler från 5, 10 och 20 kHz Rickerpuls, samma som figur A.3, men med en skala 10 gånger mindre, så att ekot från det begravnade föremålet ej blir överstyrt. I denna skala syns bottenkot bara vid 5 kHz.

A.3 Slutsatser

Vår slutsats av den teoretiska och experimentella analysen är att vi bör välja den högsta operationella frekvensen, 20 kHz, för vår parametriska sonar. Denna frekvens ger bäst kontrast för reflexer mot begravnade föremål, samtidigt som reflexer mot sjöbotten är svagast. Dessutom har sändaren sin högsta uteffekt vid den högsta frekvensen, vilket också bidrar till att öka signal/brusförhållandet.

A.4 Referenser

K. Aki och P Richards, Quantitative Seismology. Freeman, 1980.

L Abrahamsson och H.-O. Kreiss, Numerical solution of the coupled mode equations in duct acoustics. J Comput. Physics 111:1, pp. 1-14, 1994.