

BEDÖMNING AV INLÄCKANDE VATTEN- MÄNGD INFÖR TUNNELDRIVNING – SEISMOELEKTRIK ETAPP 2

Peter Ulriksen

Omslagsfigur:

Figuren visar det elektriska fält som uppmätts vid Liljeörnsgratan i Hässelby, på en plats ovanför den planerade sträckningen av Förbifart Stockholm. Bilden visar i det översta diagrammet drygt 30 s av det elektriska fältets variation och i det andra dess frekvensinnehåll. 50 Hz är helt dominerande, men eftersom amplituderna är logaritmerade framträder också svagare signaler. Nederst visas ett spektrogram. I detta är signalens spektrum ritat på den vertikala axeln medan den horisontella visar tid. Därför kan man särskilja stadigvarande frekvenskomponenter (horisontella linjer) och tillfälliga. De stadigvarande är $16 \frac{2}{3}$ Hz från järnvägens elnät samt det allmänna elnätets 50 Hz med övertoner vid 100 och 150 Hz. Dessa starka frekvenskomponenter vill man kunna undertrycka när man registrerar seismoelektriska signaler i mikrovoltområdet. Därigenom kan mätdynamiken utnyttjas bättre. I syfte att förstå bakgrundsfältets variationer har mätningarna i denna rapport genomförts i planerade försöksområden.

**BEDÖMNING AV INLÄCKANDE VATTENMÄNGD
INFÖR TUNNELDRIVNING
- SEISMOELEKTRIK ETAPP 2**

**Assessment of water leakage in advance of tunnelling
- Seismoelectrics Part 2**

Peter Ulriksen
Lunds Tekniska Högskola

FÖRORD

Metoder för att undersöka geologi och de byggtkniska förutsättningarna är viktiga för att forma en geologisk modell och planeringsunderlag i tidiga skeden av undermarksprojekt. Korrekta och relevanta data i tidiga skeden ger såväl beställare, projektörer som entreprenörer ökade möjligheter att utföra arbete på ett riktigt sätt.

Metoden som här studerats kallas seismoelektricitet och analyserar de seismiska vågor som senare omvandlas till elektromagnetiska vågor i en vattenförande zon. Metoden är inriktad på att detektera förekomst av rörligt vatten i berg, en viktig information inom dagens bergbyggande. Undersökningsmetoden är i en utvecklingsfas idag, men anses ha potential att med relativt små insatser ge en bild av vattenförande strukturer, t ex längs en tänkt tunnelsträckning.

Detta arbete utgör etapp 2, efter den förstudie, etapp 1, som avrapporterades 2011 i BeFo rapport 112. I föreliggande arbete undersöks störningar från andra strömkällor, så kallade bakgrundssignaler, med mätningar på två olika platser och hur dessa kan hanteras. Vidare konstruerades en simulator för vidare utveckling av den signalbehandling som krävs för att detektera och behandla de relativt svaga seismoelektriska signalerna i förhållande till bakgrundssignaler.

Projektet är ett seniorforskningsprojekt som utförts av Peter Ulriksen vid Lunds Tekniska Högskola under 2013. En referensgrupp har bistått projektet med råd och granskningssynpunkter och den var bemannad av Vladimir Cvetkovic/KTH, Åsa Fransson/Chalmers, Henrik Jonsson/Vattenfall, Kent Lundin/TeliaSonera, Robert Sturk/Skanska och Per Tengborg/BeFo. Projektet finansierades av BeFo och en etapp 3 planeras att inledas i början av 2014.

Stockholm i december 2013

Per Tengborg

SAMMANFATTNING

Detta är rapporten för Etapp 2 av det seismoelektriska projekt som drivs vid LTH med stöd av Befo. Etapp 1 utgjorde en litteraturstudie. Syftet med projektet är att undersöka om den seismoelektriska metoden kan användas för att i förväg bedöma risken för vatteninträning i samband med tunnelbyggnad. Kan en sådan bedömning göras förbättras förutsättningarna för projektering och i byggfasen minskar risken för oförutsedda driftstopp och säkerheten i arbetet ökar.

Den seismoelektriska metoden baseras på en tredelad händelsekedja: 1) En seismisk vågrörelse alstras på markytan och tränger ner i marken och eventuellt träffar den ett vattenförande lager eller en vattenfylld spricka. 2) När vågrörelsen sätter laddade vattenmolekyler i rörelse relativt det fasta materialet uppkommer en elektrisk ström - en seismoelektrisk omvandling, vilken momentant utbreder sig upp till markytan. 3) På markytan detekteras de elektriska signalerna med elektroder nedstuckna i marken. Man sänder alltså ut en mekanisk vågrörelse och mottar en elektrisk. Ankomsttiden anger den vattenförande zonens avstånd / djup och signalens styrka antas vara proportionell mot vattnets rörelsehastighet.

I syfte att utveckla signalbehandlingsmetoder för att detektera de seismoelektriska signalerna mot en bakgrund av störningar orsakade av huvudsakligen de elektriska nätens jordströmmar utförs utveckling av utrustning för mätning av bakgrundssignalerna. Med denna utrustning görs mätningar längs sträckningen av tunnarna genom Hallandsås samt Förbifart Stockholm, det senare baserat på Trafikverkets planeringsmaterial och geotekniska undersökningar. Dessa signaler skall användas för att blandas med artificiella signaler som efterliknar seismoelektriska omvandlingar. Därefter kan olika signalbearbetningsmetoder testas i syfte att undertrycka bakgrundsstörningarna och framhäva de seismoelektriska omvandlingarna.

Detta tas ett steg längre med hjälp av den simulator som också utvecklats i etappen tillsammans med en mångkanalig mätutrustning. Denna simulator sänks ned i ett lämpligt borrhål, där den alstrar signaler som skall efterlikna en seismoelektrisk omvandling. Man undviker alltså att sända ut seismisk energi och man behöver inte finna en zon som kan producera den seismoelektriska omvandlingen. Bakgrundsstörningarna har man överallt och därför kan man nu vidareutveckla signalprocesseringen så att framhävningen av de nere i borrhålet alstrade "seismoelektriska" signalerna förbättras ytterligare.

Seismoelektrikprojektet är uppdelat i flera etapper vilka omfattar litteraturstudier, bakgrundsmätningar, simuleringar, val av seismisk källa, konstruktion av lämplig detekteringsutrustning, fältförsök och demonstrationer.

SUMMARY

This is the report concerning the second part of the seismoelectric project that is performed at Lund University of Technology in Lund, Sweden, with the support of BeFo. The first part was a literature study. The purpose of the project is to investigate if the seismoelectric method can be used for advance assessment of water leakage to tunnel construction. If such assessment can be made the costs associated with unplanned stops in the work will be reduced and the safety at the working place will increase.

The seismoelectric method is based on a three part chain of events: 1) A seismic signal is created at the ground surface and penetrates into the ground where it eventually may hit a water bearing fractured zone. 2) When the charged water molecules in the fracture is mobilized by the seismic energy an electric current is generated. 3) On the ground surface it is possible to detect the electric signal using electrodes placed in the ground surface. A mechanical wave is thus transmitted and an electrical one is received. The arrival time indicates the distance / depth the water-bearing zone and the amplitude of the signal is supposed to be proportional to the velocity of the moving water.

Aiming at developing signal processing methods for the detection of weak seismoelectric signals mixed with a stronger electrical background created by the ground currents associated with the power lines a measurement apparatus for background measurements is assembled. With this, the background field is determined along multiple points along the routes of the tunnels through Hallandsås and the planned Förbifart (Bypass) Stockholm; the latter based on Trafikverkets (Swedish Transport Authority) planning documents and performed geotechnical surveys. These background signals will later be mixed with simulated seismoelectric signals. The mix will be used to evaluate different signal processing methods for enhancing the seismoelectric signals and attenuate the background.

This approach is moved a step further with the assistance of the borehole simulator that has also been developed in the project. The simulator is lowered into a borehole, where it generates signals supposed to mimic the seismoelectric signals. With this method we avoid to transmit any seismic energy and we don't need any water-bearing zone to have a real mixture of seismoelectric signal and omnipresent background noise. With this method the signal enhancement can be developed further.

The seismoelectric project consists of several parts that encompasses a literature study, background measurements, simulations, choice of seismic source(s), construction of signal detection equipment, field-tests and demonstrations.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

| | |
|--|-----------|
| 1. INLEDNING | 1 |
| 2. SEISMOELEKTRISKA SIGNALER | 3 |
| 2.1 Hur uppstår seismoelektriska signaler | 3 |
| 2.2 Frekvensområde | 4 |
| 2.3 Förväntad fältstyrka | 4 |
| 2.4 Geometriska aspekter | 4 |
| 2.5 Den seismiska källans egenskaper | 4 |
| 2.5.1 Slägga | 5 |
| 2.5.2 Shotgun / Buffalo gun / SISSY | 5 |
| 2.5.3 Explosion / Dynamit | 6 |
| 2.5.4 Vibroseis | 6 |
| 2.5.5 Swept Impact Source SIST / Mini-Sosie | 6 |
| 2.6 Mätningar från tunnlar i berg | 7 |
| 3. BAKGRUNDSMÄTNINGAR | 9 |
| 3.1 Syfte med att beskriva bakgrundens signalmiljö | 9 |
| 3.2 Tvåkanalsystem för elektrisk bakgrundsmätning | 9 |
| 3.3 Mångkanaligt system för mätning av flera bakgrundsfaktorer | 11 |
| 3.3.1 Elektriska fält i luften - antenn | 11 |
| 3.3.2 Elektriska fält i marken | 12 |
| 3.3.3 Differentiell mätning med två elektroder | 12 |
| 3.3.4 Magnetfält i luften - luftlindade ortogonala spolar | 13 |
| 3.3.5 Seismiska nivåer - geofon | 14 |
| 3.3.6 Oförutsedda händelser | 14 |
| 3.4 Fältmätning med RIAA-förstärkare och tre elektroder | 14 |
| 3.4.1 Hallandsås | 14 |
| 3.4.2 Förbifart Stockholm | 19 |
| 4 UNDERTRYCKNING AV BAKGRUND OCH BRUS | 23 |
| 4.1 Operationer före digitalisering | 23 |
| 4.1.1 Differentiell undertryckning | 23 |
| 4.1.2 Passbandsfiltrering | 23 |
| 4.1.3 Notch-filter | 24 |

| | |
|---|-----------|
| 4.1.4 Smalbandsdetektering | 24 |
| 4.2 Operationer efter digitalisering | 24 |
| 4.2.1 Medelvärdesbildning i tiden | 24 |
| 4.2.2 Medelvärdesbildning i rummet | 25 |
| 4.2.3 Multiplikativ signalförstärkning | 25 |
| 4.2.4 Korrelation och kodade vågformer | 25 |
| 4.2.5 Subtraktion av koherent bakgrund | 25 |
| 4.2.6 Subtraktion av koherent bakgrund utnyttjande enveloppedelkvot | 27 |
| | |
| 5 SIMULERING AV SEISMOELEKTRISKA SIGNALER | 29 |
| | |
| 5.1 Bredbandiga signaler | 29 |
| 5.1.1 Frekvenssväp | 29 |
| 5.1.2 Impulssekvens / SIST / Explosion | 29 |
| | |
| 5.2 Smalbandiga signaler | 30 |
| 5.3 Simulering av en vertikal seismisk dipol | 30 |
| 5.3.1 Simulatorns elektronikdel | 30 |
| 5.3.2 Simulatorelektronikens frekvensrespons | 30 |
| 5.3.3 Fältstyrka i vatten | 33 |
| 5.3.4 Fältförsök | 34 |
| | |
| 6 SLUTSATSER | 37 |
| | |
| REFERENSER | 38 |
| | |
| BIBLIOGRAFI | 38 |
| | |
| APPENDIX 1 | |
| Mätningar på markytan längs sträckningen av Hallandsåstunneln | 41 |
| | |
| APPENDIX 2 | |
| Mätningar på markytan längs sträckningen av Förbifart Stockholm | 59 |

1. INLEDNING

Detta är en rapport för Etapp 2 av det seismoelektriska projekt som drivs vid LTH med stöd av BeFo. Syftet med projektet är att undersöka om den seismoelektriska metoden kan användas för att i förväg bedöma risken för vatteninträning i samband med tunnelbyggnad. Det innebär att metoden förmodas användas innan något tunnelbyggnadsarbete påbörjats och således är det en utgångspunkt att mätningarna kommer att ske från markytan. Under arbetets gång har det framkommit från referensgruppen att det kan vara intressant att utföra denna typ av mätningar även från tunnlår, varför sådana experiment kan tänkas utföras i kommande etapper.

I Etapp 1 genomfördes en litteraturstudie (1) som ledde till slutsatsen att den seismoelektriska effekten kan vara intressant att studera mer ingående. I litteraturstudien finns omfattande referenser till seismoelektriska artiklar, vilka bifogas denna rapport som en bibliografi. Som första åtgärd rekommenderades att utföra mätningar av det elektriska bakgrundsfältet, vilket är ständigt närvarande på alla mätplatser. Detta fält konkurrerar med de seismoelektriskt omvandlade signalerna och det är därför av stort värde att känna till dess sammansättning för att man skall kunna utveckla effektiva signalbehandlingsmetoder. Bakgrundsmätningar har utförts längs sträckningarna av tunneln genom Hallandsås samt Förbifart Stockholm.

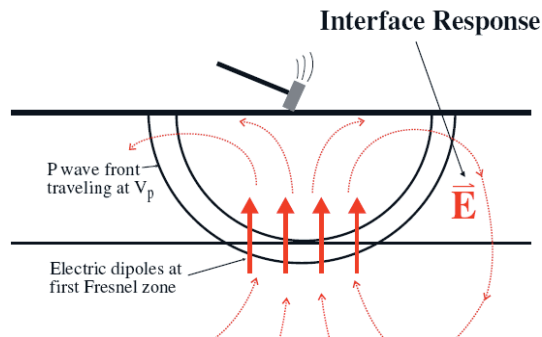
De seismoelektriska mätningarna baseras på en tredelad händelsekedja: *1 En seismisk vågrörelse alstras på markytan och tränger ner i marken och eventuellt träffar den ett vattenförande lager eller en vattenfylld spricka. 2 När vågrörelsen sätter laddade vattenmolekyler i rörelse uppkommer en elektrisk ström, vilken momentant utbreder sig upp till markytan. 3 På markytan detekteras de elektriska signalerna med elektroder nedstuckna i marken.*

I syfte att bättre kunna utveckla signalprocesseringsmetoder har vi utvecklat en seismoelektrisk simulator. Med denna kan man generera kopior av seismoelektriska signaler i ett borrhål och sedan kan dessa registreras på markytan i närvaro av verkliga bakgrundsfält. Metoden har den fördelen att man säkert vet att den seismoelektriska signalen är närvarande, något som inte är fallet om man mäter på en plats i naturen. Simulatorens gör att man kan hoppa över de inledande stegen (1+2) i den ovan beskrivna händelsekedjan. Med simulatorens behöver man alltså inte någon seismisk källa och det behöver inte finnas någon vattenförande zon som kan skapa den seismoelektriska omvandlingen. Dessutom undviker man att skapa det co-seismiska fältet, som uppstår när den horisontella komponenten av den seismiska energin passerar elektroderna på markytan.

2. SEISMOELEKTRISKA SIGNALER

2.1 Hur uppstår seismoelektriska signaler

Seismoelektriska signaler uppstår då en mekanisk vågrörelse skapar en relativ rörelse mellan fast material i marken och en polär vätska i dess sprick- eller porsystem. En detekterad seismoelektrisk signal innebär alltså besked om att det finns vatten och att det är rörligt. Det är laddningsuppdelningen mellan fast material och vätska som gör att det skapas en elektrisk ström när vätskan rör sig relativt det fasta materialet. Vanligtvis är den seismiska källan placerad på markytan där man också mäter de alstrade elektriska strömmarna. Eftersom det tar en viss tid för den mekaniska vågrörelsen att gå från källan till den vattenförande zonen får man ett mått på hur avlägsen denna är. Den elektriska signalen utbreder sig i sammanhanget momentant från den vattenförande zonen till markytan. Därför kan man räkna fram zonens djup som produkten av den seismiska gånghastigheten i marken multiplicerat med tiden som förlöper mellan det att energin sänds ut från källan och att den elektriska signalen anländer till sensorerna på markytan. Dessa utgörs vanligen av elektroder nedstuckna i marken och man mäter potentialskillnaden mellan dem. Förloppet illustreras av Figur 1. Den första Fresnel zonen definieras av en cirkel på reflektorn som har en sådan diameter att avståndet mellan källan och cirkelns mittpunkt skiljer sig från avståndet från källan till en punkt på cirkelns periferi med en kvarts våglängd. Resultatet blir att reflexen från cirkelns periferi kommer att ligga fasförskjutet en halv våglängd jämfört med signalen som kommer från cirkelns mittpunkt när den når markytan. Dessa två signaler tar därför ut varandra genom destruktiv interferens. Innanför denna cirkel kommer en positiv signal att registreras. Resonemanget är bara giltigt för smalbandiga signaler. Bredbandiga signaler innehåller många frekvenser och därför uppstår inte någon fullt utvecklad destruktiv interferens. En närmare beskrivning finns i litteraturstudien (1).



Figur 1. Schematisk framställning av hur seismoelektriska signaler alstras. Det tunna horisontella strecket är en vattenförande spricka.

Simplified illustration of how the seismoelectric signal is created. The thin horizontal line is a waterbearing fracture.

2.2 Frekvensområde

De seismoelektriska signalernas frekvensområde motsvarar den utsända mekaniska vågrörelsens frekvensområde. Det innebär att om man sänder ut en signal som innehåller frekvenskomponenter i området 5 – 500 Hz, som är typiskt för seismiska signaler, så kommer också den mottagna elektriska signalen att omfatta dessa frekvenser. Frekvensinnehållet i den utsända mekaniska vågrörelsen är beroende av vilken källa man använder. Generellt kan man säga att ju lägre frekvenser man vill åstadkomma desto större (tyngre) apparater måste man använda. Ju djupare den seismoelektriska omvandlingen sker desto mer förlorar man av högfrequensdelen på grund av att denna del dämpas mest på nedfärden. Det innebär att ju djupare en vattenförande zon är belägen desto lägre blir frekvensinnehållet i den signal som påverkar vätskan. Den elektriska signal som går upp till markytan dämpas däremot mycket lite beroende på dess låga frekvensinnehåll. Detta till skillnad mot t ex radarmätningar som sker i ett mycket högre frekvensområde (GHz) där dämpningen ökar mycket starkt med ökande frekvens. Man vill gärna ha ett brett frekvensområde i den utsända pulsen därför att det ger god upplösning, d.v.s. man får bättre detaljåtergivning. Således får man räkna med att upplösningen försämras ju större djupet till omvandlingszonen är.

2.3 Förväntad fältstyrka / signalnivå

De seismoelektriska signalernas fältstyrka har en nivå i storleksordningen mikrovolt/m och den bakgrundsstörning som alstras av elnätet är oftast i storleksordningen hundra mikrovolt/m. Det är alltså en stor fördel om man kan undertrycka bakgrundsfälten innan man digitaliserar signalerna. Man kan då öka förstärkningen och få bättre kvantifiering av de intressanta delarna av signalen.

2.4 Geometriska aspekter

Eftersom signalen uppstår då vätska rör sig relativt fast material i en vattenförande zon får man tänka sig olika mekanismer om zonen är horisontell eller vertikal och om zonen utgörs av en spricka eller ett krossat material. För närvarande pågår vid andra universitet utvecklingsarbete avseende matematiska modeller som kan beskriva omvandlingen i tre dimensioner, men de färdigutvecklade modellerna klarar endast två dimensioner. Det går inte att säga något om zonen orientering utifrån en uppmätt signal. Om man däremot har mätningar i flera punkter bör det gå att bestämma t ex ett vattenförande sprickplans orientering relativt ett horisontalplan.

Om man har en porös zon med vatteninnehåll, som är parallell med markytan, anger teorin att man får ett elektriskt fält med symmetri runt skottpunkten. Det innebär att det elektriska fältet har samma styrka på en cirkel kring skottpunkten. Om den porösa zonen lutar relativt markytan kommer emellertid det elektriska fältet inte längre vara symmetriskt kring skottpunkten utan det förskjuts åt det håll zonen lutar (1).

2.5 Den seismiska källans egenskaper

Allmänt kan sägas att ju större frekvensområde källan kan excitera (= bandbredden B_w), desto bättre blir upplösningen u (Ekv. 1), d.v.s förmågan att särskilja näraliggande objekt från varandra. Källorna kan grovt delas upp i de impulsiva och de vibrerande. Den seismoelektriskt omvandlade signalen kan betraktas som en kopia (replika) av den från källan utsända signalen. Vet man hur den utsända signalen ser ut vet man således vad det är man letar efter i den mottagna signalen som även innehåller bakgrundsfälten. Nedan diskuteras några olika seismiska källor.

$$u = \frac{v}{Bw} \quad (\text{Ekv 1})$$

där

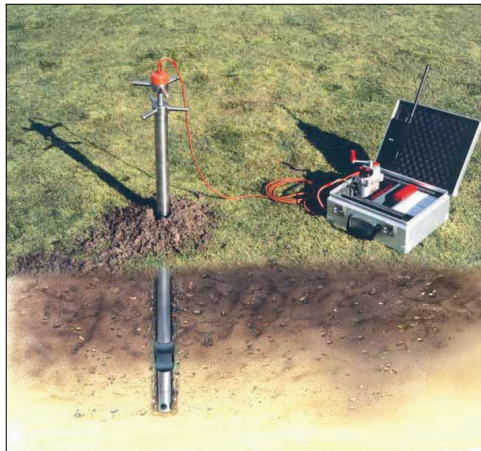
$v = \text{vågutbredningshastigheten i materialet}$

2.5.1 Slägga

Detta är den enklaste seismiska källan och signalen alstras vanligen genom att man slår ned släggan på en metallplatta som ligger på marken. Därigenom uppnår man två saker. Dels får man ett bredare frekvensspektrum än om man slår direkt på markytan, dels kommer signalen från olika slag att bli mer lika varandra än om man slår direkt mot markytan, vilken då kommer att komprimeras. Eftersom slag med slägga innehåller relativt lite energi vill man gärna summera resultatet av flera olika slag och det sker bäst om signalerna är lika varandra. Man har en mekanism i släggan som på elektrisk väg talar om i exakt vilket ögonblick släggan träffar plattan. Därigenom uppnår man att alla signaler har samma position i de digitaliserade signalerna och att nyttiga signaler adderas medan tillfälliga störningar och eventuellt brus undertrycks. Signalen är av impulsiv karaktär och således momentant bredbandig.

2.5.2 Shotgun / Buffalogun / Seismic Impulse System - Sissy

Detta är ett förenklat hagelgevär som använder hagelpatroner utan blyhagel, d.v.s lösa skott. I sin enklaste form är det ett järnrör som är delbart en bit från nedre änden. När röret delas kan man stoppa in en hagelpatron i ett patronläge. En mekanism bakom patronläget innehåller ett slagstift. Därefter skruvas röret ihop och sticks ner i ett förborrat hål i marken. Genom att släppa ner en metallstång genom rörets övre ände anslås hagelpatronens tändhatt så att skottet går av. Det finns utveckling av detta system med elektrisk tändning och en gummipackning som kan expanderas mot jorden så att allt gastryck går åt för att skapa en vågrörelse i marken (Sissy), se Figur 2. Signalen är av impulsiv karaktär och således momentant bredbandig.



Figur 2. Shotgun av typ Sissy med fjärrutlösning
Sissy shotgun with remote firing

2.5.3 Explosion / Dynamit

Dynamit är den ur signalsynpunkt bästa källan vid seismiska undersökningar, men är inte alltid möjligt att använda, t ex av miljö eller säkerhetsskäl. Signalen är av impulsiv karaktär och således momentant bredbandig.

2.5.4 Vibroseis

Vibroseis är ett varumärke men får här representera alla de seismiska källor som åstadkommer stor bandbredd och därmed god upplösning genom att svepa över ett brett frekvensområde. En elektrisk styrsignal påverkar i typfallet en hydraulisk ventil, vilken styr ett oljeflöde på sådant sätt att den till marken överförda vibrationen motsvarar styrsignalen. Denna typ av källa finns som små aggregat man kan montera på en släpvagn till en personbil och upp till mångaxliga terrängtruckar och bandfordon. Vanligtvis överförs vibrationerna via en platta som sänks ner under fordonet och lyfter upp detta för att skapa en motvikt, Figur 3. Signalen är momentant smalbandig men sveper kontinuerligt över ett brett frekvensområde och kan på så sätt föra ut mer energi vid varje frekvens än vad en signal av impulsiv karaktär kan göra.



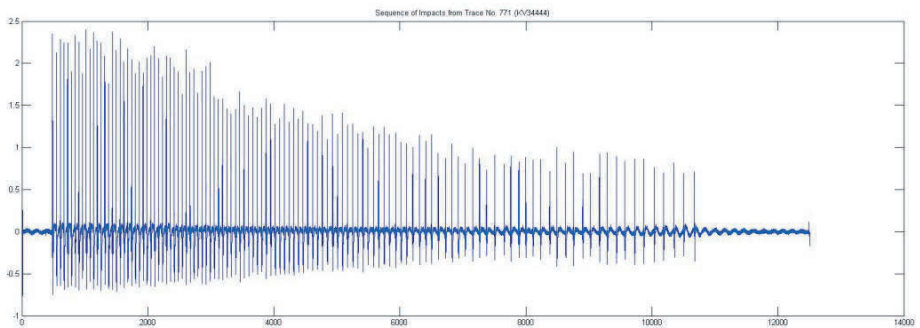
Figur 3. Vibroseis-truck. (2) *Vibroseis truck*

2.5.5 Swept Impact Source SIST / Mini-Sosie

Dessa källor sänder ut impulser enligt ett kodat schema. Genom att låta registreringsutrustningen registrera alla utsända impulser och resulterande signaler kan man bygga upp en signal på ett sätt som motsvarar stacking. Två exempel på dessa maskiner är sådan hydraulisk utrustning som används för att bilda betong, ofta monterad på en traktor av något slag, Figur 4, samt de mindre systemen som baserar sig på stampande aggregat för packning av jordar. Signalen är av impulsiv karaktär och således momentant bredbandig, men det kodade schemat gör att man via korrelation kan erhålla bättre upplösning än med en enstaka impuls. Det kodade schemat kan t ex innebära att man låter hammaren slå med en stegrad frekvens under en period. På så sätt påminner tillvägagångssättet en del om vibroseismetoden. I Figur 5 återges en SIST-sekvens som funktion av tiden. En sådan sekvens har en mycket snäv autokorrelationsfunktion, vilket innebär att den ger god upplösning.



Figur 4. Styrbar bilningshammare använd vid SIST-mätningar
Hydraulic hammer used in SIST-measurements



Figur 5. Återgivning av en SIST sekvens med ökande intervall mellan pulserna (3).
A sequence of SIST impulses with increasing inter-pulse delay

2.6 Mätningar från tunnlar i berg

Av det som sagts under 2.1 följer att man bör använda sig av annan utrustning för alstring av mekaniska vågor om man vill utföra mätningar i berg. Eftersom man inte har lika stark dämpning av vågorna i berg som i jord kan sannolikt användas sig av högre frekvenser och därigenom få bättre upplösning. Kanske man rentav kan gå upp i ultraljudområdet och därigenom kunna rikta ljudstrålar i valbar riktning från en punkt. Bergets ojämna yta förutsätter någon form av ytbehandling innan sändning kan utföras. För mottagning av de elektriska signalerna kan man antagligen använda sig av expanderbultar inborrade i berget. Sprängmedel kan knappast användas i befintliga tunnlar. Men när tunnelkonstruktion bedrivs i närheten (med borra - spräng - metoden), kan man överväga att använda de då alstrade stötvågorna för seismoelektriska mätningar. En komplikation är att man i normalfallet räknar med reflektion vid seismoelektriska mätningar och att man då måste vara ganska nära källan. I sådana fall får nog en alternativ metodik utvecklas, men det kan inte ske inom detta projekts ramar.

3. BAKGRUNDSMÄTNINGAR

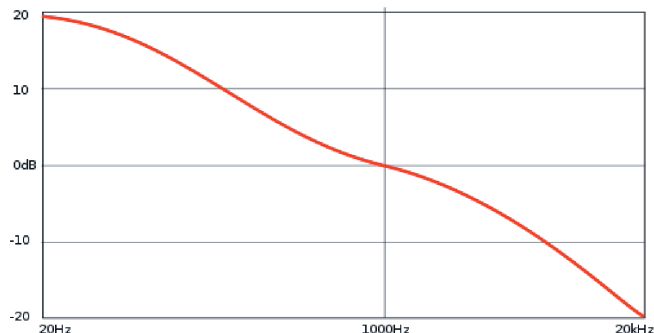
3.1 Syfte med att beskriva bakgrundens signalmiljö

De seismoelektriska signalernas fältstyrka har, som nämnts, en nivå på några mikrovolt/m och den bakgrundsstörning som alstras av elnätet är oftast några hundra mikrovolt/m. Därför måste man dämpa bakgrundsstörningen innan man digitaliserar signalerna om man skall kunna utnyttja mätutrustningen optimalt. Det kan också vara aktuellt att genom matematiska operationer på den digitaliserade signalen ytterligare framhäva de seismoelektriska omvandlingarna. I båda fallen är det nödvändigt att ha en uppfattning om hur bakgrundsfälten ser ut.

I detta syfte har två olika mätsystem utvecklats. Det första är mycket kompakt och kan lätt packas ner i en ryggsäck. Det består av två dämpsatser och två seriekopplade RIAA-förstärkare av stereotyp samt en AD-omvandlare. Det andra systemet är förpackat i en Pelikanväska på hjul och mäter flera storheter parallellt. I båda systemen samlas data in i en laptop. Det första systemet utvecklades för mätning av bakgrundsält enbart, medan det andra systemet kan användas tillsammans med simulatören och även i senare fältmätningar.

3.2 Tvåkanalsystem för elektrisk bakgrundsmätning

Systemet består, som nämnts, av två dämpsatser och två seriekopplade RIAA-förstärkare av stereotyp samt en stereo AD-omvandlare. Anledningen att det behövs dämpsatser, en för varje kanal, och två RIAA-förstärkare är att det elektriska bakgrundsältet varierar i styrka från plats till plats och att man ibland måste dämpa det och ibland förstärka det extra genom att koppla två RIAA-förstärkare i serie så att signalen passar till mätområdet (0.1 -1.0 V) för den analog-digitalomvandlare som är kopplad till den mät dator som lagrar de digitaliserade signalerna. Detta kontrolleras med ett litet oscilloskop innan digitaliseringen i datorn sker. RIAA-förstärkare är sådana att de undertrycker högre frekvenser i audioområdet, se Figur 6. Eftersom de seismiska signalerna inte sträcker sig högre i frekvens än till 500 Hz är sådana förstärkare mycket lämpliga för syftet. Då den dominerande frekvensen i alla mätningar är 50 Hz har maximala förstärkningen vid denna frekvens mätts upp till 520 ggr, vilket innebär att två seriekopplade förstärkare utan dämpning har en förstärkning av 270.000 ggr. Hela systemet, som ryms i en mindre ryggsäck, visas i Figur 7.



Figur 6. RIAA-förstärkarnas filterkurva. Den visar att förstärkarna framhäver signaler med en frekvens under 1 kHz, medan de dämpar signaler med en frekvens som är högre än 1 kHz.

The amplification curve of a RIAA amplifier. It will enhance frequencies below 1 kHz and attenuate frequencies above 1 kHz.

Tre elektroder utnyttjas och syftet är dels att bestämma bakgrundsältet i marken dels att undersöka hur lika i amplitud signalerna från två olika dipoler kan bli. Det senare har bl a med kontaktmotståndet mellan jord och elektroder att göra. RIAA-förstärkarnas konstruktion är sådan att de måste ha en gemensam jord, det är anledningen till att endast tre elektroder används, varav den i mitten är gemensam jord. Det innebär att signalen får olika polaritet i de två kanalerna. Om man adderar två signaler som är lika men har olika polaritet, kommer summan att bli noll. Skiljer sig mätningarna åt framkommer skillnaden vid summeringen. Detta har betydelse för vissa presenterade signalbehandlingsmetoder, i vilka man förutsätter att man kan subtrahera bakgrundsältet genom en sådan addition.



Figur 7. I bilden visas de tre elektroderna med anslutningskablar, RIAA-förstärkarna med dämpsatser, oscilloskopet som används för att ställa in dämpningen samt den dator som lagrar de digitaliserade värdena. Snöret används för att enkelt placera ut elektroderna med en meters mellanrum.

The picture shows the three electrodes with connecting cables, the RIAA amplifiers with their attenuators, the small oscilloscope used for adjusting the attenuators and the computer used for data storage. The string is used to simplify putting the electrodes at 1 m distance.

Bakgrundssignalerna består huvudsakligen av jordströmmar skapade av elnäten, men kan också innehålla transienta signaler skapade av åska och andra urladdningar. Transienter kan också skapas av utrustning ansluten till elnäten för att reglera motorvarvtal och dylikt.

3.3 Mångkanaligt system för mätning av flera bakgrundsfaktorer

Det andra systemet är inbyggt i en plastväska försedd med hjul och det systemet innehåller flera olika förstärkare avsedda att konditionera signaler från ett antal externa sensorer, Figur 8. Dessa är dels sådana som mäter fält i luften, dels sådana som mäter fält i marken. I luften mäts det elektriska fältet i en riktning, vanligtvis N-S samt det magnetiska fältet, vars tre komponenter x, y, z registreras. Magnetfältets x -axel orienteras vanligen N-S. I marken mäts det elektriska fältet på två olika sätt, dels med ett konventionellt elektrodpar i ett dipolarrangemang, dels med fyra elektroder i ett dubbelt dipolarrangemang. Det senare är avsett för att kopplas till en differentiell förstärkare, vilket undertrycker de komponenter som är gemensamma i de båda signalerna. Det seismiska fältet bestäms med en konventionell vertikal geofon, eftersom seismoelektriska mätningar gärna utförs parallellt med en reflektionsseismisk mätning och dessa ofta utförs med vertikolgeofoner. Avsikten med detta system är, utöver att även bestämma det magnetiska och seismiska fältet, att undersöka om det elektriska fältet ser likadant ut i marken som i luften. Det är ju enklare att mäta det elektriska fältet i luften, eftersom man då undviker de kontaktmotståndsskillnader som är oundvikliga när man använder elektroder nedstuckna i marken. Det kan därför vara intressant att undersöka förutsättningarna för att mäta seismoelektriskt omvandlade signaler i luften. Samtliga signaler mäts samtidigt och lagras via en AD-omvandlare i en vädertälig dator.



Figur 8. Mångkanalsystemet med locket uppfällt. Data samlas in i en extern dator av samma typ som visas i föregående figur.

The multichannel system with the lid open. The data is stored in an external computer of the same type as shown in the previous figure.

3.3.1 Elektriska fält i luften – antenn

I syfte att mäta det elektriska fältet i luften har en dipolantenn med 1 m längd tillverkat. Det är ett kolfiberspröt med en elektrisk ledning lindad runt sprötet. I ändpunkterna av sprötet sitter två metallsfärer med diametern 78 mm placerade och i kontakt med ledningen. Dessa sfärer fördubblar antennens känslighet. I mitten av sprötet sitter en kopplingsdosa där de

elektriska ledningar kopplas till en BNC-kontakt för vidare inkoppling till Brüel & Kjaer Nexus förstärkare kanal 4, Figur 9.



Figur 9. Förstärkare av typen Brüel & Kjaer NEXUS
Brüel & Kjaer NEXUS amplifier

3.3.2 Elektriska fält i marken – elektroder och höghögfrekvent förstärkare

Elektrodena är av samma typ som används i mätningarna med RIAA-förstärkaren. I detta fall används emellertid en höghögfrekvent laddningsförstärkare från Brüel&Kjaer, typ 2635, Figur 10.



Figur 10. Laddningsförstärkare av typen Brüel & Kjaer 2635
Charge amplifier Brüel & Kjaer 2635

3.3.3 Differentiell mätning med två elektroder

Syftet med denna konfiguration är att se hur nära nollsignal man kan komma vid mätning med två dipolpar, när man alltså använder fyra elektroder. Vid en seismoelektrisk mätning skulle

ett elektrodpar ha placerats på ena sidan om skottpunkten och det andra paret på den andra sidan om skottpunkten. Eftersom teori och gjorda försök indikerar att det elektriska fältet från en seismoelektrisk omvandling har olika riktning på olika sidor om skottpunkten kommer därför signalen från omvandlingen att förstärkas om man subtraherar den ena signalen från den andra. Bakgrundssignalen däremot är nästan lika i båda elektrodparen och vid subtraktion kommer summan att bli noll. Om denna typ av bakgrundsmätning är idealiskt framgångsrik så innebär det alltså att resultatet blir ett rakt streck, dvs att inga spänningsskillnader uppmäts när det inte finns ett seismoelektriskt fält närvarande. Vi har emellertid ännu inte tillgång till annat än en enkanalig differentiell förförstärkare. Det innebär att man kan mäta skillnadssignalen mellan två elektroder utan att besväras av bakgrundens variationer relativt jord. Är bakgrunden samma för båda elektroderna blir alltså resultatet av bakgrunden noll. Dessa signaler kopplas till den differentiella ingången på förförstärkaren Signal Recovery 5113, vars utsignal alltså kommer att visa skillnaden mellan inkopplade elektrodens potential. Förstärkaren har upp till 50.000 ggr förstärkning, Figur 11.



Figur 11. Förförstärkare av typen Signal Recovery 5113 med möjlighet att koppla ingångarna A och B (till vänster på panelen) så att differentiell mätning erhålles (A-B).
Preamplifier Signal Recovery 5113 with the option to use inputs A and B (to the left on the front panel) as a differential input.

3.3.4 Magnetfält i luften – luftlindade ortogonala spolar

I litteraturen anges att det är ett elektromagnetiskt fält som skapas vid den seismoelektriska omvandlingen i t ex en porös, vätskefylld zon. Ett sådant fält består av två komponenter, den elektriska E och den magnetiska H. Dessa fält är ortogonala. Vanligtvis mäter man endast det elektriska fältet vid seismoelektriska undersökningar. I syfte att kontrollera förekomsten av bakgrunds-fält av magnetisk typ har en kommersiell magnetfältprob inskaffats till projektet. Denna har tre luftlindade och ortogonala spolar, vars sammanlagda signal kan användas för att bestämma magnetfältets styrka och riktning. Då magnetfältproben ursprungligen är avsedd att användas med ett integrerande instrument för ELF (Extremely Low Frequency) mätning har detta måst ersättas med en förstärkare som har en kanal för varje spole. Förstärkaren är en

Nexus fyrkanalig laddningsförstärkare från Brüel & Kjaer. Magnetfältets tre komponenter x,y och z kopplas till Nexus kanal 1-3, se Figur 9 ovan.

3.3.5 Seismiska nivåer – geofon

När seismoelektriska mätningar skall utföras måste man ha en uppfattning om ljudvågornas utbredningshastighet i berggrunden. Det smidigaste sättet att göra denna bestämning är att parallellt med den elektriska mätningen även göra en reflektionsseismisk mätning. Av det skälet är det motiverat att kunna göra en mätning också av det seismiska bakgrundsfälten i de tänkta tillämpningsområdena. Detta sker genom att signalen från en kalibrerad geofon leds till en förstärkare vars känslighet kan justeras efter behov. Detta är en tvåkanalförstärkare baserad på Kemo M040 förstärkare försedd med potentiometer för att reglera förstärkningen. Vid svaga signaler kan kanalerna kopplas i serie.

3.3.6 Oförutsedda händelser

Tyvärr drabbades - efter 15 års problemfri användning - NEXUS-förstärkaren i mångkanalsystemet av funktionsfel omedelbart innan mätningarna på Hallandsås och längs Förbifart Stockholm skulle utföras. Reparationen tog flera veckor i anspråk. Därför har mätningar med mångkanalsystemet inte kunnat tas med i denna rapport. De kommer i stället att utföras under kommande etapper av projektet.

3.4 Fältmätning med RIAA-förstärkare och tre elektroder

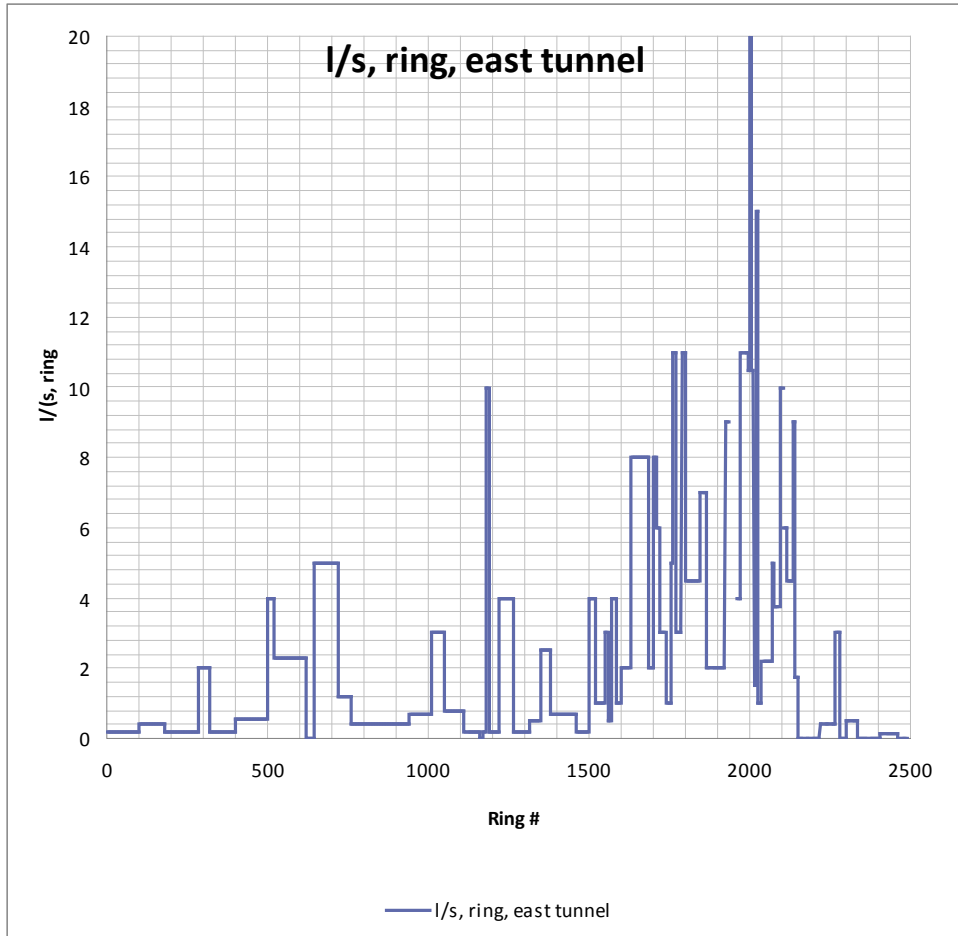
Mätningar med RIAA-systemet har utförts dels längs Hallandsåstunnelns sträckning, dels längs den planerade sträckningen av Förbifart Stockholm. Ursprungligen planerades att använda fyra elektroder, men de första mätningarna på Hallandsås visade så egendomliga effekter att denna metod fick omprövas. Då förstärkarna har gemensam jord via spänningsförstärkningen är det nödvändigt att elektrodparen också har en gemensam jord. Därför genomfördes mätningarna, som nämnts, med tre elektroder på linje, varav den mellersta är jord för båda förstärkarna. RIAA-förstärkarna ansluts med två krokodilklämmor från respektive kanals jord till den mellersta elektroden.

3.4.1 Hallandsåstunneln

Längs Hallandsåstunnelns sträckning har man bokfört vatteninläckaget som funktion av antalet installerade ringar, vilket är detsamma som längden av installerade lining-element, Figur 12. Det innebär att man har en osedvanligt god uppfattning om vattenföringsförmågan i berget, det som den seismoelektriska metoden ger oss hopp om att kunna mäta. Av det skälet är denna sträckning mycket värdefull för utvärderingen av metoden, den dag mätutrustning finns färdig. Nedan visas läckaget längs det östra tunnelröret, som alltså borrades norrifrån. Varje ring är 2.2 m lång.

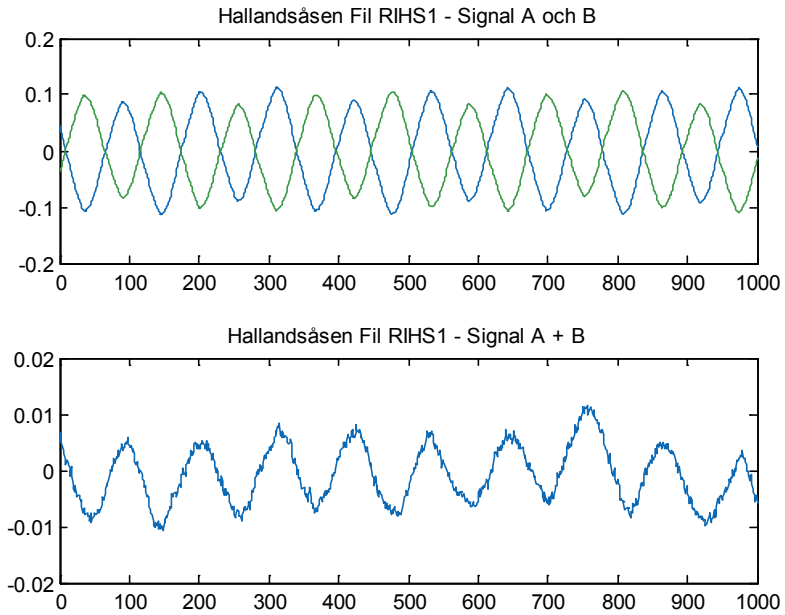
Mätpunkterna valdes ut med kravet att de skulle vara någorlunda lättåtkomliga med personbil, de ligger huvudsakligen i skärningspunkten mellan tunnellen och någon markväg. För att bestämma rätt position har en GPS-mottagares VÖ-koordinat använts för att bestämma läget längs de vägar som huvudsakligen går i öst-västlig riktning och som skär tunnelsträckningen som huvudsakligen går i SV-NO-riktning.

De nu utförda mätningarna innehåller inga seismoelektriska omvandlingar. De har endast till syfte att undersöka hur de elektriska bakgrundsfälten kan se ut på olika sträckningar där seismoelektriska mätningar kanske kommer att utföras i framtiden.

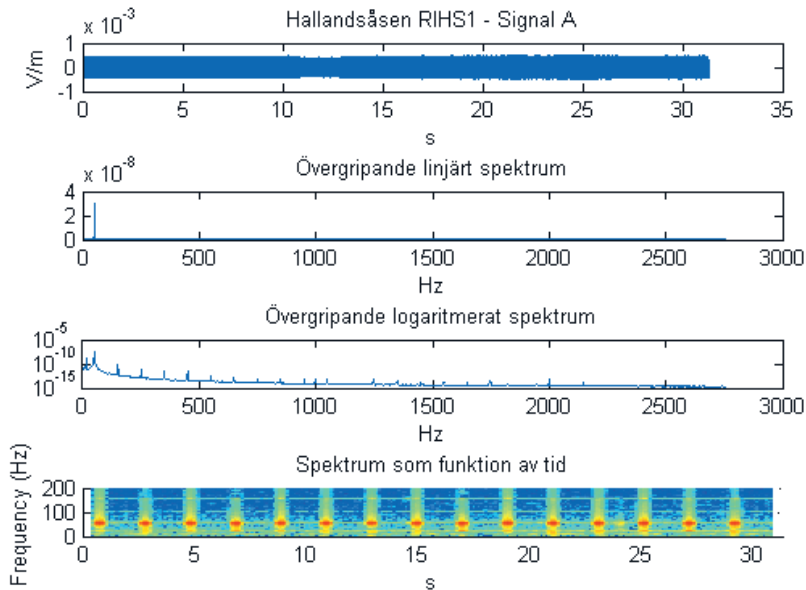


Figur 12. Inläckande vattenmängd i det östra tunnelröret i Hallandsåstunneln.
Water flow along the eastern tube of the tunnel through Hallandsås

Ett exempel på mätdata från Hallandsås visas i Figur 13. Tre elektroder nedstuckna i marken på 1 m inbördes avstånd har använts och elektroden i mitten fungerar som jord. Signal A är uppmätt mellan en yttrelektrod och mittelektroden och Signal B mellan den andra yttrelektroden och mittelektroden. Eftersom våglängderna är mycket större än 1 m kan man förvänta sig att det elektriska fältet skall se ungefär lika ut i de två kanalerna bortsett från att det bör ha olika tecken i varje ögonblick. I huvudsak är det också fallet men vi ser att vid summering kvarstår en knapp tiondel av variationerna. I den summerade signalen ser vi också att det finns en mycket svag signal av betydligt högre frekvens än den dominerande 50 Hz signalen.



Figur 13. De båda signalerna A och B med motsatt polaritet samt summan av dessa signaler. Endast 1000 mätvärden motsvarande c:a 0.2 s mättid visas.
The two signals A and B with opposite polarity and the sum of these signals. Only 1000 samples are shown.



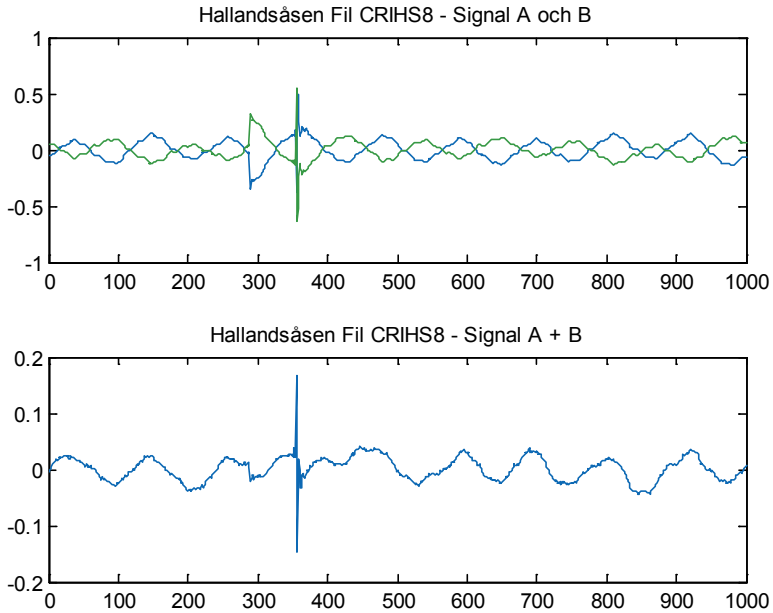
Figur 14. Hela den registrerade signalen redovisas i översta diagrammet, därefter linjärt och logaritmerat spektrum. Underst visas ett spektrogram som framställer spektrum som funktion av tid.

The complete recorded signal is displayed in the upper diagram, below follows the linear and logarithmic spectrum. At the bottom a spectrogram is shown.

I Figur 14 visas hela den digitaliserade signalen och då framträder de amplitudvariationer man har under en 30 s period. Därefter visas linjärt och logaritmerat spektrum. Det linjära spektrumet visar endast de dominerande frekvenserna, i detta fallet endast 50 Hz. I det logaritmerade spektrumet kan man däremot även se mycket svaga frekvenstoppar. De starkaste av dessa är $16 \frac{2}{3}$ Hz som orsakas av järnvägens elnät, samt en rad övertoner till 50 Hz nätfrekvens.

I spektrogrammet, nederst i Figur 14, framställs spektra som funktion av tiden. Man får då tänka sig att spektrumet vrids 90 grader och framställs som en vertikal linje. Amplituden är färgkodad. Man ser då att en bredbandig episod inträffar med c:a 2 s mellanrum, centrerad kring 50 Hz, där den har sitt maximum. Denna episod har kunnat iakttas med skiftande styrka i alla mätningar. Den saknar f.n. förklaring, men det kan inte helt uteslutas att den har med mätsystemet att göra.

De flesta mätpunkter uppvisar ett elektriskt bakgrundsfält som följer mönstret i Figur 13 och 14. På en plats registrerades däremot en transient, Figur 15, vilket kan vara ett svårbemästrat problem i signalbehandlingen man genomför för att förstärka de seismoelektriska omvandlingarna och undertrycka bakgrundssignalerna. Transienten antas vara resultatet av de strömstötter som alstras av ett elstängsel. Det torde inte vara omöjligt att få stängslets ägare att stänga av det under den korta tid mätningarna äger rum.



Figur 15. Registrering av en transient som troligen skapats av ett elstängsel.
Recording of a transient probably caused by an electric fence.

Resultat från mätningarna på Hallandsås redovisas i sammandrag i Tabell 1 nedan.

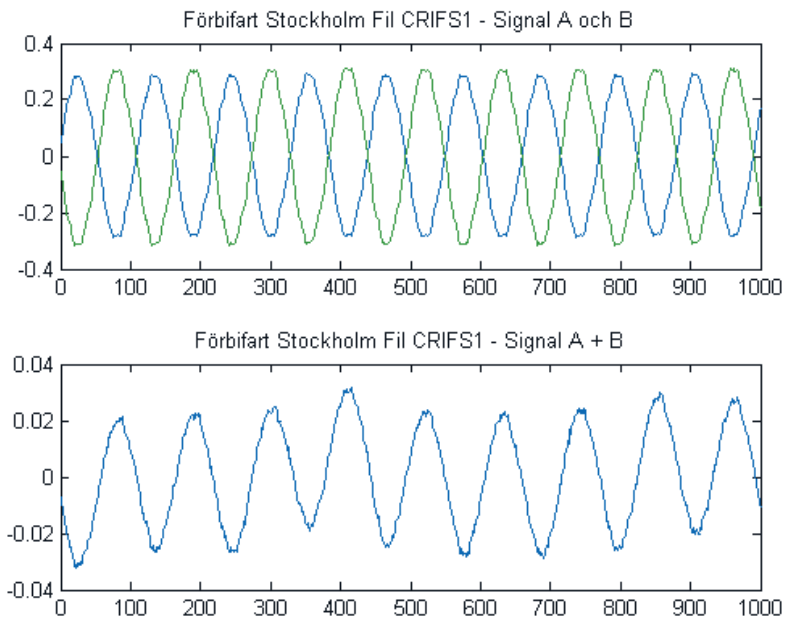
Tabell 1. Sammanfattning av mätresultatet avseende bakgrundsfält på Hallandsås
Summary of the results concerning the background electrical field

| <u>Punkt</u> | <u>Bakgrundsfältets amplitud ($\mu\text{V}/\text{m}$)</u> | <u>Frekvenser synliga i linjärt spektrum(Hz)</u> |
|--------------|--|--|
| 1 | 770 | 50 |
| 2_2 | 430 | 50 |
| 3_3 | 52 | 50 |
| 5 | 33 | 50 |
| 6 | 90 | 50 |
| 8 | 25 | 16 2/3, 50 |
| 12 | 240 | 16 2/3, 50 (svagt) |
| 15 | 925 | 50 |
| 16 | 925 | 50 |
| 17 | 3840 | 50 |
| 19 | 620 | 50 |

3.4.2 Förbifart Stockholm

Detta är ett mycket uppmärksammat infrastrukturprojekt som förhoppningsvis har kommit en bit på väg när seismoelektrisk mätteknik är framtagen och kan testas. Det kan då ha ett stort demonstrationsvärde att genomföra mätningar i delar där man vet hur förhållandena var och därför kunna skapa förtroende för utsagor om hur förhållandena kommer att bli på platser där arbetet ännu inte påbörjats. De i denna etapp utförda mätningarna innehåller inga seismoelektriska omvandlingar. De har endast till syfte att undersöka hur de elektriska bakgrundsfälten kan se ut på olika sträckningar där seismoelektriska mätningar sannolikt kommer att utföras i framtiden.

Mätpunkterna har valts ut med hjälp av Trafikverkets geotekniska undersökningar. I de platser där förhållandena anses besvärliga och man någorlunda lätt kan ta sig till en punkt på markytan rakt ovanför, har mätpunkter placerats. I detta fältarbete var tillgången till en GPS-mottagare av mycket stort värde, eftersom operatören inte hade någon lokalkännedom i det aktuella området. Ett exempel på mätdata från Förbifart Stockholm visas i Figur 16. Tre elektroder nedstuckna i marken på 1 m inbördes avstånd har använts och elektroden i mitten fungerar som jord. Trots att det på många platser längs tunnelsträckningen rör sig om hårdgjorda ytor, har det alltid varit möjligt att finna en jordplätt där elektroderna kunnat stickas ner. Signal A är uppmätt mellan en ytterelektrod och mittelektroden och Signal B mellan den andra ytterelektroden och mittelektroden.

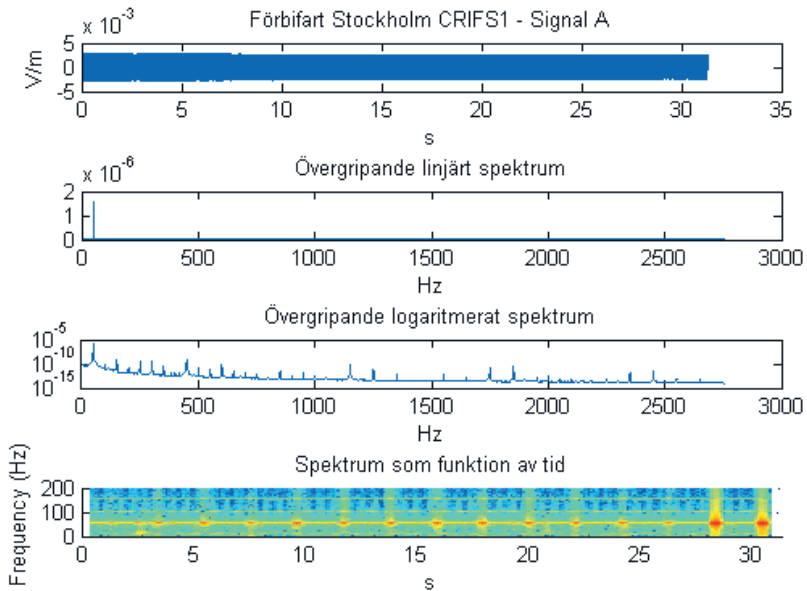


Figur 16. De båda signalerna A och B med motsatt polaritet samt summan av dessa signaler. Endast 1000 mätvärden motsvarande c:a 0.2 s mättid visas.

The two signals A and B with opposite polarity and the sum of these signals. Only 1000 samples, corresponding to 0.2 s in time are presented.

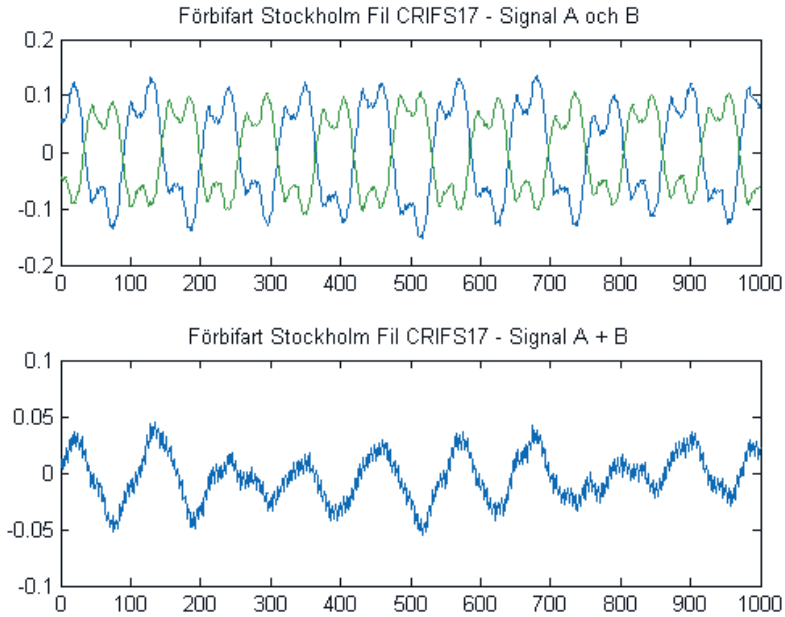
Eftersom våglängderna är mycket större än 1 m kan man förvänta sig att det elektriska fältet skall se ungefär lika ut i de två kanalerna bortsett från att det bör ha olika tecken i varje

ögonblick. I huvudsak är det också fallet men vi ser att vid summering kvarstår en knapp tiondel av variationerna.



Figur 17. Hela den registrerade signalen redovisas i översta diagrammet, därefter linjärt och logaritmerat spektrum. Underst visas ett spektrogram som framställer spektrum som funktion av tid.

The complete recorded signal is displayed in the upper diagram, then follows linear and logarithmic spectrum. At the bottom a spectrogram is presented.



Figur 18. Exempel på mät punkt där det framträder en högfrekvent signal när Signal A och B summerats. Signalen förefaller ha en frekvens som är c:a 20 ggr högre än 50 Hz, dvs 1 kHz.

Example showing a place where a high frequency signal appears as the signals A and B are summed. The signal has a frequency which is about 20 times higher than 50 Hz, i.e. 1 kHz.

Resultat från mätningarna längs sträckningen av Förbifart Stockholm visas i Tabell 2 nedan.

Tabell 2. Sammanfattning av mätresultatet avseende elektriskt bakgrundsält
Förbifart Stockholm
Summary of results concerning the electrical background field

| <u>Punkt</u> | <u>Bakgrundsältets amplitud ($\mu\text{V/m}$)</u> | <u>Frekvenser synliga i linjärt spektrum(Hz)</u> |
|--------------|--|--|
| 1 | 5770 | 50 |
| 2 | 960 | 50 |
| 3 | 274 | 50 |
| 4 | 213 | 50 |
| 5 | 11 | 50 |
| 8 | 923 | 50 |
| 910 | 111 | 50 |
| 11-2 | 817 | 50, 150 |
| 12 | 49 | 50 |
| 13 | 1540 | 50 |
| 14 | 1920 | 50, 150 |
| 16 | 2980 | 50, 150 |
| 17 | 192 | 50 |
| 18 | 592 | 50, 150 |
| 19 | 3560 | 50 |
| 20 | 555 | 50 |
| 21 | 563 | 50 |
| 22 | 3850 | 16 2/3, 50, 150 |

4 UNDERTRYCKNING AV BAKGRUND OCH BRUS

Man kan dela in dessa metoder i sådana som opererar på signalen innan den digitaliseras och lagras i datorn och sådana som arbetar på den redan digitaliserade och lagrade signalen. Fördelen med det förre är att man kan utnyttja digitaliseringens dynamik för nyttiga signaler utan att behöva slösa dynamik på störningar, fördelen med den andra metoden är att man kan testa olika parametrar för operationen hur många gånger man vill, eftersom råsignalen hela tiden finns tillgänglig.

Om bakgrundssignalen består av smala frekvenslinjer kan det vara lämpligt att använda sig av filtrering. Sådan filtrering kan göras med analoga eller digitala filter. Innan digitalisering måste man alltid lågpasfiltera signalen, så att den inte innehåller några frekvenskomponenter som är så höga att man inte får minst två digitaliserade värden per cykel av den högsta frekvensen, detta kallas Nykvists samplingsteorem. Underskrids denna punkttäthet uppstår vikning, d.v.s. energin från högre frekvenser uppträder som om den kom från lägre frekvenser. Filtrering som sker efter digitaliseringen är naturligtvis alltid digital. Filtrering kan ske på olika sätt, vilket diskuteras nedan. Man måste vara observant på att filtrering påverkar både den filterade signalens amplitud och fas relativt den ofiltrerade signalen. Av digitala filter talar man främst om s.k. Infinite Impulse Response (IIR) och Finite Impulse Response (FIR) filter. Den viktigaste skillnaden är att IIR-filter är kraftigt fasförskjutande, vilket ofta kompenseras genom att man propagerar dem i båda riktningarna längs den digitaliserade signalen. Viktigt vid filtreringsoperationer är att välja filtergränser så att man inte undertrycker även den önskade signalen. Dess karaktäristik är, som tidigare nämnts, beroende av källans egenskaper. Det frekvensband källan tar i anspråk får således inte filtreras bort.

4.1 Operationer före digitalisering

Dessa operationer måste ske analogt men har en digital motsvarighet, vilken kan utföras även efter digitaliseringen. Man förlorar i det senare fallet den ökade dynamik som filtrering innan digitaliseringen kan ge till lagrade data.

4.1.1 Differentiell undertryckning

Differentiella mätningar innebär att man mäter skillnaden mellan två potentialer utan att bry sig om vad absolutpotentialerna kan vara. Idén är att om alla signalerna innehåller en gemensam komponent kommer denna inte att tas med i beräkningen av skillnaden. I det aktuella problemet är det alltså bakgrundssignalen som är den gemensamma komponenten och som man vill undertrycka. En specialanpassning av denna teknik används när man vid seismoelektriska undersökningar mäter symmetriskt kring skottpunkten, se ovan under avsnitt 2.4.

4.1.2 Passbandsfiltrering

Passband innebär att man applicerar ett lågpasfilter med exempelvis en brytfrekvens på 130 Hz och ett högpassfilter med exempelvis en brytfrekvens vid 60 Hz. Resultatet kommer att bli att enbart frekvenser mellan 60 och 130 Hz finns kvar i signalen. Är det i detta frekvensband den seismiska källan sänder ut elastiska vågor får man ett bra resultat av passbandsfiltreringen.

4.1.3 Notch-filter

Ett notch-filter undertrycker ett mycket smalt frekvensband och kan användas för att undertrycka 16 2/3, 50 och 150 Hz var för sig. Ett sådant filter kan dock inte göras så smalt som subtraktion av t ex en analytiskt framställd 50 Hz som fasanpassas till insamlade data och därefter subtraheras, se nedan under 4.2.5. Kring varje bortfiltrerad frekvens försvinner ett mindre område av frekvenser.

4.1.4 Smalbandsdetektering

En speciell typ av signaldetektering utgörs av att man sänder en enda sinusfrekvens åt gången. Eftersom man vet exakt vilken frekvens man skall leta efter återstår endast att bestämma signalkomponentens fas och amplitud. Med modern utrustning kan detta göras för signal/brusförhållande så låga som -100 dB. Metoden innebär att man samplar den mottagna signalen med två AD-omvandlare, en som går i fas med sinus för den aktuella frekvensen och en som går i fas med cosinus för den aktuella frekvensen, båda tar två sample per cykel. Samplegrupperna summeras och medelvärde bildas för de båda summorna. Det resulterande talparet utgör ett komplext tal $(\alpha, i\beta)$ som beskriver den aktuella frekvensens två egenskaper - fas och amplitud. Fasläget ϕ för ett sådant tal relativt referenssignalen fås genom Ekv. 2 och amplituden A genom Ekv. 3. Referenssignalens amplitud antas här vara 1.

$$\phi = \arctan\left(\frac{\beta}{\alpha}\right) \quad \text{Ekv. 2}$$

$$A = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \quad \text{Ekv. 3}$$

Genom att man stegar sig igenom flera frekvenser kan man på detta sätt få in Fourierkomponenter motsvarande en hel tidsserie. De erhållna komponenterna återger signalen i frekvensplanet och genom en operation som kallas invers Fouriertransform kan man överföra informationen till tidsplanet. Den signal man då erhåller motsvarar det man skulle ha fått om man använt en impulsiv källa med samma bandbredd, dvs samma frekvensomfång som man stegat sig igenom. Fördelen är att man för varje frekvensmätning kan undertrycka alla andra frekvenser medan man vid bredbandsmätning hela tiden måste hålla mottagaren öppen för alla vid något tillfälle i signalen förekommande frekvenser. Även störningar i detta frekvensområde kommer således med i den registrerade signalen.

4.2 Operationer efter digitalisering

4.2.1 Medelvärdesbildning i tiden

Ett vanligt sätt att framhäva svaga signaler i närvaro av brus är att göra mätningar som upprepas i tiden. Man behöver då en trigger som ser till att alla registreringar startar samtidigt, så att den eftersträvade signalen alltid ligger på samma ställe i registreringarna. Alla störningar däremot kommer att ligga helt olika i relation till denna signal, då de inte har någon koppling till triggsignalen. Konsekvensen av detta blir att alla störningar undertrycks och alla önskade signaler förstärks när man summerar alla insamlade signaler. I den engelskspråkiga litteraturen betecknas metoden ”stacking”. För att denna metod skall vara användbar krävs det att källan är repeterbar, så att den önskade signalen ser likadan ut vid varje registrering.

4.2.2 Medelvärdesbildning i rummet

Ett annat sätt att medelvärdesbilda är att mäta på flera ställen på markytan och summera mätdata från de olika positionerna. Ett exempel på en sådan mätning skulle vara att placera sensorerna i en ring kring skottpunkten. Är då den horisont som ger upphov till de seismoelektriska omvandlingarna parallell med markytan, kommer signalerna att anlända till markytan samtidigt i de olika sensorerna och förstärkas vid summering. Metoden undertrycker inte elektriska bakgrundsfallt, eftersom dessa skapas av lågfrekventa system med mycket långa våglängder. 50 Hz motsvarar i luften en våglängd av $300.000 \text{ km/s} / 50/\text{s} = 6000 \text{ km}$. Därför kommer dessa signaler att se likadana ut i samtliga sensorlägen, då dessas positioner bara skiljer sig någon meter. För att denna metod skall fungera som signalförstärkare måste bakgrundsfalltet först avlägsnas.

4.2.3 Multiplikativ signalförstärkning

Genom att i stället för att addera flera signaler (stacking) kan man multiplicera datavärdena punkt för punkt. Delar av signalen som har stor amplitud på samma ställe kommer då att förstärkas väsentligt, närmast explosivt. I syfte att undvika problem med fasjitter, alltså att successiva signaler kan vara förskjutna en halv våglängd och därför ger upphov till negativa produkter, kan man genom enveloppömvandling göra signalerna strikt positiva. Därigenom blir naturligtvis alla produkter positiva.

4.2.4 Korrelation och kodade vågformer

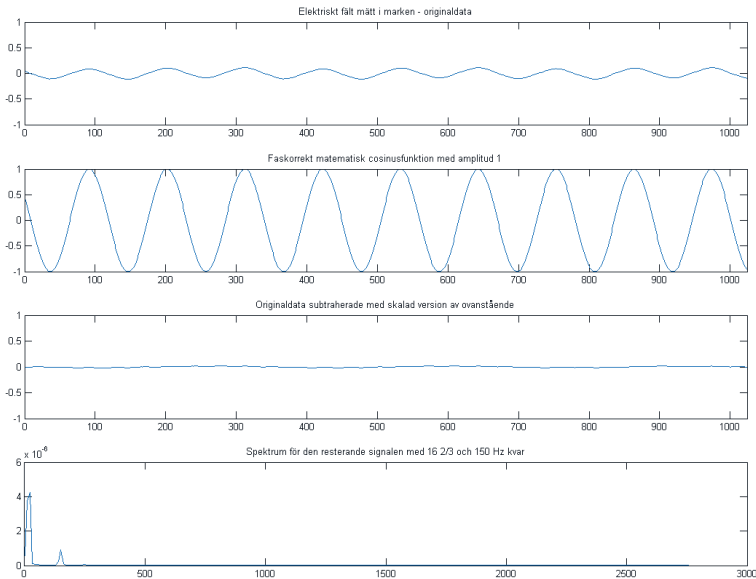
Korrelation är en matematisk metod som används för att bestämma förskjutningen mellan två olika signaler. Den kan också användas för att se om en signal upprepar sig, som t ex en ren sinussignal gör. Man börjar med att placera de två signaler bredvid varandra med första mätvärdet i respektive signal i samma position. Därefter multiplicerar man de två signalernas mätvärden punkt för punkt under summering av produkterna. När man har gått igenom alla mätvärden i signalerna förskjuter man den ena signalen ett steg i förhållande till den andra. I vissa fall tänker man sig då att signalerna är ringformigt orienterade, så att förskjutningen motsvarar en vridning ett steg av den ena ringen. Därigenom finns det alltid ett värde att multiplicera med. Därefter upprepas processen och man får en ny produktsumma. Är det nu samma signaler kommer man att få det största värdet när signalerna ligger helt parallellt och vid förskjutning avtar produktsumman. Är signalerna också sinusformade kommer produktsumman att nå ett minimum när förskjutningen motsvarar en halv våglängd och därefter kommer den att växa igen. Om den ena signalen däremot innehåller en förskjuten kopia av den andra kommer produktsumman att få sitt största värde för denna förskjutning. Ofta normaliserar man produktsumman så att det största värdet blir ett. Data insamlade med SIST-tekniken processeras med dessa metoder.

4.2.5 Subtraktion av koherent bakgrund

Med koherent bakgrund menas här att man har stabila, diskreta frekvenser som bakgrund, t ex de tidigare nämnda 16 2/3, 50 och 150 Hz. Man kan då matematiskt framställa signaler som motsvarar bakgrundens frekvenser. Enklast görs detta genom att man gör en sk Fouriertransform av mätdata för dessa tre frekvenser. Det innebär att man framställer en sinus och en cosinusversion av var och en av de aktuella frekvenserna. Därefter multipliceras dessa dataserier med de serier som innehåller den uppmätta signalen. För varje frekvens får man då ut två tal, som brukar kallas I och Q (in-phase and quadrature). Med hjälp av dessa två tal kan man rekonstruera matematiska avbilder av de tre frekvenserna. Genom att dra roten ur kvadratsumman av I och Q får man den aktuella frekvensens amplitud A och genom att ta arctg för kvoten av I och Q får man frekvensernas startfaser vid tiden $t=0$. Om nu dessa tre frekvenser subtraheras från den uppmätta signalen kommer de tre frekvenserna att elimineras

under hela den period de är stabila i fas (koherenta) och har samma amplitud, Figur 19. En nackdel är att amplituden är ett medelvärde över hela signallängden.

Om man vill anpassa amplituden till lokala variationer för att förbättra undertryckningen kan man beräkna enveloppen av bakgrundssignalen och ändra amplituden i enlighet med denna. Enveloppen är helt enkelt tidsfunktionen av amplituden presenterat som ett positivt tal. Det kan finnas skäl att utföra denna operation frekvens för frekvens i den ordning de är starkast. 50 Hz är vanligtvis den dominerande frekvensen i bakgrundssignalen, se nedan.

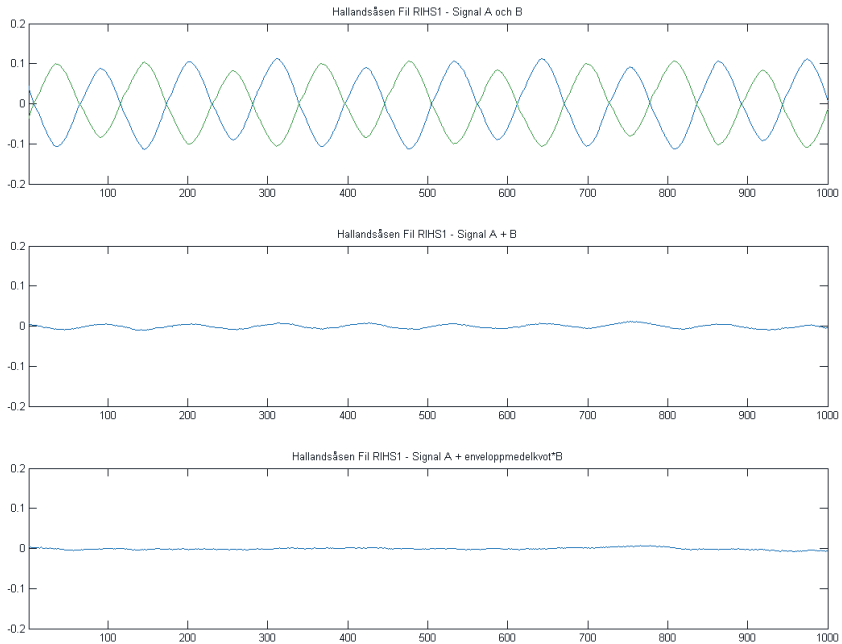


Figur 19. Överst visas det elektriska fältet uppmätt i marken, det domineras av en 50 Hz sinus. Nästa diagram visar en matematisk sinus med samma startfas (erhållen ur FFT av originalsignalen) som originalsignalen, dess amplitud är 1. När amplituden på den andra signalen justerats för att överensstämja med originaldata kan den subtraheras från originaldata och då försvinner 50 Hz komponenten ur signalen, diagram tre. Den resterande signalens spektrum innehåller endast 16 2/3 Hz och 150 Hz, vilka kan subtraheras med samma metod.

At the top the electric field measured in the ground is presented, it is dominated by 50 Hz sinus. Next diagram shows a mathematical sinus with the same starting phase (derived from an FFT of the original signal) as the original signal, its amplitude is 1. When the amplitude of the second signal is adjusted to match the original signal it is subtracted from the original and the 50 Hz is completely removed, the third diagram. The remaining signal contains only 16 2/3 Hz (railway) and 150 Hz sinus signals and they can be removed in a similar fashion.

4.2.6 Subtraktion av koherent bakgrund utnyttjande enveloppedelkvot

Ibland är signalparets amplituder inte konstanta i tiden och då kan man använda subtraktionsmetoden med justering för kvoten av signalernas amplitud i varje ögonblick. Matematiskt görs detta enklast genom att man beräknar enveloppen för varje signal. Enveloppen kan sägas vara en sorts absolutvärde av signalernas amplitud. Genom att för varje punkt i tidserien bilda kvoten av envelopperna får man en subtraktion som i varje punkt resulterar i utsläckning av den aktuella frekvensen, se Figur 20.



Figur 20. Utsläckning av två signaler med oberoende amplitudvariationer men med bestämd fas (50 Hz) genom att justera den subtraherade komponenten med enveloppedelvärdet.

Elimination of two signals with independent amplitude variations but a fixed phase relation (50Hz) by adjustment of the subtracted component by the envelope average.

5 SIMULERING AV SEISMOELEKTRISKA SIGNALER

I detta avsnitt berörs hur man skapar olika signaltyper och hur man skall sända ut dem nere i marken på ett sätt som imiterar den omvandling som sker när seismiska vågor träffar på ett vattenförande skikt och det sker en omvandling till elektriska signaler. Avsnittet är uppdelat i bredbandiga och smalbandiga signaltyper samt beskrivning av en simulator som skall användas för att alstra en elektrisk signal som motsvarar den de olika seismiska källorna skulle ge upphov till vid seismoelektrisk omvandling.

Simulatorens arbetar alltså helt i det elektriska området och förbigår den mekaniska svängningsrörelsen och omvandlingen i den vattenförande zonen / sprickan. Syftet med simulatorens är att kunna registrera signaler på markytan som man vet innehåller både bakgrundsstörningar och en imiterad seismoelektrisk signal. Dessa signaler skall sedan användas för att finslipa de algoritmer som skall undertrycka bakgrundsstörningarna och framhäva de seismoelektriska signalerna. Om man bara skulle gå ut och slå en slägga i marken kan man inte vara säker på att markförhållandena är sådana att det alstras en seismoelektrisk signal. Då kan man inte veta vad resultatet av signalbehandlingen bör bli och det är svårt att värdera utvecklade metoders effektivitet.

5.1 Bredbandiga signaler

Med bredbandiga signaler avses här signaler som samtidigt innehåller flera frekvenser, man säger att de täcker ett frekvensband. Som tidigare nämnts blir signalens upplösningsförmåga, d.v.s. förmågan att särskilja näraliggande reflexer, bättre ju större bandbredden är. En signal kan vara bredbandig genom att man sänder ut en kort impuls, brus eller ett frekvenssvcp. För en impuls erhålles den möjliga upplösningen direkt ur signalen, medan för brus eller frekvenssvcp måste man pulskomprimera, vilket vanligtvis sker genom att använda ett korrelationsförfarande enligt 4.2.4 ovan.

5.1.1 Frekvenssvcp

Denna metod har mycket stor användning inom prospekteringstekniken när man använder reflektionseismiska mätningar. En fördel med frekvenssvcp är att man kan mata ut mycket energi jämfört med impulsiv signalgenerering. Ett sådant frekvenssvcp går under beteckningen ”chirp”. Någon har räknat ut att man behöver slå med slägga i 16 år för att få ut lika mycket energi i marken som man kan få med ett frekvenssvcp från en tung vibroseiskälla. Vanligtvis börjar man frekvenssvcpet i den lägre delen och höjer sedan successivt frekvensen under svcpet. Detta gör man för att få en mjukare start av förloppet så att ringning undviks. Att starta förloppet med de högsta frekvenserna ger upphov till en momentan förändring som kan få källan att självsvänga. I anslutning till källan har man en geofon som registrerar förloppet och ger en replika för efterföljande pulskomprimering med korrelation.

Vid simulering ställer man in sin signalgenerator på att sända ett frekvenssvcp med angivna start och stoppfrekvenser. Man kan ofta även ställa in om svcp hastigheten skall vara linjär eller logaritmisk. I det senare fallet löper svcpet snabbare genom de höga frekvenserna än genom de låga.

5.1.2 Impulssekvens/SIST/Explosion

Detta rör sig om att åstadkomma en sekvens av en eller flera impulsartade signaler. Även dessa kan skapas i en vågformsgenerator. Impulserna kan vara antingen en ren fyrkantvåg, en Gausspuls formad som Gauss-fördelningen eller en s.k. Ricker-vågform, som är en derivata

av Gausspulsen. Den senare har egenskapen att dess spektrala innehåll har samma fördelning som dess tidsfunktion.

5.2 Smalbandiga signaler

Med smalbandiga signaler avses här signaler som i idealfallet endast innehåller en enda sinusformad vågrörelse. Sådana signaler åstadkoms enkelt med hjälp av en datorstyrd signalgenerator.

5.3 Simulering av en vertikal seismisk dipol

I syfte att kunna optimera processeringen av seismoelektriska signaler har en simulator konstruerats i denna projektetapp. Syftet är att man skall slippa leta reda på en plats i naturen där seismoelektrisk omvandling sker och att undvika att sända ut seismiska signaler på markytan. Det senare kan inte ske i detta skede eftersom vi saknar en lämplig seismisk källa. Vilken typ av källa som skall anskaffas kommer delvis att styras av simuleringen. I stället har vi letat fram ett lämpligt borrhål, c:a 80 m djupt och försett med foderrör av plast och ett filter längst ner. Simulatoren är helt enkelt en elektrisk dipol, 1 m lång, som avses sänkas ner i borrhålet och komma i elektrisk kontakt med omgivande marklager via slitsarna i filtret. Att foderröret är av plast innebär att det inte kommer att flyta krypströmmar på det, vilket kan misstolkas på markytan. För att kommunikationen mellan markytan och simulatoren inte skall ge upphov till liknande problem, sker den via en metallfri optisk fiber mellan elektroniken på markytan och simulatoren nere i borrhålet. Av detta skäl måste elektroniken i simulatoren vara batteridrivna. Simulatoren skall helt enkelt alstra den elektriska signal som vid en verklig seismoelektrisk mätning alstras genom omvandling av elastisk energi i berggrunden och vattnet till elektrisk energi. Syftet är som nämndes inledningsvis att på enklaste sätt kunna finlipa de algoritmer som ska framhäva den seismoelektriska signalen ur bakgrunden och att undersöka vilken signaltyp som är gynnsammast att använda. Den senare informationen styr vilken typ av källa som skall användas i verkliga mätningar.

5.3.1 Simulatorns elektronikdel

Simulatoren består av två större komponenter, dels en kabelvinda med optofibern upprullad och som i navet innehåller den elektronik som omvandlar den elektriska signalen från vågformsgeneratoren till en ljussignal i den optiska fibern, dels en del i fiberns andra ände som innehåller den elektronik som omvandlar den optiska signalen till en elektrisk signal och förstärker den innan den sänds ut i marken, Figur 21. Båda delarna drivs med 12V DC.

5.3.2 Simulatorelektronikens frekvensrespons

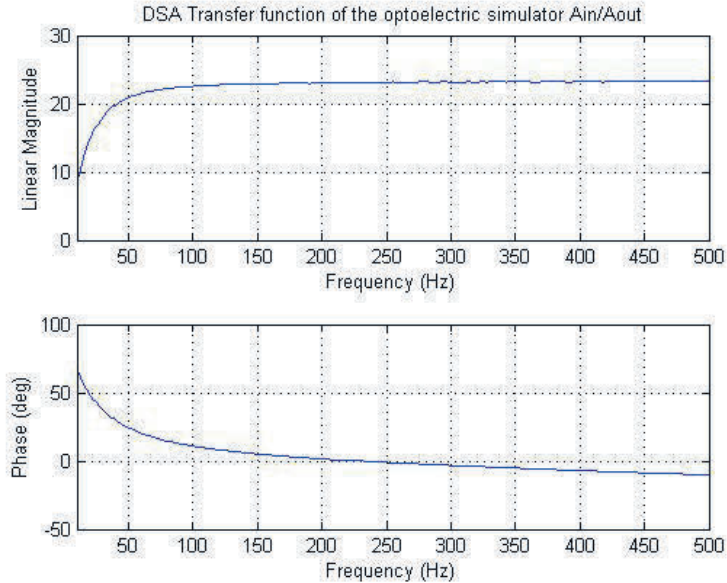
I syfte att kontrollera hur väl den avgivna signalen från simulatoren följer den nedsända styrsignalen gjordes test med en signalanalysator som jämför utsignal med en bestämd insignal frekvens för frekvens, d.v.s. simulatorns transferfunktion. Uppställningen visas i Figur 22 nedan. Mätresultatet visas i Figur 23.



Figur 21. Seismoelektrisk simulator: Kabeltrumma med elektrooptisk omvandlare, elektronikdel med optoelektrisk omvandlare och förstärkare (överst) samt batteri och elektroddel (vitt rör nederst)
Seismoelectric simulator. The cable reel carries the optofiber and contains the electro-optic converter. In the downhole probe there is an opto-electric converter an amplifier and batteries (in the white tube).



Figur 22. Den svarta kabeltrumman innehåller den optiska fiberkabeln och sändarelektroniken. Instrumentet till höger är signalanalysatorn som styr försöket. Ett oscilloskop används för att kontrollera att vågformerna ser korrekta ut under analysatorns frekvenssvep.
The black cable reel contains the optofiber and transmission electronics. The instrument to the right is a Dynamic Signal Analyzer which controls the experiment. An oscilloscope is used to inspect the signal waveforms throughout the frequency range inspected.



Figur 23. Simulators transferfunktion för frekvensområdet 1-500 Hz. Simulatore fungerar bra upp till knappt 5 kHz men seismiska signaler innehåller sällan högre frekvenser än 500 Hz.

The transfer function for the frequency range 1-500 Hz. The simulator works well up to 5 kHz but seismically generated signals rarely exceed 500 Hz.

Som framgår av den övre kurvan i Figur 23 är systemets förstärkningsfaktor i luft 23 ggr vid en frekvens högre än 100 Hz, dvs 100 mV in ger 2.3 V ut över elektroderna.

5.3.3 Fältstyrka i vatten

I syfte att kontrollera att förstärkaren fungerar när elektroderna får kontakt genom vatten sänktes simulatorns nedre del ned i ett vattenfyllt rör med 100 mm diameter. För att kontrollera att fältstyrkan blev den avsedda försågs simulatore med två mätprobar på 0.500 m avstånd, vilket visas i Figur 24 nedan, bestående av två koppartrådar lindade runt simulatorns batteridel. En insignal om 200 mVpp gav en potentialskillnad mellan de två mätproberna om drygt 3V, dvs. fältstyrkan var c:a 6V/m för den aktuella insignalen.



Figur 24. Simulatorns batteri och elektroddel försedd med två tillfälligt monterade mätprobar med ett inbördes avstånd om 0.500 m.
The battery and electrode part of the simulator equipped with temporary probes for measuring the actual electric field created in water.

5.3.4 Fältförsök

Simulatorn testades därefter i borrhålet. Mätutrustningen bestod av en lock-in förstärkare, ett oscilloskop och en dator för lagring av mätdata. Lock-in förstärkaren stegar sig genom ett valt antal frekvenser och gör en smalbandsdetektering. Dessa instrument är de känsligaste vi förfogar över och uppges kunna detektera en känd sinusvåg vid ett signal/brusförhållande på -100 dB. Förstärkaren skickar ut en frekvens i taget till simulatorn och fältet på markytan mäts upp med hjälp av två elektroder kopplade till den differentiella förförstärkaren, Figur 25. Innan simulatorn skickades ner i hålet, Figur 26, hade detta system torrtestats och fungerat. Men då mättes signalen inte på markytan utan över de två elektroderna på simulatorn nedre del direkt.

Vid själva mätningen i borrhålet kunde emellertid inga signaler registreras på markytan. Efter diverse sökande efter möjliga felkopplingar togs simulatorn upp och motsvarigheten till torrtestet upprepades. Ingen signal. Försöket avbröts.

Vid hemkomst öppnades simulatorn och det visade sig att den övre elektronikdelen var vattenfylld och att såväl den optoelektriska omvandlaren som förstärkaren upphört att fungera. Simulatorn var alltså inte vattentät. Ett mer blygsamt inläckage i batteridelen gjorde att batterierna inte tog någon skada. Läckaget kan hänföras till dåligt utförda o-ringstättningar och en bristfällig genomföring av den optiska kabeln. Nya elektroniska komponenter beställdes omedelbart.



Figur 25. Simulatorens förberedelse för nedsänkning i borrhålet
The simulator is prepared for descent into the borehole.



Figur 26. Simulatorens nedsänkning till botten i det 80 m djupa borrhålet som är försett med foderrör av plast (utom allra längst upp där det sitter ett kort yttre skydds rör av stål utanför plaströret) och filter i de djupaste metrarna. Foderröret av plast gör att inga signaler smyger upp till ytan längs röret, vilket skulle ske med foderrör av stål. Filtret gör att det elektriska fältet som simulatorens alstrar tränger ut i formationen. Måthjulet håller ordning på vid vilket djup simulatorens befinner sig.

The simulator is lowered to the bottom of the 80 m deep borehole, which has a plastic casing, except for the upper few meters where a protective steel casing is installed. There is a plastic filter in the deepest part. The plastic casing will not allow any creeping currents to reach the ground surface, which could have been the case with a steel casing. The slotted plastic filter will allow the electric field generated by the simulator to penetrate into the surrounding ground and reach the surface. The wheel is used to keep track of the simulator position in the borehole.

Simulatoren har nu byggts om av verkstaden vid institutionen för Fasta Tillståndets Fysik, vilken har stor erfarenhet av genomföringar mot vakuum. Nya försök med simulatoren följer i kommande etapper av projektet.

6. SLUTSATSER

Mätningarna med RIAA-förstärkarna var framgångsrika och har gett en god bild av bakgrundsfältet längs två tänkta försökssträckor - Hallandsåstunneln och Förbifart Stockholm. Dessa bakgrundssignaler kan användas när man simulerar mätprocessen helt utan fältmätningar. Man blandar då antagna seismoelektriska signalerna med de uppmätta bakgrundssignalerna.

Längs de två tunnelrören i Hallandsåstunneln finns mycket noggranna loggar över inläckande vattenmängd nedbrutet till tunnelsegmentlängd, således en god bild av vattenföringen i berget. Dessa data blir värdefulla när metoden testas i en senare etapp.

Den allvarligaste störningsformen är transienter, vilka typiskt alstras av elstängsel. Det bör inte vara svårt att få till stånd att sådana stängs av under de korta stunder mätning på en sådan plats utförs. I övrigt innehåller bakgrundsfältet huvudsakligen 16 2/3 Hz från järnvägen och 50 Hz och dess två första övertoner från elnätet. Dessa är huvudsakligen sinusformade och kan undertryckas effektivt med flera av de diskuterade metoderna.

Det visar sig att potentialskillnaden mellan näraliggande elektrodpar kan bli - i dessa sammanhang - betydande, varför processering som bygger på förstärkning genom addition av signaler från elektrodpar kanske inte kommer att ge önskade resultat i ett senare skede. I stället bör man förmodligen använda sig av differentiell mätning över elektrodpar i ett flertal punkter.

Mångkanalutrustningen och simulatormen har inte kunnat användas i fält pga. funktionsfel. Dessa är emellertid nu åtgärdade och förnyade insatser med denna utrustning kommer att ske under etapperna 3 och 4 av projektet.

Seismoelektrikprojektet är uppdelat i flera etapper vilka omfattar litteraturstudier, bakgrundsmätningar, simuleringar, val av seismisk källa, konstruktion av lämplig detekteringsutrustning, fältförsök och demonstrationer.

REFERENSER

- 1 Ulriksen, P., Dahlin, T. och Rydén, N., "Seismoelektrik och Vattenförekomst - Förstudie", BeFo-rapport 112, 2011, ISSN 1104- 1773, ISRN BEFO-R-112-SE
- 2 <http://www.livescience.com/26685-shaker-truck-new-zealand-trip.html> (2013)
- 3 Omar A. Alahmady, O., A., "Analysis of Swept Impact Sources for Seismic Acquisition" Report No.: GPH 2/10 BSc. (Geophysics) Curtin (2010)
<http://www.geophy.curtin.edu.au/EGPPUBS/Docs/2010-002485-AWA-A.PDF>

BIBLIOGRAFI (Referenslistan till Etapp 1, Litteraturstudien)

BEAMISH, D. and PEART, R., J., "Electrokinetic geophysics – a review", Terra Nova 10, pp48-55, **1998**

BIOT, M., A., "Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range", Journ Acoust Soc Am, Vol 28, Nr 2, March **1956**, pp168-178

BIOT, M., A., "Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher frequency range", Journ Acoust Soc Am, Vol 28, Nr 2, March **1956**, pp179-191

BUTLER, K., E. and RUSSEL, R., D., "Subtraction of powerline harmonics from geophysical records", Geophysics, Vol 58, No 6, (June **1993**) pp 898-903

BUTLER, K., E., RUSSEL, R., IC, A., W., „Measurement of the seismoelectric response from a shallow boundary“, Geophysics, Vol 61, No 5 (September-October **1996**), pp 1769-1778

CHANDLER, R., "Transient streaming potential measurements on fluidsaturated porous structures: An experimental verification of Biot's slow wave in the quasi-static limit", J. Acoust.Soc.Am. 70(1), July 1981

CLARKE, R.,H., MILLAR, J., W., A. and KNAGGS, D., "Electrokinetic soundings at Cape Hill Brewery, Birmingham UK, Groundflow Ltd, undated

DUKHIN, A., S., GOETZ, P., J. and TOMMES, M., "Seismoelectric effect: A non-isochoric streaming current. 1. Experiment", Journ Colloid and Interface Science 345, **2010**, pp547-553

FRENKEL, J., "On the Thoery of Seismic and Seismoelectric Phenomena in a Moist Soil", Journ. Engineering Mech. September **2005**, pp 879-887

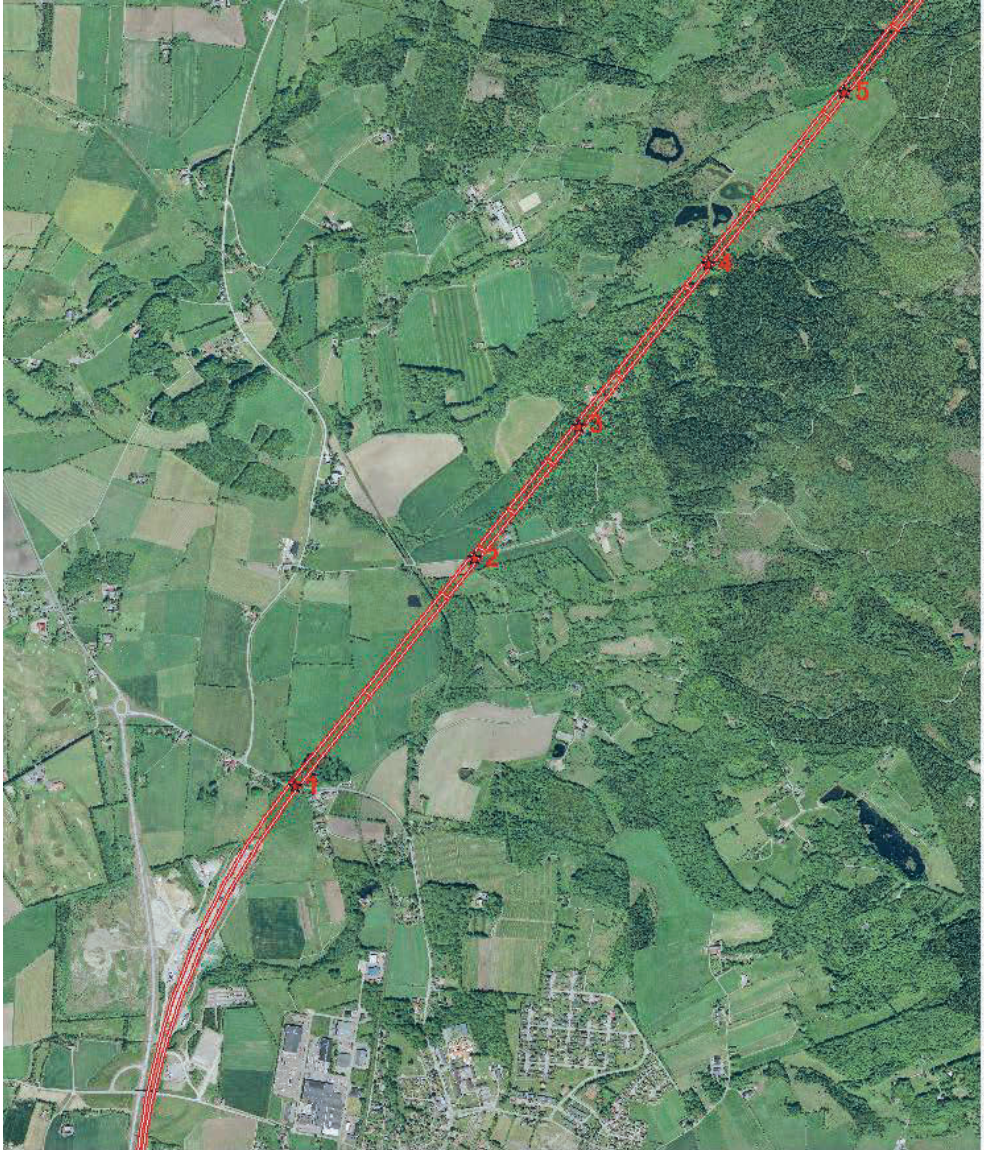
FOURIE, F., D., "Application of Seismoelectric Techniques to Geohydrological Investigations in Karoo Rocks", Dr Thesis, University of the Free State, Bloemfontein, Sydafrika, November **2003**

GEERITS, T., W., "Acoustic wave propagation through porous media revisited", Journ Acoust. Soc. Am., 100 (5), November **1996**

- GHARIBI, M., BENTLEY, L., B. and STEWART, R., R., “Seismoelectric monitoring of producing oilfields: A review”, CREWES Research Report, Vol 15, **2003**
- HAINES, S.,S., “Seismoelectric imaging of shallow targets”, Dr Thesis, Stanford University, December **2004**, 179p.
- KRÖGER, B., YARAMANCHI, U. and KEMNA, A., “Modelling of seismoelectric Effects”, Power-point presentation
- KULESSA, B., MURRAY, T. and RIPPIN, D., “Active sesmoelectric exploration of glaciers”, Geophysical Research Letters, Vol 33, L07503, **2006**
- LIEBERMANN, L., “Extremely Low-Frequency Electromagnetic Waves. I. Reception from Lightning”, Journ Appl Physics, Vol 27, Nr 12, pp1473-1476, **1956**
- MIKHAILOV, O., V., QUEEN, J. and TOKSÖZ, N., “Using borehole electroseismic measurements to detect and characterize fractured (permeable) zones”, Geophysiscs, Vol 65, No4, (July-August **2000**), pp 1098-1112
- MILLAR, J.,W., A. and CLARKE, R.,H., “Elektrokinetic Techniques for Measurement of Rock Permeability”, <http://groundflow.com/frames/artpaperfrm.html>
- PRIDE, S., R. and HAARTSEN, M., W., “Electroseismic wave properties”, Journ Acoust Soc Am, 100 (3) September **1996**, pp1301-1315
- RUSSEL, R.,D., BUTLER, K.,E., KEPIC, A.,W. and MAXWELL, M., “Seismoelectric exploration”, EdgeNet, November **1997**, www.edge-online.org
- SALLAS, J., J., “How do hydraulic vibrators work? A look inside the black box”, Geophysical Prospecting, **2010**, 58, pp 3-17
- SCHAKEL, M. and SMEULDERS, D., “Seismoelectric reflection and transmission at a fluid/porous-medium interface”, Journ Acoust. SOc. Am, 127 (1), January **2010**
- SCHAKEL, M., D., SMEULDERS, D., M., J., SLOB, E.,C. and HELLER, H., K., J., ”Seismoelectric interface response: Experimental results and forward model”, Geophysics, Vol 76, No 4 (July-August **2011**), pp 29-36
- THOMPSON, A., H. and GIST, G., A., “Geophysical applications of electrokinetic conversion”, pp 1169-1173, The Leading Edge, December **1993**
- TITOV, K., ILYIN, Y., KONOSAVSKI, P. and Levitsky, A., ”Elektrokinetic spontaneous polarization in porous media: petrophysics and numerical modelling”, Journal of Hydrology 267, **2002**, pp207-216
- ZHU, Z. and TOKSÖZ, N., “”Crosshole seismoelectric measurements in borehole models with fractures”, Geophysics, Vol 68, No 5, (September-October **2003**), pp1519-1524

APPENDIX 1

Bakgrundsmätningar på Hallandsås längs tunnelsträckningen



**Punkter 1-5 för mätning av bakgrundsfält. S påslaget i Förslöv nere till vänster.
Grafik P-G Alm**



**Punkter 5 - 19 för mätning av bakgrundsfält. N påslaget i Båstad uppe till höger.
Grafik P-G Alm**

| ID | East | North | System | Data |
|-----------|-------------|--------------|----------------|---------------------|
| 1 | 1314833.65 | 6252586.56 | "RT90 2.5 g V" | RIHS1 |
| 2 | 1315512.61 | 6253446.66 | "RT90 2.5 g V" | RIHS2 ₂ |
| 3 | 1315909.17 | 6253948.26 | "RT90 2.5 g V" | CRIHS3 ₃ |
| 4 | 1316392.88 | 6254559.47 | "RT90 2.5 g V" | Ej mätt |
| 5 | 1316910.85 | 6255207.21 | "RT90 2.5 g V" | CRIHS5 |
| 6 | 1317358.03 | 6255777.32 | "RT90 2.5 g V" | CRIHS6 |
| 7 | 1317644.22 | 6256133.53 | "RT90 2.5 g V" | Ej mätt |
| 8 | 1317937.64 | 6256507.26 | "RT90 2.5 g V" | CRIHS8 |
| 9 | 1317998.16 | 6256582.62 | "RT90 2.5 g V" | Ej mätt |
| 10 | 1318074.27 | 6256677.39 | "RT90 2.5 g V" | Ej mätt |
| 11 | 1318368.46 | 6257050.35 | "RT90 2.5 g V" | Ej mätt |
| 12 | 1318521.46 | 6257243.31 | "RT90 2.5 g V" | RIHS12 |
| 13 | 1318658.08 | 6257416.08 | "RT90 2.5 g V" | Ej mätt |
| 14 | 1318753.99 | 6257540.53 | "RT90 2.5 g V" | Ej mätt |
| 15 | 1318911.92 | 6257738.06 | "RT90 2.5 g V" | CRIHS15 |
| 16 | 1319218.29 | 6258123.57 | "RT90 2.5 g V" | RIHS16 |
| 17 | 1319571.09 | 6258573.04 | "RT90 2.5 g V" | CRIHS17 |
| 18 | 1319697.82 | 6258713.09 | "RT90 2.5 g V" | Ej mätt |
| 19 | 1319866.41 | 6258876.75 | "RT90 2.5 g V" | CRIHS19 |

Anm.

CRIHSX står för Konverterade data(C), insamlade med RIAA-systemet, HallandsåS, X mätpunkt. "Konverterade" avser att vissa datafiler inte kunde läsas direkt av MATLAB. Därför lästes de först in i programmet AUDACITY och sparades i ett format som därefter kunde läsas av MATLAB.

Mätdatapresentation

För varje mätpunkt redovisas sex diagram. De är uppifrån och ner

1. Förstoring av de samtidigt uppmätta signaler från kanal A och B visande 1000 samples. Signalen är mätt mellan tre elektroder på linje, med den i mitt som gemensam jord. Av det skälet kommer signalerna att ha olika tecken. X-axeln visar samples (mätvärden). Antalet digitaliserade mätvärden i varje kanal är 5513 per sekund. 1000 samples motsvarar alltså c:a 0.2 sekunder. Den visade amplituden är den som digitaliserats och måste således korrigeras för att den verkliga fältstyrkan skall erhållas. Detta görs nedan för varje mätpunkt.
2. Summering av de båda kanalerna A och B. Är de precis lika blir summan noll.
3. Hela datainspelningen för Signal A
4. Ett linjärt spektrum för hela signalen visad i ovanstående diagram. Vanligen framträder 50 Hz som en dominerande topp.
5. Samma spektrum som ovanstående men med logaritmisk skala, vilket framhäver svaga frekvenser och dämpar starka.
6. Spektrogram längs hela signalen. Ett spektrogram visar spektrumets variation med tiden. Det har frekvens på y-axeln och tid på x-axeln.

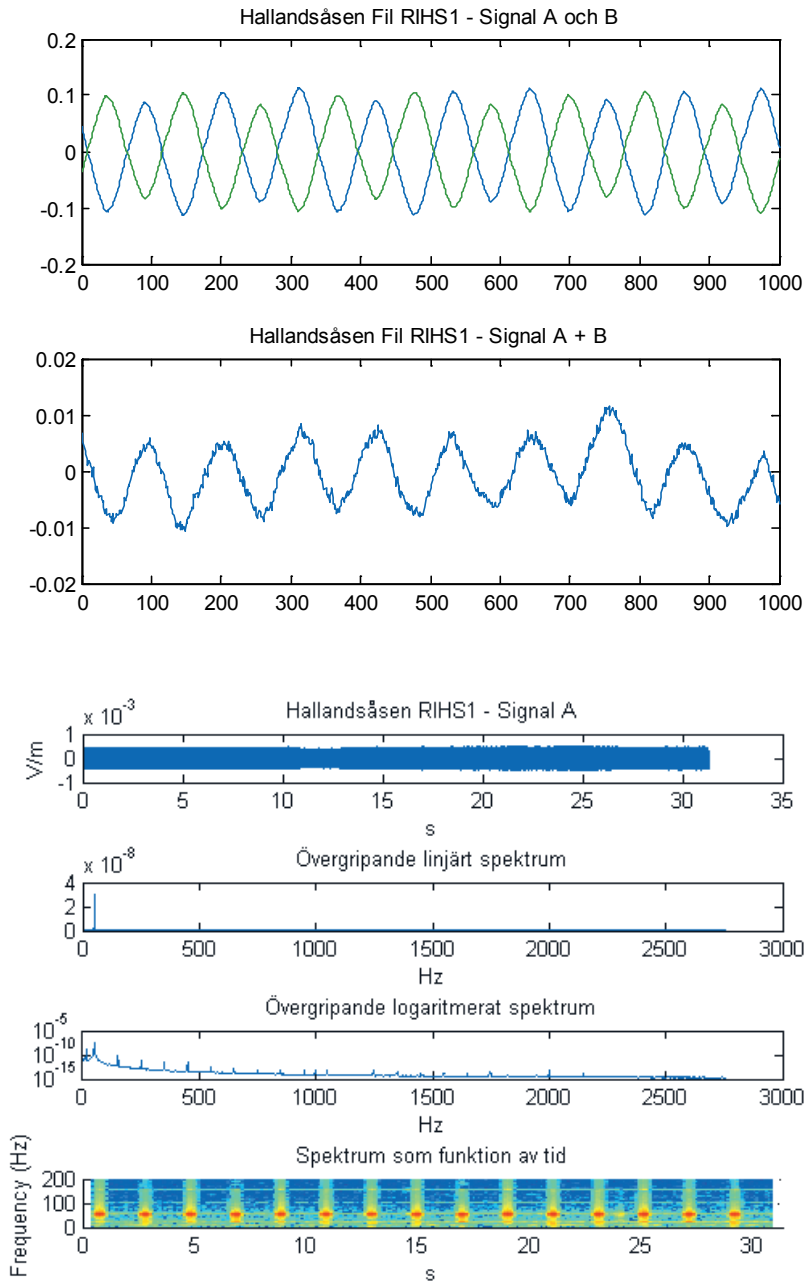
Den återkommande bredbandiga störningen med en periodtid på c:a 2 s har ännu ingen säker förklaring. Signalerna från mätpunkt 8 innehåller transienter som antas komma från elstängsel. I dessa signaler är den periodiska störningen emellertid inte särskilt framträdande.

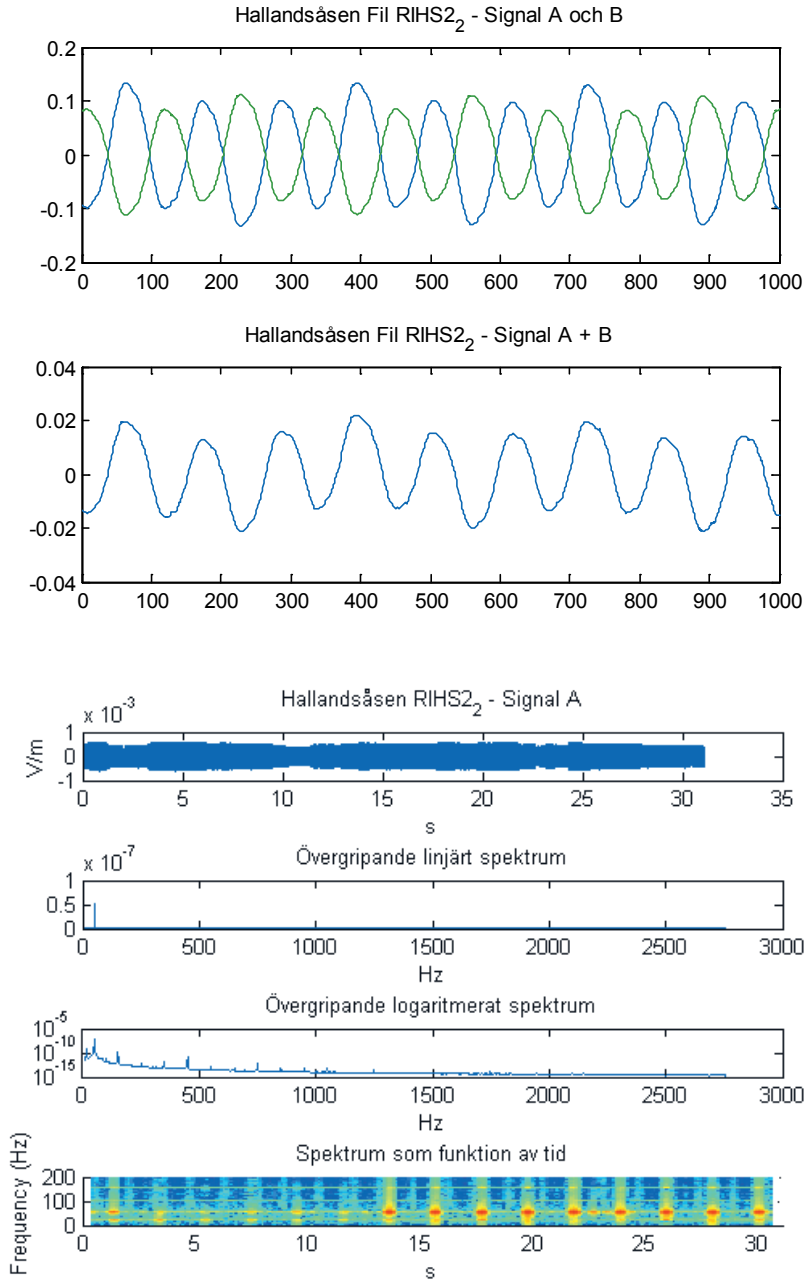
Kalibrering av mätdata

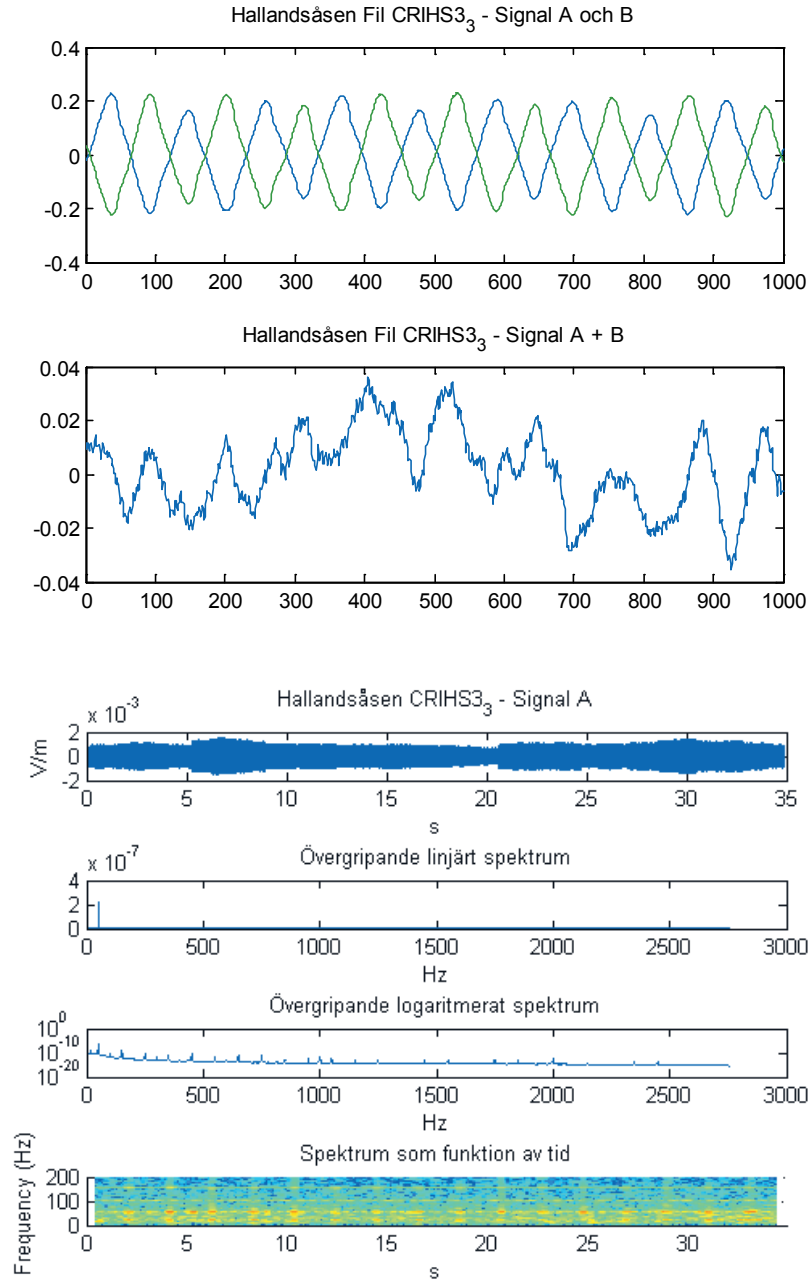
| ID | Dämpning | Antal först. | Förstärkn. | Digit.nivå (mV) | Verklig fältstyrka ($\mu\text{V/m}$) |
|-----------|-----------------|---------------------|-------------------|------------------------|--|
| 1 | (500,500) | 1 | 260 | 200 | 770 |
| 2.2 | (900,900) | 1 | 468 | 200 | 430 |
| 3.3 | (030,030) | 2 | 8100 | 420 | 52 |
| 5 | (050,050) | 2 | 13500 | 450 | 33 |
| 6 | (015,015) | 2 | 4050 | 360 | 90 |
| 8 | (030,030) | 2 | 8100 | 200 | 25 |
| 12 | (002,002) | 2 | 540 | 130 | 240 |
| 15 | (002,002) | 2 | 540 | 500 | 925 |
| 16 | (002,002) | 2 | 540 | 500 | 925 |
| 17 | (300,300) | 1 | 156 | 600 | 3840 |
| 19 | (005,005) | 2 | 1350 | 340 | 620 |

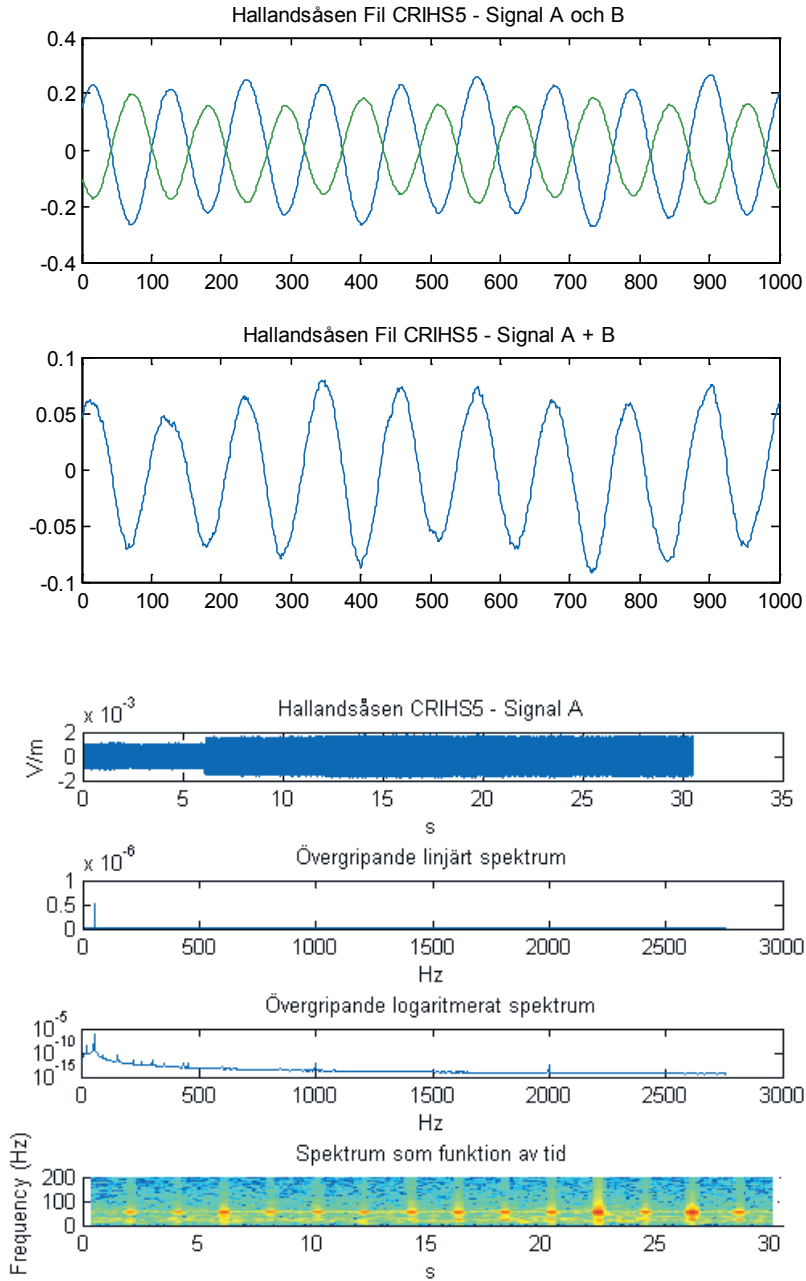
Anm.

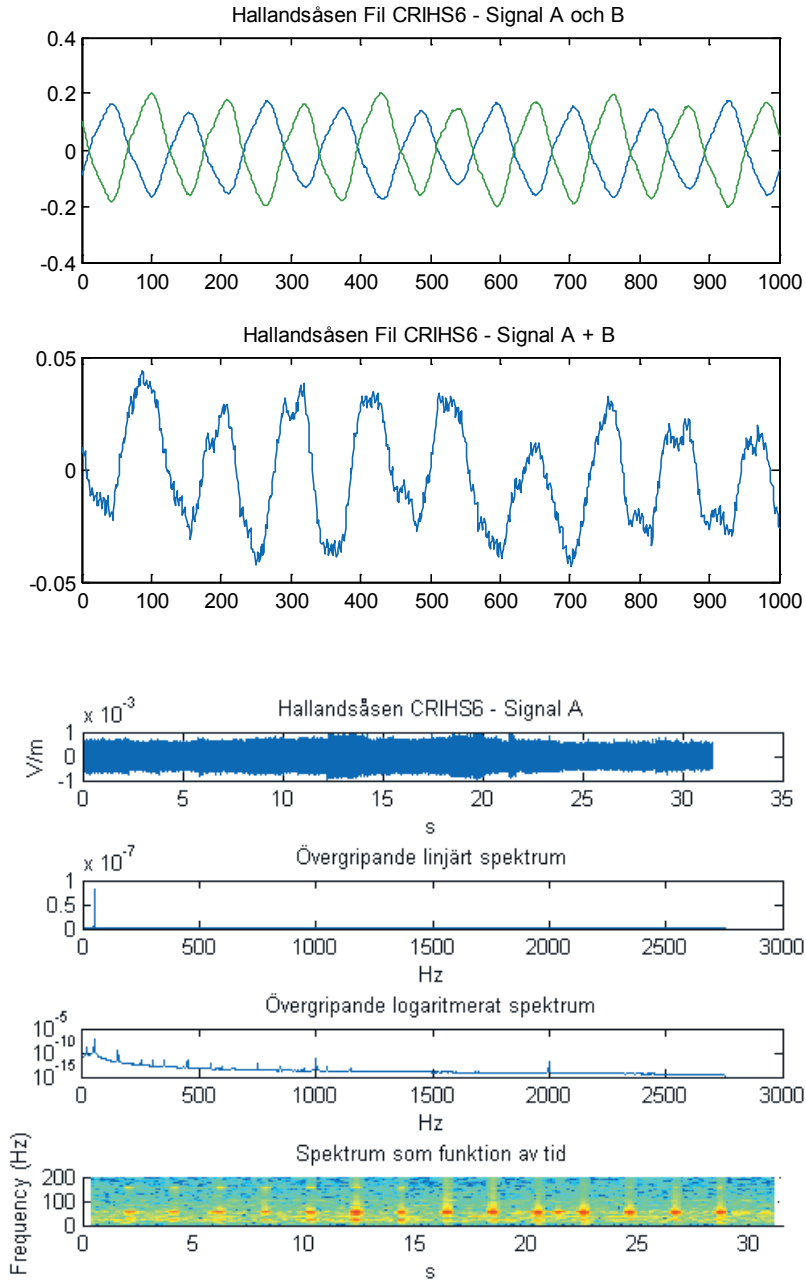
Dämpningsvärdena inom parentes avser kanal A resp kanal B. Därför har de alltid samma värde. Verklig fältstyrka är framräknad som digitaliserad nivå / förstärkning. Förstärkningen är framräknad som $520^N \times$ dämpningen/1000, där N är antalet seriekopplade RIAA-förstärkare - N = 1 eller 2.

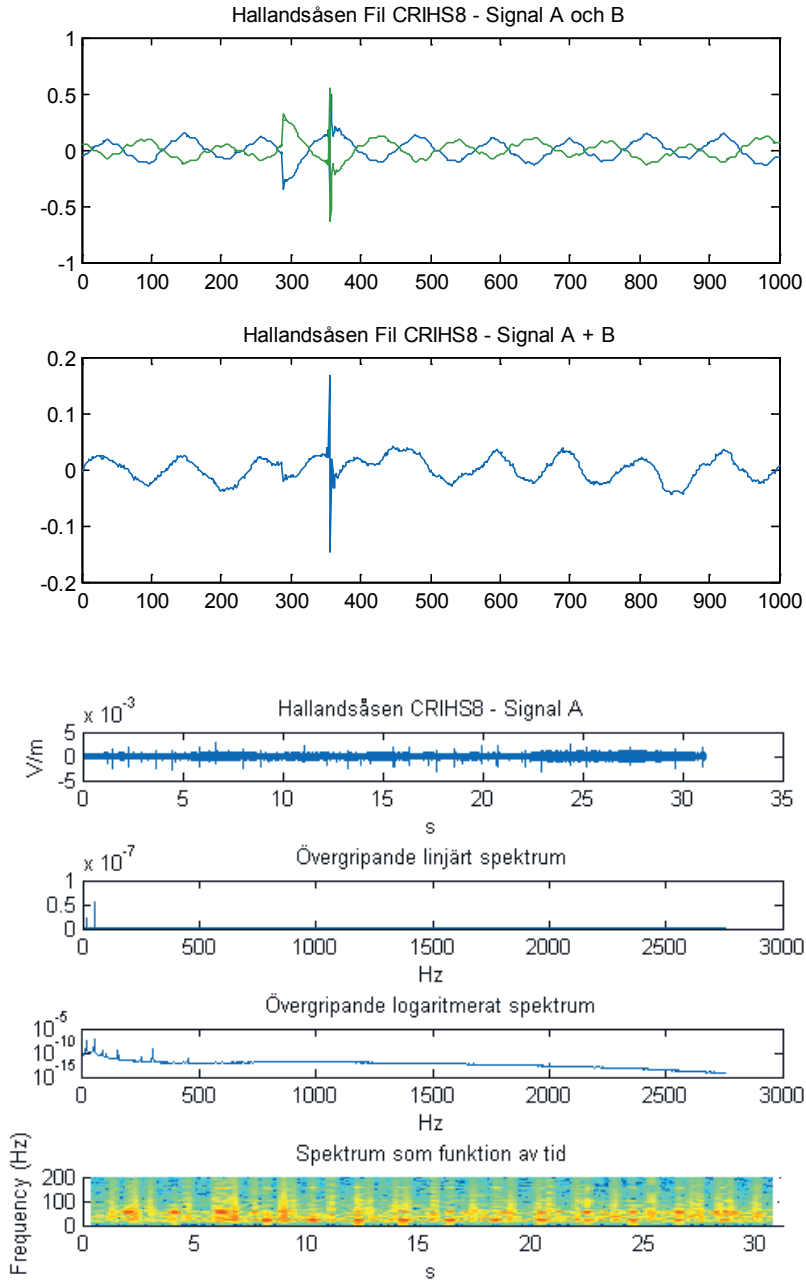


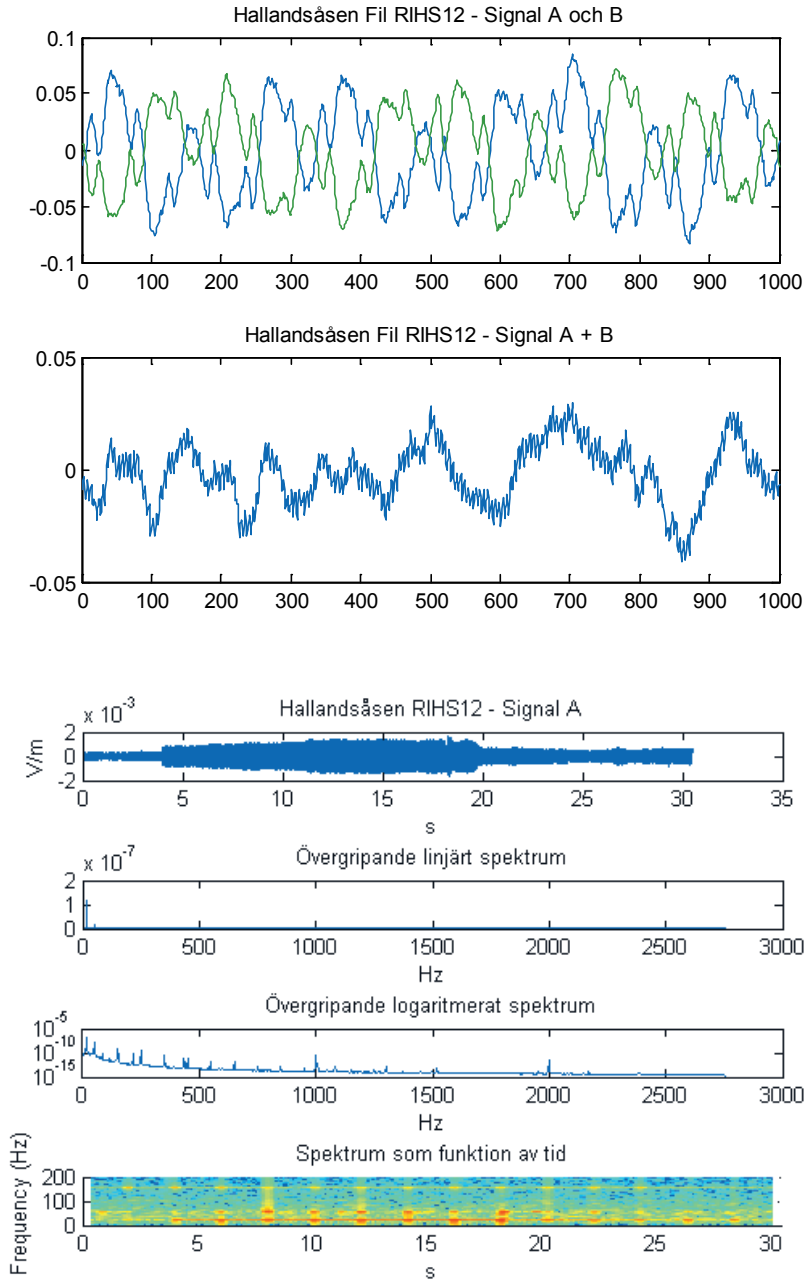


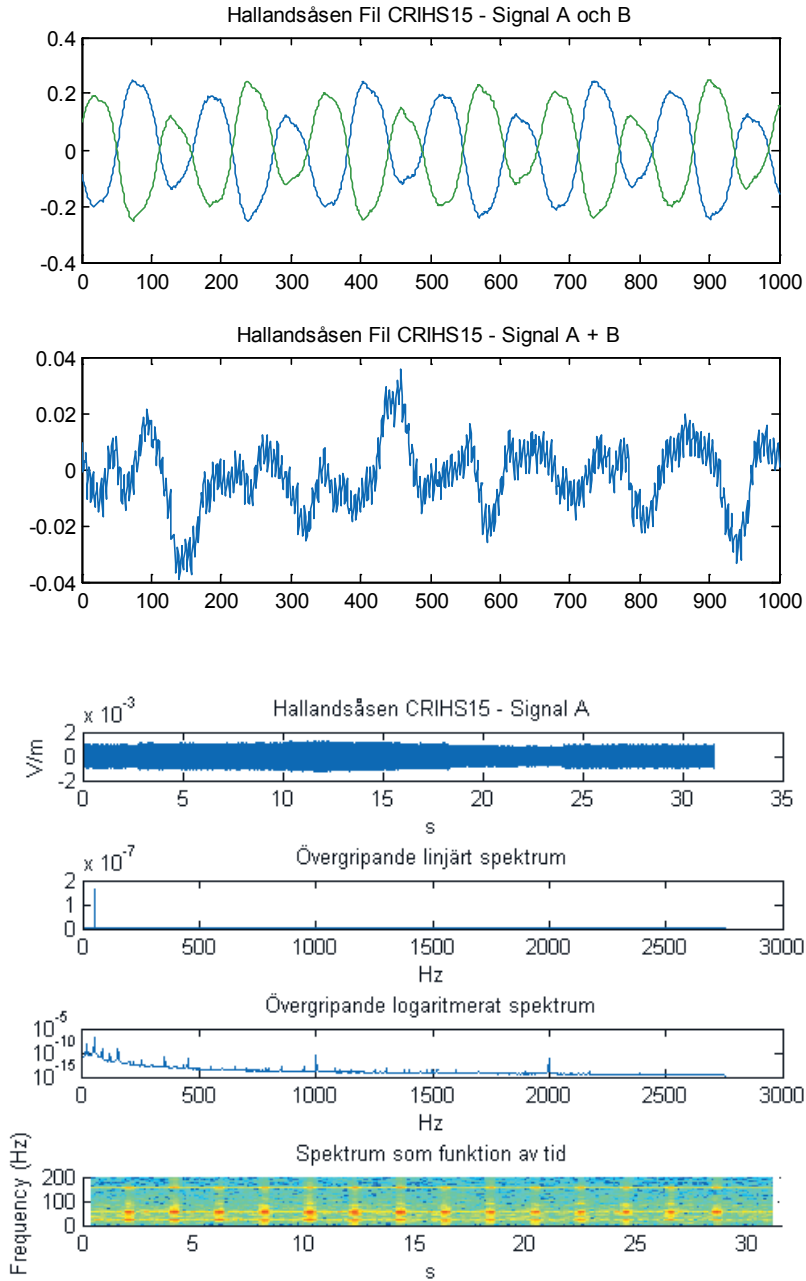


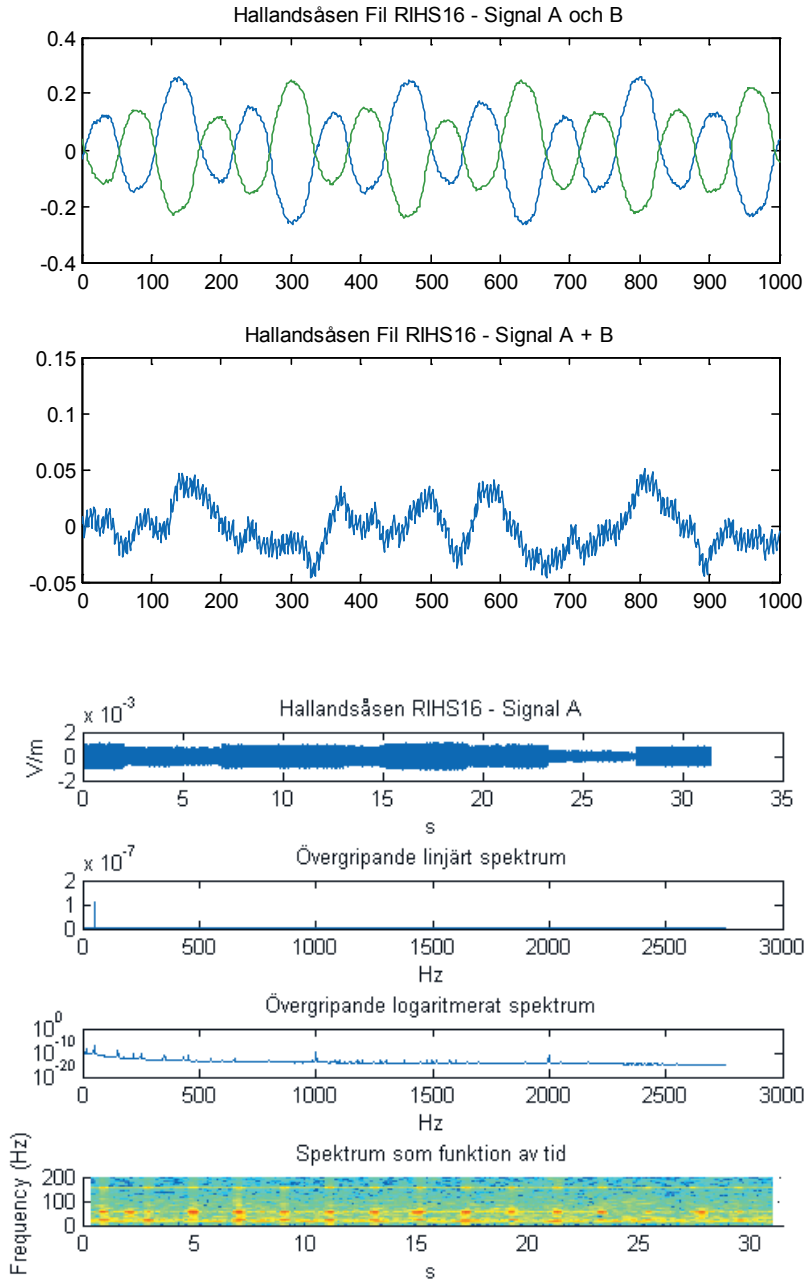


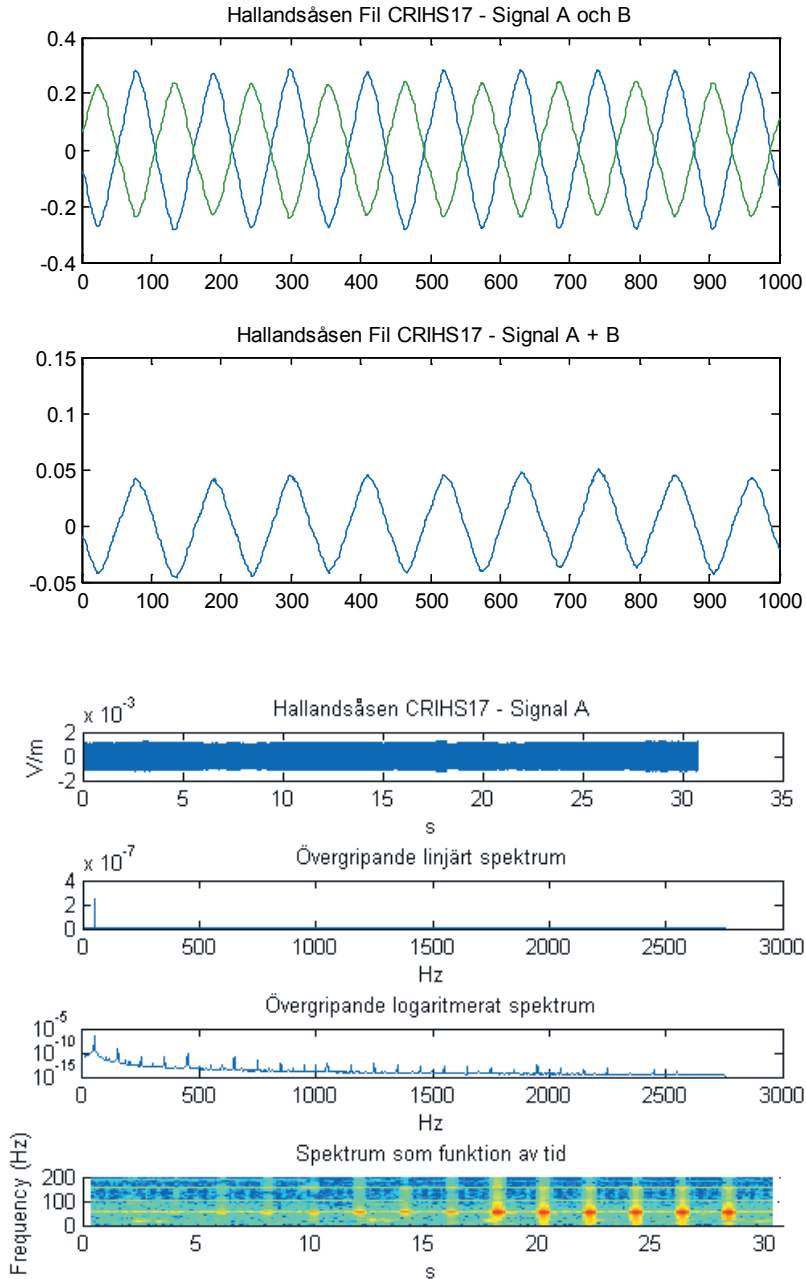


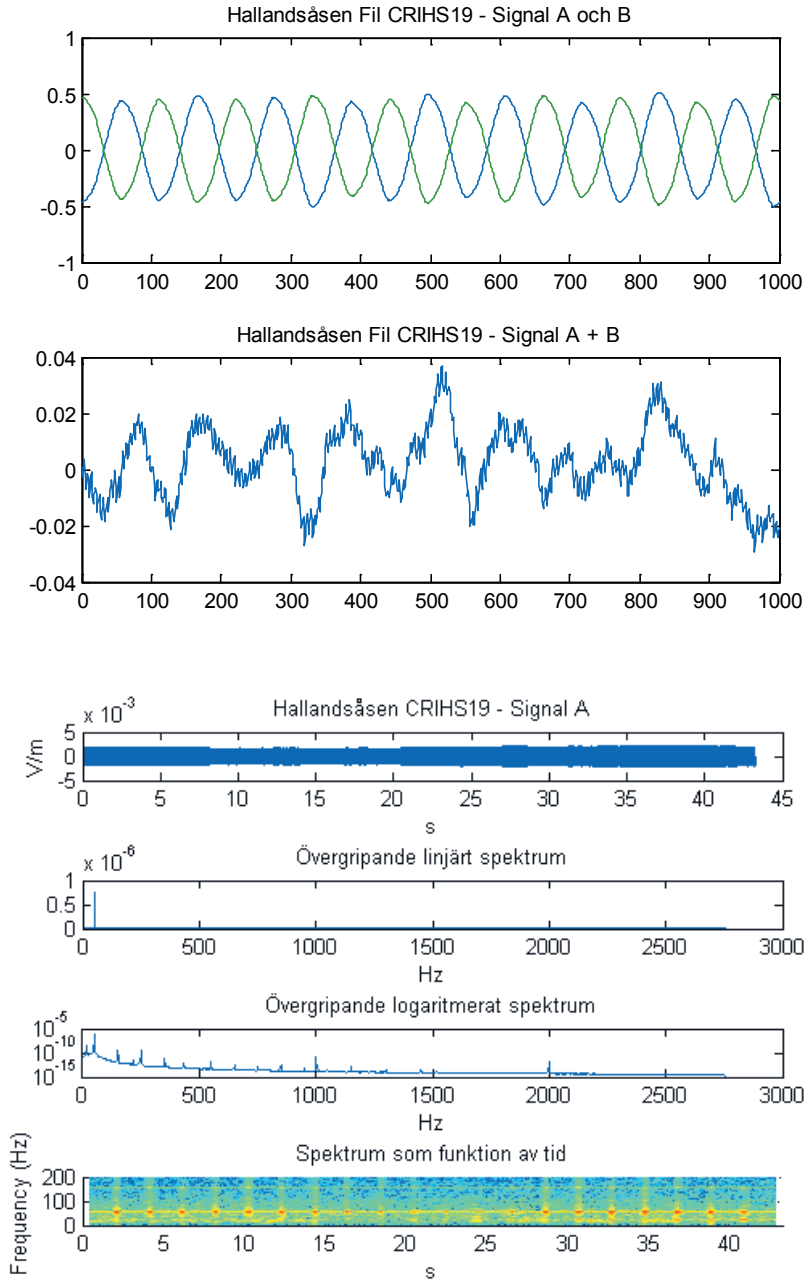






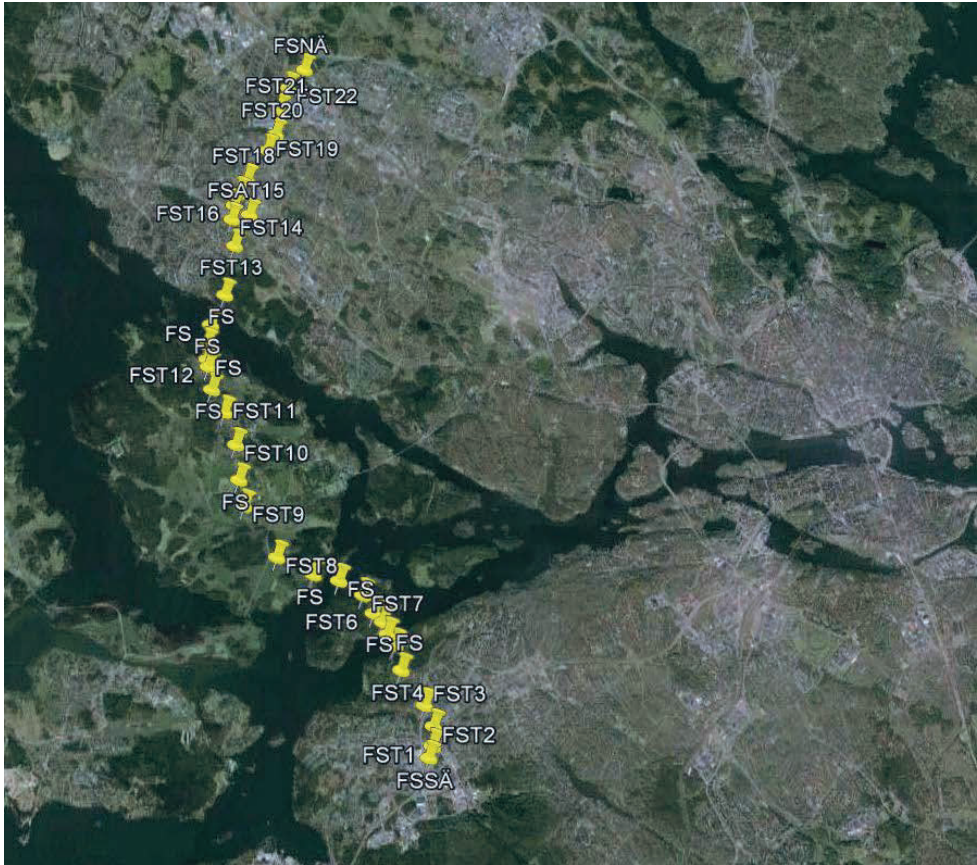






APPENDIX 2

Mätpunkter längs sträckningen av Förbifart Stockholm



| Namn | Koordinater | Plats | Data |
|--------------|--|-------------------------------|----------------------|
| | Marktyp | | |
| FSSÄ | 59°16'18.41 17°54'41.52"O Södra ändpunkten | Skärholmen Ekholmsvägen / E4 | Ej mätt |
| FST1 | 59°16'25.32"N 17°54'46.23"O Bergknalle (Kraftledning) | Skärholmen Vårbergsvägen | CRIFS1 |
| FST2 | 59°16'37.26"N 17°54'48.52"O Gräsmatta / gångväg | Skärholmen Smistakopplet | CRIFS2 |
| FST3 | 59°16'50.22"N 17°54'38.34"O Gräsmatta / gångväg | Skärholmen S Björksättravägen | CRIFS3 |
| FST4 | 59°17'12.10"N 17°54'11.38"O Gräsmatta / gångväg | N Ålsättravägen | CRIFS4 |
| FST5 | 59°17'27.41"N 17°54'4.44"O Skog på berg | Sätra Berg NV Vattentorn | CRIFS5 |
| FST6 | 59°17'47.57"N 17°53'39.41"O Skog på berg | Kungshatt | Ej mätt |
| FST7 | 59°17'59.18"N 17°53'27.46"O Skog på berg | Kungshatt | Ej mätt |
| FST8 | 59°18'25.00"N 17°51'42.78"O Åkermark | Lövön Ö Ekerövägen | CRIFS8 |
| FST9 | 59°18'57.96"N 17°51'3.33"O Gräs / Åker | Lövön S Golfbana | CRIFS910 |
| FST10 | 59°19'37.04"N 17°50'54.58"O Åkermark | Lövön Ö Rörbyvägen | Ej mätt |
| FST11 | 59°19'58.09"N 17°50'40.79"O Åkermark | Lövön V Lambaruddsvägen | CRIFS11 ₂ |
| FST12 | 59° 20'27.75"N 17°50'21.53"O Åkermark / skogsbryn | Lövön S Lambaruddsvägen | CRIFS12 |
| FST13 | 59°21'46.32"N 17°50'56.51"O Gräsmatta / gångväg | Hässelby V Gulddragargränd | CRIFS13 |
| FST14 | 59°22'3.88"N 17°50'53.38"O Skog längs järnväg | Hässelby Ö Viveka Trolles gr. | CRIFS14 |
| FST15 | 59°22'6.49"N 17°51'15.97"O | Hässelby N Lövestavägen | Ej mätt |

| | | | | |
|--------------|--|---------------|-----------------------------------|---------|
| | Gräsmatta / gångväg | | | |
| FST16 | 59°22'13.06"N Gräsmatta / gångväg | 17°50'56.57"O | Hässelby N Liljeörnsgratan | CRIFS16 |
| FST17 | 59°22'21.08"N Stig / buskage | 17°51'3.34"O | Hässelby Vinstagårdsskolan | CRIFS17 |
| FST18 | 59°22'29.78"N Gatukorsning | 17°51'13.60"O | Hässelby Plaisirv. / Packstensgr. | CRIFS18 |
| FST19 | 59°22'49.12"N Gatukorsning | 17°51'40.39"O | Hässelby Kärrgränd | CRIFS19 |
| FST20 | 59°22'59.63"N Gräsmatta / gångväg | 17°51'51.03"O | Hässelby N Sörgårdsvägen | CRIFS20 |
| FST21 | 59°23'16.24"N Asfalterat industriområde | 17°51'56.87"O | Hässelby Fagerstagatan | CRIFS21 |
| FST22 | 59°23'31.01"N Asfalterat industriområde | 17°52'8.15"O | Hässelby Avestagatan | CRIFS22 |
| FSNÄ | 59°23'43.13"N Norra ändpunkten | 17°52'29.38"O | Hässelby Väg 275 | Ej mätt |

Anm.

CRIFSX står för Konverterade data(C), insamlade med RIAA-systemet, Förb. Sthlm., X mätpunkt. "Konverterade" avser att vissa datafiler inte kunde läsas direkt av MATLAB. Därför lästes de först in i programmet AUDACITY och sparades i ett format som därefter kunde läsas av MATLAB.

Mätdatapresentation

För varje mätpunkt redovisas sex diagram. De är uppifrån och ner

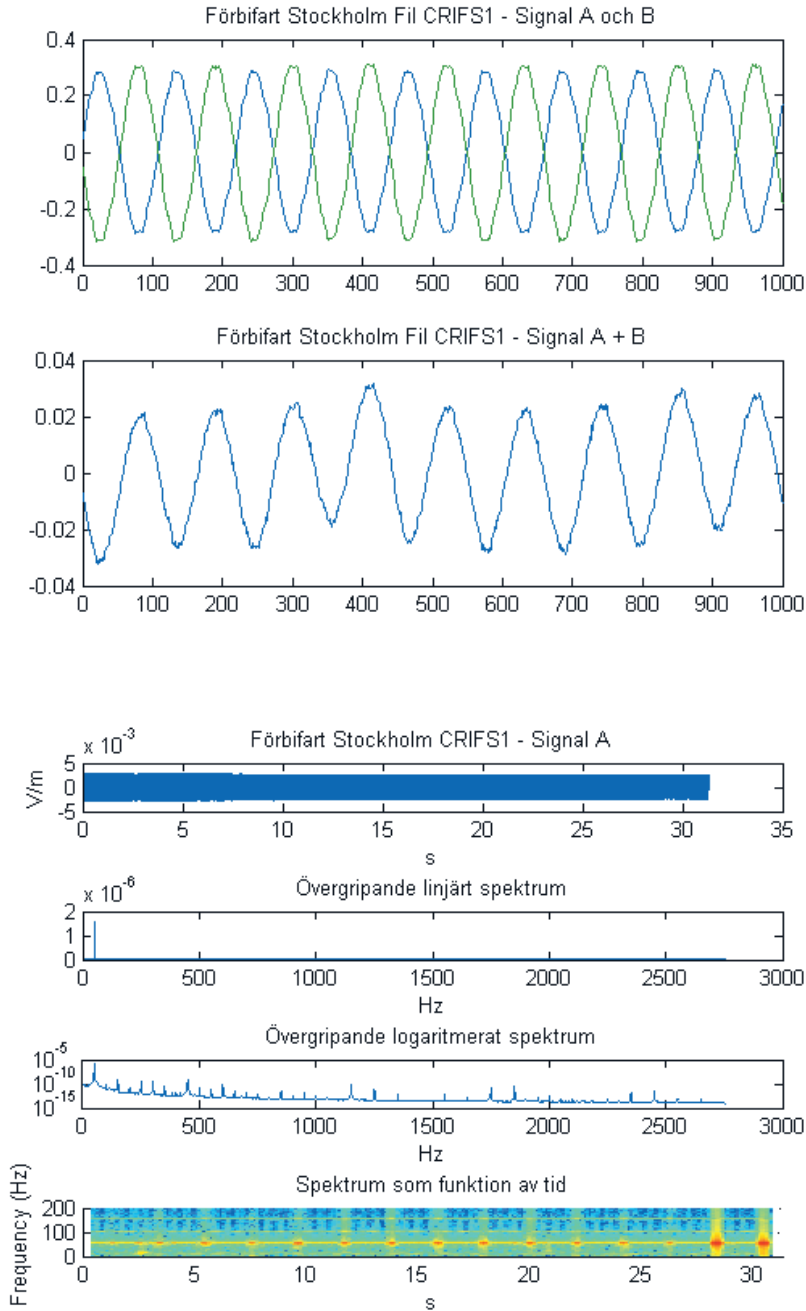
1. Förstoring av de samtidigt uppmätta signaler från kanal A och B visande 1000 samples. Signalen är mätt mellan tre elektroder på linje, med den i mitt som gemensam jord. Av det skälet kommer signalerna att ha olika tecken. X-axeln visar samples (mätvärden). Antalet digitaliserade mätvärden i varje kanal är 5513 per sekund. 1000 samples motsvarar alltså c:a 0.2 sekunder. Den visade amplituden är den som digitaliserats och måste således korrigeras för att den verkliga fältstyrkan skall erhållas. Detta görs nedan för varje mätpunkt.
2. Summering av de båda kanalerna A och B. Är de precis lika blir summan noll.
3. Hela datainspelningen för Signal A
4. Ett linjärt spektrum för hela signalen visad i ovanstående diagram. Vanligen framträder 50 Hz som en dominerande topp.
5. Samma spektrum som ovanstående men med logaritmisk skala, vilket framhäver svaga frekvenser och dämpar starka.
6. Spektrogram längs hela signalen. Ett spektrogram visar spektrumets variation med tiden. Det har frekvens på y-axeln och tid på x-axeln.

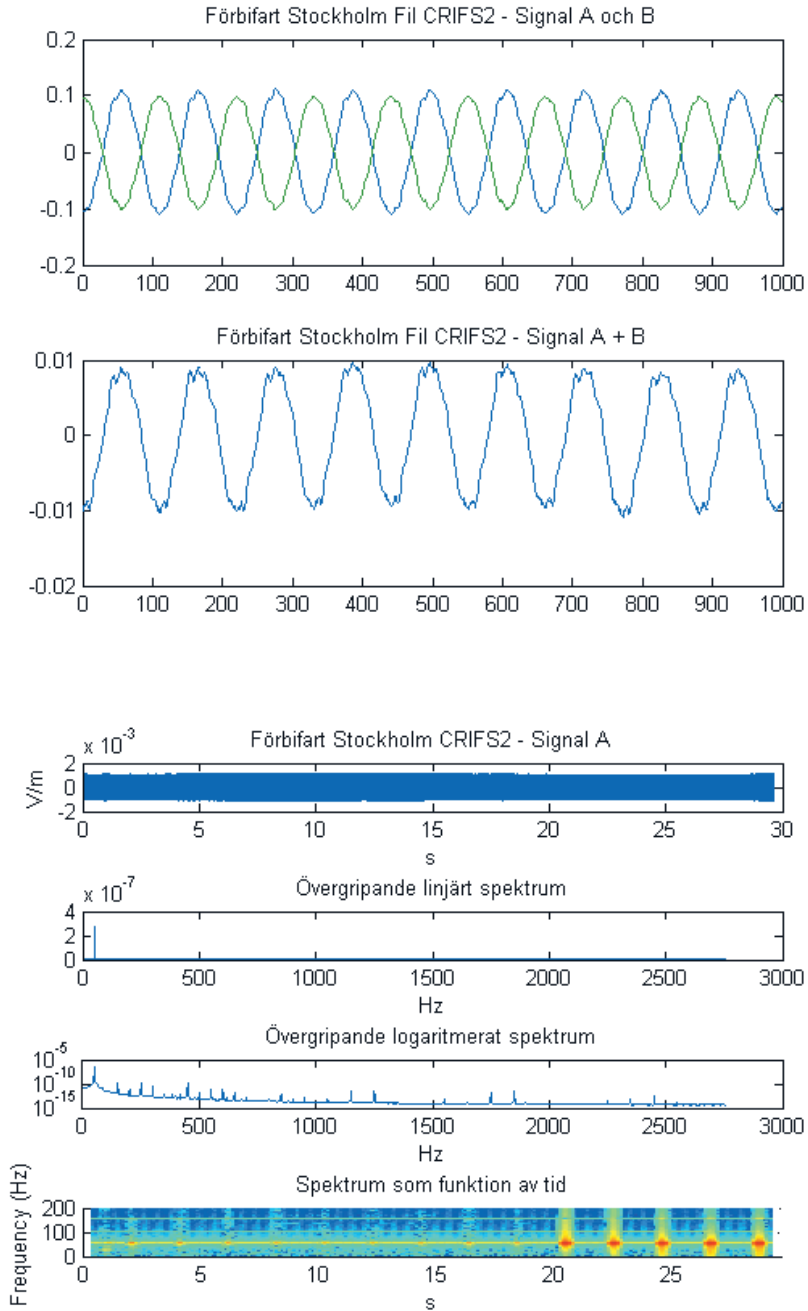
Kalibrering av mätdata

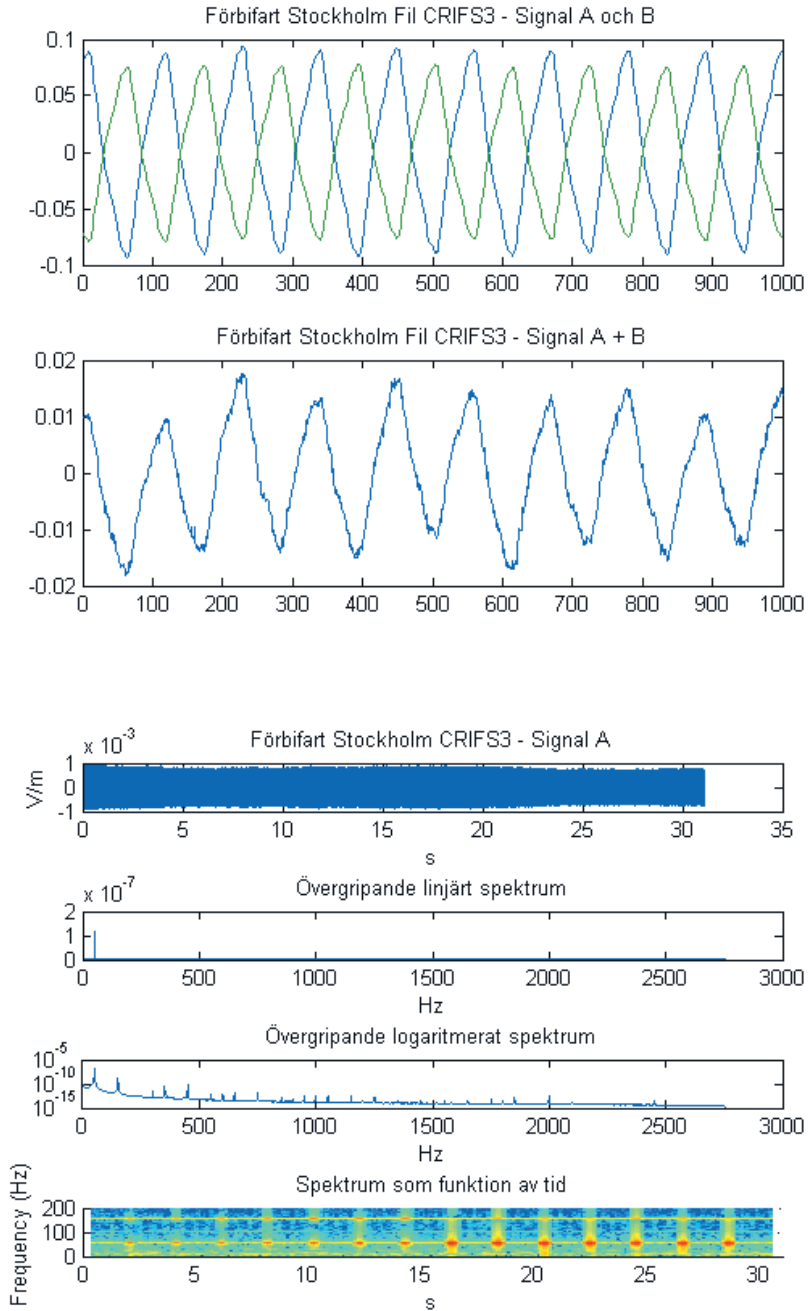
| ID | Dämpning | Antal först. | Förstärkn. | Digit.nivå (mV) | Verklig fältstyrka (µV/m) |
|-----------|-----------------|---------------------|-------------------|------------------------|----------------------------------|
| 1 | (200,200) | 1 | 104 | 600 | 5770 |
| 2 | (400,400) | 1 | 208 | 200 | 960 |
| 3 | (700,700) | 1 | 364 | 100 | 274 |
| 4 | (900,900) | 1 | 468 | 100 | 213 |
| 5 | (020,020) | 2 | 5400 | 60 | 11 |
| 8 | (500,500) | 1 | 260 | 240 | 923 |
| 910 | (020,020) | 2 | 5400 | 600 | 111 |
| 11-2 | (800,800) | 1 | 416 | 340 | 817 |
| 12 | (030,030) | 2 | 8100 | 400 | 49 |
| 13 | (400,400) | 1 | 208 | 320 | 1540 |
| 14 | (400,400) | 1 | 208 | 400 | 1920 |
| 16 | (400,400) | 1 | 208 | 620 | 2980 |
| 17 | (005,005) | 2 | 1350 | 260 | 192 |
| 18 | (005,005) | 2 | 1350 | 800 | 592 |
| 19 | (400,400) | 1 | 208 | 740 | 3560 |
| 20 | (900,900) | 1 | 468 | 260 | 555 |
| 21 | (005,005) | 2 | 1350 | 760 | 563 |
| 22 | (200,200) | 1 | 104 | 400 | 3850 |

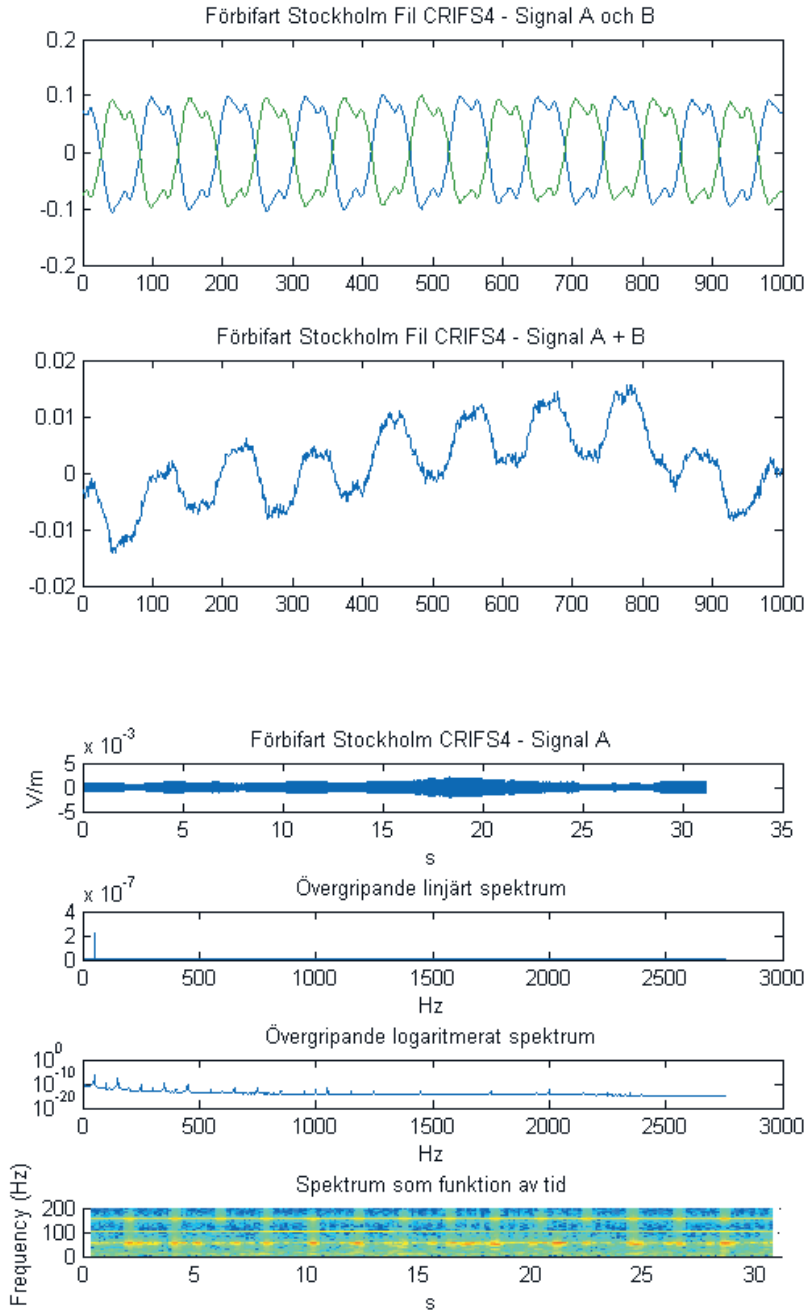
Anm.

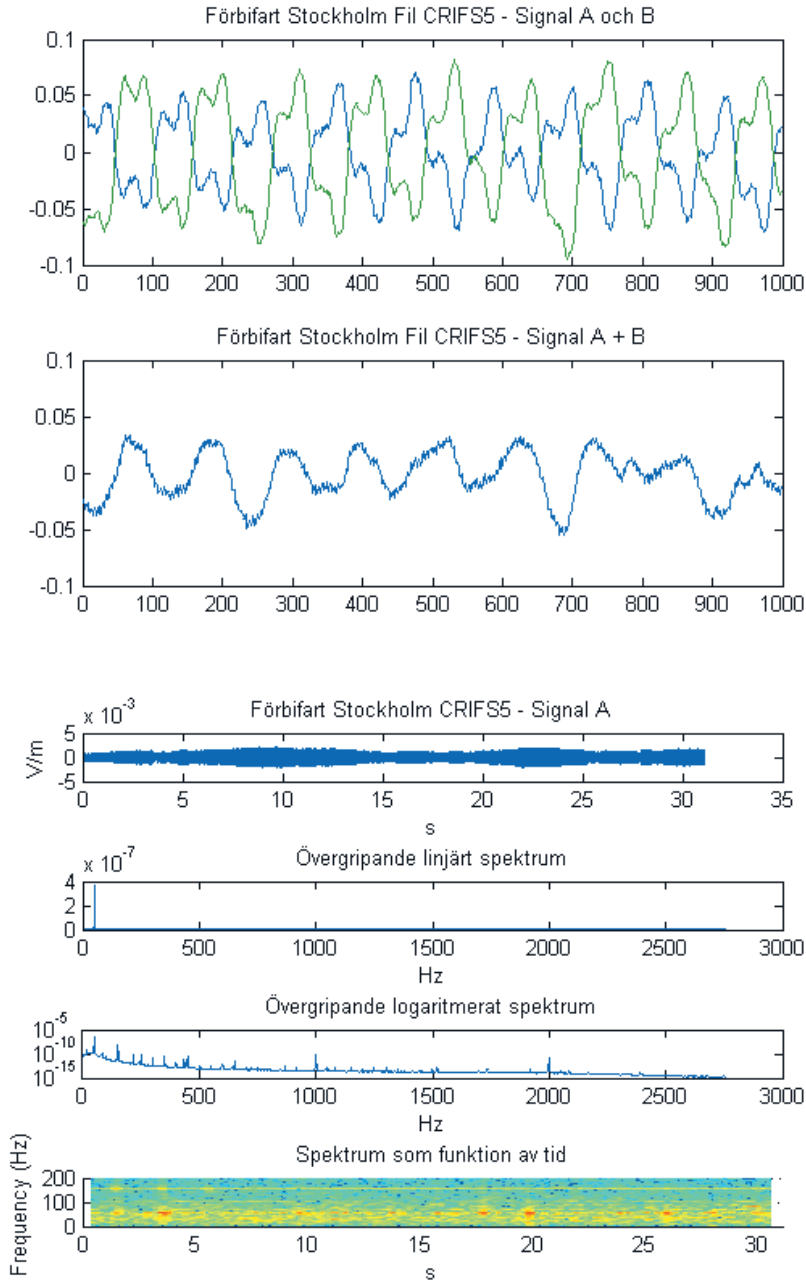
Dämpningsvärdena inom parentes avser kanal A resp kanal B. Därför har de alltid samma värde. Verklig fältstyrka är framräknad som digitaliserad nivå / förstärkning. Förstärkningen är framräknad som $520^N \times$ dämpningen/1000, där N är antalet seriekopplade RIAA-förstärkare - N = 1 eller 2.

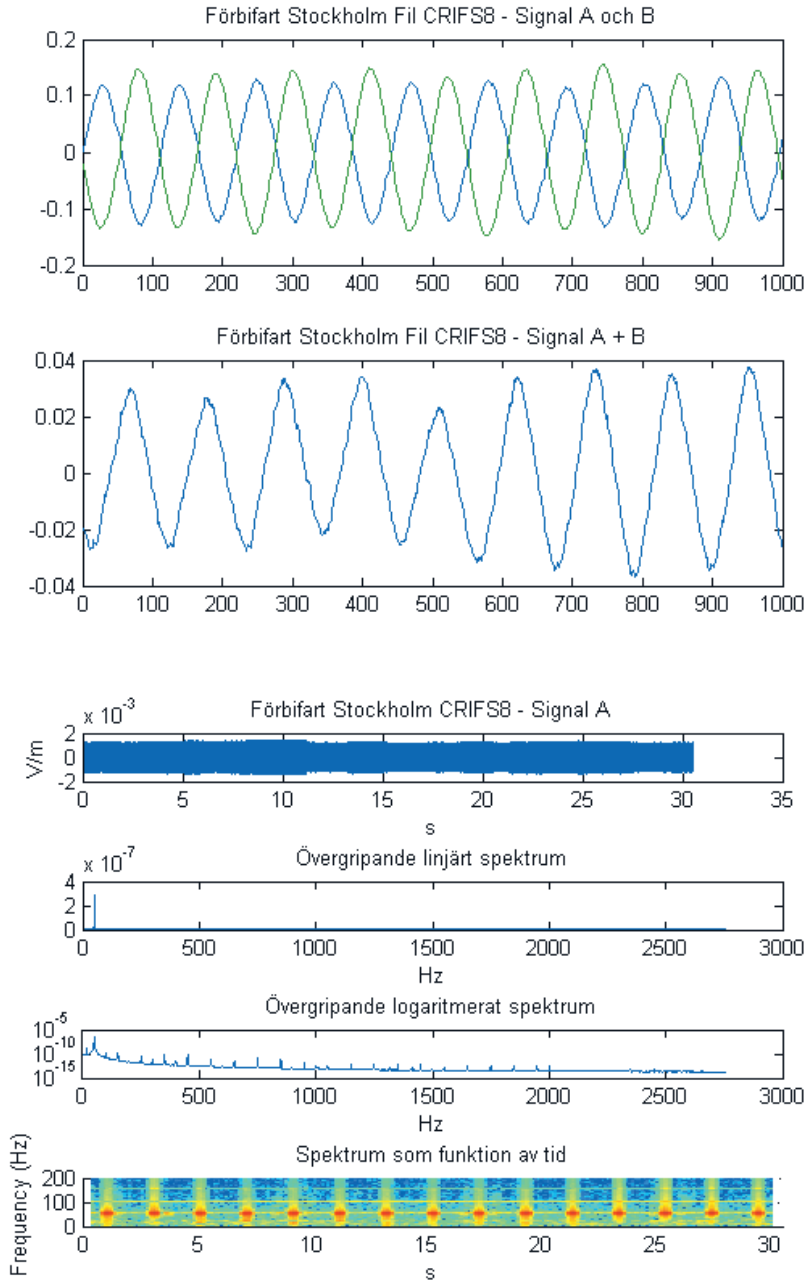


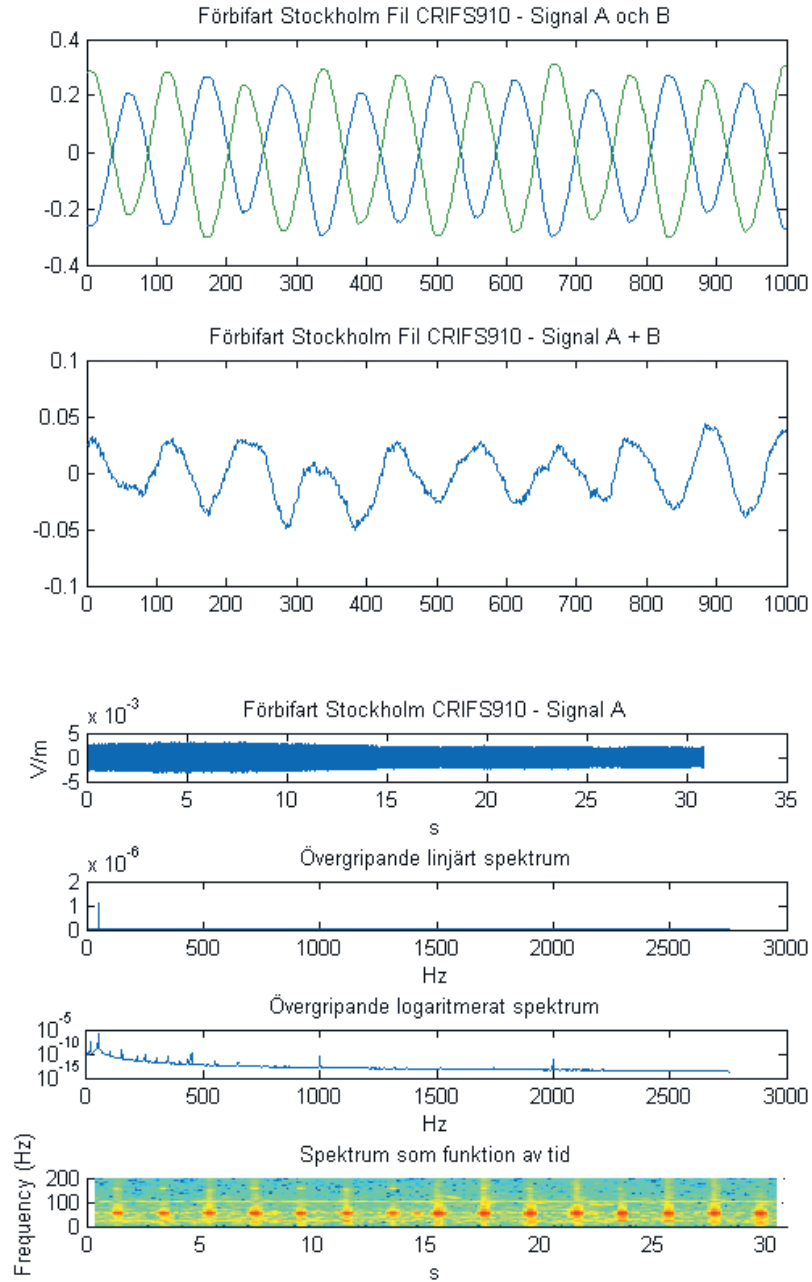


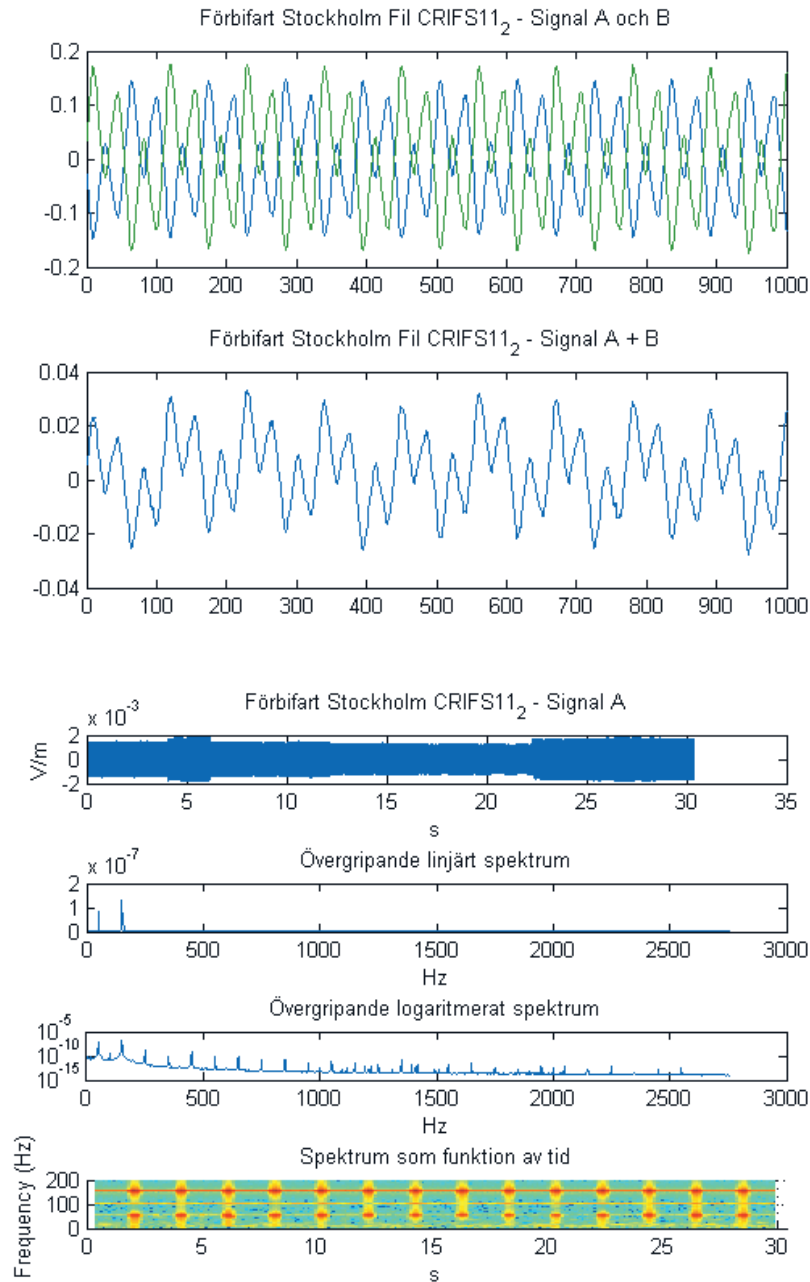


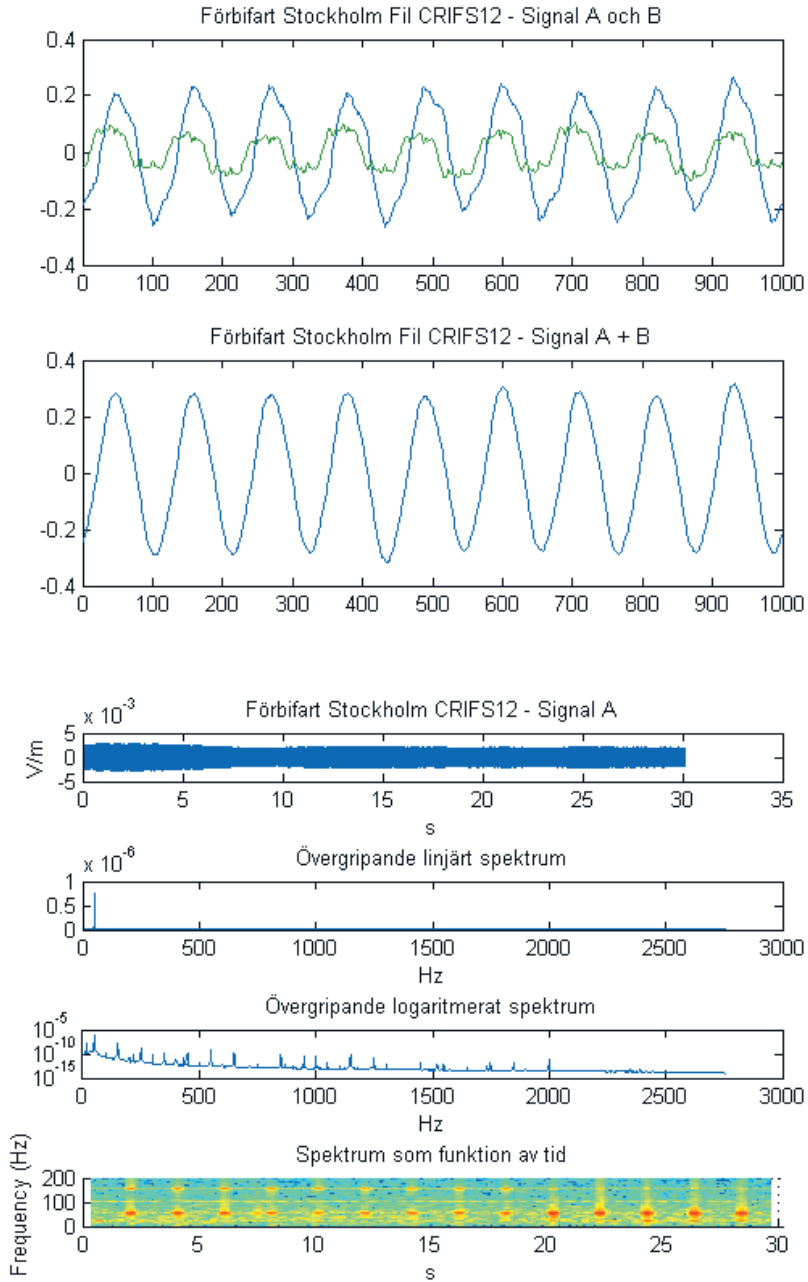


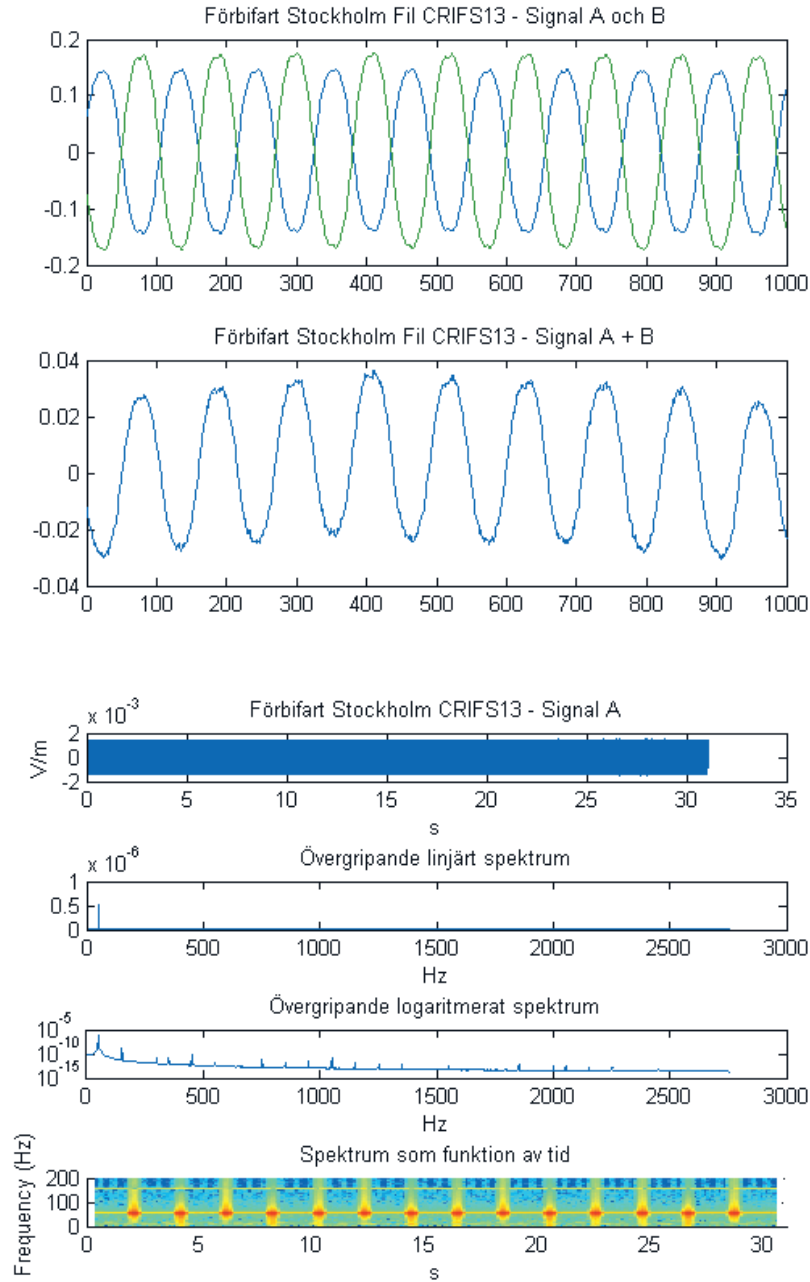


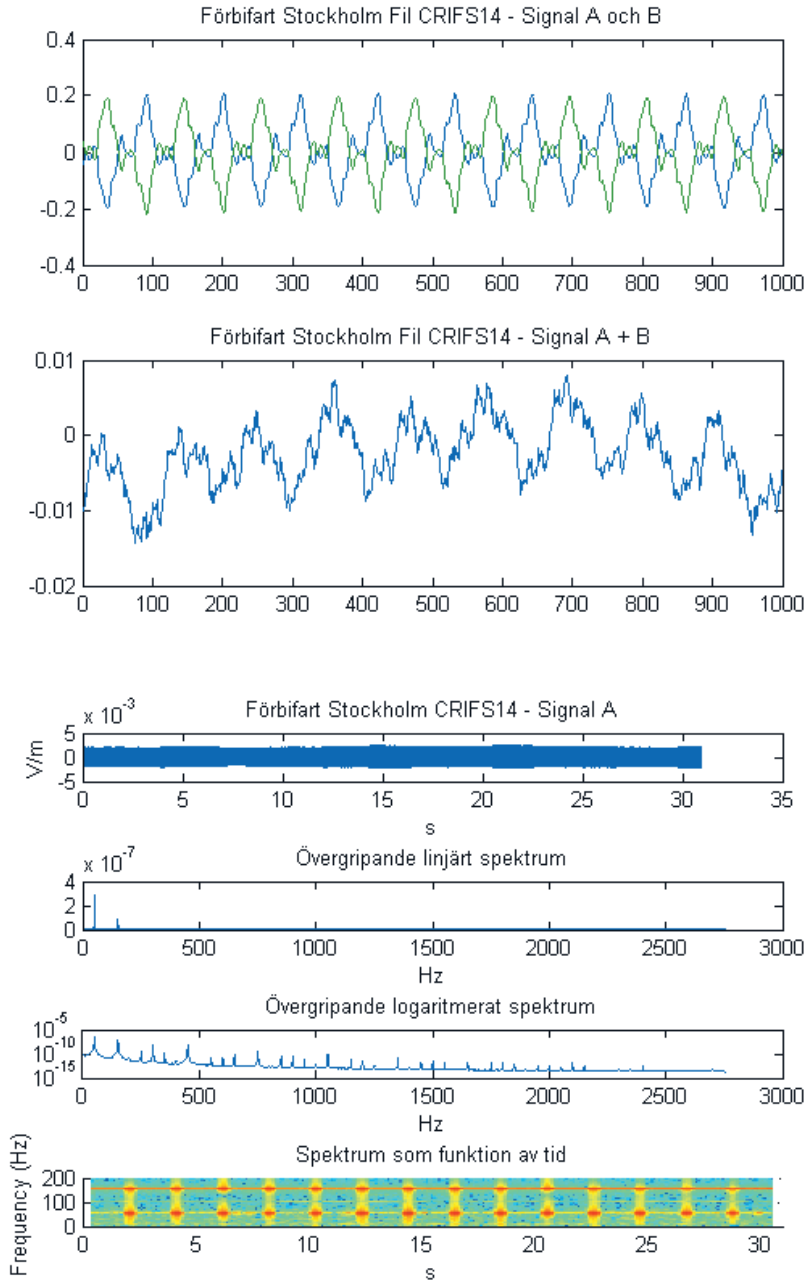


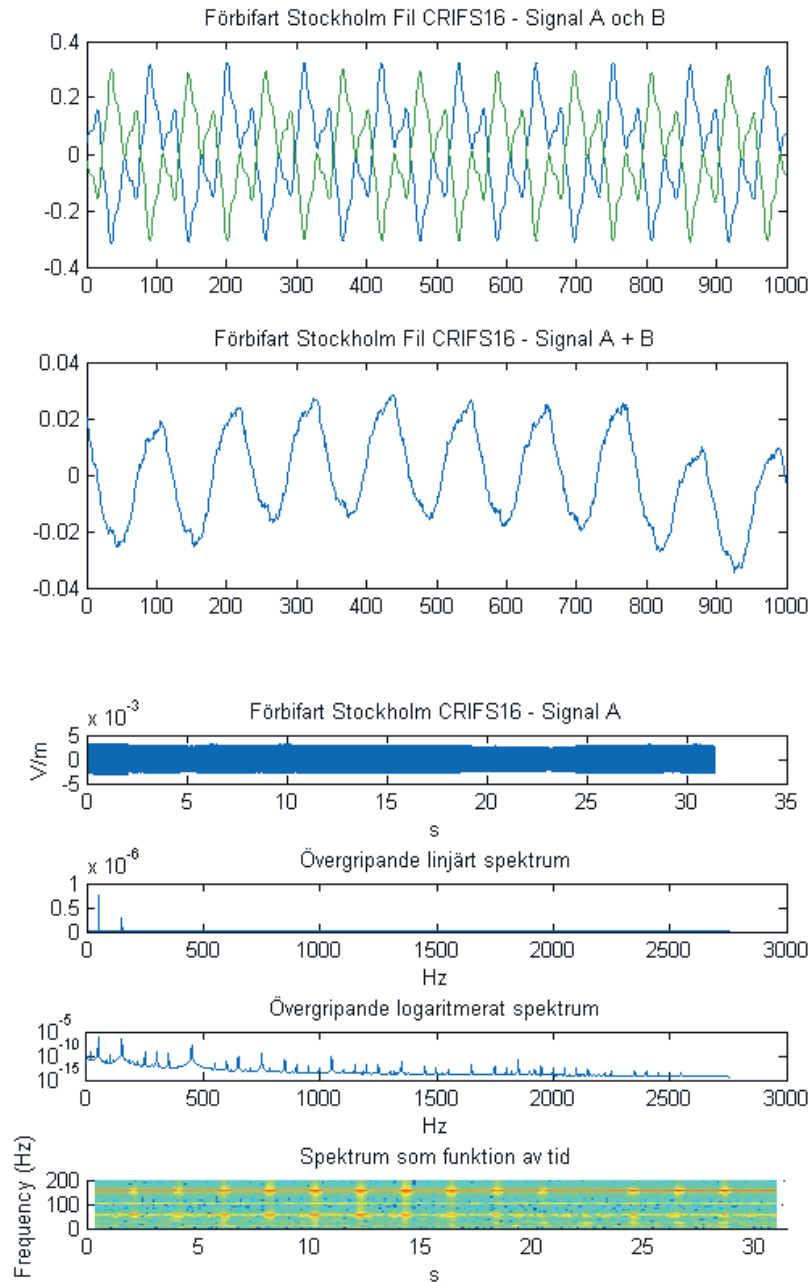


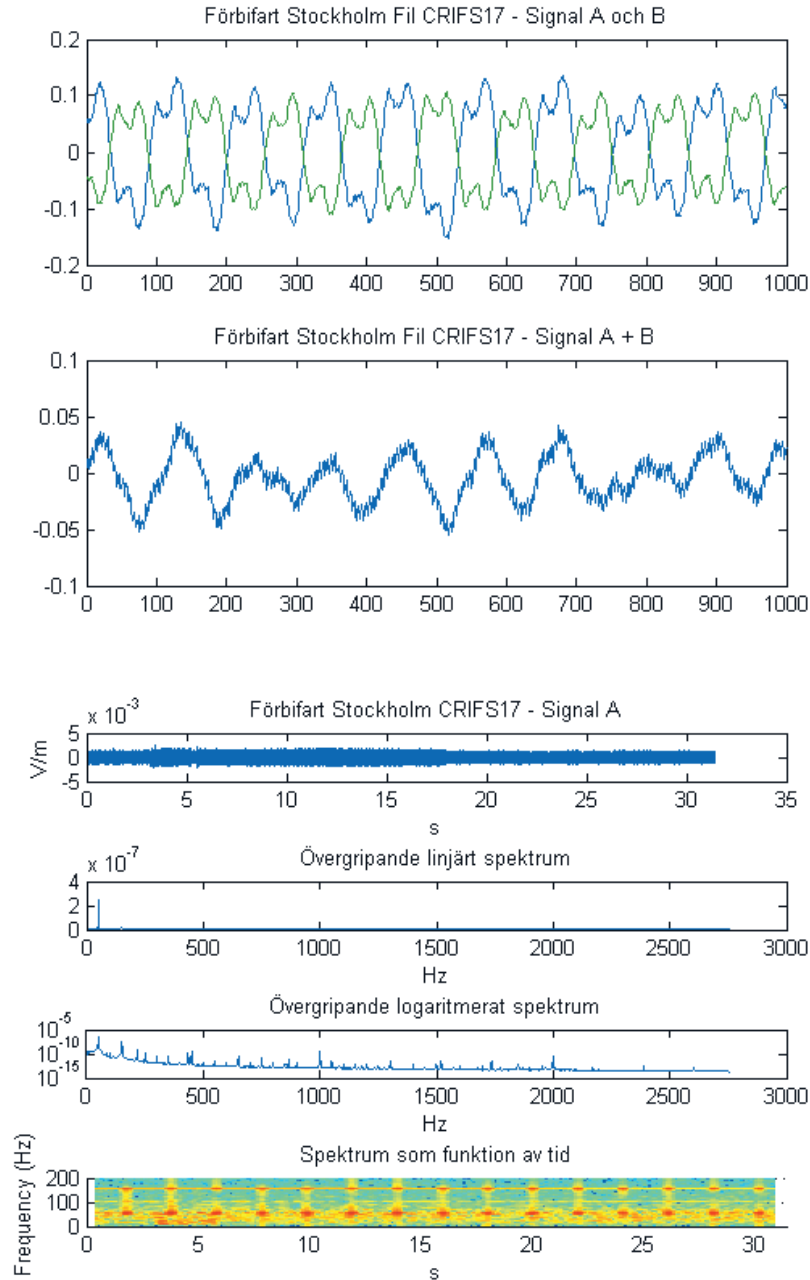


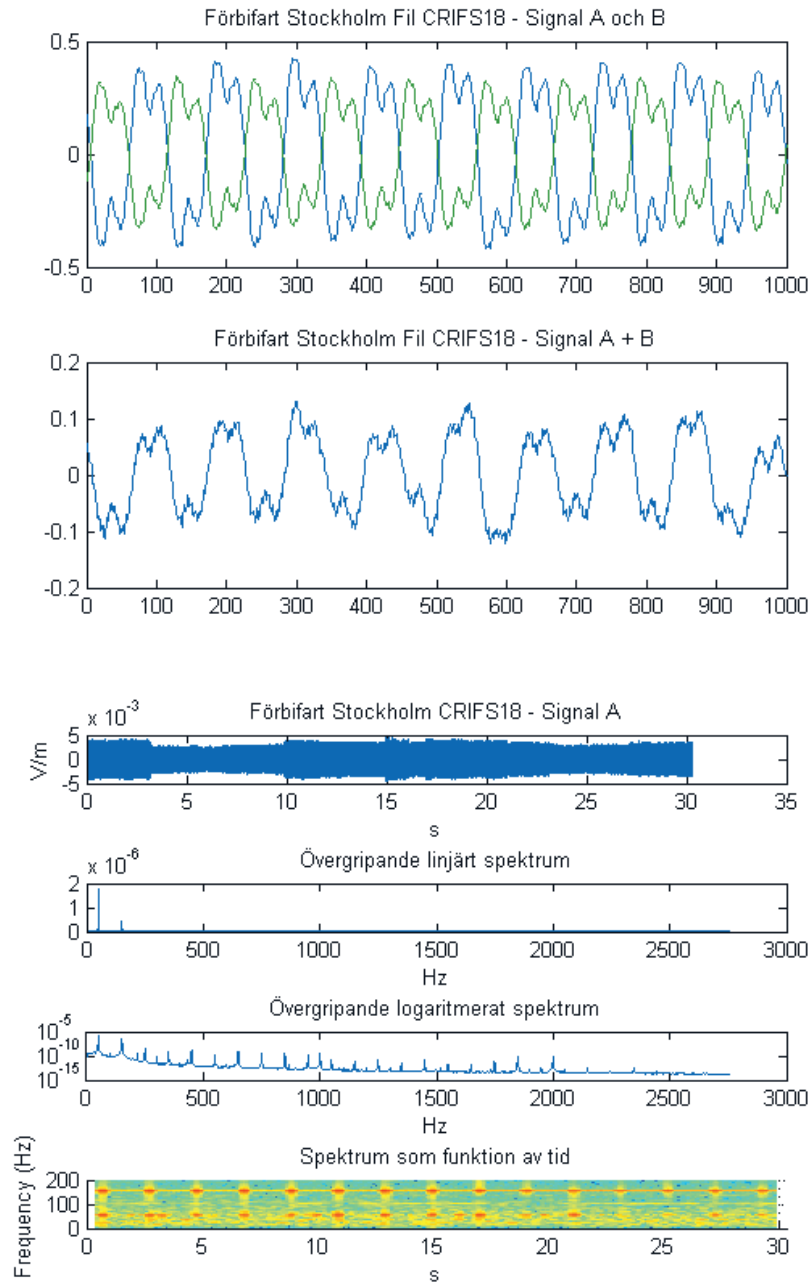


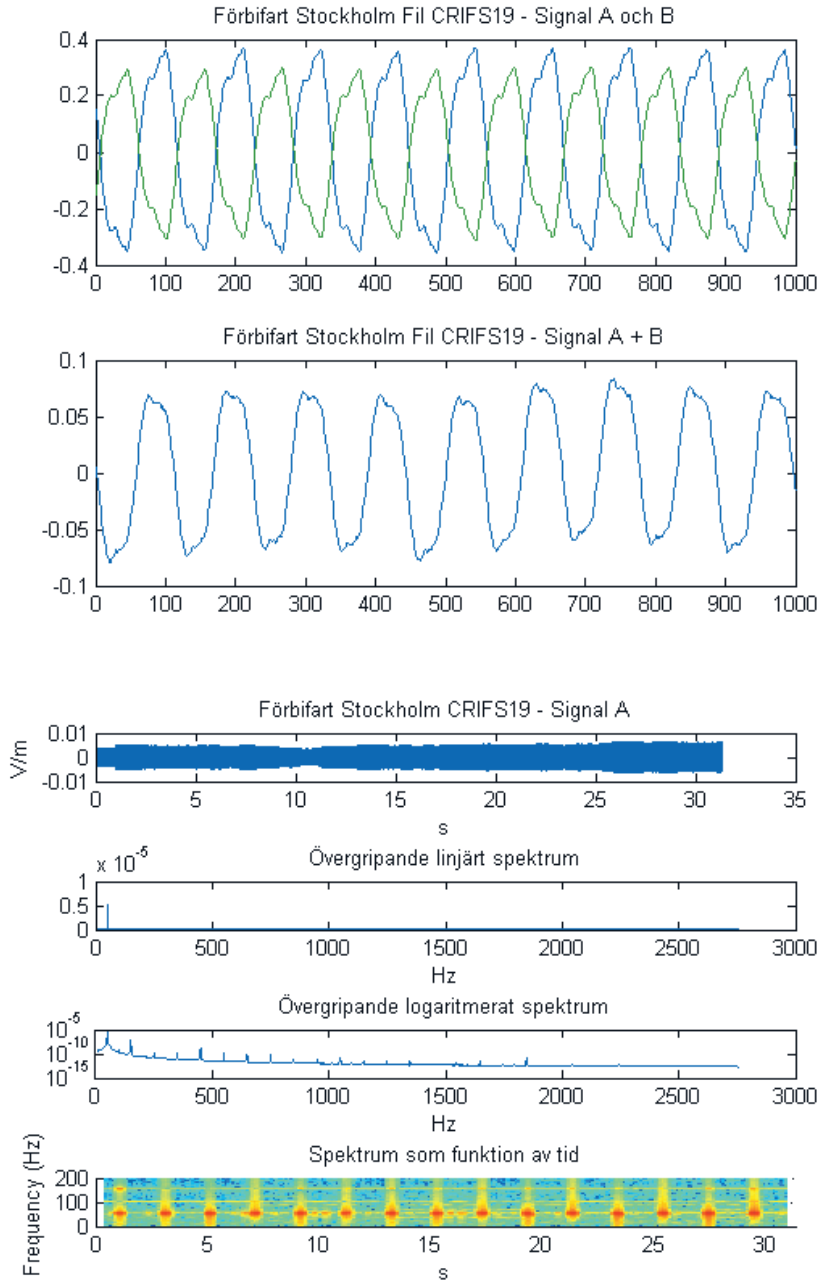


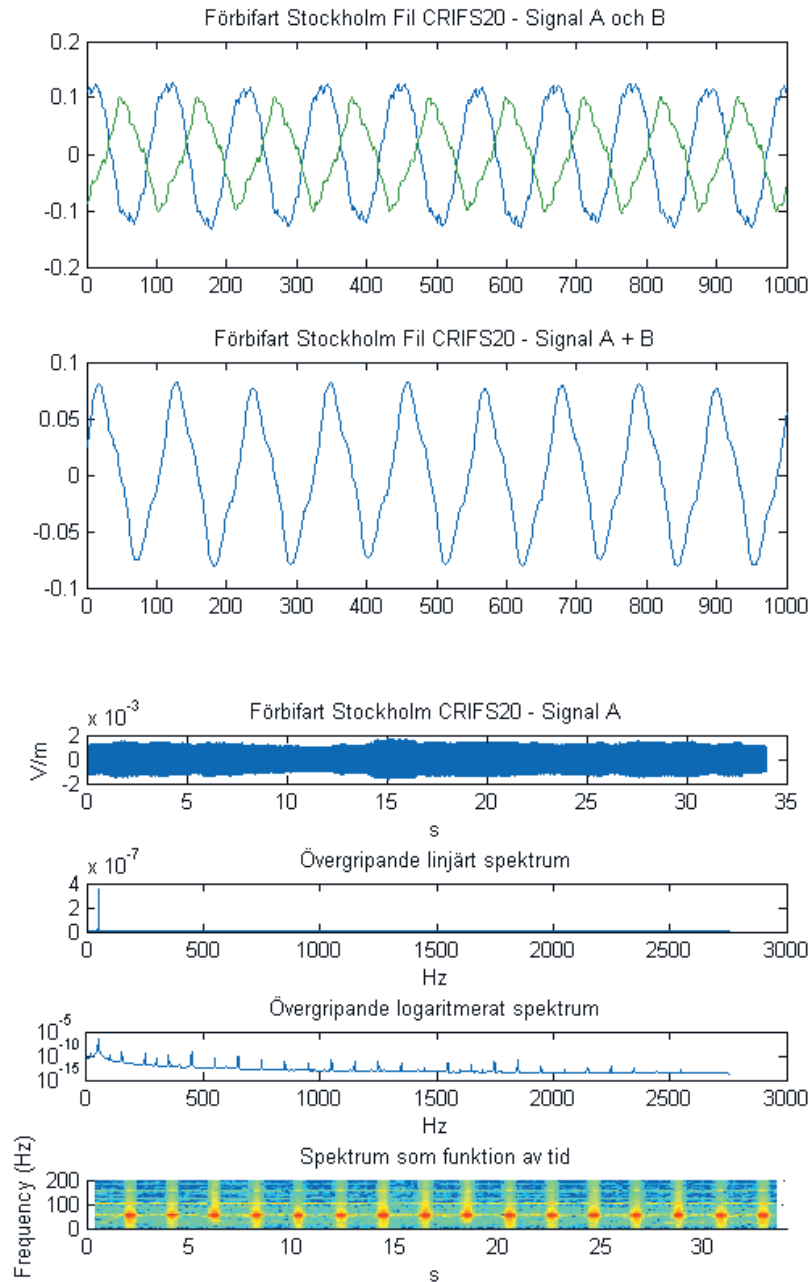


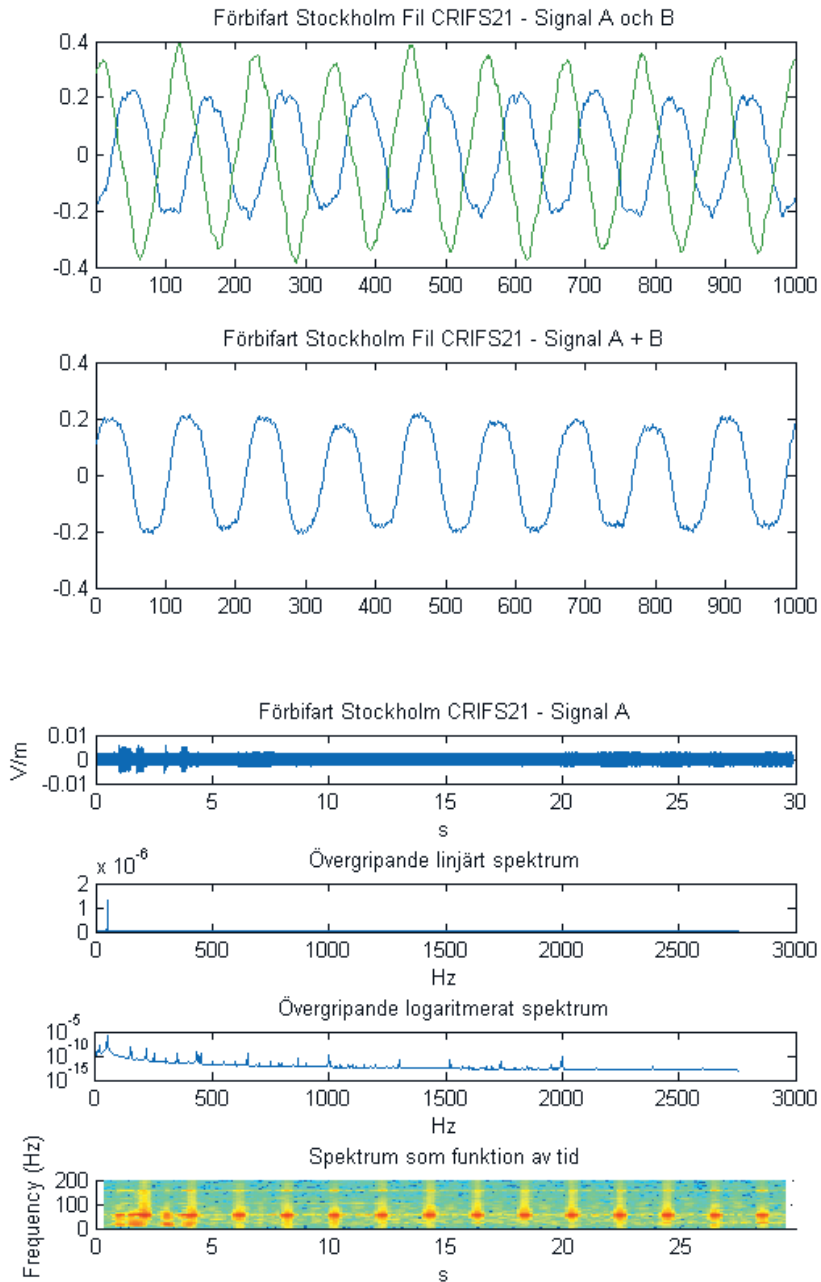


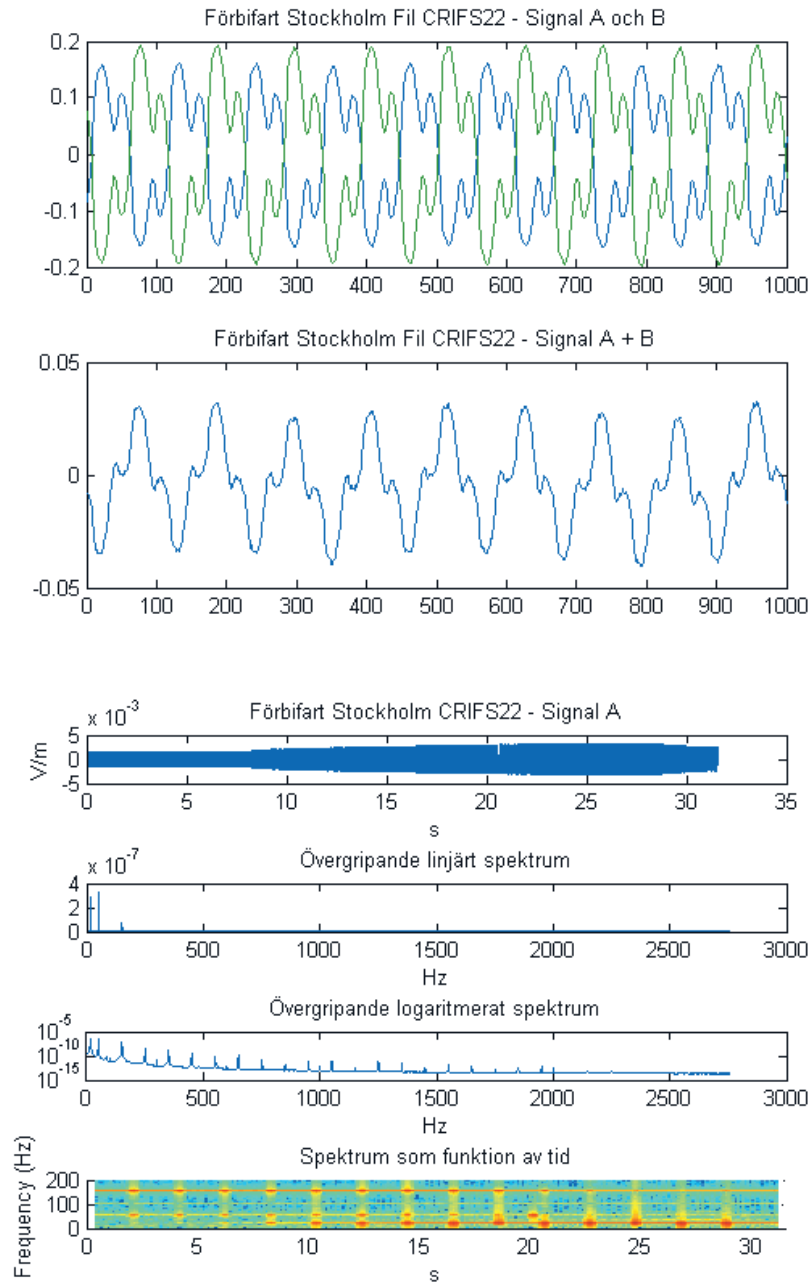












BeFo



Box 5501
SE-114 85 Stockholm

info@befonline.org • www.befonline.org
Besöksadress: Storgatan 19

ISSN 1104-1773