



BEDÖMNING AV INLÄCKANDE VATTEN- MÄNGD INFÖR TUNNELDRIVNING – SEISMOELEKTRIK ETAPP 3

Peter Ulriksen

Omslagsbild:
IVI-vibrator tillhörig konsultfirman Ramböll i Danmark.

BEDÖMNING AV INLÄCKANDE VATTENMÄNGD INFÖR TUNNELDRIVNING

- Seismoelektrik Etapp 3

Estimation of leakage rate ahead of tunneling operations
- Seismoelectrics Part 3

Peter Ulriksen, Lunds universitet

BeFo Rapport 146

Stockholm 2016

ISSN 1104-1773

ISRN BEFO-R—146—SE

Förord

Data från förundersökningsmetodik spelar en viktig roll för att kunna planera och genomföra såväl bergbyggnadsprojekt inom infrastruktur som gruvsektorn. Nya metoder inom geofysik utvecklas och befintliga metoder förfinas vilket successivt leder till en ökad tillämpning i bergbyggnadsbranschen. Geofysiska metoder är ofta lämpliga för att skapa en övergripande yttäckande undersökning medan mer traditionella metoder som borrhning och sondering ger exaktare punktinformation. Så en kombination av olika metoder är fördelaktig eftersom de ofta kompletterar varandra.

Metoden i detta projekt är seismoelektricitet och analyserar de seismiska vågor som senare omvandlas till elektromagnetiska vågor vattenförande zoner ner till 100 m djup. Den 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.

Projektet är etapp 3, efter tidigare avrapporterade; etapp 1 (Förstudie) BeFo-rapport 112 och etapp 2 BeFo-rapport 129. I föreliggande arbete, etapp 3, är målet att utveckla lätthanterlig utrustning som kan användas för att genomföra smalbandiga seismoelektriska mätningar. Man har arbetat med att sätta samman och tillverka ett fungerande mätsystem och mätningar har bl. a. utförts från befintliga tunnlrar.

Projektet är ett seniorforskningsprojekt som utförts av Peter Ulriksen vid Lunds Tekniska Högskola. En referensgrupp har bistått projektet med råd och granskningssynpunkter och den var bemannad av Henrik Jonsson/Vattenfall, Kent Lundin/Telia, Robert Sturk/Skanska och Per Tengborg/BeFo. Projektet finansierades av Stiftelsen Bergteknisk Forskning - BeFo.

Stockholm

Per Tengborg

SAMMANFATTNING

Komponenter och metodik tänkta att ingå i ett fungerande seismoelektriskt system har inskaffats och utvärderats. Den fundamentala idén, att man kan mäta smalbandigt och omvandla data från stegade frekvensmätningar till en tidsdomänsignal verkar ha visats experimentellt. De smalbandiga mätningarna gör att störkänsligheten blir väsentligt mindre än om bredbandig mätning utförs, dvs transienta mätningar. Projektet var ursprungligen helt inriktat på mätningar från markytan ner i berggrunden. Det har emellertid visat sig finnas stort intresse för mätningar även från befintliga tunnlar och därför har utrustning för sådana mätningar utvärderats och intressanta resultat inhämtats.

Projektets syfte är att lokalisera vattenförande zoner ner till ett djup av c:a 100 m i syfte att underlätta planering av undermarksarbete som t ex tunnelbyggnad. För detta utnyttjas omvandling av mekaniska tryckvågor till elektriska signaler i vattenförande sprickor.

De seismoelektriska signalerna är mycket svaga och medför ett betydande detekteringsproblem. Det är känt inom andra discipliner att smalbandig detektion medger möjlighet att detektera mycket svagare signaler än bredbandig detektion gör. Anledningen är att bakgrundsstörningarna blandas med signalerna när man mäter bredbandigt.

Vid smalbandsdetektion mäter man frekvens för frekvens och vet exakt vilken frekvens man söker. Därför kan alla störningar av annan frekvens uteslutas. Genom att stega sig igenom det önskade frekvensbandet erhåller man samma resultat som vid bredbandig mätning, dock i frekvensplanet. Genom en Fouriertransform kan man sedan omvandla signalen till tidsdomän.

Den tredje etappens mål

är att utveckla lätthanterlig utrustning som kan användas för att genomföra smalbandiga seismoelektriska mätningar. I den ursprungliga etapplanen ingick också fältprov med den utvecklade utrustningen, men då finansieringen varit lägre än planerat utesluts detta moment och fokus är lagt på att sätta samman och tillverka ett fungerande system.

I syfte att förstå problematiken har fältförsök med laboratorieutrustning genomförts. Dessa fältförsök är utförda med en enkanalig lock-in-förstärkare, en hydrauliskt driven vibrator och en specialprogrammerad laptop som styr vibratorn och lock-in-förstärkaren. En 32-kanalig lock-in-förstärkare, som avses användas i fältutrustningen, har också testats. Mjukvaran till dessa försök har utvecklats inom etappens ram.

Under etappens gång har det också framkommit att det finns ett stort intresse att kunna göra seismoelektriska mätningar från befintliga tunnlar. Därför har ett test med laboratorieutrustning gjorts i en tunnel för att inhämta erfarenheter från vad den annorlunda miljön där har för betydelse för systemets utformning. I en tunnel har man direkt kontakt med bergmassan och då kan transient mätning av signalerna vara effektiv därför att man undviker den starka dämpningen i jordlagren. De elektriska bakgrundsstörningarna är sannolikt likartade.

Systemkonceptet framgår av följande beskrivning

Som källa för mätningen från markytan används en hydrauliskt driven vibrator. Denna kontrolleras av en funktionsgenerator som också levererar referenssignal till en 32 kanal lock-in-förstärkare. Mottagarna är jordade eller ojordade (antennar) elektriska dipoler kopplade till en differentialförstärkare per kanal. Differentialförstärkare har den fördelen framför single-ended förstärkare att störningar som kommer in via kablarna utjämnas, då de är likadana i båda ledarna.

En kopplingsbox medger att två 16-kanal kabelstammar kopplas ihop med lock-in-förstärkaren. Kopplingsboxen försörjer också ingångssteget, differentialförstärkarna, med drivspänning. Funktionsgenerator och lock-in-förstärkare styrs av programvara som är utvecklad inom projektets ram.

Således kan man ansluta antingen 32 dipoler som mäter det elektriska fältet differentiellt eller 16 dipoler och 16 geofoner. I det senare fallet kan man alltså samutvärdera seismiska och seismoelektriska mätdata. Systemet bör, som en bieffekt, också kunna användas för reflektionsseismiska mätningar i 32 kanaler. Detta kan vara av intresse när signal/brusförhållandet är för dåligt för att medge de vanliga mätningarna i tidsdomän.

Nyckelord: Geofysik, Seismik, Vattenföring, Mätutrustning

SUMMARY

Components and methods considered for a working seismoelectric field system have been acquired and evaluated. The fundamental idea, that it is possible to make narrowband measurements with stepped frequency and convert the data to time domain seems to have been confirmed experimentally. The narrowband measurements are much less susceptible to noise than wideband, i.e. transient measurements. Originally the project was focused only on measurement from the ground surface, through the soil and into the bedrock. It has, however, turned out that there is considerable interest in making seismoelectric measurements from existing tunnels and for that reason we have also evaluated equipment and methods suitable for that kind of measurement.

The purpose of this project is to locate waterbearing zones in bedrock from the surface down to a depth of about 100 m, facilitating planning of underground constructions like e.g. tunneling. To do this the conversion of mechanical waves to electromagnetic waves in fractures is used.

The seismoelectric signals are very weak and constitute a serious detection problem. It is known from other disciplines that narrowband detection can operate in much lower signal to noise ratios than wideband detection. The reason is that background noise is mixed with the signals in wideband detection.

In narrowband detection only one frequency is measured at each instant and consequently the only parameters available are the phase and the amplitude of the signal relative a stable reference signal. By stepping through a frequency range the same information can be gained as with wideband detection, i.e. high temporal/range resolution. That is achieved by an inverse Fourier transform.

The goal of the third project part is to develop a manageable system for performing narrowband seismoelectric measurements.

To familiarize ourselves with the measurement problems field tests with laboratory equipment has been performed. These test were performed with a single channel lock-in amplifier, a hydraulically driven vibrator and a laptop with software that controls the vibrator and the lock-in amplifier. A 32-channel lock-in amplifier has also been tested. The software for these tests has been developed within the framework of the project.

During the third project part it has also occurred to us that there is considerable interest in using the seismoelectric approach for measurements from tunnels. For that reason measurements have also been performed in a tunnel to gain experience from the different environment as compared to surface measurements. In a tunnel there is direct contact with the rock mass and the transient signals may also be used, since the strong attenuation of the soil layer is avoided. The electrical background disturbances are similar however.

The system concept is presented below

The source of mechanical waves is anhydraulically driven vibrator. This is controlled by a function generator which also provides the reference signal to a 32 channel lock-in amplifier. The receivers are grounded electrodes or antennas connected to differential amplifiers, one per channel. Differential amplifiers have the advantage to single-ended amplifiers, that noise entering through the cables is eliminated.

A connection box makes it possible to connect two 16 channel cable stems to the 32 channel lock-in amplifier. This box also provides electrical supply to the differential amplifiers.

Consequently it is possible to attach either 32 electrical dipoles measuring the seismoelectric field differentially or 16 dipoles and 16 geophones. The latter alternative permits co-evaluation of reflection seismics and seismoelectrics data. It should also be possible to use the system for seismic reflection measurement with 32 geophones. This may be of interest when the signal to noise ratio is unfavourable for conventional measurements.

Keywords: Geophysics, Seismics, Waterflow, Seismoelectrics, Equipment

INNEHÅLL

| | |
|---|----|
| 1 Bakgrund | 1 |
| 2 Detektionsmetod | 9 |
| 2.1 Mätningar från markytan..... | 9 |
| 2.2 Mätning direkt mot bergyta..... | 11 |
| 3 Teknisk Utveckling..... | 13 |
| 3.1 Övergripande beskrivning..... | 13 |
| 3.2 Funktionsgenerator..... | 14 |
| 3.3 IVI vibratoradapter..... | 14 |
| 3.4 Lock-in förstärkare | 15 |
| 3.5 Kabelstam..... | 15 |
| 3.6 Förförstärkare | 16 |
| 3.7 Kopplingsbox..... | 16 |
| 4 Fältförsök | 17 |
| 4.1 Försök på Helseholmen i Köpenhamn | 17 |
| 4.2 Kemicentrum LTH Lund..... | 23 |
| 4.3 Västra Lund | 24 |
| 4.4 Gårdatunneln i Göteborg | 43 |
| 4.5 Försök med multikanal lock-in förstärkare vid LTH | 67 |
| 5 Slutsatser..... | 75 |
| 6 Erkännanden | 75 |
| 7 Referenser..... | 75 |

1 Bakgrund

Etapp 3 av det seismoelektriska projektet vid LTH baseras på två tidigare, av BeFo stödda etapper:

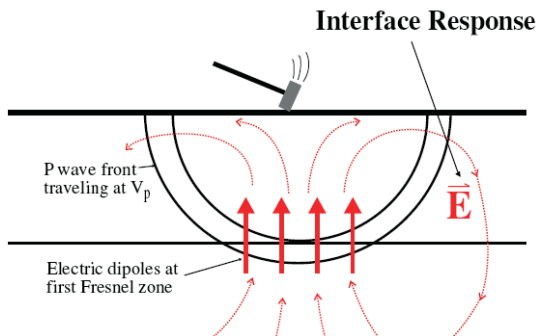
Etapp 1, som är en litteraturstudie, bekräftar att seismoelektriska mätningar har en solid vetenskaplig grund och Etapp 2 som huvudsakligen omfattar fältmätningar av elektriska störningsfält längs sträckningarna för Hallandsåstunneln och Förbifart Stockholm. Nedan följer en sammanställning av sammanfattningarna för de tidigare etapperna.

Etapp 1

Elektrokinetiska fenomen utgör ett samspel mellan mekaniska kompressionsvågor och elektriska fält, se Figur 1. Det finns åtminstone fyra olika elektriska effekter som kan iakttas när en kompressionsvåg utbreder sig i marklagren:

- 1) Markens elektriska motstånd påverkas av kompressionsvågen vilket ger upphov till en spänningsförändring om en stadigvarande elektrisk ström samtidigt leds genom marken (jmf. kolkornsmikrofon).
- 2) Elektrokinetiska effekter som är analoga till de strömningspotentialer man kan mäta upp när vätska strömmar genom ett porskelett.
- 3) Den piezoelektriska effekten som uppstår när t ex ett kristallint material pressas samman.
- 4) Kraftigt olinjära processer uppmätta i sulfider, som ger upphov till radiofrekventa pulser när de påverkas av en jämförelsevis lågfrekvent seismisk vågrörelse.

Seismoelektriken utnyttjar det andra fenomenet att när en vätska innehållande joner rör sig längs en fast yta kommer det att uppstå en elektrisk ström därför att de i det fasta materialet belägna balanserade jonerna är fixerade. Det uppstår också ett magnetiskt fält, vilket kan detekteras vid markytan. Detta fält skapas av skjuvvågor. Det elektriska fältets styrka är proportionell mot materialets acceleration och magnetfältets styrka är proportionellt mot materialets hastighet. Fenomenet har också en invers däri att ett starkt elektriskt fält kan sätta vatten i rörelse och därigenom skapa en seismisk vågrörelse.



Figur 1. Hur seismoelektriska signaler uppstår: Svart är den mekaniska stötvågen, rött är det elektriska fältet. *How seismoelectric signals are created: Black is the mechanical seismic wave, red is the electric field.*

Seismiska vågor ger upphov till två olika seismoelektriska effekter. När kompressionsvågen passerar ett avsnitt av jorden uppstår en lokalt mätbar spänning, men den utbreder sig inte

utanför den komprimerade marken. Denna elektriska signal betecknas coseismisk. Det andra fenomenet uppstår när kompressionsvågen passerar en gränsyta i marken, t ex mot ett vattenförande skikt.

Den ström, som därvid uppstår, ger upphov till ett elektromagnetiskt/elektrostatiskt fält som mycket snabbt utbreder sig i materialet och når upp till markytan där det kan detekteras.

De praktiska mätningarna genomförs så att på markytan skapad seismisk energi utbreder sig ner till t ex en vattenfylld spricka där stötvågen sätter vattnet i rörelse. Denna rörelse hos vattnet ger alltså upphov till en elektrisk ström, vilken skapar ett elektromagnetiskt / elektrostatiskt fält som kan detekteras på markytan. Den vanligaste detektortekniken är att man slår ner två elektroder i marken på någon meters avstånd och mäter den elektriska potentialen mellan dem.

Eftersom den seismiska vågens hastighet i materialet kan bestämmas med klassiska metoder lånade från reflektionsseismiken kan djupet till den reflekterande horisonten bestämmas genom att elektroiseismiska signalens färdtid multipliceras med den akustiska utbredningshastigheten i marken. Den tid som åtgår för den elektromagnetiska / elektrostatiska signalens transport från sprickan upp till markytan är i sammanhanget helt försumbar. Dock skall man komma ihåg att den elektromagnetiska våghastigheten för vågrörelser i frekvensområdet några hundra Hz skiljer sig från radiovåghastigheten i fast materia för normala radiofrekvenser.

Det relativa dielektricitetsstalet kan ha värden uppemot 10.000, indikerande att de elektromagnetiska vågorna rör sig med en hastighet av 1/100 av ljushastigheten.

De främsta störningskällorna är nätfrekvensen och det coseismiska fältet. Det senare uppstår, som nämnts, när jorden i markytan, där elektroderna sitter, komprimeras av ytvågor och av reflekterade och refrakterade kompressionsvågor.

Det existerar radiostationer som använder / har använt hundraherzområdet för kommunikation med ubåtar i undervattensläge. T ex den ryska Zeus-stationen (80 Hz) och de amerikanska SIAS (45 och 75 Hz). De senare togs ur bruk 2004.

Om man tänker sig en horisontell spricka på visst djup kommer det seismoelektriska fältet att motsvaras av en vertikal dipol centrerad kring lodlinjen under exciteringspunkten på markytan. Det innebär att det elektriska fältet är riktat ut från slagpunkten. Detta kan utnyttjas för att undertrycka störningar. Om man ställer upp ett elektroddpar på vardera sidan om exciteringspunkten kan man genom en differentiell mätning undertrycka störningar. De för båda elektroddparen gemensamma störningssignalerna kan subtraheras bort, medan den eftersträvade signalen har olika polaritet i de två elektroddparen och vid subtraktion kommer den att fördubblas i amplitud. Med många elektroddpar bör man alltså ställa upp dessa symmetriskt kring signalkällan.

Ofta använder man en vanlig seismograf med 24 eller 48 kanaler för insamlingen av de elektroiseismiska signalerna. Varje geofon ersätts då av ett elektroddpar. Mellan elektroddparet och seismografen placeras antingen en passiv transformator eller en förförstärkare. Använder man ett stort antal elektroddpar placeras de vanligtvis med viss inbördes överlapp symmetriskt kring exciteringspunkten. Man får då enligt ovan en polaritetsväxling i de kanaler som befinner sig på ömse sida om exciteringspunkten. Denna utnyttjas för störningsundertryckning.

Dipolfältets egenskaper kan också användas för att uppskatta djupet till en vattenförande spricka. Fältstyrkan är nämligen teoretiskt maximal på ett avstånd från exciteringspunkten som uppgår till halva djupet förutsatt att sprickan är horisontell. För att kunna använda denna metod måste man naturligtvis mäta upp den elektriska fältstyrkan som funktion av avståndet från exciteringspunkten, dvs man måste mäta i ett stort antal punkter. Denna metod kan bli problematisk om man vill undersöka stora djup, eftersom det då krävs långa utlägg med många elektrodpar.

Den seismoelektriska effekten uppstår, som nämnts, i kontaktzonen mellan fast material och vätska. I en hypotetisk två meter tjock spricka får man då en dubbeleffekt, en från vardera begränsningsytan. Beroende på utbredningshastighet och våglängd får man då interferens mellan signalerna från vardera begränsningsytan, så att det blir en förstärkning eller en försvagning av den resulterande signalen. I de flesta fall torde dock sprickor vara så tunna jämfört med kompressionsvågornas våglängd att det endast kan bli tal om en fördubblad effekt, dvs de individuella effekterna ligger nästan helt i fas och adderas därför.

På vägen mellan en vattenförande spricka och markytan kommer den elektromagnetiska / elektrostatiska signalen att dämpas. Det mått man använder för att beskriva sådana signalers dämpning i marken är "skin depth". Detta mått anger vid vilket djup signalen har dämpats till $1/e$, där e är den naturliga logaritmen. I beräkningen av "skin depth" ingår kvadratroten ur den elektriska konduktiviteten dividerat med frekvensen. Då frekvenserna är mycket låga för de elektroseismiska fenomenen kommer "skin depth" att bli stort jämfört med för normala radiofrekvenser. Dämpningsmättet fungerar naturligtvis även för beräkning av dämpning av signaler som rör sig nedifrån och upp mot markytan.

I dämpningshänseende är den perfekta situationen för elektroseismiska mätningar att bestämma djupet till ett vattenförande skikt under en glaciär. Kall glaciäris är nämligen nästan en perfekt isolator, man har t ex med radar bestämt inlandsisens tjocklek både på Grönland och i Antarktis.

Seismoelektriska mätningar kan utföras också i borrhål. Man får då möjlighet att gå under starkt dämpande jord- och berglager och kan utsträcka det mycket begränsade informationsområdet kring borrhålet mångfalt.

Den seismoelektriska metoden är såvitt känt den enda indirekta metod som kan ge indikation om vattenförekomst i sprickor i berggrunden samt permeabiliteten med samma goda avståndsupplösning som reflektionsseismik.

Ju snabbare vattnet rör sig desto starkare blir signalen. Metoden är fn föremål för stort intresse i forskningsvärden. Inte minst utvecklas det mjukvara för att simulera processen. Sådan mjukvara är ett viktigt hjälpmedel när man planerar en fältmätning, eftersom man då får en indikation om det man har tänkt sig göra är möjligt och om hur man i så fall bäst skall gå tillväga.

När det gäller källan förefaller dynamit och vibratorer vara de bästa metoderna. För mycket grunda undersökningar kan hammarslag vara tillräckligt. Dean (workshop) har beräknat att 16 s vibration med en Vibroseis-sändare motsvarar att man slår med slägga i 100 år.

Viktiga utvecklingsområden är detektortekniken och processeringen av mottagna signaler.

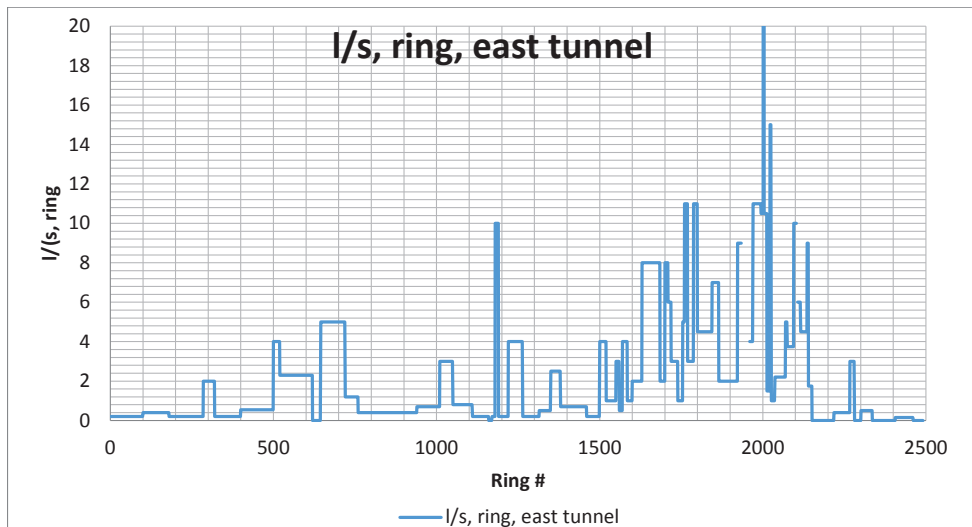
Mätning av seismoelektriska signaler kan göras med hjälp av en vanlig ingenjörseismograf av modernt snitt, dock krävs ofta ingångsförstärkare som förstärker mätsignalen och anpassar impedansen till mätinstrumentet. Man kan mäta signalerna mellan vanliga elektroder av rostfritt stål som jordas i marken på lämpliga avstånd från varandra. Signal-brus-förhållandet är dock ofta så lågt att det krävs avancerad signalbehandling för att extrahera användbara signaler ur mätdata.

Det största verkliga djup någon hittills angivit för seismoelektriska reflektioner är c:a 300 m men beräkningar pekar på att väsentligt större djup än så skulle vara möjliga att uppnå. Å andra sidan uppnår man sällan större penetration än något tiotal meter om slägga används som energikälla. För tunnelmätningar är sannolikt en sk buffalo-gun ett bra alternativ. Det är en rörbitt utformad för att medge att lösa hagelpatroner avfyras ned i ett hål i marken.

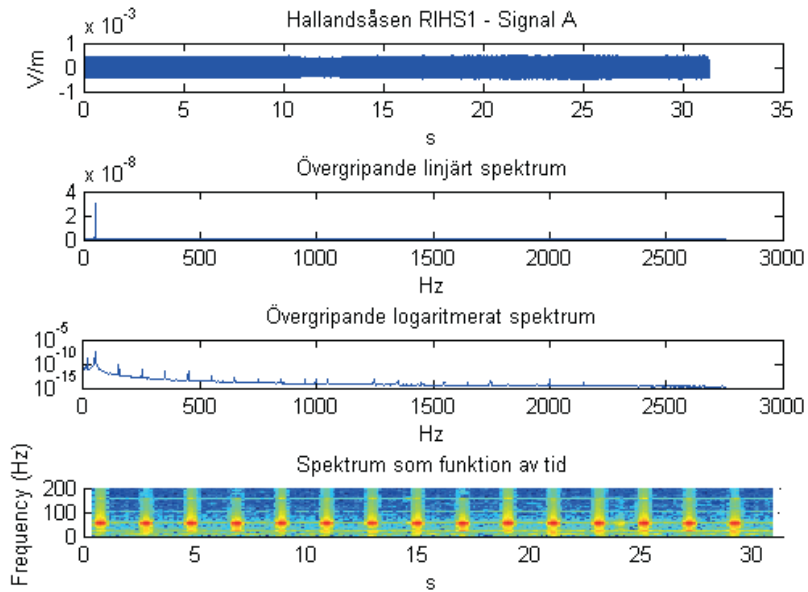
Etapp2

Som första åtgärd efter Etapp 1 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.

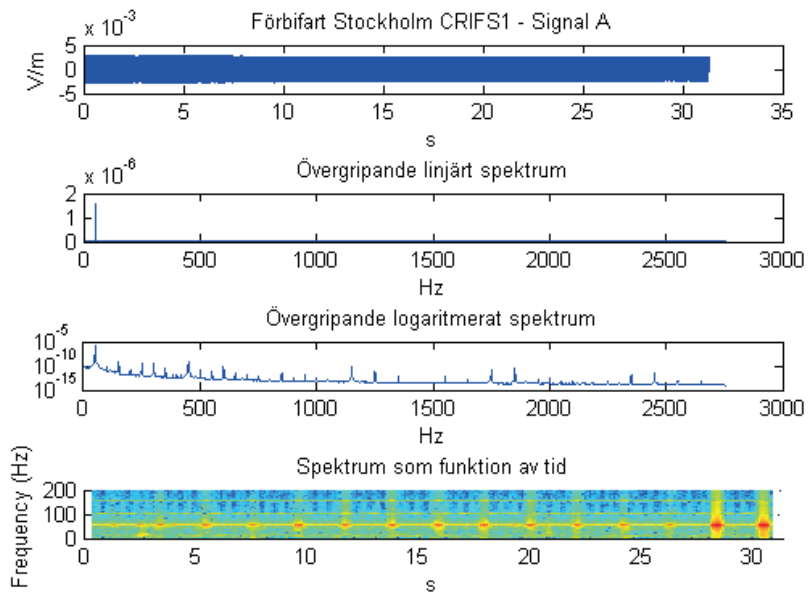
Bakgrundsmätningar har utförts längs sträckningarna av tunneln genom Hallandsåsen samt Förbifart Stockholm. Dessa platser är valda därför att det finns omfattande läckagedata från Hallandsåsprojektet och det kan tänkas att mätningar längs Förbifart Stockholm också kan ha ett prognosvärde för planeringsarbetet. De genomförda bakgrundsmätningarna visar att 50 Hz nätfrekvens och dess övertoner är den dominerande störningen, men att även järnvägens 16 2/3 Hz ibland kommer in i signalerna. Elektriska boskapsstängsel är den mest exotiska störningen, men sådana torde kunna stängas av vid mättillfällena.



Figur 2. Läckage längs östra tunnelröret under Hallandsåsen. *Leakage rate along the eastern tunnel through Hallandsåsen.*



Figur 3. Exempel på bakgrundsmätning på Hallandsåsen. De med två sekunders intervall återkommande bredbandiga signalerna skapas av ett fel i programvaran och har inget med bakgrunds-fältet att göra. Framtida bakgrundsmätningar kommer att göras med annan programvara. Störningsfältet uppgår till 0.5 mV/m. *Example of background measurement on Hallandsåsen. The wideband signals at two seconds interval are created in the recorder software and thus an artefact. Future measurements will be performed with other software. The noise field has a magnitude of 0.5 mV/m.*



Figur 4. Exempel på bakgrundsmätning längs Förfärd Stockholm. De med två sekunders intervall återkommande bredbandiga signalerna skapas av ett fel i programvaran och har inget med bakgrundsfältet att göra. Framtida bakgrundsmätningar kommer att göras med annan programvara. Störningsfältet uppgår till 3 mV/m. *Example background measurement along Förfärd Stockholm. The wideband signals at two seconds interval are created in the recorder software and thus an artefact. The noise field has a magnitude of 3 mV/m.*

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 en "seismoelektrisk" signal är närvarande, något som inte är fallet om man mäter på en plats i naturen. Med simulatoren 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.



Figur 5. Den seismoelektriska simulatoren klagörs för nedsänkning i borrhål. Den vita delen t.v. innehåller laddningsbara batterier och metalldelarna är elektroderna som alstrar det simulerade seismoelektriska fältet. Delen till höger innehåller den optoelektriska elektroniken och förstärkare. Kabeln är en metallfri optisk tvåledare, varav endast en fiber utnyttjas. Den andra kan utnyttjas om simulatoren kompletteras med en funktion för mätning av elektriska fält nere i borrhål. *The seismoelectric simulator is prepared for lowering in a borehole. The white part to the left contains batteries and the metal parts are the electrodes that generate the simulated seismoelectrical field. The part to the right contains the optoelectronics and an amplifier. The cable is a non-metallic two fiber optical link. Only one fiber is used presently. The other fiber can be used if the simulator is extended to measuring electrical fields in a borehole.*

Nuvarande Etapp 3 omfattar utveckling av utrustning för mångkanalig mätning under fältmässiga förhållanden.

2 Detektionsmetod

2.1 Mätningar från markytan

De flesta seismoelektriska tillämpningar har gjorts med mätningar i tidsdomän. Detta är en rättfram procedur där man skickar iväg en signal och lyssnar efter ekon, dvs att signalen har reflekterats i en gränssyta och kommer tillbaka efter en tidsfördröjning. Om man vet signalens utbredningshastighet kan man beräkna avståndet till gränssytan genom att multiplicera tiden för ekots ankomst med utbredningshastigheten och dividera med två. I det seismoelektriska fallet kompliceras situationen av att man sänder ut en mekanisk vågrörelse men mottar en elektromagnetisk. Den senare utbreder sig ofantligt mycket snabbare än den förra, så transporttiden för den elektromagnetiska vågen kan man bortse ifrån. Avståndet fås därför genom att man multiplicerar den mekaniska utbredningshastigheten med tiden mellan sändningen och ekots ankomst. Man dividerar alltså inte med två som vid reflektionsseismiska undersökningar.

Mätningarnas detaljupplösningensförmåga är beroende av bandbredden i de utsända och mottagna signalerna. Ju större bandbredd, desto bättre upplösning erhålles. Men samtidigt medför den större bandbredden att alla störningskomponenter inom bandbreddens frekvensområde också kommer med i mätningen. Är dessa starka måste mottagarens känslighet ställas in så att störningarnas starkaste komponent kommer med i den registrerade signalen utan att topparna kapas. Därigenom förloras mätdynamik på irrelevanta bakgrundssignaler. Man måste ha med alla signaler därför att de svaga överlagras de starka.

Det svåraste problemet med att detektera de skapade elektromagnetiska signalerna är att de är svaga och blandas med elektriska störningar skapade av olika system, t ex nätspänningens 50 Hz och järnvägens 16 2/3 Hz och dessa frekvensers övertoner. Övertonerna gör att det inte är så enkelt som att filtrera bort 50 Hz och 16 2/3 Hz från mätningarna.

Fältmätningar längs sträckningen av Hallandsåstunneln och Förbifart Stockholm har visat att de elektriska bakgrundsfälten på de flesta platserna har sin starkaste komponent vid 50 Hz.

-Hallandsås bakgrundsfältets medelvärde, intervall: 722 +/- 1092, [25-3840] μV

-Förbifart Stockholm bakgrundsfältets medelvärde, intervall: 1382 +/- 1625, [11-5770] μV

Då de seismoelektriska signalerna ofta ligger i nivån några mikrovolt (μV) utgör bakgrundsfältet ett allvarligt problem för bredbandiga mätningar i tidsdomän.

Den lösning som valts för mätsystemet är därför att mäta smalbandigt, närmare bestämt ultrasmalbandigt i den meningen att endast EN EXAKT frekvens mäts åt gången. Därigenom kan alla ovidkommande frekvenser filtreras bort. Eftersom man bara sänder en ren sinus finns det bara två parametrar att bestämma relativt den kända referenssignalen, nämligen dess amplitudrelation och dess fasrelation. Dock gäller fortfarande att bandbredden måste vara stor för att man skall få god upplösning. Detta löser man genom att stega genom hela det möjliga frekvensområdet frekvens för frekvens. Detta tar naturligtvis längre tid än att sända alla frekvenser på en gång, men det resulterar i en dramatiskt förbättrad störningsökänslighet. Det frekvensband man kan använda beror på vilka frekvenser sändaren av mekanisk energi klarar av och vilka frekvenser mottagarna kan hantera. Sändaren, som måste vara en vibrator, inte en impulsgenerator, skall vara hydrauliskt styrd, så att så

lite koherenta elektriska fält som möjligt alstras. Med koherens menas att störningarna har samma frekvens som de signaler man vill mäta.

Med ett stort antal fas- och amplitudvärden för olika frekvenser kan man beräkna hur motsvarande signal skulle sett ut i tidsdomän. Skillnaden är att med smalbandsmetoden kan man detektera fas och amplitud ner till i bästa fall ett signal/brusförhållande av -100 dB, medan tidsdomän-mätningar havererar vid ett signal/brusförhållande av 0 dB om signalkanalerna inte är mycket stabil så att man kan medelvärdesbilda framgångsrikt. Om vi gör en konservativ uppskattning att man når 50 dB lägre med smalbandsmätning innebär det att man kan detektera signaler som är 1/300-del svagare.

Självklart slår störningen genom fullständigt om man mäter vid t ex 50 Hz, men man behöver inte sänka ingångskänsligheten i mottagaren för alla frekvenser för att ta hand om denna störande frekvenskomponent vid denna enda frekvens. Vid omvandlingen från frekvens till tidsdomän kan man helt enkelt undvika att ta med de frekvenskomponenter där man vet att bakgrunden ger allvarliga störningar.

Metoden innebär att man digitaliserar 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 ett mätvärde per cykel. Mätvärdesgrupperna summeras och medelvärde bildas för de båda summorna. Det resulterande talparet utgör ett komplext tal $(\alpha, i\beta)$ med vars hjälp man kan beräkna den aktuella frekvensens två egenskaper - fas och amplitud. Fasläget ϕ för ett sådant tal relativt referenssignalen fås genom Ekv. och amplituden A genom Ekv. 3. Referenssignalens amplitud antas här vara 1.

$$\phi = \arctan\left(\frac{\beta}{\alpha}\right) \quad \text{Ekv. 1}$$

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

För varje frekvens kan man räkna ut tidsfunktionen med hjälp av Ekv.

$$S(f_i, t) = A_i \sin(2\pi f_i t + \phi_i) \quad \text{Ekv. 3}$$

Om man summerar det uppmätta antalet frekvenser fas- och amplitudriktigt får man den sökta funktionen av tid S(t).

$$S(t) = \sum_i A_i \sin(2\pi f_i t + \phi_i) \quad \text{Ekv. 4}$$

För att åstadkomma detta behöver man bestämma frekvensområdet B_w och intervallet df mellan frekvenserna. Frekvensområdet bestäms dels av källans kapacitet, dels av den eftersträfvade upplösningen i mätningen. Säg att signalkällan har kapacitet att skicka ut signifikanta mekaniska vibrationer mellan 5 Hz och 700 Hz. Då blir bandbredden $B_w = 700 - 5 = 695$ Hz och bästa möjliga upplösning dx

$$dx = v_0/2B_w \quad \text{Ekv. 5}$$

Om man vill ha ett observationsfönster med ett omfång av T sekunder - kom ihåg att djupet är tiden för reflexen multiplicerad med utbredningshastigheten för de mekaniska vågorna - krävs det att man sätter frekvensintervallet df

$$df = 1/T \quad \text{Ekv. 6}$$

för att man skall få en unik lösning i tidsdomänen. För längre tider än T kommer den rekonstruerade signalen att upprepa sig. Uppenbart tar det längre tid att mäta om man vill nå till större djup.

Målsättningen för projektet är att kunna nå ner till 100 m djup i berg. Om man antar att utbredningshastigheten för mekaniska vågor i de översta 100 metrarna är 2500 m/s blir tiden för att nå ner till 100 m 40 ms. Detta är den nödvändiga observationstiden T och den bestämmer att frekvensintervallet måste vara $1/0.040$ Hz, dvs 25 Hz. Vi behöver således mäta $N = 695/25 = 28$ olika frekvenser. Med 695 Hz bandbredd blir upplösningen $2500/(2 \times 695) = 1.8$ m.

Dessa 28 frekvenser bör väljas så att de inte omfattar någon känd störningsfrekvens, t ex 50 Hz med övertonerna 100, 150, 200 Hz osv eller $16 \frac{2}{3}$ Hz med övertoner dvs $16 \frac{2}{3}$, $33 \frac{1}{3}$, 50, $66 \frac{2}{3}$ etc. Om vi sätter startfrekvensen till 5 Hz erhålles frekvenserna 5, 30, 55, 80, 105, 130, 155, 180 och 205 Hz. Vi ser att frekvenserna är cykliska med talen 5, 30, 55, 80 + $n \times 100$ och att ingen multipel av 50 Hz påträffas inom bandbredden 695 Hz och därför undviks alla övertonerna till 50 Hz störningen. Samma gäller för järnvägsspänningen.

2.2 Mätning direkt mot bergyta

Dessa mätningar skiljer sig främst från mätningar på markytan därigenom att det dämpande jordlagret inte behöver tas med i systemdesignen. Således kan man överväga att använda högre frekvenser i smalbandiga mätningar eller att använda någon typ av impulsälla i kombination med mätningar i tidsdomän.

3 Teknisk Utveckling

3.1 Övergripande beskrivning

I det följande görs en beskrivning av det mätsystem vi föresatt oss att sätta samman. Systemet bygger dels på kommersiella produkter, dels på specialtillverkade delar. Systemet är ett rent mottagarsystem i den meningen att det inte innehåller några komponenter för att förstärka en styrsignal och sända ner denna i marken. Styrsignalen alstras dock av vårt system. Orsaken till att denna komponent utelämnats är att kostnaden inte ryms inom projektramen, vi har tillgång till en hydraulisk vibrator vi kan hyra för att bekräfta att systemet fungerar. I en kommande etapp kan det bli aktuellt att skaffa en vibrator.

I nedan beskrivs ett fullständigt system inkluderande den inhyrda vibratorn.

En laptop styr en funktionsgenerator och en 32-kanalig lock-in förstärkare. Från funktionsgeneratören utgår den signal som styr vibratorn. Från lock-in förstärkaren kommer de 32 komplexa talparen som utgör mätdata för varje frekvens. I laptoppen körs en specialtillverkad mjukvara som även kan hantera data från ett fyrkanaligt oscilloskop, nödvändigt om man vill göra mätningar i tidsdomän.

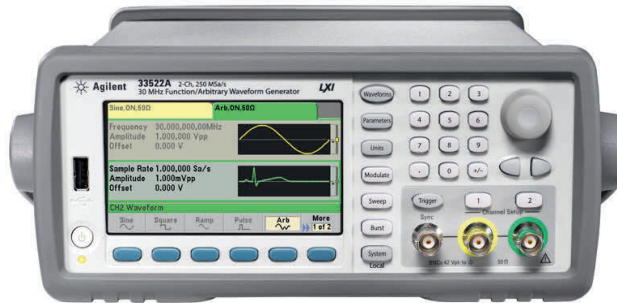
Mjukvaran stegar sig igenom det valda frekvensområdet. För varje frekvens sänds en styrsignal från funktionsgeneratören till vibratorns förstärkare via en speciell adapter som tillverkats av vibratorleverantören (Drive input). Denna kopplingsbox medger också att man på oscilloskopet studerar hur vibratorn uppträder.

Indata till lock-in förstärkaren kommer från en kopplingsbox som försörjer 32 st differentialförstärkare med drivspänning via ett tvåtrådsystem på vilket också de förstärkta mätsignalerna skickas. Kopplingsboxen avskiljer drivspänningen innan signalerna kopplas till lock-in förstärkaren. Till kopplingsboxen går två vanliga geofonstammar med 16 uttag i vardera. Till differentialförstärkarna kopplas två kablar som går till vars en dipol. Dipolen kan utgöras av jordspett, en dipolantenn, en geofon eller en spole. Det finns alltså stora möjligheter att göra jämförande studier, då de två kabelstammarna kan arrangeras parallellt och förses med olika sensorer.

Nedan beskrivs komponenterna mer i detalj.

3.2 Funktionsgenerator

Funktionsgeneratoren är en Agilent 33522A och dess uppgift är att leverera styrsignalen till vibratoren, vilken också är referenssignalen till lock-in förstärkaren. Styrsignalen är en ren sinusfrekvens.



Figur 6. Agilent Funktionsgenerator. *The Agilent function generator.*

3.3 IVI vibratoradapter

Denna adapter sköter signalutbytet mellan styrsystemet och vibratoren. Via en BNC kontakt (Drive Input) styr man vibratorens rörelse med en spänning alstrad av funktionsgeneratoren, på beställning av mjukvaran i laptoppen. Man kan också få information om hur vibratoren fungerar. Det sker genom att man kan koppla in sig på signalen från accelerometrar och lägesgivare på vibratoren. Man kan således mäta motvikts acceleration (Mass Acc.), vibratorplattans acceleration (BP Acc.) och motvikts position (Mass Position).



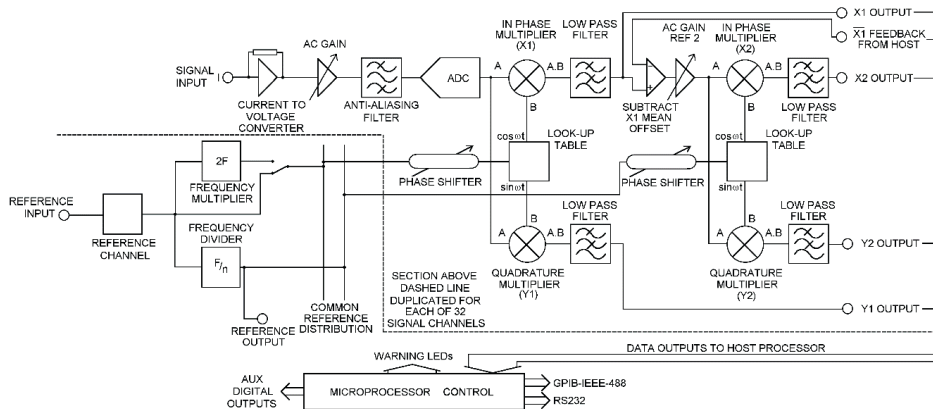
Figur 7. IVI adapter med koppling till ingångssignal, motviktsacceleration, motviktsposition samt markplattans acceleration, den signal som är närmast det man sänder ut i marken. *Adapter from IVI with BNC:s for sending an input signal and measuring the mass acceleration, the mass position and the baseplate acceleration, the signal closest describing what is transmitted into the ground.*

3.4 Lock-in förstärkare

Under projektets gång presenterade det amerikanska företaget Signal Recovery en 32 kanal lock-in förstärkare Modell 7210 Multichannel DSP Lock-in Amplifier. Projektet förfogar nu över en sådan. Att kunna göra fas- och amplitudbestämningar i 32 kanaler samtidigt sparar ju mycket tid, eftersom man inte behöver multiplexera signalerna från 32 mottagare till en enkanalig lock-in förstärkare. Lock-in förstärkaren får sin insignal från kopplingsboxen, som beskrivs nedan. Flera förstärkare kan kopplas ihop i en kedja så att maximalt 512 mätkanaler blir tillgängliga. Utöver ingångarna från förförstärkarna finns det och BNC-kontakter för referenssignalen från funktionsgeneratoren – samma signal som styr vibratorn,



Figur 8. 32 kanal Lock-in förstärkare. *The 32 channel lock-in amplifier.*



Figur 9. Principschema för Lock-in förstärkarens funktionsblock. *Circuit scheme for the different functional blocks of the lock-in amplifier.*

3.5 Kabelstam

Kabelstammarna är som nämnts två och de har vardera 16 uttag av standard geofontyp. Detta gör att vanliga geofoner kan anslutas direkt till systemet om man skulle vilja göra smalbandiga reflektionsseismiska mätningar. Differentialförstärkarna ansluts på samma sätt. De 16 uttagen sitter med 5 m mellanrum och det finns 10 m inledare i ändarna på kablarna. Kablarna är försedda med 32 poliga kontakter i båda ändarna för att möjliggöra sk roll-along

mätningar, då man flyttar mätinstrumentet till ena kabelns andra ändpunkt och flyttar den andra kabeln, så att man stegar sig fram längs mätsträckan med en kabellängd i taget.



Figur 10. Kabelstam (orange) och pigtails (svart). *Cable stem and pigtails.*

3.6 Förförstärkare

Förförstärkarna är av differentiell typ. Detta innebär att störningar som påverkar båda inledarna gör det lika mycket och eftersom man mäter skillnaden mellan ledarna försvinner de gemensamma signalkomponenterna. Detta är en av de viktigaste komponenterna i systemet och tillverkningen är utlagd på en underleverantör med stor erfarenhet av magnetik- och sonarsystem. Flera olika produkter har testats, men det finns ingen färdig lösning på marknaden. För att undvika kabeltrassel i mätsituationen vill vi bara ha kabelstammarna och elektrodanslutningarna på marken. Därför måste förförstärkarna få sin drivspänning genom kabelstammen ledarpar, som också leder tillbaka de förstärkta signalerna till mätsystemet. Då förförstärkarna är under tillverkning kan de inte visas med bild.

3.7 Kopplingsbox

Denna har två stycken 32 poliga cirkulära kontakter på baksidan, en för varje kabelstam. Inuti boxen finns spänningsaggregat som lägger ut +28V på ledarparen till varje uttag. Det finns också kretsar som avskiljer mätsignalen från denna DC-spänning och leder mätsignalen vidare till 32 st BNC-kontakter på boxens framsida. Dessa kontakter förbinds med lock-in förstärkaren 32 BNC-kontakter. Då denna box samspelar med förförstärkarna tillverkas den av samma underleverantör som bygger förförstärkarna. Då kopplingsboxen är under tillverkning kan den inte visas med bild.

4 Fältförsök

Fältförsök har utförts med en befintlig enkanelig lock-in förstärkare samt med utrustning för mätning i tidsdomän. Det senare utfördes i en bergtunnel. Motivet för att mäta från en tunnel är att det har visat sig finnas intresse för att lokalisera vattenförande strukturer också från befintliga tunnlar. De senaste försöken har utförts med den nyanskaffade 32 kanal lock-in förstärkaren.

Den seismiska källan skall kunna sända rena toner och den skall vara hydrauliskt driven för att så lite störande elektriska fält som möjligt skall alstras av tekniken. Undersökning av marknaden för seismiska källor i Sverige visade att inga lämpliga fanns. Däremot äger den danska konsultfirman Rambött en sådan vibrator från IVI.

Vårt första experiment avsåg att ta reda på om vi kunde styra vibratorn enligt önskemål och vilket frekvensområde den kunde täcka. Som redovisats ökar upplösningen i mätningarna ju större frekvensområde / bandbredden är. Ihopkopplingen av våra instrument och IVI-vibratorn erfordrade en särskild adapter som tillverkades av IVI.

4.1 Försök på Helseholmen i Köpenhamn

Av bekvämlighetsskäl utfördes den första testen med Rambölls vibrator på Helseholmen i Köpenhamn, där Ramböll har sina förråd och vibrator ekipaget finns uppställt.



Figur 11. Uppkoppling för test av vibrator. Vibratorn är det blå ekipaget. På vagnen närmast kameran finns vibratorns styrelektronik. På vagnen till höger finns våra instrument, kopplade till vibratorns styrelektronik via IVI-adaptern. *Set-up for testing communication with the vibrator. The vibrator is the blue device. On the cart closest to the camera is the vibrator's control electronics connected to the vibrator via the IVI-adpater.*

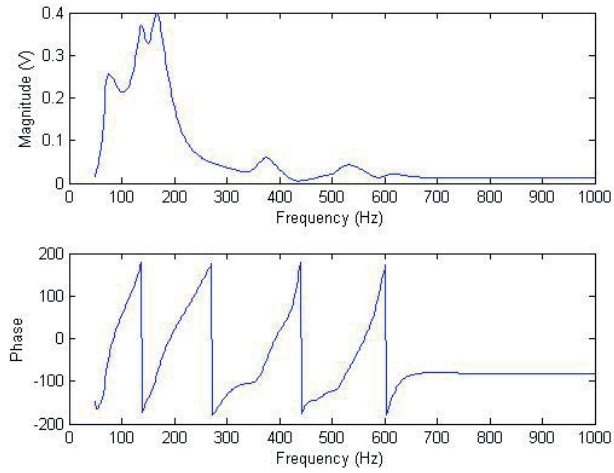


Figur 12. I denna bild visas tydligt vibratorns bottenplatta (Base Plate). Hela ekipaget hissas upp och vilar på denna platta. Plattans acceleration är vår mätsignal och den hämtas via IVI-adaptern och BNC-kontakten Base Plate Acceleration – BP Acc. *In this picture the baseplate of the vibrator is demonstrated. The entire vehicle is elevated and everything rests on this plate when operated. The acceleration of the plate is our measurement signal and it is retrieved from the IVI-adapter and the BNC "Base Plate Acceleration" - BP Acc.*

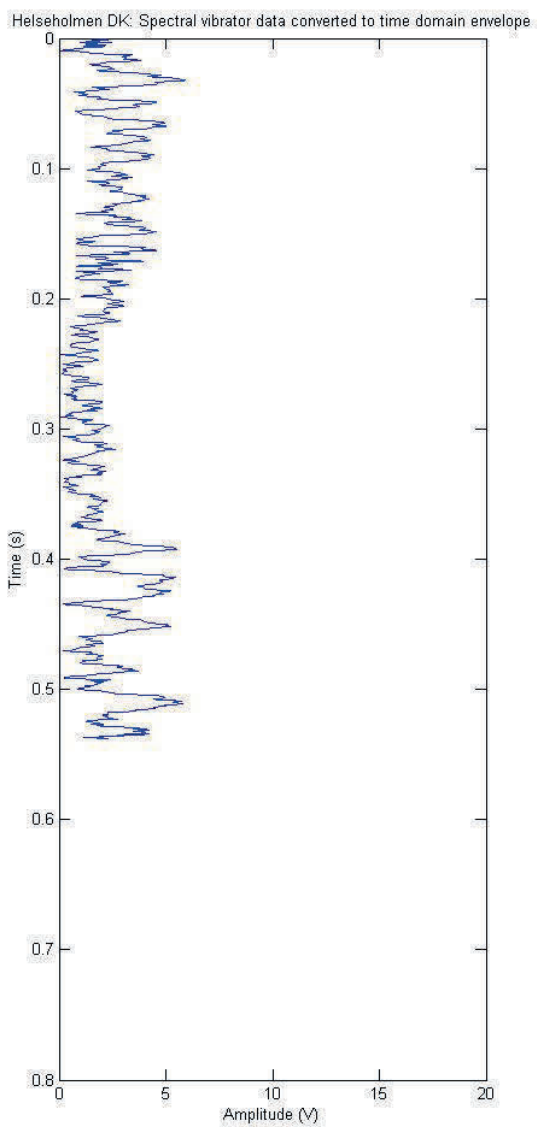
Försöket föll väl ut. Det gick att styra vibratorn med utsignalen från vår enkanaliga lock-in förstärkare. I första försöket ställde vi in frekvensområdet 5 – 1000 Hz i 512 steg, I det andra försöket anpassade vi frekvensområdet till vad vibratorn förmådde sända ut, vilket var 5 – 700 Hz.

I det andra försöket fördubblades utsignalen från lock-in förstärkaren.

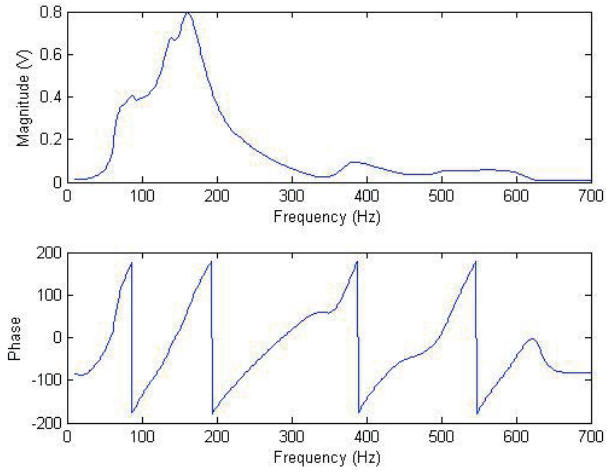
Med insamlade data beräknade vi en tidsfunktion på det sätt som redovisas i Kapitel 2.



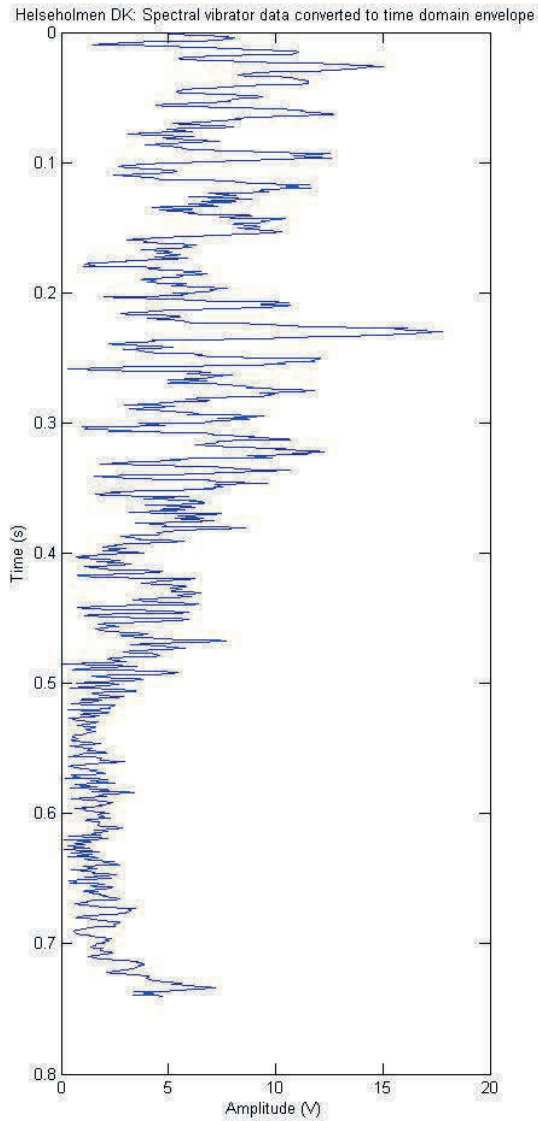
Figur 13. Försök 1. Frekvensområde 5 – 1000 Hz. *Experiment 1. Swept frequency range is 5Hz to 1000Hz.*



Figur 14. Inverterade mätdata: Frekvensdomän till tidsdomän. *Inverted measured data: From frequency domain to time domain.*



Figur 15. Försök Nr 2 Frekvensområdet reducerat till 5Hz – 700Hz. Experiment Nr 2 The frequency range reduced to 5Hz to 700Hz.

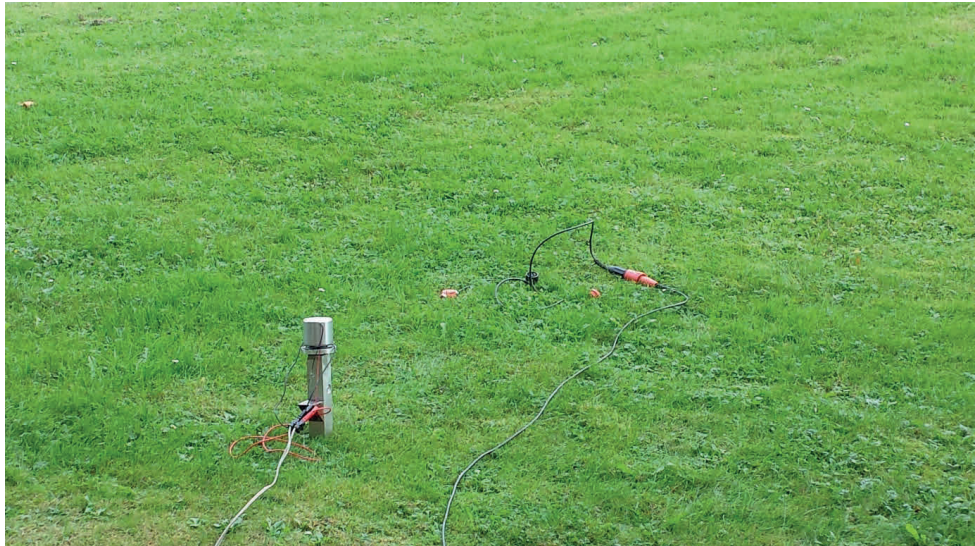


Figur 16. Inverterade mätdata 5-700 Hz: Frekvensdomän till tidsdomän
Enveloppomvandling. *Inverted measured data 5Hz to 700Hz: Frequency domain to
time domain. Envelope converted.*

Tidsfunktionen T sträcker sig till 0.54s för frekvensområdet 5-1000 Hz och till 0.75s för frekvensområdet 5-700Hz. Skillnaden beror på att frekvenssteget df är mindre i det andra fallet och då blir den otvetydiga tidsignalen längre ($T=1/df$). Enveloppomvandlingen förenklar signalen utseende, t ex blir den unipolär.

4.2 Kemicentrum LTH Lund

I syfte att utvärdera om utvecklad programvara för enkanalig lock-in förstärkare fungerade enligt intentionerna utfördes ett enkelt experiment utanför Kemicentrum i Lund. I stället för den stora vibratoren vi planerade att använda i ett senare försök användes en liten elektrisk vibrator och i stället för elektroder användes en geofon som sensor. Ett oscilloskop användes för att övervaka att relevanta signalnivåer uppnåddes.



Figur 17. Motran elektromekanisk vibrator t.v. och en geofon i mitten av bilden. *Motran electromechanical vibrator to the left and a geophone to the right.*

Den utrustning som användes var en laptop, en förförstärkare Signal Recovery 5113, en Signal Recovery 7230 lock-in förstärkare, en effektförstärkare från Labgruppen och ett Tektronix MDO 3014 oscilloskop. Effektförstärkaren drev vibratoren. Den enkanaliga lock-in förstärkaren har en inbyggd signalgenerator och därför behöver inte någon funktionsgenerator användas i dessa försök.



Figur 18. Den utrustning som användes vid funktionskontroll av mjukvara utvecklad för försök med enkanalig lock-in förstärkare. *Equipment used when the developed software for experiments with a single-channel lock-in amplifier is used was checked.*

4.3 Västra Lund

Försök med en IVI vibratort som hyrdes in från Ramböll i Danmark utfördes i Västra Lund, på en plats – Värpinge - där det tidigare observerats relativt ytliga reflexer vid reflektionseismiska undersökningar för geotermiutvinning.

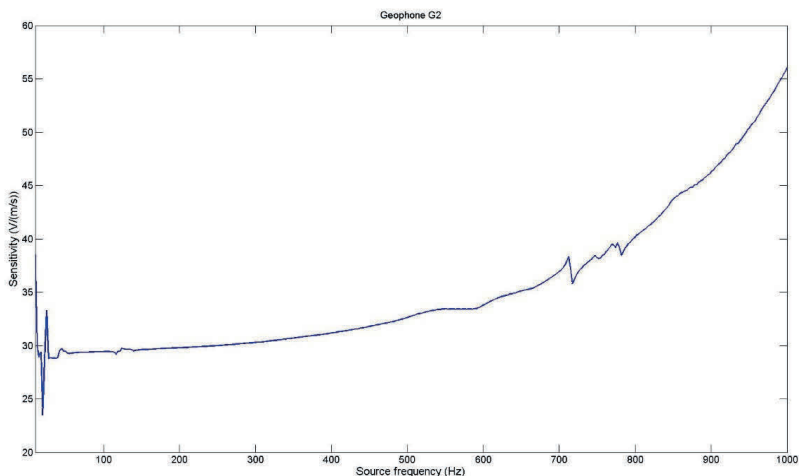


Figur 19. IVI-vibrator tillhörig konsultfirman Ramböll i Danmark. *IVI-vibrator that belongs to the danish consultant Ramböll.*



Figur 20. Mätupställning. Mellan vibratorn bakom Land-Rovern och instrumenten är en geofon och en elektrisk dipol utplacerade. *Test set-up. Between the vibrator behind the Land-Rover and the instruments a geophone and an electric dipole are located.*

Sensorerna i detta försök var elektrisk dipol och geofon. Eftersom den aktuella geofonens (G2) frekvensrespons inte var känd, mättes den upp i laboratoriet innan försöket genomfördes. Vi fann att geofonens respons inom frekvensområdet 40 – 700 Hz var monotont svagt ökande. Geofonen har en egenresonans vid c:a 10 Hz och en mycket stark högfrekvensresonans vid c:a 1300 Hz. Den senare ligger dock utanför vad vibratorn kan presteras.



Figur 21. Frekvensrespons för den vid Lundaförsöket använda geofonen. *Frequency response for the geophone used in the test west of Lund.*

Försöksplan

Försöket utförs längs den av Ramböll tidigare, med reflektionsseismik och samma vibrator, uppmätta linjen Lund 05. Platsen är vald därför att den seismiska profilen uppvisar tydliga reflektorer.

Plats: Vid station 50 i den seismiska profilen 490 m från Önnerupsvägen, i omedelbar anslutning till geotermibrunnen Skälsåker 2.

Markägare: Rütger Wachtmeister 0709-147480

Planerade moment och Syfte med dessa

- 1) Vibratorns frekvensrespons **FR** bestäms med hjälp av dess utsignal BPacc. Nominellt klarar vibratoren en insignal på 10 Vpp. Vid mätningarna på Helseholmen använde vi som mest 5Vpp. Det gav en utsignal från BPacc om 1.5 Vpp. Mäts med Acquire.
- 2) Ytvågshastigheten **YH** bestäms med hjälp av refraktionsmetoden - geofoner + oscilloskop och en hammare, alternativt som en fasskillnad vid frekvensen 150 Hz.
- 3) Genom mätning med geofoner undersöka om det är möjligt att återskapa en reflektionsseismisk sekvens **RS** med hjälp av stegad frekvens mätningar (stepped frequency)
- 4) Genom mätning med elektroddpar undersöka om stegad frekvens är en framkomlig väg att mäta seismoelektriska **SE** signaler.

Fyra olika mätningar utföres för vardera moment 3 och 4 ovan

- a) Mätning med Acquire **a** - samtidig sändning och mottagning
- b) Mätning med Sweep 7230 **b** "gate off" - samtidig sändning och mottagning
- c) Mätning med Sweep 7230 **c** "gate off" - Överhörningstest vibratoren inte aktiverad
- d) Mätning med Sweep 7230 **d** "gate on" - Excitering med vibrator som stängs av och mottagning utförs på kvarstående vibrationer.

Syftet med **a** är att tillsammans med **b** kontrollera att Signal Recoverys programvara "Acquire" och Patrik Fröjds programvara "Sweep 7230" ger samma resultat.

Syftet med **b** och **d** är att se hur resultatet påverkas av att vibratoren stängs av innan mätningen börjar, eventuellt med en paus mellan excitering och mätning.

Syftet med **c** är att registrera bakgrundsdata för att kontrollera eventuell överhörning och för att få en "baseline" som kan subtraheras från exciterade mätningar. Data i **c** kan alltså tänkas subtraheras från **b** och **d**.

Följande mätningar skall alltså göras:

FR, YH

RSa, RSb, RSc, RSd

SEa, SEb, SEc, SEd

Mätupplägg Seismik: Stående vertikala vågor skall mätas - inte horisontell vågutbredning. Detta kan främjas genom att två geofoner placeras på halva våglängden av den dominerande frekvensen. Om ytvågshastigheten på platsen är 250 m/s och dominerande frekvens är 150 Hz blir våglängden 1.7 m och geofonerna skall placeras på ett inbördes avstånd av 0.85 m för att undertrycka horisontella vågor. Signaler som är i motfas dämpas då ut medan de som är i fas förstärks. Mellan geofonledningen och lock-införstärkaren kopplas förförstärkaren 5113 in med inställning A AC. Displayen stängs av under mätning. 5113 Gain = 1000 fungerade vid mätningarna på KC.

Mätupplägg Seismoelektrik: Längs en radiell linje från vibratorn placeras två elektroder på 1-2 m inbördes avstånd. Mätningen sker differentiellt, dvs den ena elektroden ansluts till 5113 ingång A, den andra till 5113 ingång B. 5113 ställs in på A-B. Displayen stängs av under mätning.

Försöksrapport

Mätningarna påbörjades kl 10:00 och var avslutade 15:00

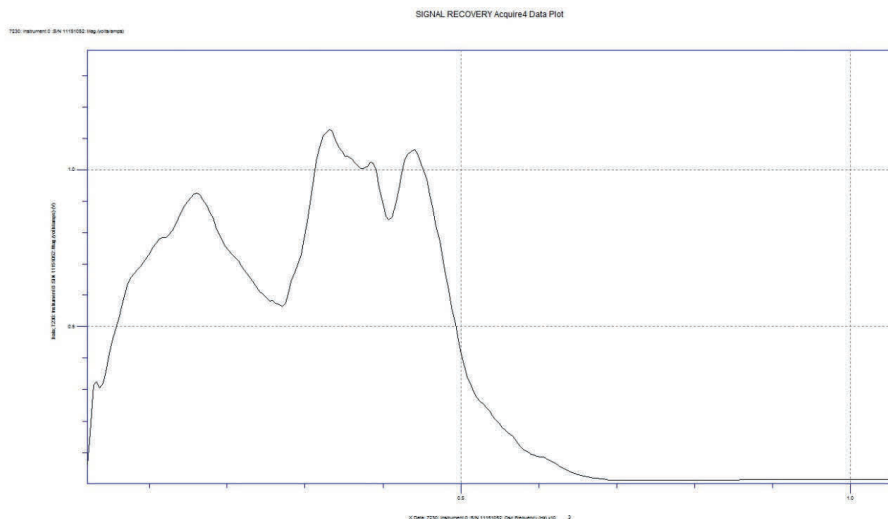
Mätdatafiler

1) Vibratorns frekvensrespons

Genomgående användes 4V ut från 7230 för att styra vibratorn. Ny ventil hade monterats. Jimmy ansåg att vibratorn lät ungefär som när den styrdes av Rambölls egen hårdvara.

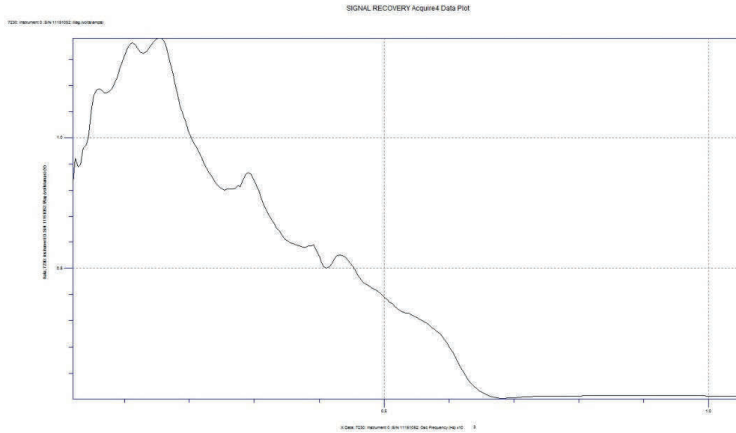
Instrumentuppställning bredvid fordonet. Även motviktens frekvensrespons (FRMA) uppmättes.

FRBP: Vibratorplattand frekvensrespons

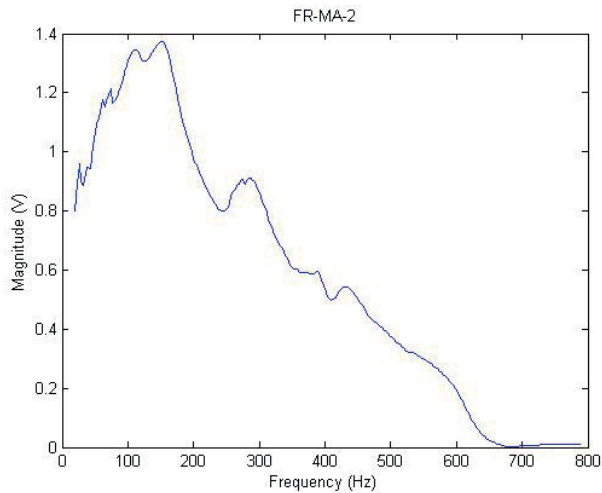


Figur 22. FRBP1 Frekvensrespons mätning av signalen "Base Plate Acceleration" med Acquire. *FRBP1* Frequency response measurement of the signal "Base Plate Acceleration" with the commercial software "Acquire".

FRMA: Motviktens frekvensrespons



Figur 23. FRMA1: Frekvensrespons mätning av signalen "Mass Acceleration" med programmet Acquire. *FRMA1: Frequency response measurement of the signal "Mass Acceleration" with the software Acquire.*



Figur 24. FRMA2: Frekvensrespons för mätning av signalen "Mass Acceleration" med Sweep 7230. *FRMA2: Frequency response measurement of the signal "Mass Acceleration" with our own software Sweep 7230.*

Försöksdata FRMA2 överensstämmer väl med försöksdata FRMA1, vilket bekräftar att den utvecklade programvaran "Sweep 7230" ger samma resultat som Signal Recovery's programvara "Acquire".

Liksom vid provet på Helseholmen visar det sig finnas skillnader mellan vibratorplattans och motviktens frekvensrespons.

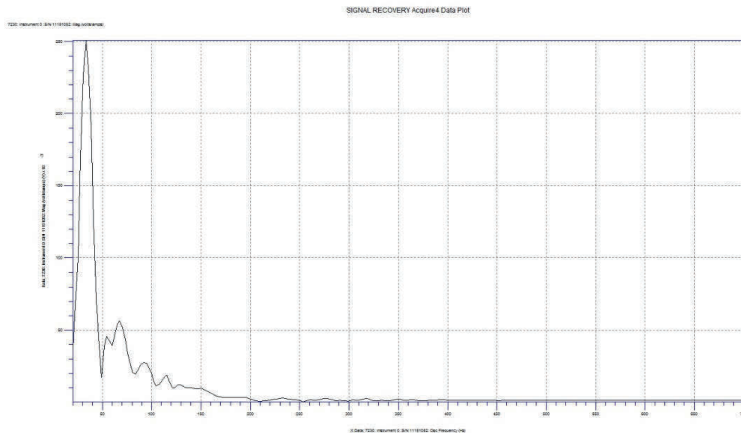
2) Ytvåghastigheten

Geofoner ställdes upp med 5 m avstånd. Försök gjordes att trigga på hammarslag mot sten och flera andra metoder. Efter att ha förstått hur oscilloskopet triggar, kunde vi konstatera att bakgrundsstörningarna var för starka för att vi skulle kunna använda oscilloskopet som seismograf. Detsamma gällde försök att mäta fasskillnaden när vibratorn var inkopplad. Inga mätdata motsvarande planens **YH** inhämtades således.

3) Mätning av stegad frekvensrespons med geofoner, G1 18 m från vibratoren, 1 m avstånd G2

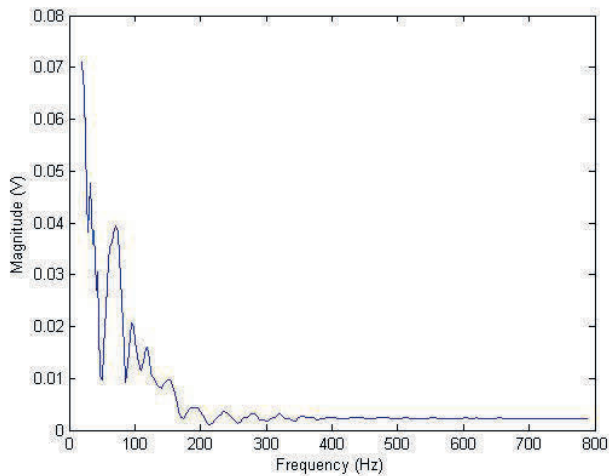
Geofonerna kopplades samman parallellt via en T-koppling.

RSa: Geofon. Samtidig sändning och mottagning med programvaran Acquire



Figur 25. RSa1: 5113 Gn 25, DC-LP1kHz, 7230 Sens 100 mV, T0 200 ms. Acquire.

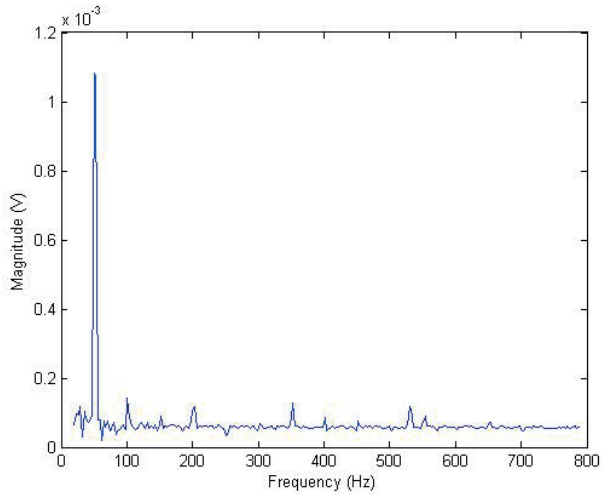
RSb: Geofon. Samtidig sändning och mottagning med mjukvaran Sweep 7230



Figur 26. RSb1: D:o men 7230 Sens 200 mV. Sweep 7230.

Liksom vid den tidigare jämförelsen mellan Acquire och Sweep 7230 är utfallet mycket lika för de två mjukvarorna. Resterande mätningar görs därför med den av Patrik Fröjd utvecklade programvaran "Sweep 7230".

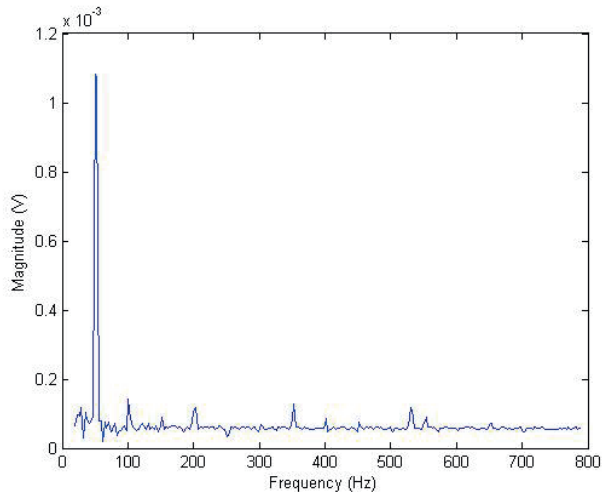
RSc: Geofon. Överhörningstest vibratoren inte aktiverad



Figur 27. RSc: Överhörningsmätning. Vibratorn fränkopplad elektroniken. *Cross-talk measurement with the vibrator disconnected from the electronics.*

Överhörningsmätningen visar på en konstant bakgrund som påverkas av 16 2/3 och 50 Hz frekvenserna och dessas övertoner. I övrigt är signalnivån konstant över hela frekvensområdet och man kan därför utesluta att någon skadlig överhörning inträffar. Det är dock intressant att geofonen plockar upp dessa elektriska störningar.

RSd: Geofon. Vibratorn stängs av och mottagning utförs på kvarstående vibrationer.



Figur 28. RSd: 7230 Sens 5 mV, Paus 2 s

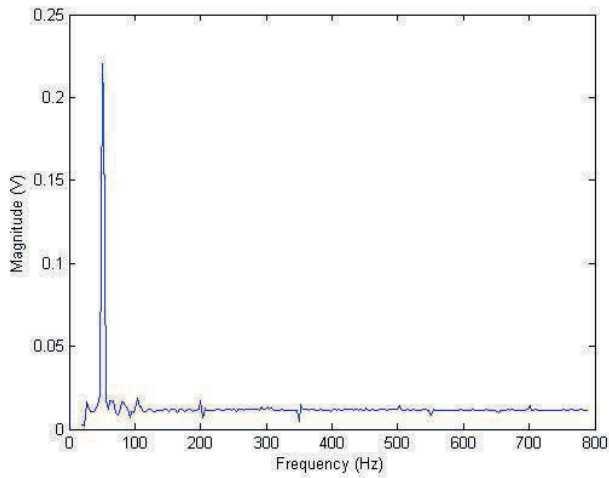
Experimentet visar att geofonen inte uppfångar några vibrationer efter ett 2 s långt interval efter att vibratorn har stängts av. Det enda som framträder i spektrumet är de elektriska störningarna som också återfinns i experimentet RSc.

4) Mätning med elektrodpar, A 16 m från vibratorn, 2 m avstånd till B. 5113 diff-inst A-B

SEa: Elektrodpar. Samtidig sändning och mottagning med programvaran Acquire

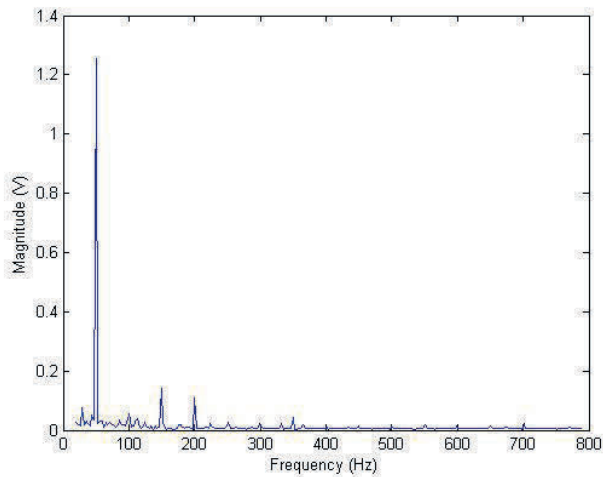
Hoppades över då Sweep 7230 var igång i avsikt att återkomma till programvaran Audacity. Glömdes sedan bort. Utan betydelse då kontrollen kan ske med data i föregående mätserie. I tidigare jämförelser har programvarorna visat sig jämbördiga. Sweep 7230 antas därför vara felfri.

SEb: Elektrodpar. Samtidig sändning och mottagning med mjukvaran Sweep 7230



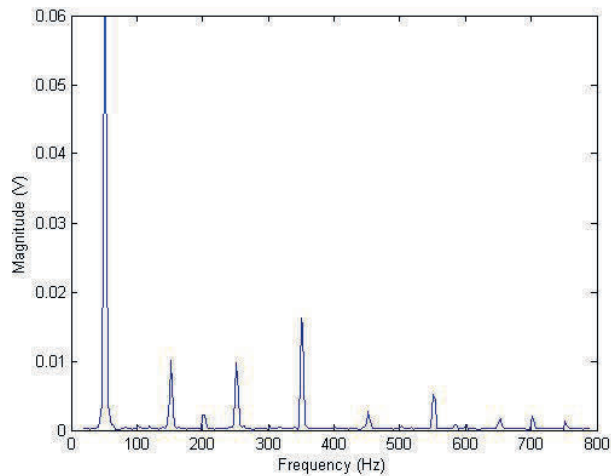
Figur 29. SEb1: 5113 Gain250, DC-LP 1 kHz, 7230 Sens 1 V. Sweep 7230.

Då mätsignalen var svag vid de högre frekvenserna ökades differentialförstärkarens förstärkningsfaktor till 1000 och lock-in förstärkarens ingångskänslighet minskades till 500 mV.



Figur 30. SEb: 5113 Gain 1000, 7230 Sens 500 mV

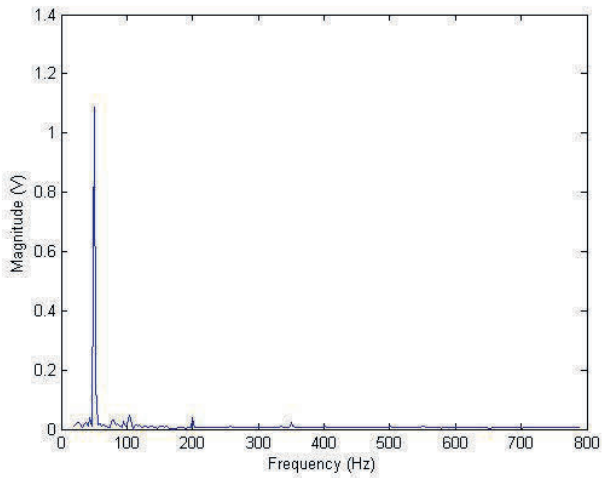
SEc : Överhörningstest vibratorn inte aktiverad



Figur 31. Sec : Paus 0.1 s, 7230 Sens 20 mV

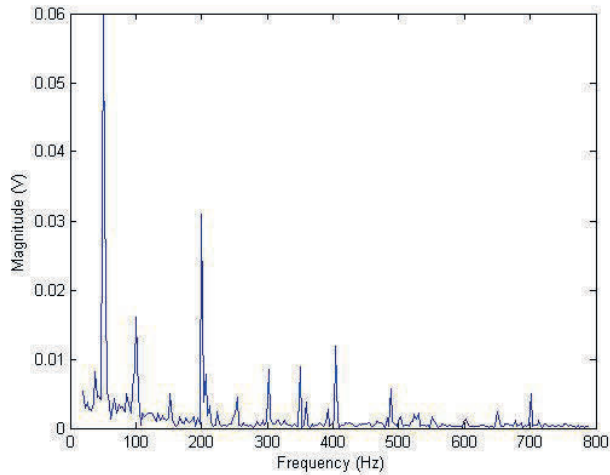
Överhörningsmätningen visar på en konstant bakgrund som påverkas av 50 Hz frekvensen och dess övertoner. I övrigt är signalnivån konstant över hela frekvensområdet och man kan därför utesluta att någon skadlig överhörning inträffar. Det framgår tydligt att det är de udda övertonerna som är starkast, alltså 150(3), 250(5), **350(7)**, 450(9) och 550(11) Hz.

SEd : Elektrisk dipol. Vibratorn stängs av och mottagning utförs på kvarstående vibrationer.

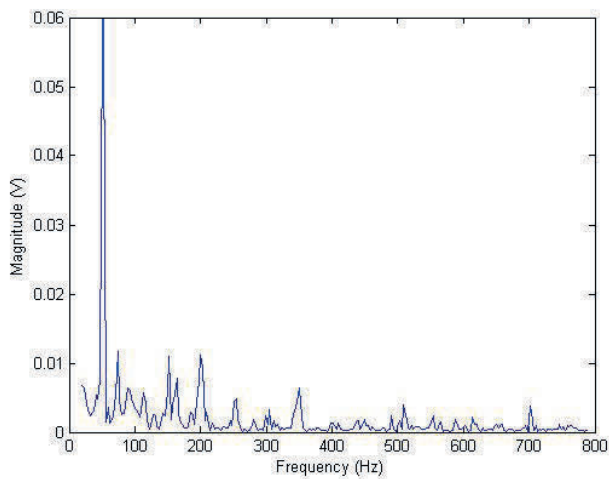


Figur 32. SEd1: Paus 1 s

I försöket SEd1 blev signalen för svag. Därför utfördes ett andra försök Sed2 med minskat ingångsområde på lock-in förstärkaren.



Figur 33. SEd2: Paus 1 s, 7230 Sens 20 mV

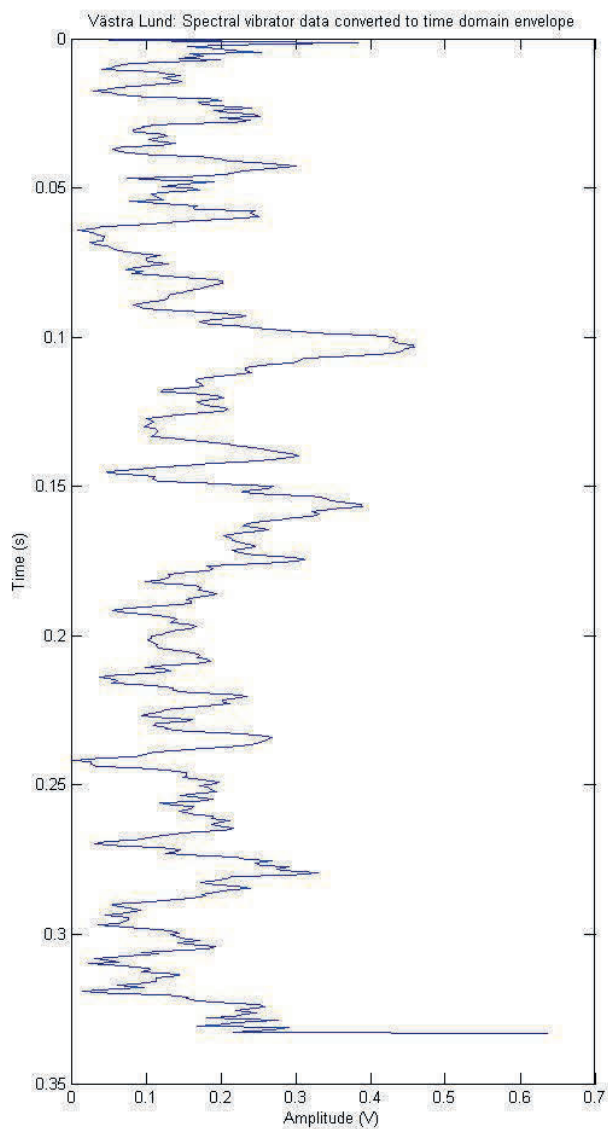


Figur 34. SEd3: Paus 0.1 s, 7230 Sens 20 mV

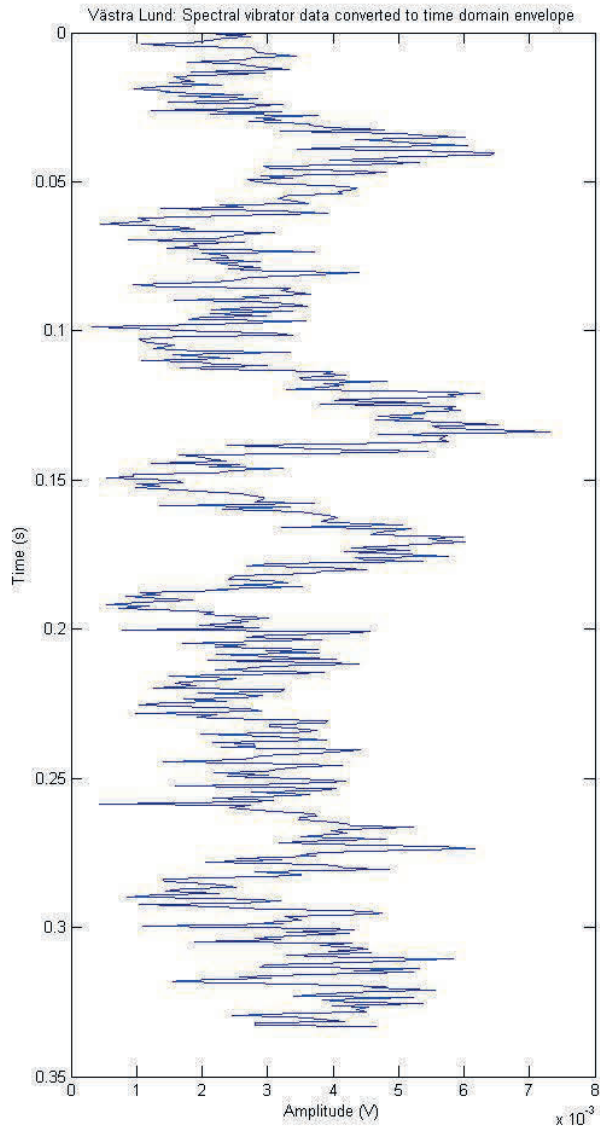
SEd-försöken visade att det utöver de vanliga elektriska störningarna förekommer elektriska signaler upp mot 300 Hz. Vid högre frekvenser är det endast övertonerna som sticker upp ur bruset.

5) Omvandling av uppmätta spektra till tidsdomän

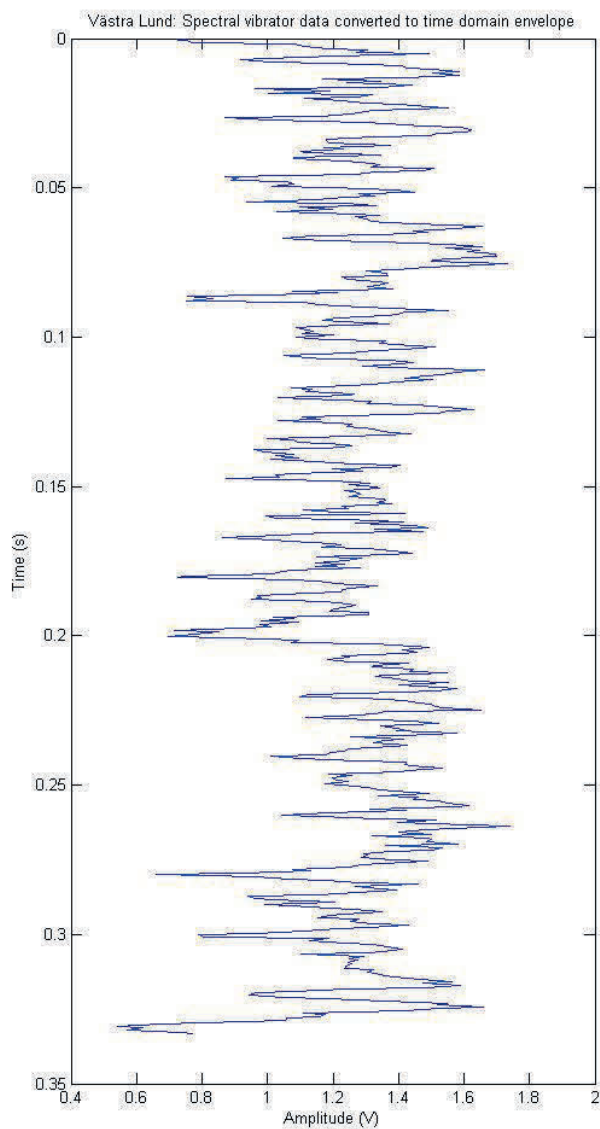
I fyra av de aktuella mätningar inhämtas spektra som kan omvandlas till tidsdomän enligt det tillvägagångssätt som beskrivs i Kapitel 1 Detektionsmetod. Det rör sig om geofonmätningarna RSb och RSd samt om elektrodparmätningarna SEb och Sed. Dessa omvandlingar presenteras nedan. Även Rsa skulle kunnat omvandlas men gett samma resultat som RSb, då mätningarna är lika. Det är inget som säger att den seismiska tidsdomänen skall se likadan ut som den elektriska. I de följande fyra omvandlingarna har inte de kända störningsfrekvenserna tagits bort, då denna process ännu inte är utvecklad. Omvandlingarna görs för att visa att konceptet mätning i frekvensdomän och redovisning i tidsdomän är genomförbart. Detta är ju själva kärnan i det seismoelektriska projektet vid LTH.



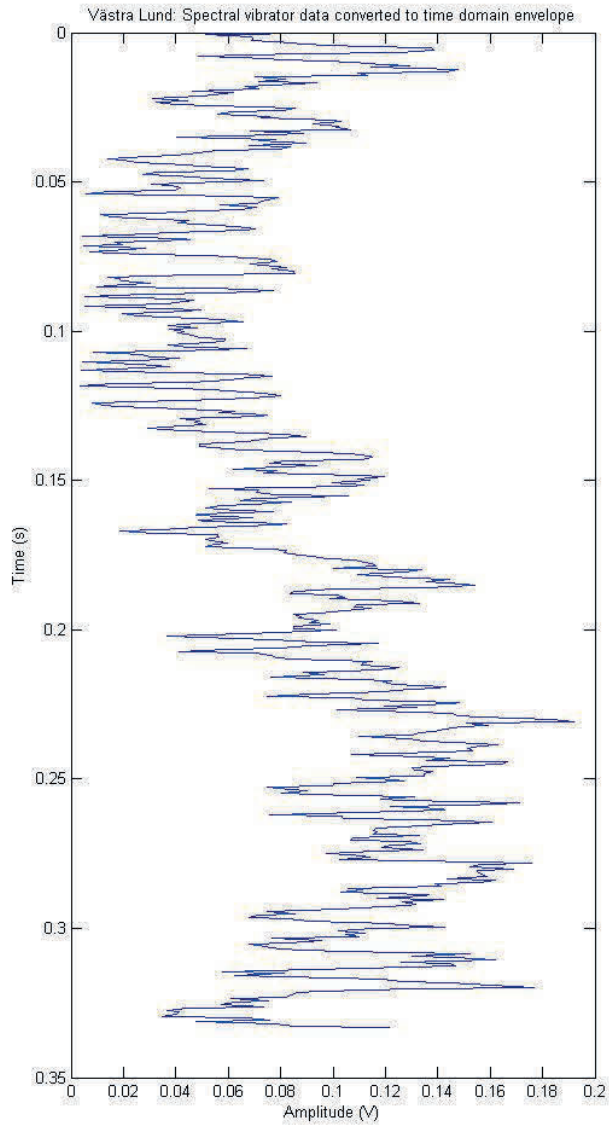
Figur 35. RSb: Seismiska frekvensdata transformerade till tidsdomän. *RSb: Seismic frequency data transformed into the time domain.*



Figur 36. RSd: Seismiska frekvensdata transformerade till tidsdomän. *RSd: Seismic frequency data transformed to the time domain.*



Figur 37. SEb2: Elektriska frekvensdata transformerade till tidsdomän. *SEb2: Electrical frequency data transformed to the time domain.*



Figur 38. SEd3: Elektriska frekvensdata transformerade till tidsdomän. *Sed3: Electrical frequency data transformed to the time domain.*

Omvandlingen från spektrala data till tidsdomän (djup) har gått som planerat. Metodiken får därför anses bekräftad. Bristen är att vi inte har några referensdata avseende vattenförande horisonter.

Apparatförteckning

MC och bilbatteri 12 V

DC- 220 V AC konverter 300 W

Grenuttag

Förlängningssladd 220V (användes ej)

Tektronix 3014 Oscilloskop

Signal Recovery 7230 Lock-in förstärkare

Signal Recovery 5113 Preamplifier

Laptop med "Acquire" och "Sweep 7230" programvaror installerade

Break-out box till IVI Minivib 7000

Diverse BNC kablage, T-kopplingar (2 st) och mellanstycken hona-hona (2 st)

100 m vit koax RG58

2 st geofoner med förlängningskablar på rulle

2 st elektroder med kablage - koax 178 utan skärmslutning perifert

2 st enkelledare på rulle (användes ej, tänkt som back-up för SE differentiell mätning)

Hammare

Måttband

Tältstol

Bord

Borde ha funnits med

Thurlby spänningsförstärkare (ökad insignal till vibratorn)

Geofonförstärkare m 2 kanaler

Iakttagelser

Starka elektriska fält på platsen, de uppgår till 1-2 V. Övertoner upp till 700 Hz

Displayen på 5113 kan inte stängas av när förstärkaren befinner sig i "overload"-tillstånd.

4.4 Gårdatunneln i Göteborg

Experimentet utfördes på initiativ av referensgruppen, då mangärna såg tillämpningarna utvidgade till mätningar direkt mot berg. Det har under projektets gång framkommit att det finns stort intresse för att undersöka vattenförande zoner kring befintliga tunnlar. Detta är också ett av de problemområden som den vetenskapliga gruppen som utvärderade SKB:s arbete kom fram till att det finns brister inom.

Inga detaljer om tunnelns sträckning eller funktion presenteras här, då de är ovidkommande för de mätningar vi utförde, liksom exakt var dessa skedde. Däremot skall framhållas den mycket goda support vi erhöll från ägarna Teliasonera och BESAB, servicebolaget som sköter tunneln.

Två platser hade valts ut i förväg med ledning av tidigare loggade läckageuppgifter.

Försöksplan Gårdatunneln

Tid: 2015-02-02 och 04

= Assistans från Teliasonera / BESAB erfordras

2015-02-02 Förberedelser

10:00 Möte vid tunneln. Plats specificeras v 5.

Identifiering av de två mätsträckorna, val av mätpunkt.

Planslipning av bergyta vid behov. LTH: montering av fästplattor med lim (vinkelslip m trissa)

Lunch

13:00 Åter i tunneln

Två platser: Borrning av hål 2 m avstånd enligt figur för elektroder med slagborr 10 mm. LTH: montering av elektroder som består av expanderbult medtagen från Lund.

Bakgrundmätning av elektriska fält.

2015-02-03 Annan aktivitet

BESAB förbereder försöksplatserna

2015-02-04 Mätningar

8:00 Träffas vid tunnelinfart.

#Vagn för transport av mätutrustning önskvärd. Instrumentbord och stol medtagna från Lund.

Följande konfigurationer är avsedda att mätas:

Akustiska området

Källa: Transient: 1 Snickarhammare, 2 slägga, 3 bultpistol; 4 Motran vibrator; Kontinuerlig: 5 Motran Vibrator

Detektor: a) Horisontalgeofon, b) Elektrodpar med 2 m separation

Försök: A1, A2, A3, A4, A5

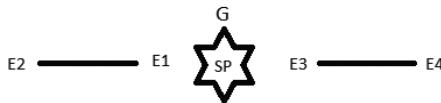
Ultraljudområdet

Källa: 6 Ultraljudsändare/mottagare 50, 100, 180

Detektor: a) Ultraljudsändare/mottagare, b) elektrodpar med 2 m separation

Försök: U50, U100, U180

Således sammanlagt 8 försök.



Figur 39. Arrangemang av källa (SP), elektroder E_x med 2 m separation och geofon (G).
Arrangement of the source (SP), electrodes E_x with 2 m separation and Geophone (G).

Utrustningslista*Datainsamling*

- Dator med datainsamlingskort Toughbook
- Oscilloskop 4 ch Tektronix
- Lock-in förstärkare Signal Recovery 1 ch
- Förförstärkare 2 st Signal Recovery 5113
- Ritecförstärkare
- Fordonsförstärkare 12V (Mono)
- BNC-Kablar
- Nätssladdar
- Konverter 12-230 V

Signalgenerering

- Akustiskt: Hammare, slägga, Vibrator (Motran) m förstärkare, bultpistol (BESAB)
- Ultraljud: Ultraljudsändare/mottagare 50, 100 och 180 kHz
- Signalgenerator HP

Signalmottagning

- Krohn-Hite filter 2 ch
- Akustiskt: Geofon med förförstärkare (12V) fungerar som triggpuls, två elektrodpar
- Ultraljud: Samma som vid signalgenerering, diplexer ger triggsignal, två elektrodpar

Försök med icke elektrisk källa som ger mindre risk för störningar

Försök A1: Snickarhammare anslås mellan elektrodparen. Signalen från geofonen används för att trigga oscilloskop och datainsamling. Signalerna från elektrodparen kopplas till 5113, därefter till datainsamlingen. (15 min)

Försök A2: Slägga anslås mellan elektrodparen. Signalen från geofonen används för att trigga oscilloskop och datainsamling. Signalerna från elektrodparen kopplas till två stycken 5113, därefter till datainsamlingen. (15 min)

Försök A3: Bultpistolen anbringas mellan elektrodparen. Signalen från geofonen används för att trigga oscilloskop och datainsamling. Signalerna från elektrodparen kopplas till två stycken 5113, därefter till datainsamlingen. (15 min)

Försök med elektriskt drivna källor vilket kan ge upphov till störningar

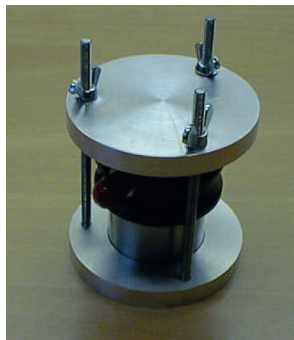
Försök A4: Motran vibrator monteras på metallplatta med gängat hål. Denna platta skruvas fast på den platta som är avsedd för ultraljudstransducern. Pulssändning. Försök görs med olika frekvenser i arbetsområdet 10-600 Hz (Resonans vid 38 Hz). Signal från signalgeneratoren sänds till 12 V fordonsförstärkare. (60 min)

Försök A5: Motran vibrator som i föregående försök. Stegad frekvens. Signal från Lock-in förstärkare styr 12V fordonsförstärkare kopplad till vibratoren. Signal från det ena elektrodpåret leds via 5113 till lock-in förstärkarens ingång. Lock-in körs med hjälp av standard programvaran Acquire. (Detta försök sker mot bättre vetande, då det innebär att vibratoren drivs elektriskt samtidigt som vi försöker mäta mycket svaga elektriska signaler. Men försöka duger ju då extra kostnaden är försumbar).(60 min)

Försök U1: 50 kHz transducer monterad på metallplatta med tre skruvar och lock. Signal från signalgeneratoren leds till RITEC och därefter till 50 kHz transducern. RITEC diplexer används för att registrera ultraljudekon på oscilloskop ch 1. Signalerna från elektrodpåren och 5113 förförstärkarna leds till oscilloskopets ch 2 och ch 3. (15 min)

Försök U1: 100 kHz transducer monterad på metallplatta med tre skruvar och lock. Signal från signalgeneratoren leds till RITEC och därefter till 100 kHz transducern. RITEC diplexer används för att registrera ultraljudekon på oscilloskop ch 1. Signalerna från elektrodpåren och 5113 förförstärkarna leds till oscilloskopets ch 2 och ch 3. (15 min)

Försök U1: 180 kHz transducer monterad på metallplatta med tre skruvar och lock. Signal från signalgeneratoren leds till RITEC och därefter till 180 kHz transducern. RITEC diplexer används för att registrera ultraljudekon på oscilloskop ch 1. Signalerna från elektrodpåren och 5113 förförstärkarna leds till oscilloskopets ch 2 och ch 3. (15 min)



Figur 40. Bergfäste för 50 kHz, 100 kHz och 180 kHz ultraljudsändare. Den undre plattan limmas mot den planslipade bergytan och används även för vibratoren. *Fixture for rock for 50, 100 and 180 kHz ultrasonic transducers. The lower plate is glued against the flattened rock surface and is also used for the vibrator.*

Försöksrapport Gårdatunneln 2/2 och 4/2.

Rapporten refererar till Försöksplanen

2015-02-02

Alla deltagare (8 personer) samlades kl 10 och nedfärd i tunneln per Kawasaki Mule (2 st) skedde efter genomgång. Det ena fordonet hade en plattform på taket vilket underlättade arbete i tunneltak.



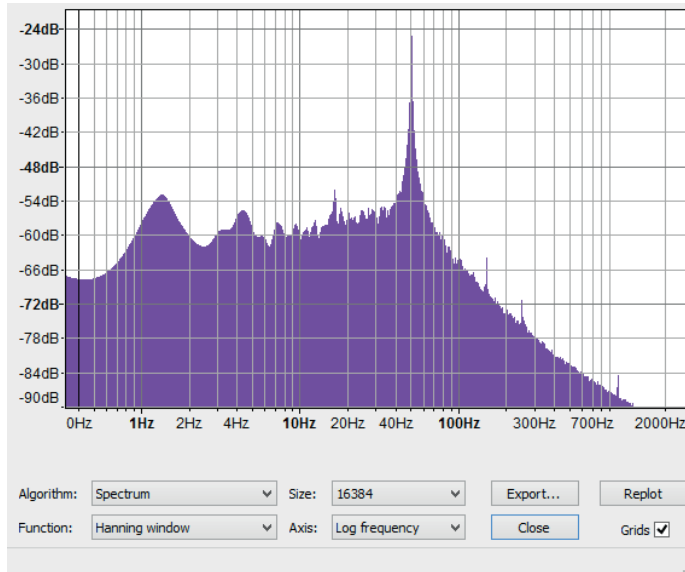
Figur 41. Kawasaki Mule använd för transporter i Gårdatunneln. *Vehicle used for transportation in the tunnel.*

FM

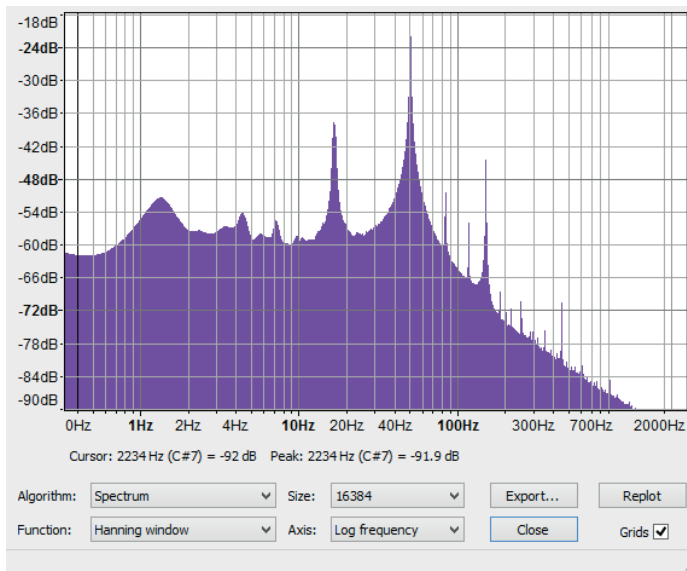
Syftet med förmiddagens arbete var att montera infästningsplattor för geofon och vibrator i de båda tunnelavsnitt som valts. På åtta platser hade BESAB förberett sprutbetongen genom att planslipa den. Det sker med en vinkelslip försedd med planskiva. Då försöksplanen var upplagd för mätning på två olika platser valdes de lämpligaste två ut. Resterande platser kan utnyttjas vid kommande mätningar med finslipad metodik.

De två platserna som valdes ut var belägna inom mätvall 15D-15C (W) respektive inom 17-16C (E). Räknat från påfarten var det förberedda ytorna 4 resp 7 av totalt 8. I det första avsnittet fästes plattorna med en tvåkomponent epoxibaserad spackelmasa och i det andra avsnittet med vanligt epoxilim. Syftet var att utröna vilken fästmetod som var fördelaktigast. Infästningsplattorna hade genomgående gängade hål och för att dessa inte skulle fyllas med epoxi var hålen tejpad på den sida som monterades mot sprutbetongen.

EMB Bakgrundsmätning av elektriska fält genomfördes på de två mätplatserna. Detta skedde genom att slå ner spik i kanten av asfalten i tunnelbotten. Expanderbult för montering av elektroder kring skottpunkterna överlämnades till BESAB, som monterade dessa detaljer innan mätningarna på onsdagen påbörjades.



Figur 42. Bakgrundsspektrum i det västra(1) försöksområdet. 50 Hz dominerar.
Background spectrum in the western (1) test-area. 50 Hz dominates.



Figur 42. Bakgrundsspektrum i det östra(2) försöksområdet. 50 Hz dominerar

men $16 \frac{2}{3}$ Hz liksom andra övertonen 150 Hz, framträder också tydligt. *Background spectrum in the eastern test-area. 50 Hz dominates but $16 \frac{2}{3}$ (railway) and the second harmonic 150 Hz also appear.*

Inverkan av järnvägens $16 \frac{2}{3}$ Hz är betydligt kraftigare i det östra området och övertonerna är också starkare där.

2015-02-04

Alla deltagare (6 personer) samlades kl 8 och nedfart skedde för mätningar.

Mätningarna genomfördes med ett elektrodpar på vardera sidan om skottpunkten. Dessutom var en geofon fäst vid bergytan och denna gav en bild av den signal som skickades in i bergmassan. Signalerna registrerades på oscilloskop och i vissa fall skedde medelvärdesbildning (Avg) genom upprepade slag/skott/transmissioner i syfte att undertrycka bakgrundens nätfrekvens. Med transmissioner menas att en puls med fem cykler av angiven frekvens sänds ut via vibratorn. Då detta sker helt automatiskt kan ett mycket större antal medelvärdesbildningar ske än om man använder snickarhammare eller bultpistol som signalkälla. Med dessa användes åtta signaler (slag/skott) per medelvärde, med vibratorn 512 signaler.



Figur 43. Sensormontage i Gårdatunneln. Innanför den röda cirkeln (skottpunkten) är sprutbetongen planslipad. Där sitter en geofon och den något större vibratorn monterade på fastlimmade aluminiumskivor. Geofonsignalen används för att trigga oscilloskopet. Utanför

ringen ser man de inre elektroderna i de två elektrodparen på ömse sidor om skottpunkten. Dessa består av 10 mm expanderbult och är inkopplade med batteriklämmor. Inom den röda cirkeln applicerades också de impulsiva källorna hammare, spett, handslägga och bultpistol.

Sensor installation in Gårdatunneln. Inside the red circle (Shotpoint) the shotcrete is flattened. The geophone and vibrator are installed on glued plates. The signal from the geophone is used to trigger the oscilloscope. Outside the red ring the inner electrodes of the two electrode pairs are visible. These consist of 10 mm expansion bolts and are connected with crocodile clamps. Within the red circle the impulsive sources were also applied.

Mätningar med stegad frekvens och ultraljud genomfördes inte av utrustnings- och tidsskäl. Sådana mätningar planeras genomföras vid framtida återbesök i Gårdatunneln.

FM Plats 15D-15C (W, 1)

De flesta mätdata är trekanaliga. Vibratormätningarna fyrkanaliga

Ch1: Geofonsignal = I berget utsänd akustisk signal

Ch2: Östra (E) elektrodparet genom förstärkare 5113 Gain 1 Filter 1-3 kHz

Ch3: Västra (W) elektrodparet direkt till oscilloskopet

Ch4: Den elektriska utsignalen till vibratorn

I syfte att optimera den registrerade signalen utfördes oftast flera olika registreringar med samma källa. För de källor som visade god repetitivitet var medelvärdesbildning möjlig. För vibratorn registrerades resultatet vid olika frekvenser.

Följande mätningar genomfördes i västra området (filnamn inom parentes):

-1W Snickarhammare: (Hammare1, Hammare1n1Avg8, Hammare1n2Avg8)

-2W Handslägga: (Slägga1)

-3W Järnspekt: (Spett1)

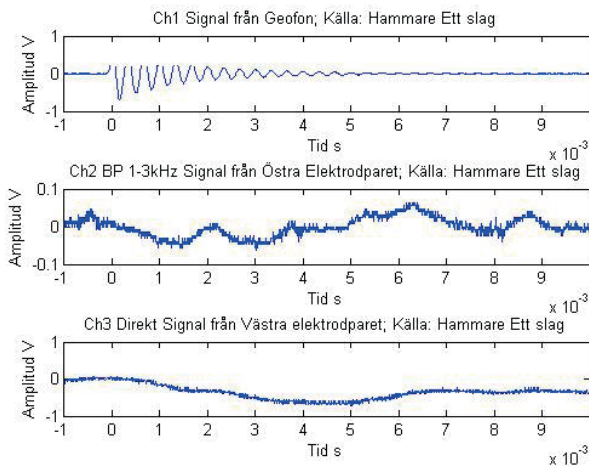
-4W Bultpistol: (Bultpistol1n1, Bultpistol1n2, Bultpistol1n3Avg8, Bultpistol1n4Avg8)

-5W Vibrator 1 kg: (Motran1n1Avg512F600Hz, Motran1n2Avg512F240Hz,
Motran1n3Avg64F40Hz)

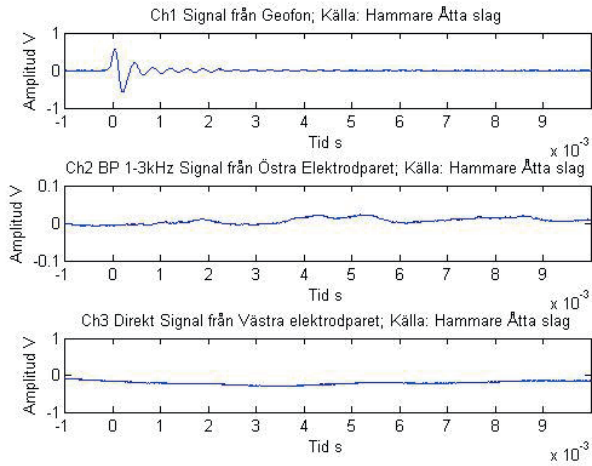


Figur 44. Bultpistol med krutladdningar på remsa. Pistolen avfyras direkt mot berget utan något spik i loppet. Pistongen slår alltså direkt mot berget. Detta ger en mycket kraftig och repeterbar signal. *Bolt-gun with shells. The gun is fired directly against the rock without any nail in the barrel. The piston slams directly into the rock. This provides a very strong and repeatable signal.*

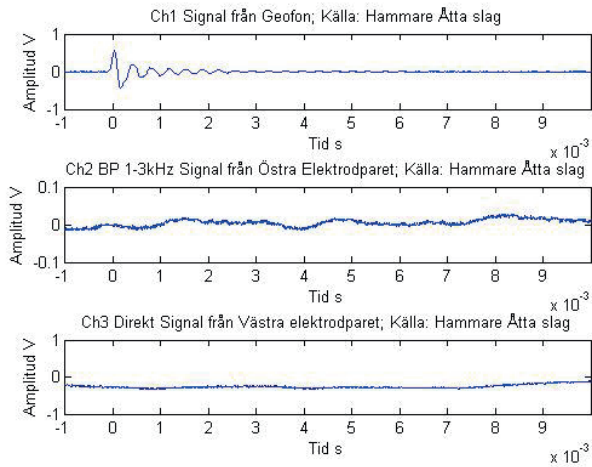
1W Snickarhammare



.Figur 45. Geofonsignalen är överstyrd (Hammare1). *The geophone signal is saturated.*

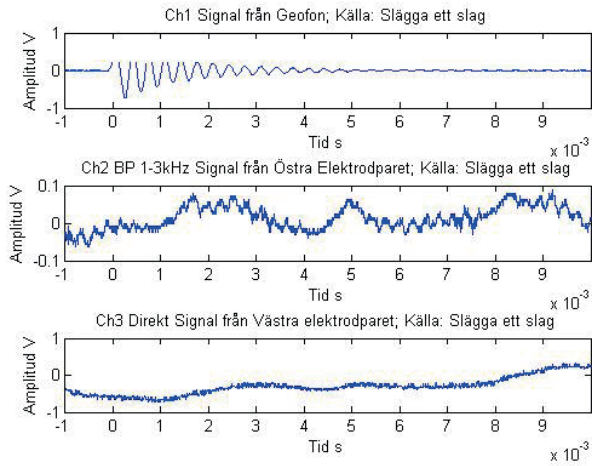


Figur 46. Medelvärdesbildning av åtta hammarslag (Hamare1n1Avg8). *Averaging of eight hammer-strikes.*



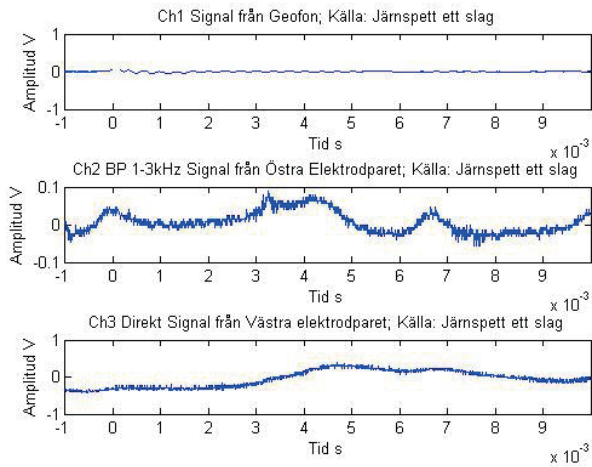
Figur 47. Medelvärdesbildning av åtta hammarslag (Hamare1n2Avg8). *Averaging of eight hammer-strikes.*

2W Handslägga



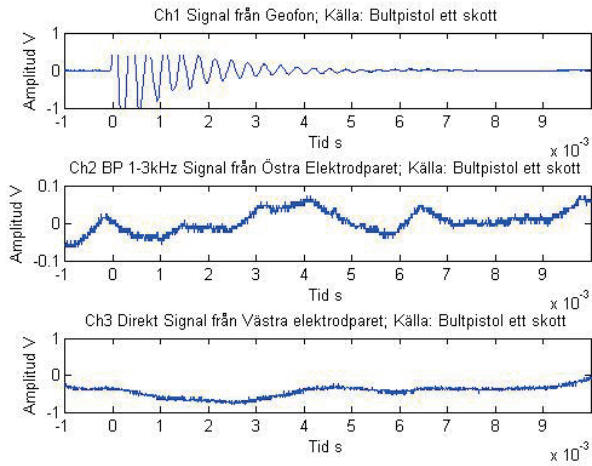
Figur 48. Geofonsignalen är överstyrd (Slägga1). *The geophone signal is saturated.*

3W Järnspekt

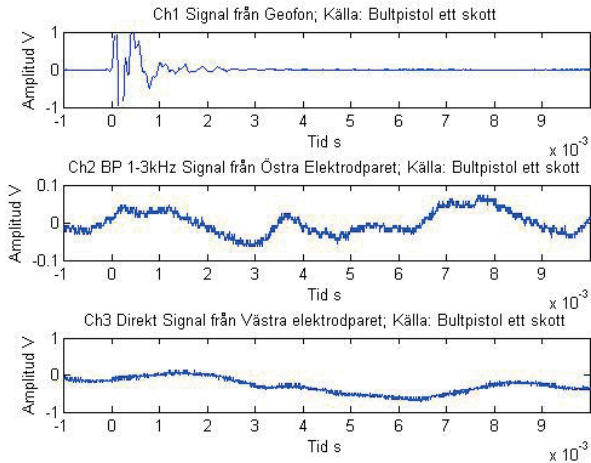


Figur 49. Järnspekt 1 slag gav svag signal (Spekt1). *Iron rod one strike produced a weak signal.*

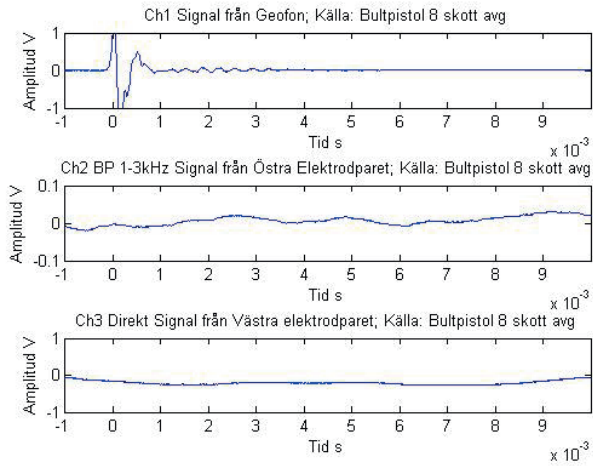
4W Bultpistol



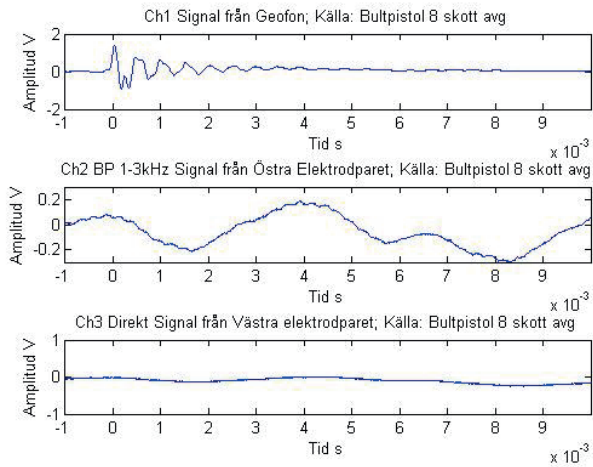
Figur 50. Bultpistol 1 skott, signalen överstyrd (Bultpistol1n1). *Bolt-gun one shot, the signal is saturated.*



Figur 51. Bultpistol 1 skott (Bultpistol1n2). *Bolt-gun one shot.*

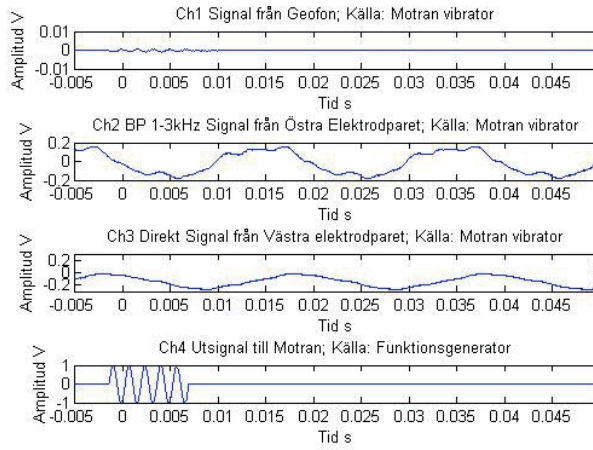


Figur 52. Bultpistol åtta skott medelvärdesbildade (Bultpistol1n3Avg8). *Bolt-gun eight shots averaged.*

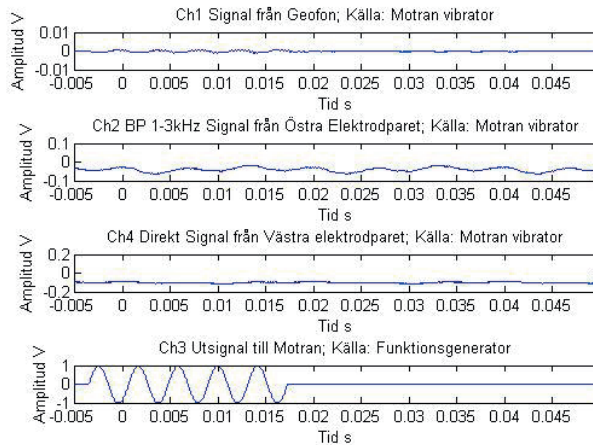


Figur 53. Bultpistol åtta skott medelvärdesbildade (Bultpistol1n4Avg8). *Bolt-gun eight shots averaged.*

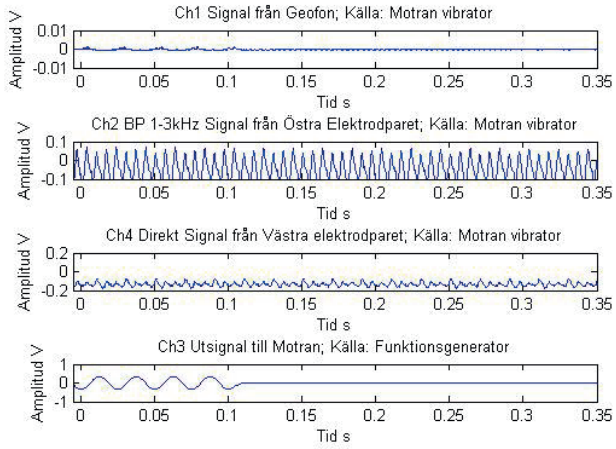
5W Vibrator 1 kg



Figur 54. Utsändning av 5 cykler 600 Hz signal (Motran1n1Avg512F600Hz). *Transmission of five cycles 600 Hz signal.*



Figur 55. Utsändning av 5 cykler 240 Hz signal (Motran1n2Avg512F240Hz). *Transmission of 5 cycles of 240 Hz.*



Figur 56. Utsändning av 5 cykler 40 Hz signal (Motran1n3Avg64F40Hz). *Transmission of five cycles of 40 Hz signal.*

EM Plats 17-16C (E, 2)

Ch1: Geofonsignal = I berget utsänd signal

Ch2: Västra (W) elektrodparet direkt till oscilloskopet

Ch3: Östra (E) elektrodparet genom förstärkare 5113 Gain 1 Filter 1-3 kHz

Efter förmiddagens mätningar stod det klart att de bästa transienta källorna var snickarhammare och bultpistol, vilka visade goda egenskaper vid medelvärdesbildning, dvs de var repetitiva. Vibratorn fungerade inte som avsett vid det sista försöket på förmiddagen. Därför genomfördes mätningarna på eftermiddagen endast med snickarhammare och bultpistol. Även en bakgrundsmätning med oscilloskopet utfördes.

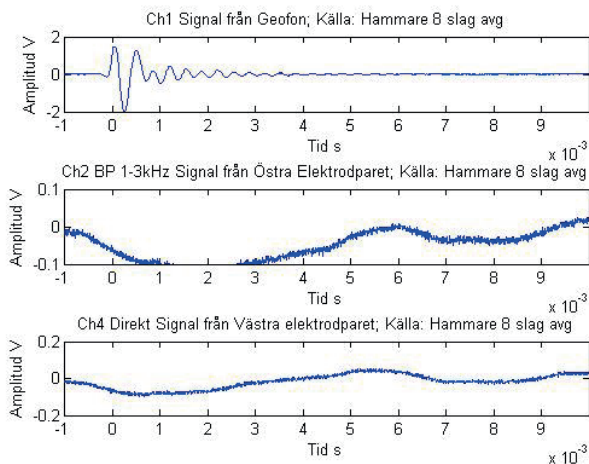
Följande mätningar genomfördes i östra området (filnamn inom parentes):

-1E Snickarhammare: (Hammare2Avg8)

-2E Bultpistol: (Bultpistol2n1Avg8, Bultpistol2n2)

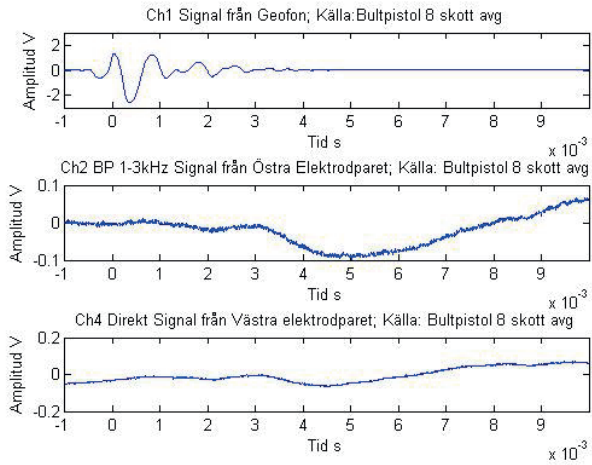
-3E Bakgrundsmätning med oscilloskop

1E Snickarhammare: (Hammare2Avg8)

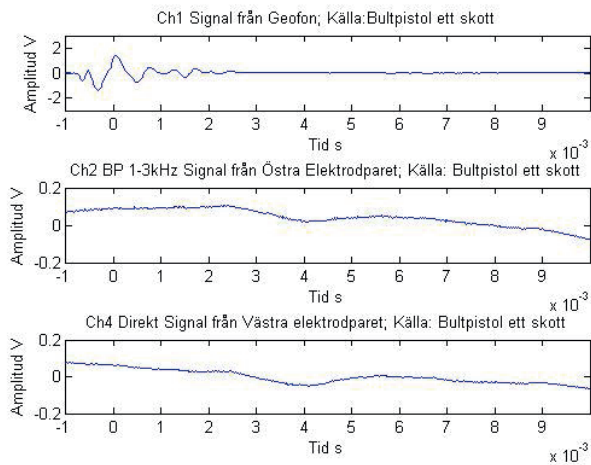


Figur 57. Snickarhammare (Hammare2Avg8). *Carpenters hammer.*

2E Bultpistol: (Bultpistol2n1Avg8, Bultpistol2n2)

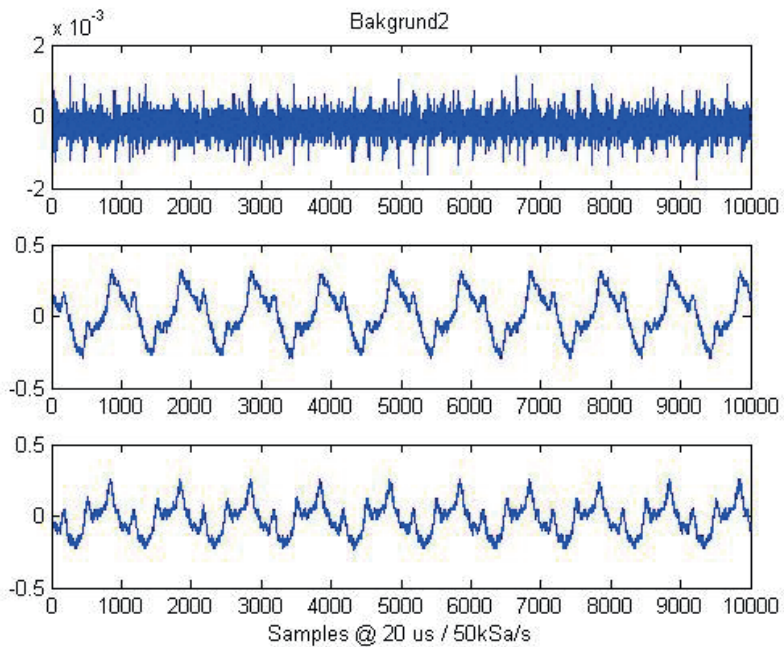


Figur 58. (Bultpistol2n1Avg8)



Figur 59. (Bultpistol 2n2)

3E Bakgrundsmätning med oscilloskop östra området

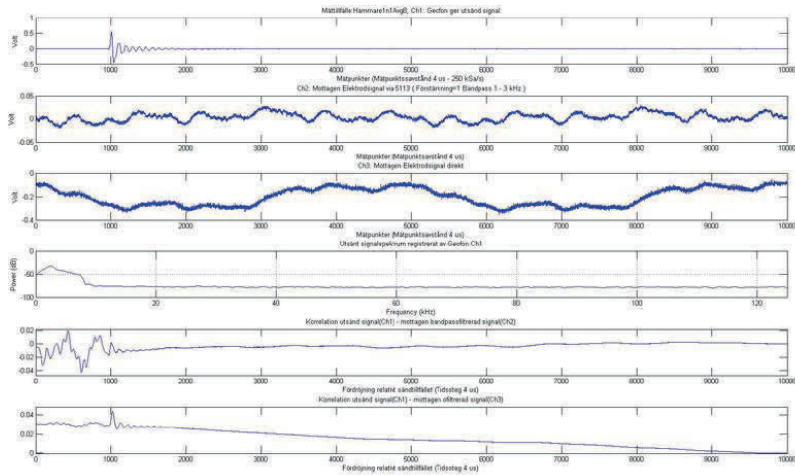


Figur 60. Bakgrundsmätning med oscilloskop i det östra området(2). *Background measurement with an oscilloscope in the eastern test-area.*

Processerade data

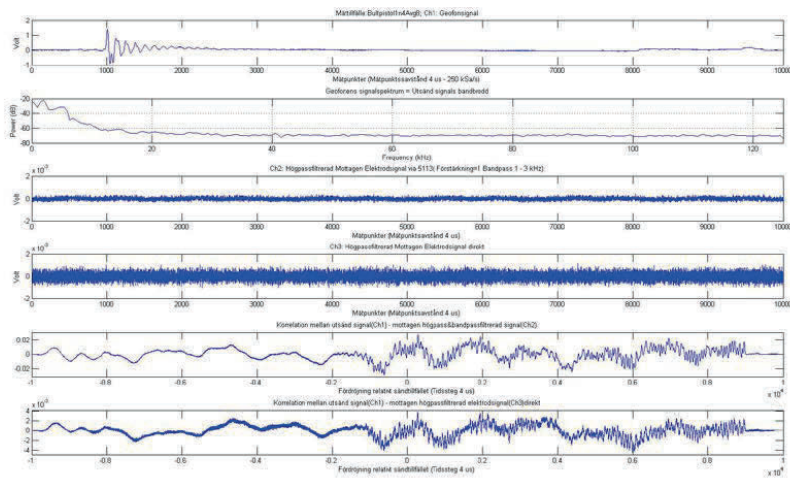
Vissa mätdata från hammare, bultpistol och vibrator har analyserats genom att frekvensspektrum för den uppmätta geofonsignalen har beräknats. Denna bedöms vara en replika av den signal de olika källorna sänder ut. Dessutom har korskorrelationen mellan denna signal och de registrerade elektriska fälten beräknats.

Hammare

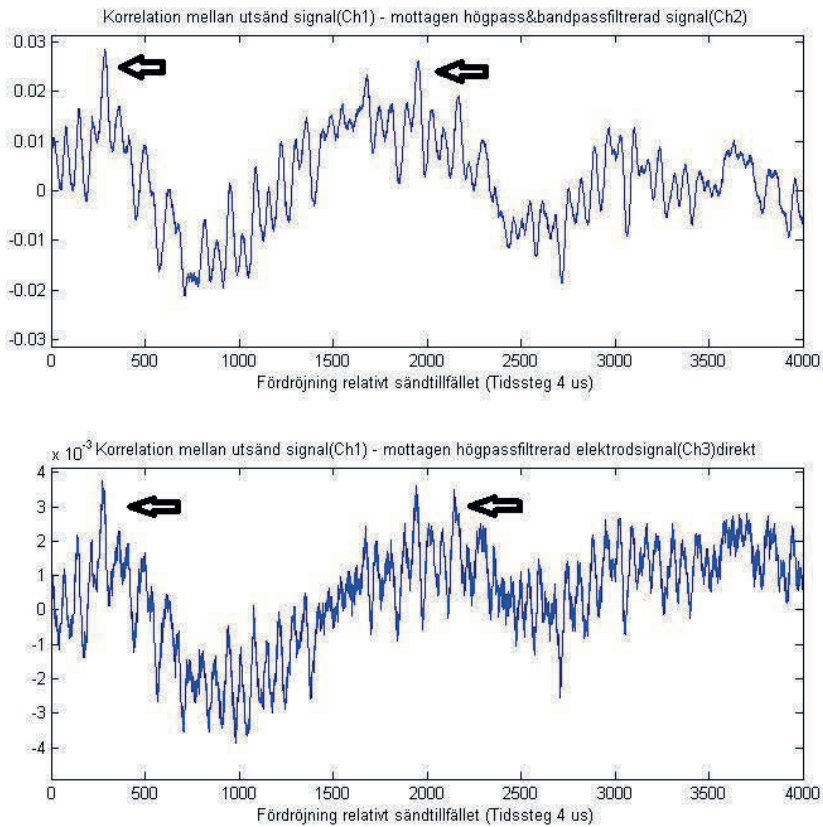


Figur 61. Hammare ger ett spektrum 0-9kHz. Inga korrelationer med signalerna från de elektriska dipolerna. *The carpenter's hammer generates a spectrum 0-9kHz but there is no correlation between the source and the received electrical signals.*

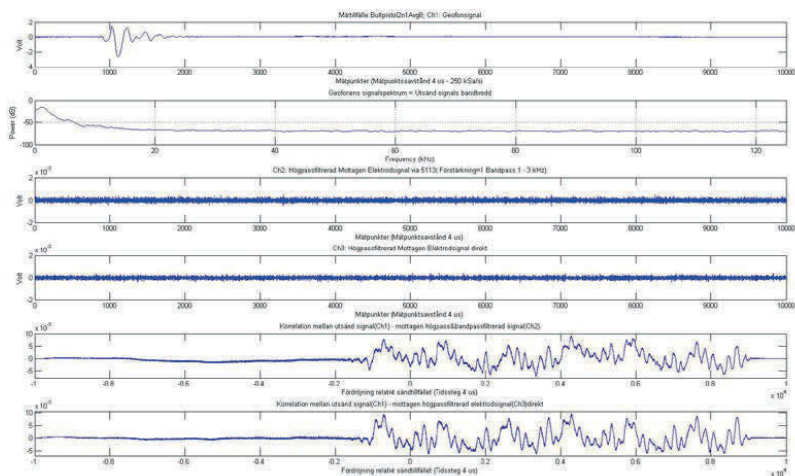
Bultpistol



Figur 62. Bultpistol (Bultpistol 1n4Avg8) västra området (1). Diagram 1 geofonsignal, diagram 2 geofonsignalens spektrum 0-17 kHz, diagram 3 bandpassfilterad signal från västra elektrodparet, diagram 4 högpasfilterad signal från det östra elektrodparet, diagram 5 korrelation mellan geofonsignalen och den elektriska signalen i diagram 3, diagram 6 korrelation mellan geofonsignalen och den elektriska signalen i diagram 4. Bolt-gun. Western area. Diagram 1 geophone signal (source), diagram 2 the spectrum of the geophone signal, diagram 3 bandpass-filtered signal from the western electrode pair, diagram 4 high-pass filtered signal from the eastern electrode pair, diagram 5 correlation between the geophone signal and the electrical signal in diagram 3, diagram 6 correlation between the geophone signal and the electrical signal in diagram 4.

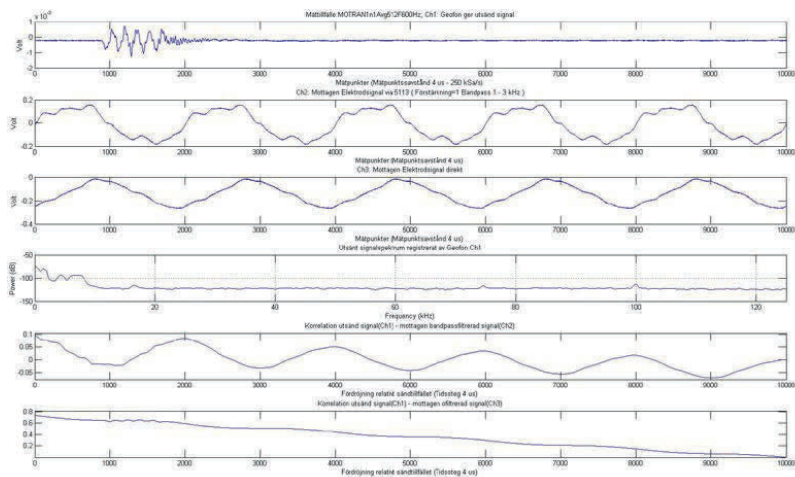


Figur 63. Förstoring av de nedersta diagrammen i föregående figur. De indikerade topparna kan vara seismoelektriska indikationer. De inträffar vid c:a 1 ms och 8 ms. Om ljudhastigheten i berget sätts till 4000 m/s blir avstånden från tunneln till dessa zoner 4 resp 32 m. *Magnification of the two lower diagrams in the previous figure. The indicated peaks (arrows) can be seismoelectric signals. They occur at about 1 ms and 8 ms after the shot. If the speed of sound in the rock is assumed 4000 m/s the corresponding distances will be 4 and 32 m.*

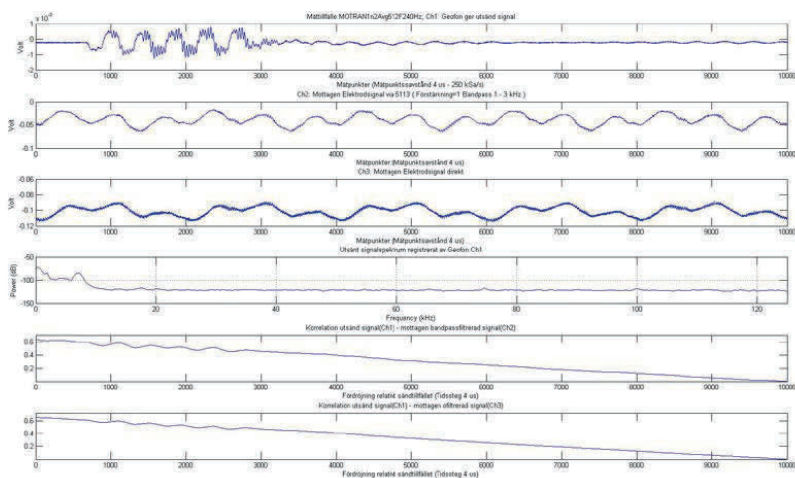


Figur 64. Bultpistol (Bultpistol 2n1Avg8) östra området (2). *Bolt-gun in the eastern test-area.*

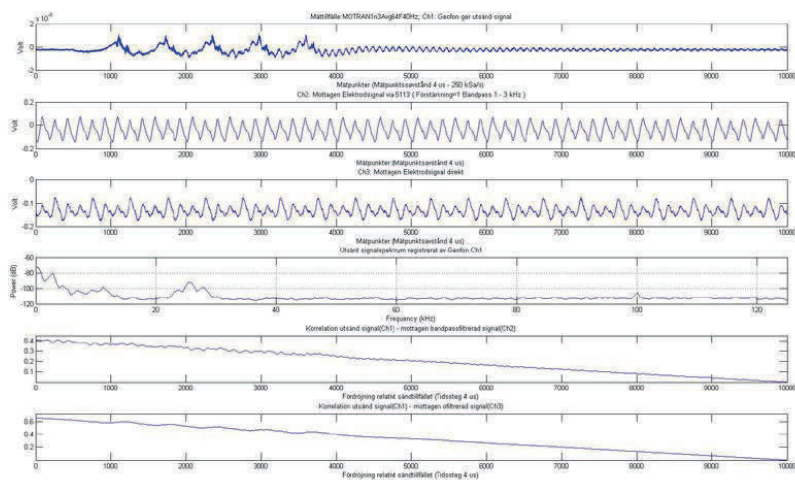
Vibrator



Figur 65. Motran vibrator 600 Hz medelvärde av 512 transmissioner. *Motran vibrator 600 Hz average of 512 transmissions.*



Figur 66. Mottran vibrator 240 Hz medelvärde av 512 transmissioner. Underligt utseende på signalen från geofonen invid vibratorn. *Mottran vibrator 240 Hz average of 512 transmissions. Strange appearance of the geophone signal indicates something wrong with the vibrator.*



Figur 67. Mottran vibrator medelvärde av 64 transmissioner. Tydligt fel på vibratorn. Ett bultförband hade lossnat visade det sig. *Mottran vibrator average of 64 transmissions. Obviously something is wrong with the vibrator. A loose bolt was the explanation.*

På plats vunna erfarenheter

Infästning av sensorer

Den tjocka fästmassan höll under försöket, medan det vanliga epoxilimmet visade dålig vidhäftning mot aluminiumplattan avsedd för infästning av vibratorn. Plattan lossnade vid måttlig påkänning. Metoden att förbereda sprutbetong/bergytan med planslipning fungerade utmärkt.

Störningsundertryckning

Medelvärdesbildning skall göras så att pulsrepetitionsfrekvensen inte är en över- eller undermultipel av 50 Hz. Ex vis ger 2 och 5 transmissioner per sekund dåliga resultat eftersom det medför att transmissionen sker vid samma fas i 50Hz-cykeln. Därigenom kommer medelvärdesbildningen inte att medföra den önskade undertryckningen av bakgrundsstörningens 50 Hz. Om pulsrepetitionsfrekvensen sattes till 3 eller 0.3 transmissioner per sekund undertrycktes 50 Hz nästan fullständigt. Bäst vore att ha en slumpvalsgenerator som styr transmissionerna. Detta påminner mycket om den teknik SIST som används vid reflektionsseismik av kollegerna i Uppsala. De använder då en hydraulhammare som energikälla. En sådan är inte orimlig att använda i en tunnel av den typ Gårdatunneln representerar.

Bultpistol

Bultpistol visade sig vara en utmärkt signalkälla därigenom att den avfyras utan störande elektriska signaler och att den är repetitiv. Den är också bekvämare att använda än hammarslag och medger arbete i vinklar som inte lämpar sig för hammarslag. Den använda bultpistolen var försedd med ett huvud för instansning av tecken i metallföremål. Försök att modifiera en bultpistol så att den använder ett hårdmetallstift av den typ som sitter på borrhjull kommer att utföras. Det går också att avfyra bultpistolen mot bergytan utan att montera någon spik i loppet.

Dataanalys

Oscilloskop är utmärkt att använda inledningsvis men har för dålig upplösning för att vara lämpligt för att registrera data för sofistikerad databehandling. Man måste dock ta ett steg i sänder innan man finner ett fungerande mätsystem. Parallellt med oscilloskoppresentation kommer i fortsatta mätningar att ske med registrering med en 24 bitars AD-omvandlare. Såvitt känt är försöket det första seismoelektriska experiment som har genomförts i en tunnel.

4.5 Försök med multikanal lock-in förstärkare vid LTH

Dessa försök är de första med den 32-kanaliga lock-in förstärkaren som mätinstrument. Den drivs av programvara utvecklad vid LTH. Försöket är en test av att denna programvara fungerar som avsett. Försöket omfattar mätningar i fyra kanaler. Tillkanalerna har kopplats en geofon nära den seismiska källan, vilken är samma vibrator från Motran, som användes vid försöket vid Kemicentrum i Lund. Nära vibratoren har placerats en källsignaturgeofon och 2 m därifrån en annan geofon, "avlägsen geofon2. Utöver dessa sensorer har två elektriska dipoler använts. Den ena utgörs av två elektroder nedstuckna i marken och den andra av en luftburen dipol bestående av två metallklot sammanbundna med en elektrisk ledning till mätinstrumentet – en antenn. Metallkloten fördubblar antennens känslighet. Förförstärkare har använts för alla kanaler. Försöket var dessutom ett test av mätningar parallellt med sändning och med mätning 0.2s efter det att sändaren stängts av. Dessutom gjordes en mätning med vibratoren och dess förstärkare frånkopplade för att studera förekommande bakgrundsstörningar. Alla dessa mätningar utfördes med stegad frekvens, i frekvensdomän således.

Slutligen studerades avklingningsförloppet i tidsdomän med hjälp av ett oscilloskop. Då ersattes antennen av utsignalen från funktionsgeneratoren. Den utsända frekvensen var vid detta försök 200 Hz och funktionsgeneratoren stängdes av momentant.



Figur 68. Försökupställning. Mätinstrument på vagnar och sensorerna närmast kameran. Skuggan av antennen syns på stenplattorna. *Test set-up outside LTH in Lund. Instruments on the carts and sensors close to the camera. The shadow of the antenna used is visible on the pavement.*



Figur 69. Sensorer från vänster i bilden. Avlägsen geofon, elektrodspett, antennfot, vibrator och källgeofon, elektrodspett. *Sensors as they appear from the left: Remote geophone, electrode, antenna-foot, vibrator and the source geophone, electrode.*



Figur 70. Den omfattande apparaturen som erfordras för detta synbart enkla försök. Nederst till höger den 32 kanaliga lock-in förstärkaren. *The paraphernalia needed to perform this seemingly simple test. Down right the 32 channel lock-in amplifier is visible.*

7210 Lock-in Sweep, no gate/gate

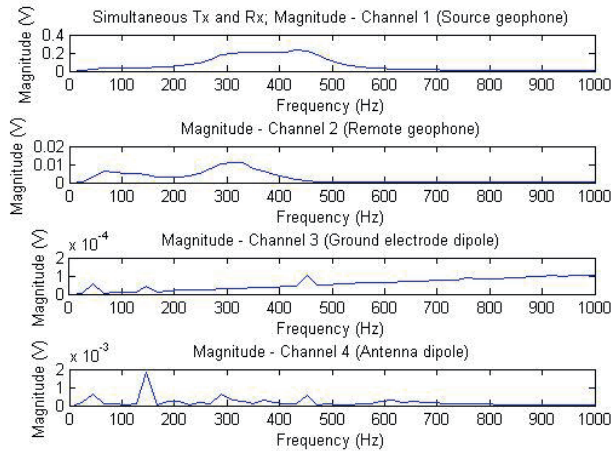
Data i filen "150612_1520 sweep_gating"

-Ch1: Gephone + geophone amplifier gain 4.7 intill Motran vibrator

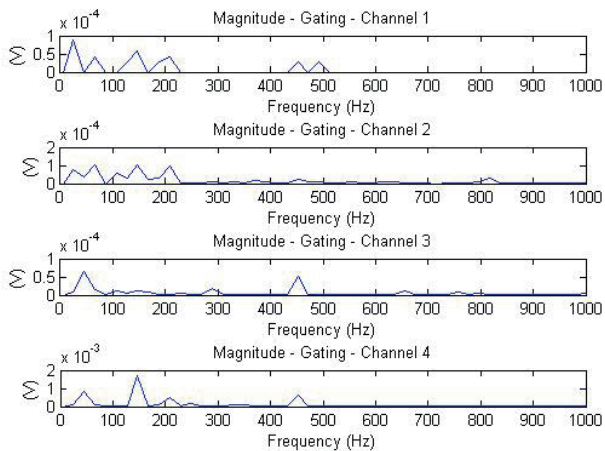
-Ch2: Remote (2m) geophone + geophone amplifier gain 10

-Ch3: Ground electrodes 1 m apart, symmetric around source, excentric .4m. 5113 FLAT, gain 1

-Ch4: Antenna+5113 FLAT, Gain 10



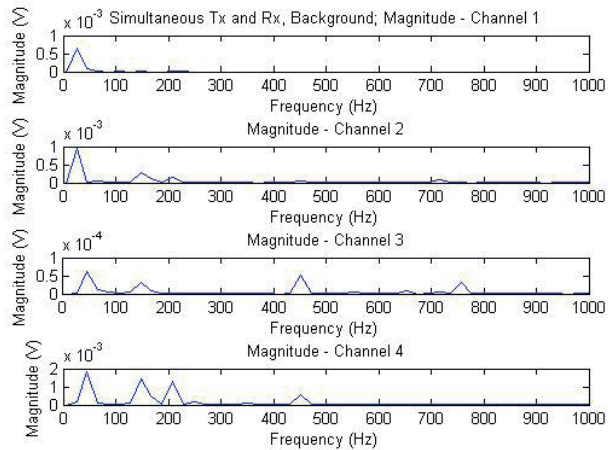
Figur 71. Samtidig sändning och mottagning. *Parallel transmission and receiving.*



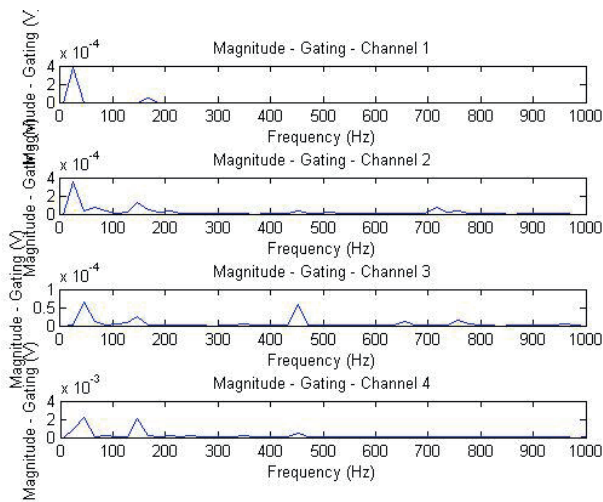
Figur 72. Mottagning 0.2s efter det att sändning upphört. *Receiving starts 0.2 s after transmission has stopped.*

7210 Lock-in Sweep, no gate/gate bakgrundsmätning (Motran och dess förstärkare ej inkopplade)

Data i filen "150612_1520 sweep_gating_no_motran"



Figur 73. Bakgrundsdata utan gating, men med Motran vibratorn frånkopplad. Funktionsgeneratorm dock påslagen. *Background data without gating, but with the Motran vibrator disconnected. The function generator was connected.*



Figur 74. Bakgrundsdata med gating-programvaran, men med motran frånkopplad. Funktionsgeneratorm avstängd under mätning. *Background data with the gating-software, but with the Motran vibrator disconnected. The function generator disconnected during measurement.*

Avklingningsförlopp när Motran-vibratorn stängs av

Data i filen "150612_1544_waveform"

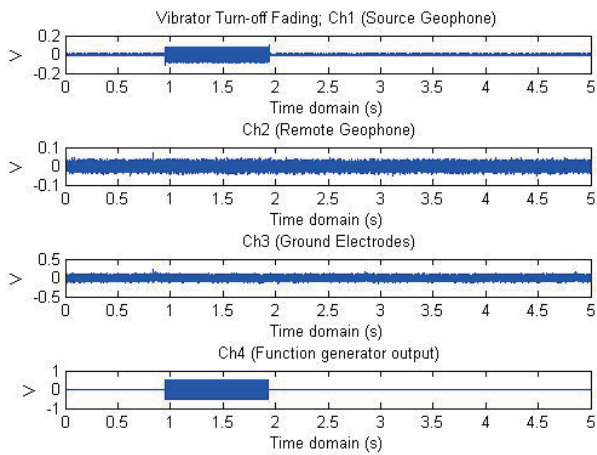
Mätning med 4 ch Oscilloskop

Ch1: Geofon vid källan som ovan

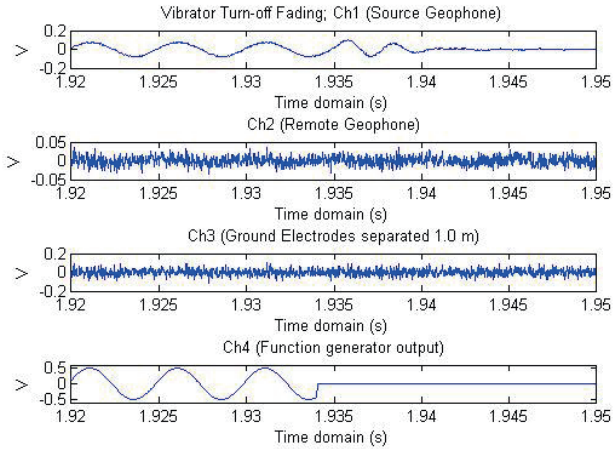
Ch2: Geofon som ovan

Ch3: Markspett som ovan

Ch4: Utsignal från funktionsgeneratorn



Figur 75. Avklingningsförsök. Underst visas utsignalen från funktionsgeneratorn. I övrigt samma sensorer som i de tidigare experimenten. *Attenuation experiment. At bottom signal from the function generator. Otherwise the same signals as in previous experiments.*



Figur 76. Förstoring av den del av registreringen som visar när funktionsgeneratoren stängs av.
Magnification of the part of the signal corresponding to when the function generator was turned off.

Det framgår att 200 Hz signalen upphör i marken när funktionsgeneratoren slås av. Den transient som uppstår när utsignalen momentant går till noll gör att det sänds ut någon cykel av en högre frekvens än 200 Hz. Det är dock i princip helt tyst i källgeofonsignalen efter 10ms. Vi ser alltså att intervallet om 0.2s i svepmätningarna med gating är onödigt väl tilltaget. Mättekniken avses utnyttjas vid framtida mätningar med gating, i syfte att inte låta onödigt mycket tid gå mellan det att funktionsgeneratoren slås av och mätningen av de kvarstående vibrationerna och seismoelektriska signalerna påbörjas.

5 Slutsatser

Komponenter och metodik tänkta att ingå i ett fungerande seismoelektriskt system har inskaffats och utvärderats. Den fundamentala idén, att man kan mäta smalbandigt och omvandla data från stegade frekvensmätningar till en tidsdomänsignal verkar ha visats experimentellt. De smalbandiga mätningarna gör att störkänsligheten blir väsentligt mindre än om bredbandig mätning utförs, dvs transienta mätningar. Projektet var ursprungligen helt inriktat på mätningar från markytan ner i berggrunden. Det har emellertid visat sig finnas stort intresse för mätningar även från befintliga tunnlar och därför har utrustning för sådana mätningar utvärderats och intressanta resultat inhämtats.

6 Erkännanden

Denna, den tredje, etappen av seismoelektrik-projektet samfinansieras av BeFo och FORMAS inom GEOINFRA-ramen. Men finansieringen har olika tidsramar. Därför är detta inte en fullständig rapport för etapp 3, men en slutrapport för den del som täcks av BeFo-anslaget. Författaren framför sitt tack till finansiärerna utan vars stöd detta arbete inte hade kunnat genomföras.

I den ursprungliga etappplanen ingick också fältprov med den utvecklade utrustningen, men då finansieringen varit lägre än planerat utesluts detta moment och fokus är lagt på att sätta samman och tillverka ett fungerande system. Fältprov utföres i en kommande etapp.

7 Referenser

Ulriksen, P., Dahlin, T. and Rydén, N., "Seismoelektrik och vattenförekomst – Förstudie", BeFo-rapport 112, 2011.

Ulriksen, P., "Bedömning av inläckande vattenmängd inför tunneldrivning – Seismoelektrik Etapp 2", BeFo Rapport 129, 2013



Box 5501
SE-114 85 Stockholm

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

ISSN 1104-1773