



Instrumenterad bomknackning

Test av mätmetod och verifiering i verkliga skadefall i Ringhals

Elforsk rapport 12:09



Peter Ulriksen

December 2011

ELFORSK

Instrumenterad bomknackning

Test av mätmetod och verifiering i verkliga skadefall i Ringhals

Elforsk rapport 12:09

Förord

Elforsk driver sedan 2007 ett forskningsprogram kring betongkonstruktioner inom kärnkraftverken. Det finns ett behov av att bygga både kompetens och att utveckla teknikbasen för teknisk förvaltning av byggnader och konstruktioner inom kärnkraftindustrin. Det övergripande målet med det betongtekniska programmet är att säkerställa avsedd livslängd och hög tillgänglighet för svenska kärnkraftverk med bibehållen säkerhet. Programmet finansieras av Vattenfall, av kärnkraftverken i Forsmark, Ringhals samt OKG i Oskarshamn, av Strålsäkerhetsmyndigheten SSM samt av Teollisuuden Voima Oy (TVO) i Finland.

Inom programmet har föreliggande projekt, "Instrumenterad bomknackning - Test av mätmetod och verifiering i verkliga skadefall i Ringhals (BET 105)" genomförts. Projektet syftar till att, baserat på kunskaper från tidigare projekt (BET 012, se Elforsk-rapport 11:11), testa ett sammansatt system för instrumenterad bomknackning bestående av i huvudsak befintliga komponenter (handtag, mikrofoner) för att kunna konstatera delaminering i betongkonstruktioner. Verifieringstester har genomförts i Ringhals kärnkraftverk.

Projektet har genomförts av docent Peter Ulriksen vid Lunds Tekniska Högskola och följts av styrgruppen för Elforsks Betongprogram med följande medlemmar; Kostas Xanthopoulos SSM, Jonas Bergfors EON OKG, Lars-Erik Berglund, Anders Bergkvist och Marcus Edin Vattenfall Forsmark, Patrik Gatter och Manouchehr Hassanzadeh Vattenfall Research and Development AB, Jan Gustavsson och Johanna Spåls Vattenfall Ringhals, Juha Riihimäki TVO samt Lars Wrangensten Elforsk AB. Elforsk tackar styrgruppen för värdefulla kommentarer och synpunkter under projektgenomförandet.

Stockholm i december 2011

Lars Wrangensten
Elforsk AB
Programområde Kärnkraft.

Sammanfattning

De testmetoder som utvecklats i laboratoriemiljö inom ELFORSK-projektet BET 012 "Impulsresponsmätningars beroende av sprickdjup" och som kan vara lämpliga för mätning i verkliga skadefall, har testats vid ett besök i Ringhals kärnkraftverk 2011-04-20.

Försöket utfördes i anslutning till kylvattentunnlarna i reaktor 2, i det utrymme som betecknas 0410. I detta utrymme har, under någon period, dumpats vatten, vilket synbarligen har stått upp till 0.8 m höjd på väggen i den för mätningarna valda platsen. Samma väggyta har tidigare undersökts med ultraljudinstrumentet A1220 från det ryska företaget ACSYS. En 1.4 m lång vertikal profil undersöktes med slagpunkter fördelade med 0.1 m avstånd.

Fyra olika försök omfattande sammanlagt drygt 60 slag redovisas:

1. Det tidigare utvecklade impedanshandtaget som mäter kraft och hastighet och anslås med "dead-blow"-hammare av fabrikat "Thorace 2012".
2. Samma handtag som i försök 1 kompletterat med en mikrofon som stod fast uppställd på det bord där annan mätutrustning placerades, cirka 1.5 m från undersökta väggen.
3. Stor "modally tuned" hammare från PCB försedd med kraftgivare och med mikrofon uppställd på samma sätt som i försök 2.
4. Vanlig snickarhammare utan instrumentering samt med mikrofon uppställd som i försök 2.

De fyra försöken gav alla tydlig differentialdiagnos mellan solid och delaminerad betong. Försök 1 och Försök 2 genomfördes med hammarslag mot det utvecklade impedanshandtaget medan Försök 3 och Försök 4 utfördes med hammarslag direkt mot betongväggen utan användning av handtaget.

Bakgrundsbullret var högt på mätplatsen, men utgjorde inget problem för mätningarna med mikrofon. Signalen från hammarslagen har högre intensitet och ligger i ett högre frekvensområde än vad bullret gör.

Impedansen, $Z(f) = F(f)/v(f)$, är frekvensberoende, men vid impulsexcitering är det praktiskt att använda sig av begreppet maxvärdesimpedans Z_m som är $F_{\max} / v_{\max}$. Endast numeriska värden presenteras då mätkedjan inte är kalibrerad.

Försök 1 Thorace hammare + Kombinationshandtag F/v. Maxvärdesimpedansen Z_m ligger i genomsnitt på 0.7 för solid betong medan den ligger på 0.2 för delaminerad betong. Frekvenstoppen ligger för solid betong vid 700 Hz medan den för delaminerad betong ligger vid 250 Hz. Båda mätstorheterna visar en ökning närmast golvet, vilket troligen kan förklaras med att väggen är fastare inspänd där än högre upp.

Försök 2 Thorace hammare + Kombinationshandtag F/v och Mikrofon. Kraft och hastighet ger samma värden som i försök 1 varför endast mikrofondata diskuteras. Ljudstyrkan ligger på 0.2 för den solida betongen och stiger till

maximalt 1.0 för den delaminerade betongen, men spridningen inom det delaminerade området är stor. Gränsen mellan solid och delaminerad betong markeras väl. Vad gäller frekvensinnehållet är detta högre i det solida området men variationen är stor, från 1700 Hz till 3500 Hz. I det delaminerade området ligger toppfrekvenserna runt 1500 Hz. Slutsatsen måste vara att ljudmätningar i samband med det aktuella kombinationshandtaget inte är en optimal lösning.

Försök 3 "Modally tuned" PCB-hammare och Mikrofon. I detta försök används kraftgivaren i PCB-hammaren för att trigga datainsamlingen, men endast data från ljudupptagningen analyseras. Ljudstyrkan ger inte en tillförlitlig indikation av solid versus delaminerad betong. Inte heller indikeras gränsen mellan områdena korrekt. Däremot visar frekvenstoppen tydligt om det är fråga om solid eller delaminerad betong. Solid betong ger upphov till frekvenser kring 6000 Hz medan delaminerad betong ger frekvenser kring 1000 Hz. Gräns mellan solid och delaminerad betong markeras något för tidigt. Det är intressant att konstatera att PCB-hammaren med slagdyna av hårdgummi ger högre frekvenskomponenter än snickarhammaren av stål.

Försök 4 Snickarhammare och Mikrofon. I detta försök triggas dataregistreringen av ljudsignalen när ljudet som uppstår när hammaren träffar betongytan når mikrofonen. Ljudstyrkan för solid betong ligger på 0.35 medan den ligger på 0.9 i snitt för den delaminerade betongen. Gränsen mellan solid och delaminerad betong markeras korrekt. Vad gäller frekvensinnehållet ligger detta kring 4500 Hz för de flesta mätpunkterna i solid betong men de allra första visar markant lägre värden 2000 Hz. I den delaminerade betongen ligger frekvensen på 1500 Hz i genomsnitt.

Den starkaste differentialdiagnosen erhålles från frekvensinformationen då PCB hammaren används som energikälla och mikrofonsignalen som informationskälla (Försök 3). Kvoten är 6. Å andra sidan ger amplitudinformationen osäkra värden med denna metod.

Som nummer två i ordning följer ljudupptagning av slag med Thorace-hammaren mot kombinationshandtaget triggat av kraftgivaren i handtaget (Försök 2). Kvoten är 5. Å andra sidan tycks frekvenserna inte vara en särskilt stark differentieringsgrund i detta försök.

Som nummer tre följer slag med Thorace-hammaren mot kombinationshandtaget (Försök 1). Här är det intressant att konstatera att båda de analyserade parametrarna, maxvärdesimpedans och frekvensinnehåll, ger samma grad av differentiering mellan solid betong och delaminerad. Kvoten är 3.5 för båda. Man bör vid bedömningen ta hänsyn till att man därigenom får ett säkrare beslutsunderlag än om man bara har en parameter. Dessutom bör man ta hänsyn till att kombinationshandtaget ger en fysikaliskt meningsfull parameter i den enkelt beräkningsbara maxvärdesimpedansen Z_m .

Sist följer slag med snickarhammare och trigging av mätsystemet med ljudsignalen från mikrofonen (Försök 4). Kvoten är 3 men å andra sidan gäller detta värde både för amplitud och frekvensinformationen, vilket i likhet med

föregående fall medför ett förbättrat beslutsunderlag. Dock kan ingen fysikalisk parameter bestämmas med denna metod.

Summeras, som en enkel modell, amplitud och frekvenskvoterna för varje försök erhålles i stort sett samma värde för alla fyra försöken, nämligen ett värde någonstans mellan 6 och 7.

Dessa försök innehåller ingen ansats att gradera delamineringen och koppla sådana data till uppmätta storheter. Ett sådant arbete fordrar nedrivning av eller borrar i betongen och det har inte varit målsättningen med projektet. Aktuell delaminering är mycket tydligt observerbar med vanlig bomknackning. Den stora dynamiken i mätvärdena ger god anledning att tro att även en gradering av delaminering kan ske med de undersökta metoderna.

Som slutsats kan man påstå att det finns flera alternativ som alla har mycket goda möjligheter att ställa differentialdiagnos mellan solid och delaminerad betong och dessutom att ge en gradering av graden av "bom".

Inför fortsatt teknikutveckling rekommenderas mätningar med Thorace-hammare och kombinationshandtag för registrering av kraft och hastighet, dvs. impedans. Skälet är att denna metod ger högst kvotsumma. Tyvärr har denna metod visat sig olämplig att kombinera med ljudregistrering, i varje fall med nuvarande utformning av kombinationshandtaget. Användandet av kombinationshandtaget som pressas mot anvisad punkt på mätobjektet garanterar att mätvärdena kommer från precis den punkt handtaget anbringats mot.

Som alternativ till denna metod föreslås snickarhammare med ljudupptagning från stationär mikrofon med motivet att man då inte behöver ta hänsyn till kablar och att man får god diskriminering både från amplitud och frekvensdata. Detta alternativ ligger mycket nära slag med PCB-hammare med kraftgivare och ljudupptagning med stationär mikrofon, som dock hämmas av att det går en kabel till hammarens kraftgivare. Båda dessa metoder är väsentligt lättare att hantera än kombinationshandtaget då man slipper hålla handtaget pressat mot väggen under mätningen, man behöver bara rikta ett slag mot den anvisade punkten. Viss avvikelse från anvisningen kan därvid påräknas.

Summary

Those test-methods that have been developed in a laboratory setting within the ELFORSK-project BET 012 "Impulse response measurement dependance on crack depth", and have potential for measurements in real delamination situations, have been tested during a visit to the Ringhals Nuclear Power Plant 2011-04-20.

The tests were performed close to the cooling water tunnels in reactor 2, in a room labeled 0410. In this room it appears that water has been standing for extended periods of time to a level of 0.8 m above the floor. This has created a delamination effect in the lower part of the wall. The same position has earlier been surveyed with the russian ACSYS 1220 multipoint ultrasonic instrument. A vertical profile, 1.4 m long, has been surveyed with hammer blows at 0.1 m intervals.

Four different test-methods comprising 60 hammer blows have been studied:

1. The earlier developed impedance handle containing a force and a velocity sensor is hit by a so called "dead-blow" hammer of type Thorace 2012.
2. Same handle as in test 1 but with the addition of a microphone which was located with the data acquisition equipment, about 1.5 m from the concrete wall.
3. A large modally tuned hammer from PCB equipped with a force sensor and with a microphone located as in test 2.
4. A common carpenters hammer without any sensors and with the microphone as in test 2. This setup requires no cables between the operator and the acquisition equipment.

The four tests all gave a clear differential diagnosis between solid and delaminated concrete. The first two test methods were performed with a hammer strike against the developed impedance handle, while the two last test-methods were performed with a hammer-strike directly against the concrete wall. The background acoustical noise was severe at the location, but did not pose any problem for the microphone measurements because the sound from the hammer blows had an even higher intensity and were also in a higher frequency range.

The impedance $Z(f) = F(f) / v(f)$ is the relation between force F and velocity v and it is a function of frequency f , but in impulse excitation it is practical to use the maxvalue-impedance Z_m , which is F_{max} / v_{max} .

Test 1. Thorace dead-blow hammer with impedance handle F/v . The max-value-impedance is in average 0.7 for solid concrete and 0.2 for delaminated concrete. The peak frequency is 700 Hz for solid concrete and 250 Hz for delaminated concrete. Both parameters displays an increase towards the floor, which may be explained by that the wall is stiffer there due to the anchoring in the floor.

Test 2. Impedance handle F/v with a Microphone. The results regarding force and velocity are the same as in test 1 and not discussed again. The sound strength is 0.2 for the solid concrete and increases to 1.0 for the delaminated concrete, but the variance is large within the delaminated part. The border between solid and delaminated concrete is well indicated by the sound strength. Regarding the frequency content it is higher in the solid part but the variance is large, from 1700 Hz to 3500 Hz. In the delaminated part the peak frequencies are about 1500 Hz. The conclusion must be that sound recording together with the impedance handle should be avoided.

Test 3. "Modally tuned" hammer from PCB and a Microphone. In this test the force transducer in the hammer is used to trigger the data acquisition, but only the sound recording is analyzed. The sound strength does not give a reliable differentiation between solid and delaminated concrete nor does the border between the different concrete types appear correctly. But the frequency peak clearly indicates if it is solid or delaminated concrete. Solid concrete generates frequencies around 6000 Hz while delaminated concrete generates frequencies around 1000 Hz. The border between solid and delaminated concrete is indicated one step too early. It is interesting to note that the PCB-hammer with a hard rubber tip generates higher frequencies than the carpenter hammer made of steel used in test 4.

Test 4. Carpenter hammer and Microphone. In this test the data acquisition is triggered by the sound created by the hammer impact as detected by the microphone. The sound strength for solid concrete is around 0.35 and for delaminated concrete it is 0.9 in average. The border between solid and delaminated concrete is correctly indicated. Regarding the frequency content it is about 4500 Hz for most points in the solid concrete, but the very first ones show a lower value, around 2000 Hz. In the delaminated concrete the frequency amplitude peaks at about 1500 Hz in average.

Below follows a grading of the different methods based on the relation between the parameters for solid vs delaminated concrete.

The strongest differential is obtained using the frequency content recorded with a microphone as the PCB hammer strikes the concrete surface (Test 3). The relation is 6. On the other hand the amplitude values are uncertain with this method.

Second comes sound strength recording with a microphone using the Thorace dead-blow hammer and the impedance handle (Test 2). The relation is 5. On the other hand it seems that the frequency content is not a good differentiator in this test.

Third follows the Thorace hammer and the impedance handle (Test 1) recording force and velocity. In this test it is interesting to note that both analyzed parameters, the maxvalue-impedance Z_m and the frequency content of the velocity spectrum has the same relation between solid and delaminated concrete. The relation is 3.5 for both. In the final selection it should be noted that two equally strong parameters may be a better indicator than one

stronger. The result is also interesting in that the calculated maxvalue-impedance Z_m is physically meaningful.

Last follows the carpenter hammer with sound recording using a microphone (Test 4). The relation is 3 but on the other hand it is the same relation for both the sound strength and the frequency content, which gives a better decision situation, just as in Test 1. No physically meaningful parameter can be calculated with this method however.

If the amplitude and frequency relations are summed in each test the result is almost the same for all tests, i.e. a combined value between 6 and 7.

These tests does not attempt to grade the delamination and to connect such parameters (thickness, area) to measured properties. Such work requires demolition of the structure and that has not been included in this project. The large dynamics of the measured properties indicates that grading of delamination may be possible.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1. Syfte	2
2. Allmän bakgrund	2
3. Resultat	5
3.1 Punktviss jämförelse solid / delaminerad betong	5
3.1.1 Kommentar till försök 1	10
3.1.2 Kommentar till försök 2	10
3.1.3 Kommentar till försök 3	10
3.1.4 Kommentar till försök 4	10
3.2 Profiler över solid / delaminerad betong	12
3.2.1 Kommentar till försök 1	16
3.2.2 Kommentar till försök 2	16
3.2.3 Kommentar till försök 3	17
3.2.4 Kommentar till försök 4	17
3.3 Sammanställning av resultat	17
4 Rekommendation	19
Bilaga med samtliga mätdata.	20
Försök 1. Thorace hammare och kombinationshandtag	21
Försök 2. Som försök 1 men med mikrofon för ljudupptagning	31
Försök 3. PCB hammare och fast mikrofon	42
Försök 4. Snickarhammare och fast mikrofon	52

1. Syfte

Projektet (BET 105) syftar till att, baserat på kunskaper från tidigare projekt (BET 012), testa ett sammansatt system för instrumenterad bomknackning bestående av i huvudsak befintliga komponenter (handtag, mikrofoner) för att kunna konstatera delaminering i betongkonstruktioner. Resultatet av verifieringstesterna som kommer att genomföras i Ringhals kärnkraftverk skall vara att ge en definitiv rekommendation om vilken teknik som skall användas i samband med den föreslagna försatta projektorstödda avsökningen.

2. Allmän bakgrund

De testmetoder som utvecklats i laboratoriemiljö i ELFORSK-rapporten 11:11 "Impulsresponsmätningars beroende av sprickdjup. Delaminering" och som kan vara lämpliga för mätning i verkliga skadefall har testats vid ett besök i Ringhals 2011-04-20.

Försöket utfördes i anslutning till kylvattentunnlarna i reaktor 2, i det utrymme som betecknas 0410. I detta utrymme har, under någon period, dumpats vatten, vilket synbarligen har stått upp till 0.8 m höjd på väggen i den för mätningarna valda platsen. På väggytan drogs en vertikal linje upp till 1.5 m höjd och varje 0.1m markerades. Då mätning inte kan ske i golvplanet erhöles på så sätt 15 mätpunkter från 0.1m höjd till 1.5 m höjd ovan golvet. Genom orienterade bomknackning med snickarhammare kunde man konstatera att ett parti med mycket tydlig "bom" / delaminering finns mellan den åttonde markeringen uppifrån och ner till den trettande markeringen räknat uppifrån. Mätningarna börjar alltså i den översta punkten och går ner mot golvet, se Figur 1.

Fem olika försök omfattande sammanlagt drygt 60 slag genomfördes:

- 1 Det utvecklade kombinationshandtaget som mäter kraft och hastighet och anslås med "dead-blow"-hammare av fabrikat "Thorace 2012", se Figur 2.
- 2 Samma handtag som i försök 1 kompletterat med en mikrofon som stod fast uppställd på det bord där annan mätutrustning placerades, cirka 1.5 m från undersökta väggen.
- 3 Stor "modally tuned" hammare från PCB försedd med kraftgivare och med mikrofon uppställd på samma sätt som i försök 2, se Figur 3.
- 4 Vanlig snickarhammare utan instrumentering samt med mikrofon uppställd som i försök 2.
- 5 Stor "modally tuned" hammare från PCB försedd med kraftgivare och med en handhållen accelerometer som pressades mot väggen intill slagpunkten.

Försöket utfördes i anslutning till kylvattentunnlarna i Ringhals 2, i det utrymme som betecknas 0410 och på den långa väggen som uppgavs ligga i tekniskt östlig riktning, till vänster sett från ingången till utrymmet. Tekniska väderstreck avviker något från de verkliga kompassriktningarna. I detta utrymme har dumpats vatten, vilket synbarligen har stått upp till 0.8 m höjd på väggen i den för mätningarna valda platsen. Samma väggyta har tidigare undersökts med ultraljudsinstrumentet A1220 från det ryska företaget ACSYS, redovisat i ELFORSK-rapport 10:85 "Litteraturstudier och test av oförstörande provningsmetoder (OFP) med möjliga tillämpningar på kärnkraftens betongkonstruktioner".



Figur 1. Mätplatsen i utrymme 0410. Den vertikala mätlinjen med punkt 1 överst är markerad med kritstreck. Rekylfri hammare (Thorace 2012) och det utvecklade kombinationshandtaget för mätning av kraft och hastighet användes i försök 1 och 2.

De fyra första försöken gav alla tydlig differentialdiagnos mellan solid betong och delaminerad. Det femte försöket avbröts då signalen från accelerometern överstyrde den laddningsförstärkare den var kopplad till. Det i sin tur för med sig att AD-omvandlaren inte kan triggas igång för datainsamling. Detta problem uppstod även under laboratorieförsöken och är av rent instrumentell art. Då uppmätt acceleration måste integreras till hastighet för att det skall gå att räkna fram impedansen undviker man gärna accelerometern i detta sammanhang. Eftersom de övriga försöken var framgångsrika lämnas därför accelerometerspåret tills vidare åt sitt öde.

Bakgrundsbullret var högt på mätplatsen, men visade sig inte utgöra något problem för mätningarna. Signalen från hammarslagen har högre ljudintensitet och ligger i ett högre frekvensområde än vad bullret gör.



Figur 2. Närbild på det utvecklade kombinationshandtaget t.v. som mäter kraft i slaget och betongytans hastighet i slagriktningen. Dessa parametrar medger beräkning av betongytans punktimpedans. Hammararen är fylld med blykulor. Det gör den rekylfri så att inga studsar uppkommer.



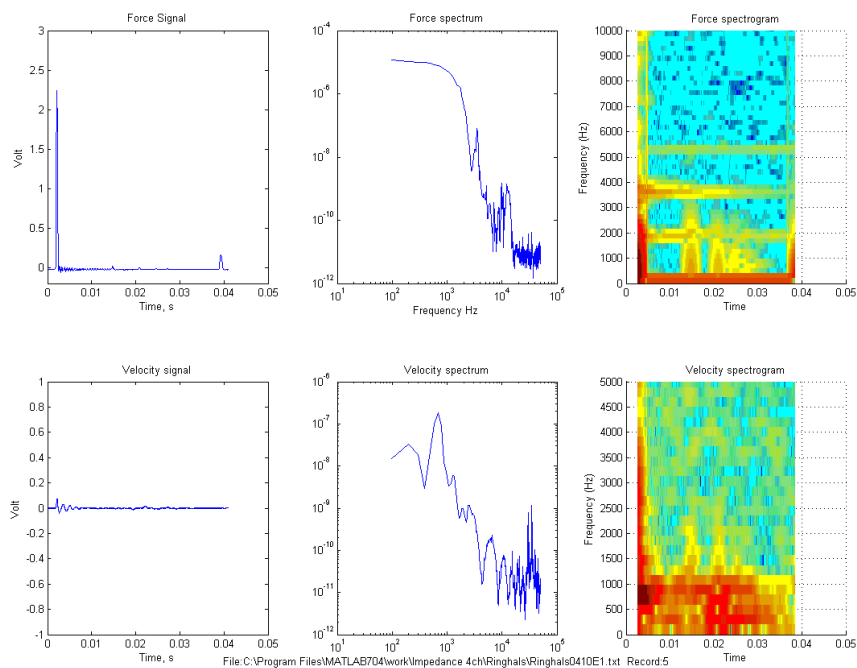
Figur 3. Närbild av en sk "modally tuned" hammare från PCB. Den har en inbyggd kraftgivare och kan förses med olika slagdynor av gummi och en extravikt. Även denna hammare är rekylfri.

3. Resultat

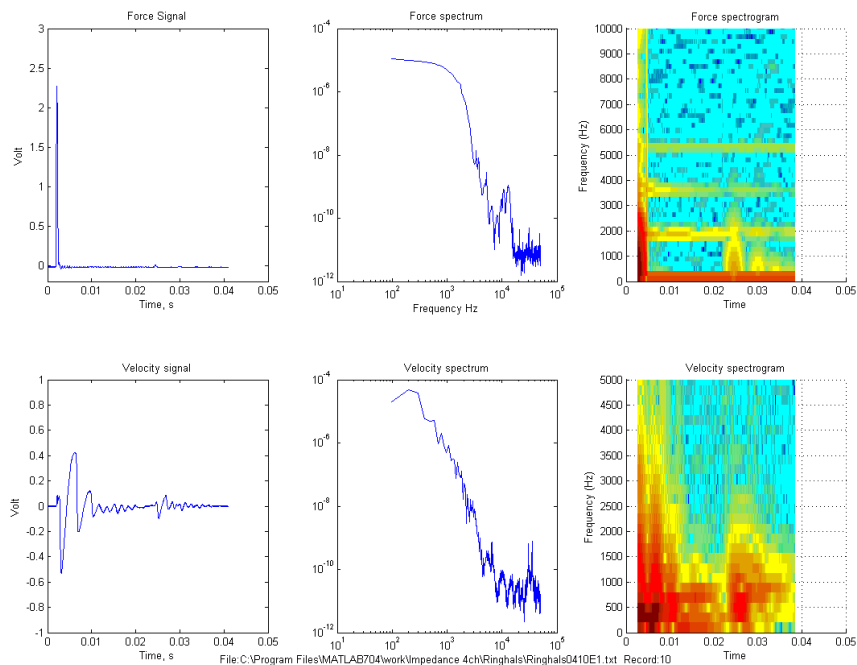
Resultaten presenteras här dels genom diagram för två karaktäristiska mätpunkter (punkt 5 och 10) för varje försök (avsnitt 3.1) och dels genom profiler som visar en vald parameters variation längs de 15 mätpunkterna (avsnitt 3.2). Samtliga mätdata från de fyra försöken i de 15 punkterna, dvs. 60 resultat redovisas i en separat bilaga.

3.1 Punktvis jämförelse solid/delaminerad betong

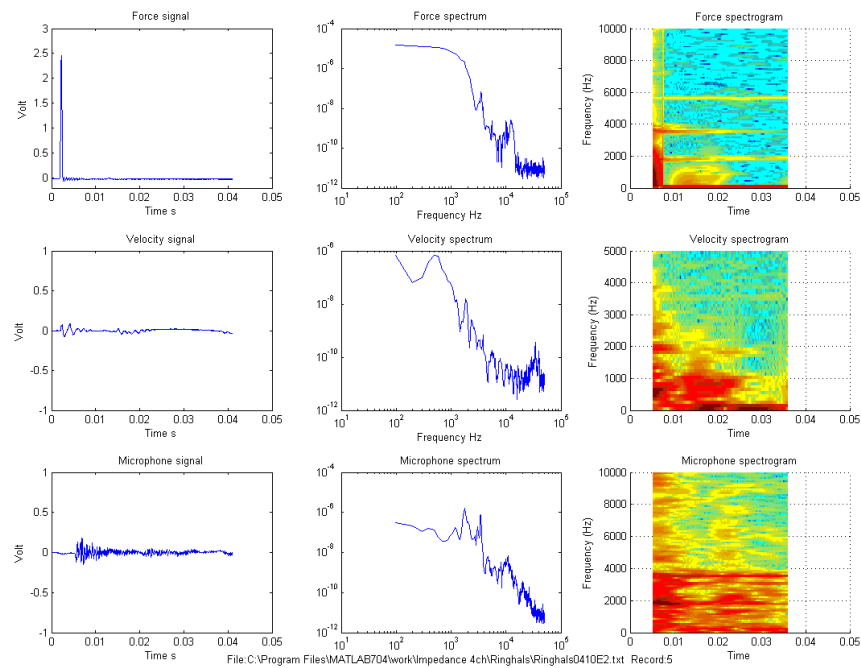
Nedan visas mätdata från de fyra försöken 1-4 parvis i punkt 5 (solid betong) respektive i punkt 10 (delaminerad betong).



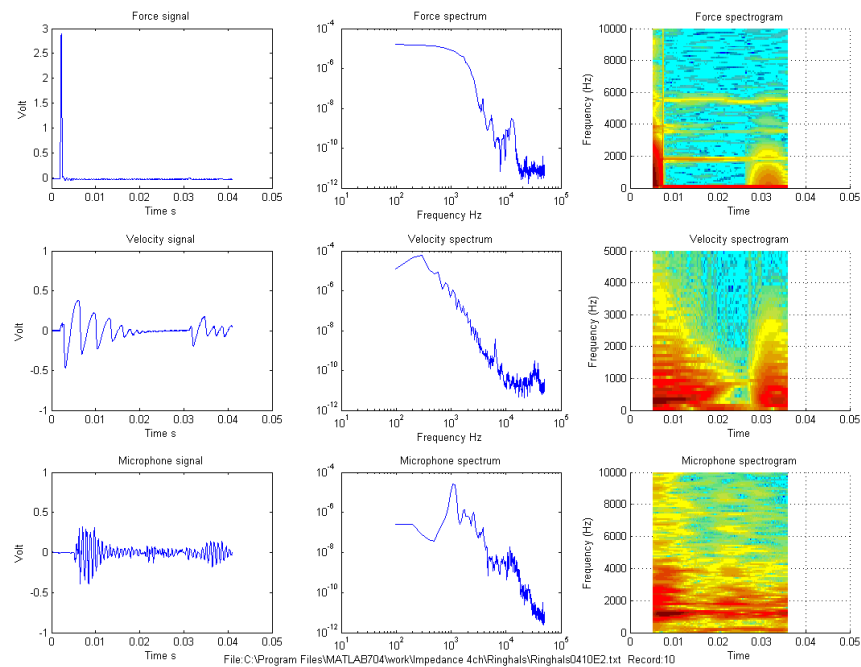
Ovan visas resultat från solid betong (p5), nedan resultat från delaminerad betong(p10)



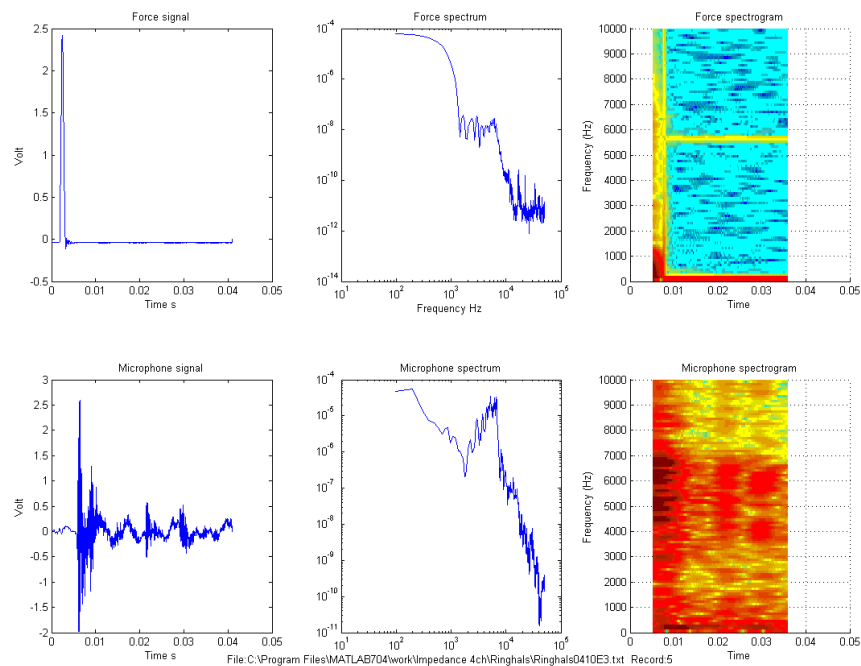
Figur 4. Thorace hammare och kombinationshandtag som ger kraft och hastighet. Försök 1.



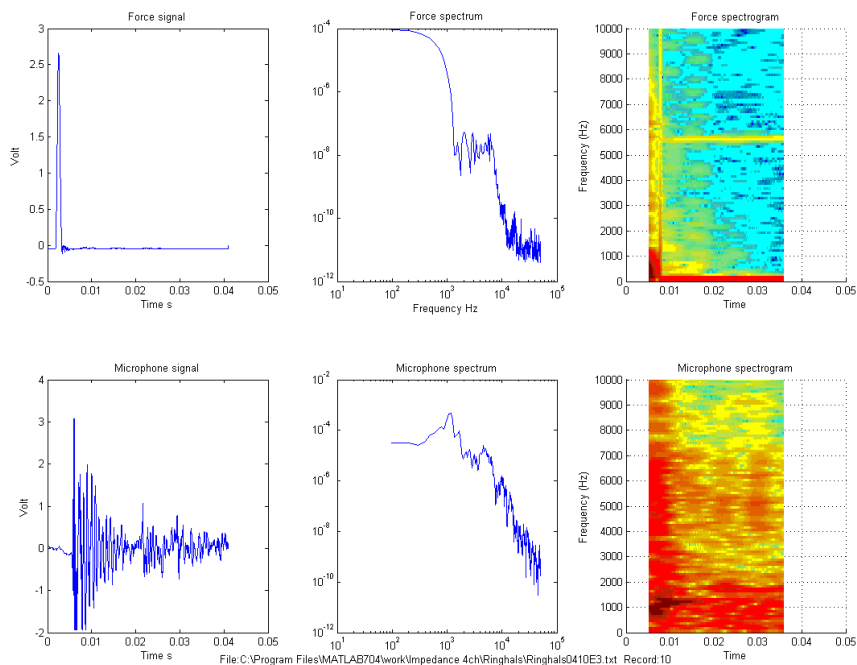
Ovan visar resultat från solid betong (p5), nedan resultat från delaminerad betong (p10)



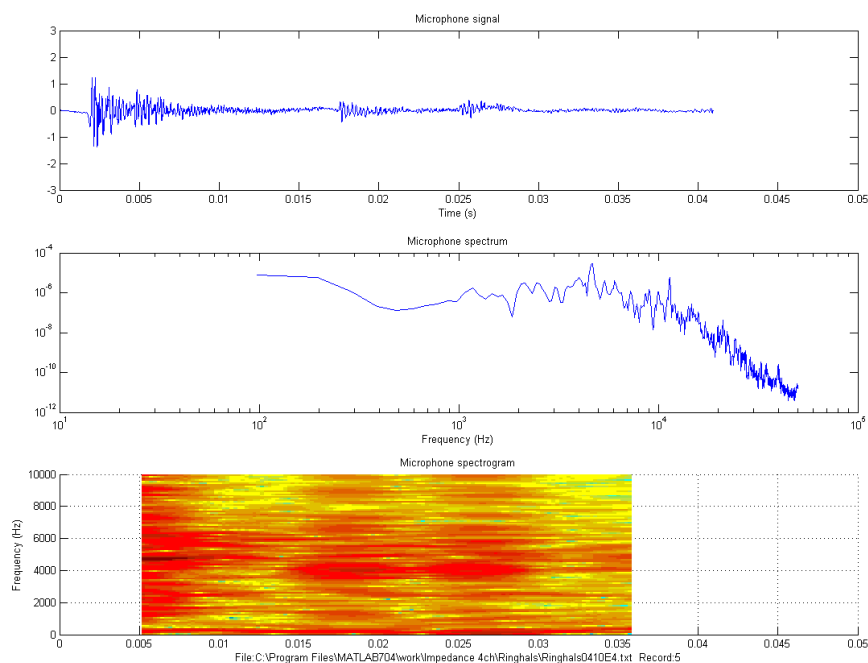
Figur 5. Thorace hammare och kombinationshandtag som ger kraft och hastighet samt inspelning av ljudsignal från stationär mikrofon. Försök 2.



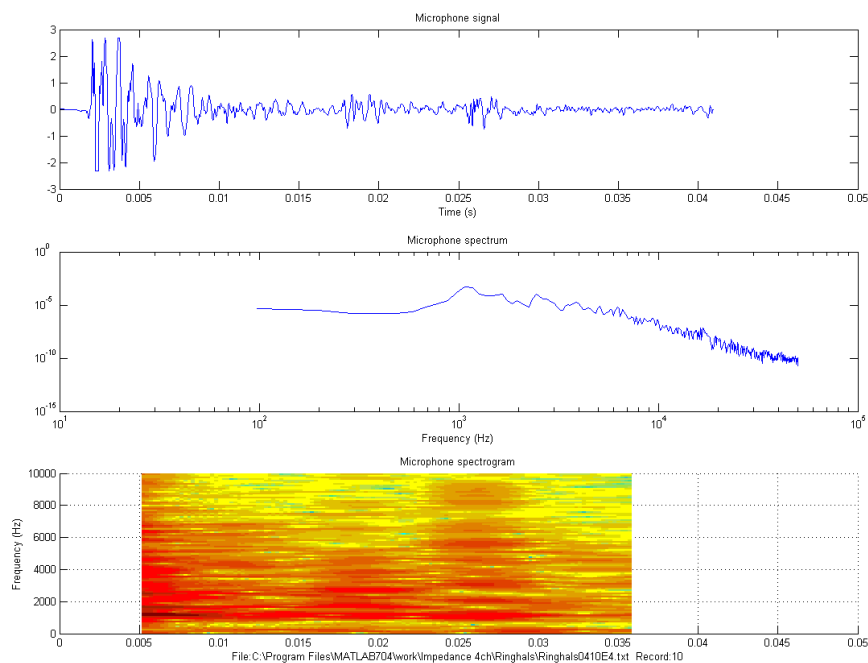
Ovan visas resultat från solid betong (p5), nedan resultat från delaminerad betong(p10)



Figur 6. Stor "modally tuned" PCB-hammare (gummihammare) som ger kraft samt inspelning av ljudsignal från stationär mikrofon. Försök 3.



Ovan visas resultat från solid betong (p5), nedan resultat från delaminerad betong(p10)



Figur 7. Slag med snickarhammare samt inspelning av ljudsignal från stationär mikrofon. Observera multipla studsar med denna hammare. De uppträder vid 0.017 resp 0.025 s.

Mätningen i figur 7 triggas igång av ljudpulsen från slaget. Den akustiska bakgrunds-nivån, som framgår av de första 5ms data ligger som synes långt under signalnivån från slaget. Ingen kraftsignal registreras och snickarhammaren saknar förbindelse med mätutrustningen.

3.1.1 Kommentar till Försök 1 (Figur 4) Thora-ce+Kombinationshandtag F/v

För i stort sett samma slagkraft ökar betongytans hastighet med en faktor 5 när man jämför resultaten från solid betong 0.08V med resultaten från delaminerad betong 0.42V. Frekvensinnehållet i hastighetssignalen ligger mellan 700 Hz och 1000 Hz för den solida betongen men sjunker till mellan 200 Hz och 600 Hz för delaminerad betong.

3.1.2 Kommentar till Försök 2 (Figur 5) Thora-ce+Kombinationshandtag F/v och mikrofon

Resultaten avseende kraft och hastighet är samma som i försök 1. Mikrofon-signalen fördubblas i amplitud och frekvensen minskar drastiskt när man jämför resultaten från delaminerad betong med resultaten från solid betong. Frekvensinnehållet i signalen från delaminerad betong är 1200 Hz medan signalen från solid betong är 2000 Hz. Detta är ett mycket intressant resultat då frekvensmätningar kan ske på olika avstånd utan att frekvensinnehållet påverkas. Amplitudmätningar påverkas däremot av avståndet på så sätt att amplituden minskar med avståndet, med minskningstakten beroende på den riktverkan ljudkällan har.

3.1.3 Kommentar till Försök 3 (Figur 6) "Modally tuned" PCB-hammare med kraftgivare och mikrofon

Detta försök motiveras av en enklare hantering. Det behövs endast en kabel mellan hammaren och mätutrustningen, nämligen den som överför kraftsignalen från den i hammaren inbyggda kraftgivaren. För denna hammare ser vi ungefär samma amplitud på mikrofonsignalen för solid och delaminerad betong. Frekvensinnehållet ligger emellertid i området 3000 – 7000 Hz för solid betong, medan det ligger i området 800 – 1300 Hz för den delaminerade betongen. Återigen visar sig frekvensen vara en god indikator, särskilt som den kan mätas utan att avståndet mellan källa och mikrofon påverkar uppmätta värden.

3.1.4 Kommentar till Försök 4 (Figur 7) Snickarhammare och mikrofon

I syfte att uppnå ännu enklare mätförfarande provades att använda en vanlig snickarhammare och den fast uppställda mikrofonen. Det finns då inga kablar alls kvar mellan operatören och mätutrustningen. Efter viss anpassning av förstärkning och trignivåer erhöles god funktion i att starta AD-omvandlingen (AD = Analog till digital) med hjälp av mikrofonsignalen. Vanligtvis sker detta annars med kraftsignalen som alltid är stark och mycket distinkt. Man ser att mikrofonsignalens amplitud är dubbelt så stor för delaminerad betong som för solid betong. Man ser också att medan den uppmätta frekvensen är c: a 4800 Hz för solid betong så är den endast c: a 1600 Hz för den delaminerade betongen. Frekvensen visar sig alltså än en gång vara en överlägsen indikator.

Tabell 1. Sammanfattande resultat för de fyra försöken. För Försök 1 redovisas data för uppmätt hastighet. För de övriga försöken avses data för mikrofonsignalen.

Parameter	Försök 1	Försök 2	Försök 3	Försök 4
Amplitud solid	0.08 V*	0.2 V	2.5 V	1.1 V
Amplitud delaminerad	0.42 V*	0.4 V	3.0 V	2.7 V
Frekvens solid	700 – 1000 Hz	2000 Hz	3000-7000 Hz	4800 Hz
Frekvens delaminerad	200 – 600 Hz	1200 Hz	800 – 1300 Hz	1600 Hz

Den bästa differentialdiagnosen enligt Tabell 1, en faktor fem, ger hastighetskillnaden erhållen från kombinationshandtaget (Försök1). Snickarhammaren (Försök 4) ger en frekvensskillnad med en faktor fyra. Inte långt därefter kommer resultaten från den stora "modally tuned" hammaren, men då är frekvenserna spridda över ett bredare frekvensband.

Om man kombinerar kombinationshandtag och mikrofon får man ett omfattande informationsunderlag. Detta tillvägagångssätt ger även operatören en möjlighet till direkt återkoppling i efterhand till den subjektiva upplevelsen vid utförandet av mätningen, genom att han kan lyssna på det inspelade ljudet. Operatören kan då utveckla ett förtroende för det han hört och de presenterade resultaten.

Så länge slagsignalen går fram till mikrofonen utgör kombinationen snickarhammare och hastighet en elegant möjlighet att undvika kablar, vilket gör förfarandet mycket smidigt.

Detta försök innehåller ingen ansats att gradera delamineringen och koppla sådana data till uppmätta storheter. Ett sådant arbete fordrar nedrivning av eller borrar i betongen och det har inte varit målsättningen med projektet. Aktuell delaminering är mycket tydligt observerbar med vanlig bomknackning. Den stora skillnaden i mätvärdena mellan solid och delaminerad betong ger god anledning att tro att även en gradering av delaminering kan ske med de undersökta metoderna.

"Bom" är en kombinerad effekt av delamineringens tjocklek och utsträckning. Om man gör systematiska mätningar i ett rutnät framträder delamineringens omfattning och då kan det tänkas att man kan beräkna tjockleken teoretiskt. Ett vanligt sätt att mäta tjockleken av ett delaminerat skikt är med hjälp av impact-echo-metoden (resonans, stående våg). För att det skall vara möjligt krävs att man kan alstra betydligt högre frekvenser än de som är aktuella vid bomknackning. Ett annat sätt att mäta delamineringens tjocklek är med ultraljud. För att ringning då inte skall uppstå krävs, enligt erfarenheter att det delaminerade skiktet har en viss tjocklek, säg 50 -60 mm.

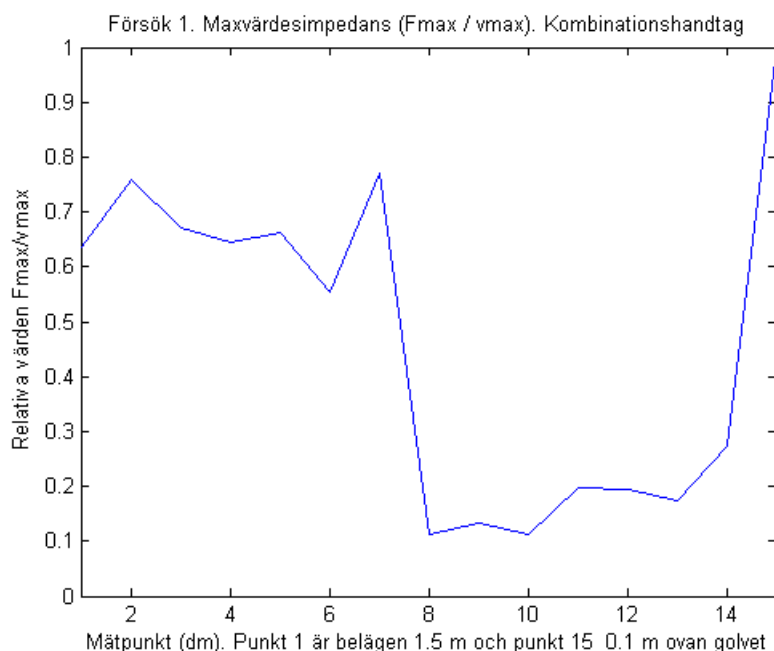
3.2 Profiler över solid / delaminerad betong

De profiler som redovisas innehåller maxvärdesimpedans och frekvenstopp från försök 1 (kombinationshandtag+Thorace), maxamplitud och frekvenstopp för mikrofondata i försök 2 (kombinationshandtag+Thorace+mikrofon), maxamplitud och frekvenstopp för mikrofondata i försök 3 (PCB-hammare+mikrofon) samt maxamplitud och frekvenstopp för mikrofondata i försök 4 (snickarhammare+mikrofon).

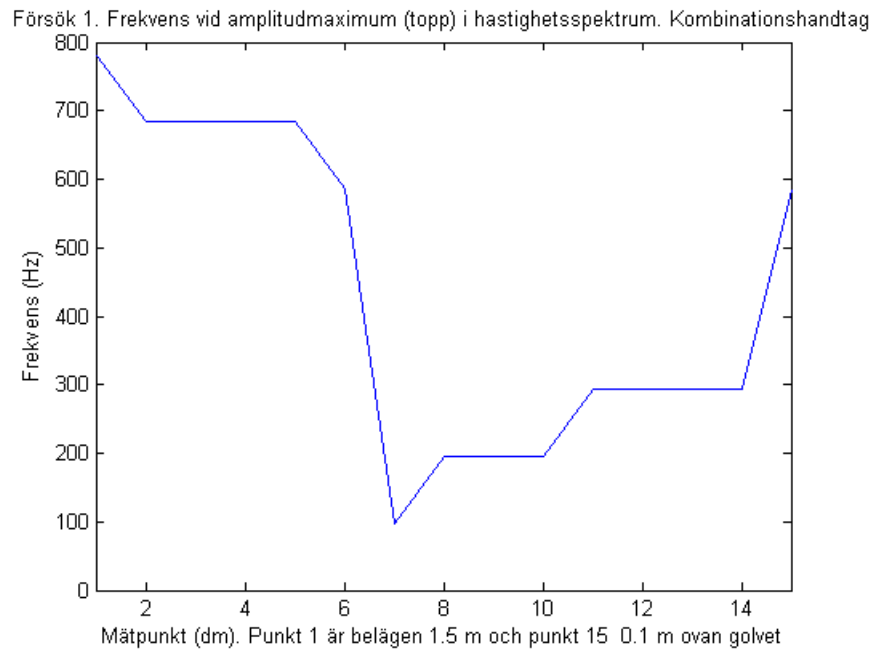
Impedans är en frekvensberoende storhet som utgör kvoten mellan kraft och hastighet. I syfte att förenkla redovisningen använder man ibland kvoten mellan maximal uppmätt kraft och maximal uppmätt hastighet för att karakterisera ett materials punktimpedans. Man ersätter då ett helt spektrum av impedanser med ett enda värde. Denna typ av impedansvärde kallas i denna rapport för maxvärdesimpedans Z_m .

Kombinationshandtaget används i försök 1 – 2, men data från handtaget är i stort sett desamma för båda försöken varför data från kombinationshandtaget endast visas från försök 1. I försöken 2-4 fokuseras intresset på signalen som uppmäts med mikrofon. I profilberäkningarna för Försök 3 och 4 utnyttjas bara de 1000 första mätvärdena i varje signal om 4096 mätvärden. Profilerna är automatiskt beräknade i dator med en enkel algoritm. Som tidigare nämnts omfattar det delaminerade området punkterna 8-13.

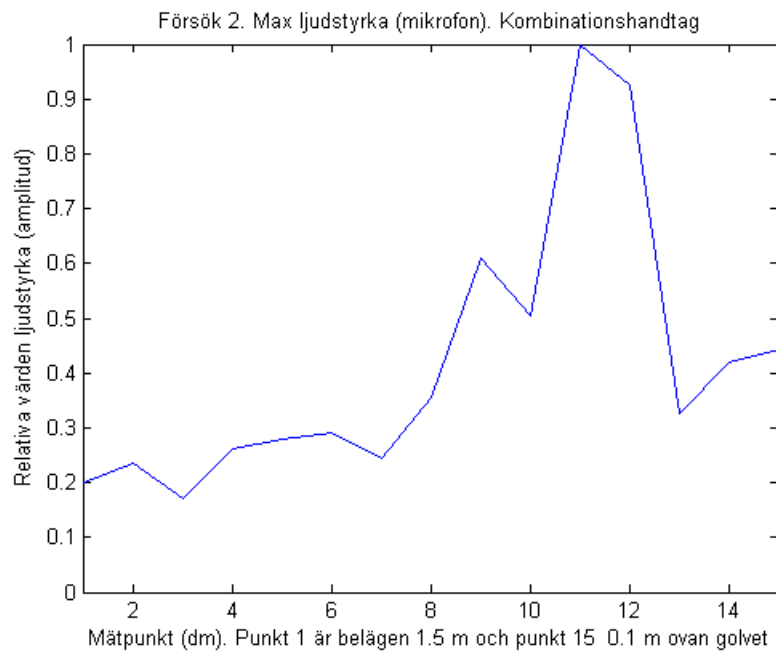
För den som är intresserad av andra mätvärden hänvisas till bilagan med alla mätdata redovisade.



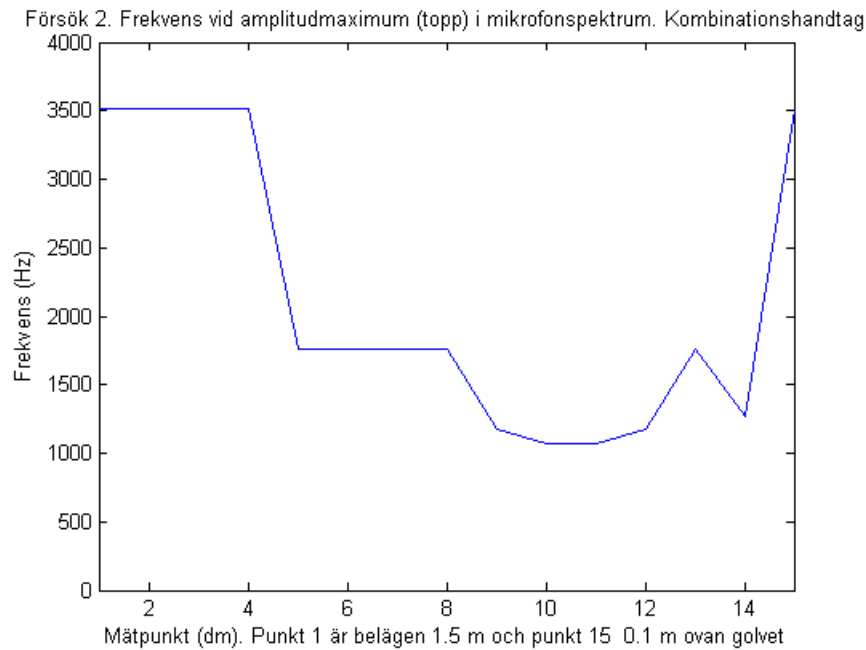
Figur 8. Relativ maxvärdesimpedans vid mätning med kombinationshandtag och Thorace-hammare.



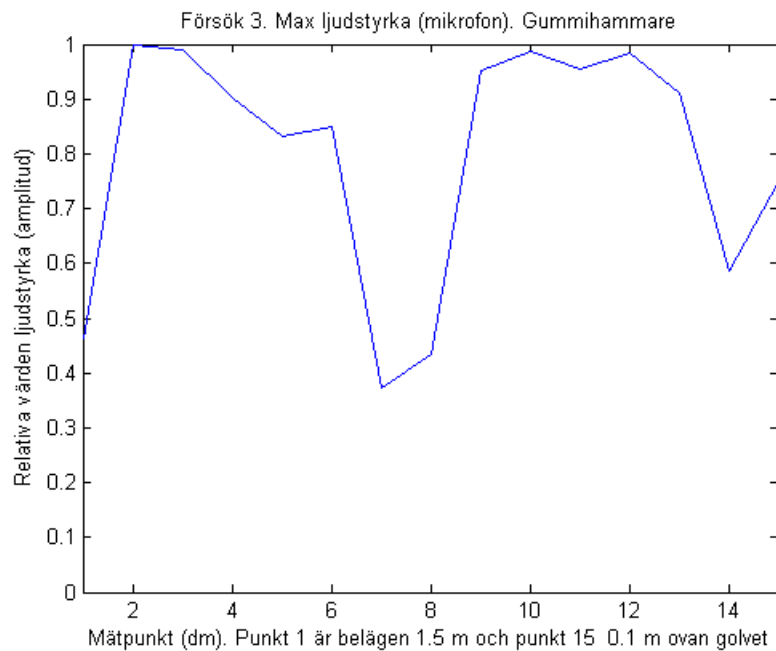
Figur 9. Den frekvens i varje mätpunkt för vilken toppvärdet i hastighetspektrum erhålles vid mätning med kombinationshandtag och Thorace-hammare.



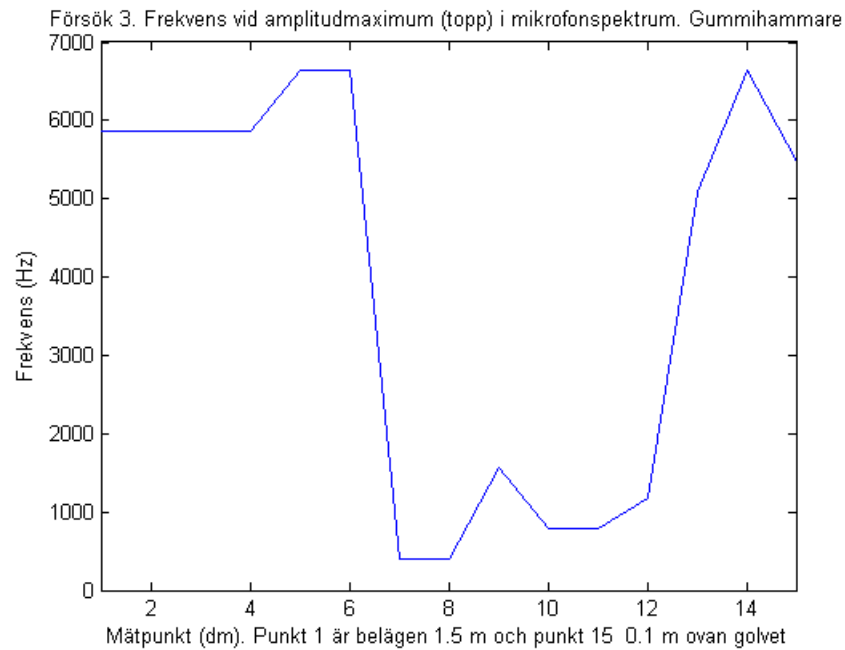
Figur 10. Maximal ljudstyrka vid mätning med kombinationshandtag och Thorace-hammare.



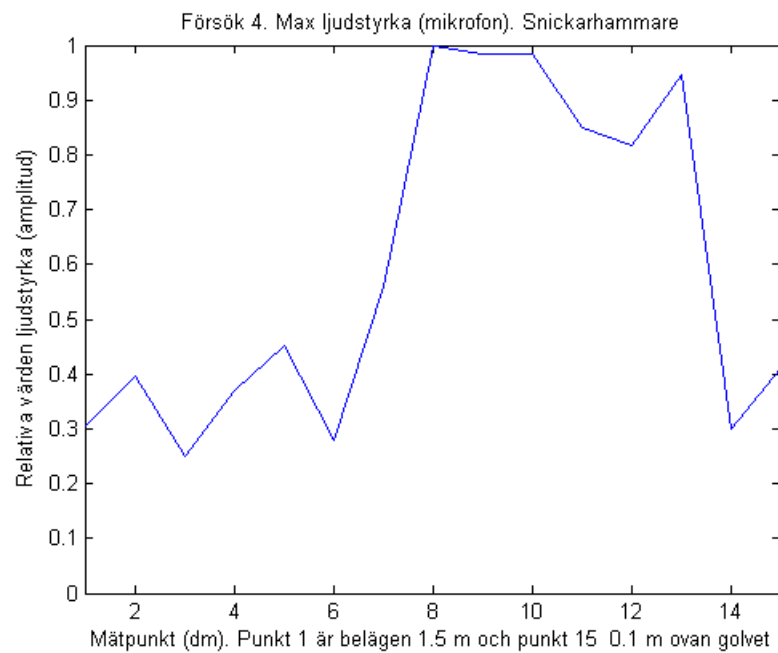
Figur 11. Den frekvens i varje mät punkt för vilken toppvärdet i ljudspektrum erhålles vid mätning med kombinationshandtag och Thorace-hammare.



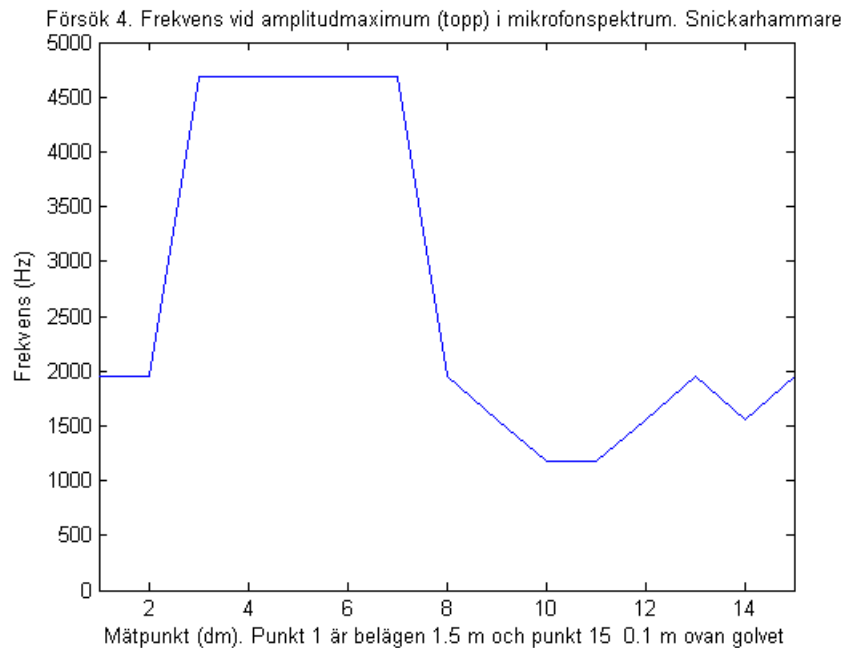
Figur 12. Maximal ljudstyrka vid mätning med PCB-hammare och mikrofon.



Figur 13. Den frekvens i varje mät punkt för vilken toppvärdet i ljudspektrum erhålles vid mätning med PCB-hammare och mikrofon.



Figur 14. Maximal ljudstyrka vid mätning med snickarhammare och mikrofon.



Figur 15. Den frekvens i varje mätpunkt för vilken toppvärdet i ljudspektrum erhålles vid mätning med snickarhammare och mikrofon.

3.2.1 Kommentar Försök 1 (Figur 8, 9) Thorace + Kombinationshandtag F/v

Trenden från den punktvisa jämförelsen finns kvar i dessa mätningar. Maxvärdesimpedansen Z_m ligger i genomsnitt på 0.7 för solid betong medan den ligger på 0.2 för delaminerad betong. Frekvenstoppen ligger för solid betong vid 700 Hz medan den för delaminerad betong ligger vid 250 Hz. Båda mätstorheterna visar en ökning närmast golvet, vilket troligen kan förklaras med att väggen är fastare inspänd där än högre upp.

3.2.2 Kommentar Försök 2 (Figur 10, 11) Thorace + Kombinationshandtag och mikrofon

I dessa figurer visas inte kraft och hastighetsdata från kombinationshandtaget, eftersom det är samma värden som visats i Försök 1, utan endast aspekter på den via mikrofon upptagna ljudsignalen. Ljudstyrkan ligger på 0.2 för den solida betongen och stiger till maximalt 1.0 för den delaminerade betongen, men spridningen inom det delaminerade området är stor. Gränsen mellan solid och delaminerad betong markeras väl. Vad gäller frekvensinnehållet är detta högre i det solida området men variationen är stor, från 1700 Hz till 3500 Hz. I det delaminerade området ligger toppfrekvenserna runt 1500 Hz. Det delaminerade området markeras mindre väl, man skulle ha indikerat delaminering redan i punkt 5, medan den i verkligheten startar i punkt 8. Slutsatsen måste vara att ljudmätningar i samband det aktuella kombinationshandtaget inte är en optimal lösning. Det är möjligt att en annan utformning av kombinationshandtaget kan ge bättre akustisk profil. Det är också möjligt att högpasstrerering av ljudsignalen kan ge mindre spridning av frekvensvärdena.

3.2.3 Kommentar Försök 3 (Figur 12, 13) "Modally tuned" PCB-hammare och mikrofon

I detta försök används kraftgivaren i PCB-hammaren för att trigga datainsamlingen, men endast data från ljudupptagningen analyseras. Ljudstyrkan ger inte en tillförlitlig indikation av solid versus delaminerad betong. Inte heller indikeras gränsen mellan områdena korrekt. Däremot visar frekvenstoppen tydligt om det är fråga om solid eller delaminerad betong. Solid betong ger upphov till frekvenser kring 6000 Hz medan delaminerad betong ger frekvenser kring 1000 Hz. Gränsen mellan områdena markeras vid punkt 7, vilket är ett steg för tidigt. Det är intressant att konstatera att PCB-hammaren med slagdyna av hårdgummi ger högre frekvenskomponenter än snickarhammaren av stål.

3.2.4 Kommentar Försök 4 (Figur 14, 15) Snickarhammare och mikrofon

I detta försök triggas dataregistreringen av ljudsignalen när ljudet som uppstår när hammaren träffar betongytan når mikrofonen. Ljudstyrkan för solid betong ligger på 0.35 medan den ligger på 0.9 i snitt för den delaminerade betongen. Gränsen mellan solid och delaminerad betong markeras korrekt. Vad gäller frekvensinnehållet ligger detta kring 4500 Hz för de flesta mätpunkterna i solid betong men de allra första visar markant lägre värden 2000 Hz. I den delaminerade betongen ligger frekvensen på 1500 Hz i genomsnitt.

3.3 Sammanställning av resultat

Tabell 2. Sammanställning av resultat av profiler längs mätpunkterna. Försök 1 avser maximipedans och frekvensinnehåll i hastighetssignalen medan Försök 2-4 visar ljudstyrkan och frekvensinnehållet i signalen från mikrofonen. Approximativa värden.

Parameter	Försök 1	Försök 2	Försök 3	Försök 4
Amplitud solid	0.7 (Z_m)	0.2	-	0.35
Amplitud delaminerad	0.2 (Z_m)	1.0	-	0.90
Frekvens solid	700 Hz	2500 Hz	6000 Hz	4800 Hz
Frekvens delaminerad	200 Hz	1500 Hz	1000 Hz	1600 Hz
Amplitudkvot	3.5	5	-	3
Frekvenskvot	3.5	1.7	6	3

Av Tabell 2 framgår det att den starkaste differentialdiagnosen erhålles från frekvensinformationen då PCB hammaren används som energikälla och mikrofonsignalen som informationskälla (Försök 3). Kvoten är 6. Å andra sidan ger amplitudinformationen osäkra värden med denna metod.

Som nummer två i ordning följer ljudupptagning av slag med Thoracehammaren mot kombinationshandtaget triggat av kraftgivaren i handtaget (Försök 2). Kvoten är 5. Å andra sidan tycks frekvenserna inte vara en särskilt stark diskrimineringsgrund i detta försök.

Som nummer tre följer slag med Thorace-hammaren mot kombinationshandtaget (Försök 1). Här är det intressant att konstatera att båda de analyserade parametrarna ger samma grad av differentiering mellan solid betong och delaminerad. Kvoten är 3.5 för båda. Man bör vid bedömningen ta hänsyn till att man därigenom får ett säkrare beslutsunderlag än om man bara har en parameter. Dessutom bör man ta hänsyn till att kombinationshandtaget ger en fysikaliskt meningsfull parameter i den enkelt beräkningsbara maximpedansen Z_m .

Sist följer slag med snickarhammare och trigging av mätsystemet med ljudsignalen från mikrofonen Försök 4. Kvoten är 3 men å andra sidan gäller detta värde både för amplitud och frekvensinformationen, vilket i likhet med föregående fall medför ett förbättrat beslutsunderlag. Dock kan ingen fysikalisk parameter bestämmas med denna metod.

Summeras, som en enkel modell, amplitud och frekvenskvoterna för varje försök erhålles i stort sett samma värde för alla fyra försöken, nämligen ett värde någonstans mellan 6 och 7.

4 Rekommendation

I ELFORSK rapport 11.11 "Impulsresponsmätningars beroende av sprickdjup" framgår det att den uppmätta resonansfrekvensen i det akustiska området är beroende både av delamineringens tjocklek och dess utbredning (Ekv 19). Uttrycket för den stående vågens frekvens som funktion av delamineringstjockleken i det delaminerade skiktet (Ekv 20) kräver att man exciterar vågor i ultraljudområdet och det gör man inte vid bomknackning. Följaktligen kan man med mikrofonmetoden aldrig diskriminera mellan delamineringens tjocklek och dess utbredning med en punktmätning, båda storheterna påverkar resonansfrekvensen mikrofonen fångar upp. Den andra parametern mikrofonen fångar upp är ljudamplituden vid slaget, men denna är beroende av avståndet mellan slagpunkt och mikrofon och är därför inte tillförlitlig. Man kan däremot tänka sig att kraft och hastighet som ger impedansen och mäts med kombinationshandtaget ger tillräckligt mycket extra information för att man skall kunna beräkna både delamineringens utbredning och tjocklek. Kombinationshandtaget ger därför störst utvecklingspotential. Vid mätningar i ett tätt rutnät torde dock delamineringens utbredning framgå med båda metoderna. Ur operatörssynpunkt är det självklart så att de sladdlösa mikrofonmätningarna är att föredra.

Bilaga med samtliga mätdata

Försök 1: Figur 1.1 – 1.15

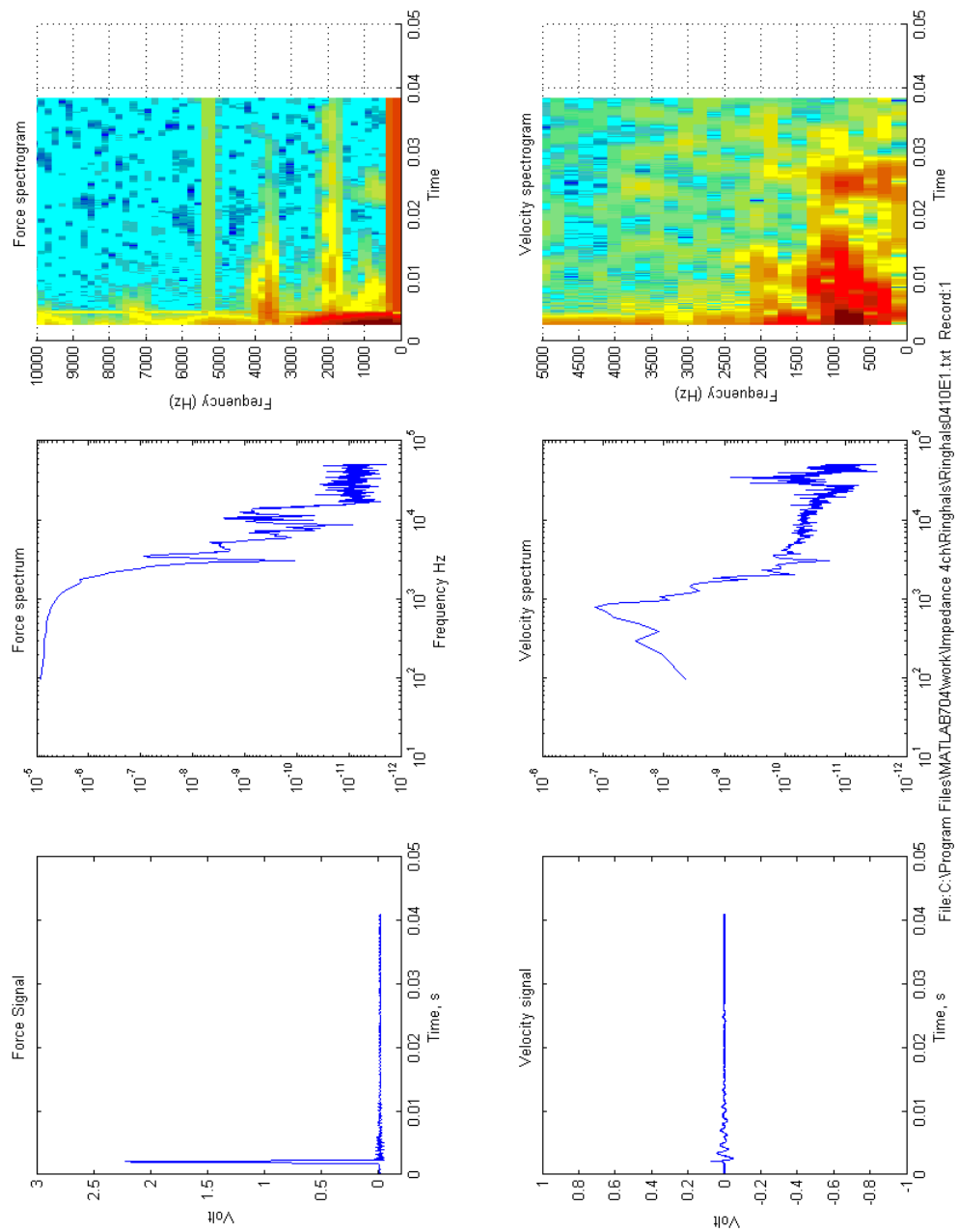
Försök 2: Figur 2.1 – 2.15

Försök 3: Figur 3.1 – 3.15

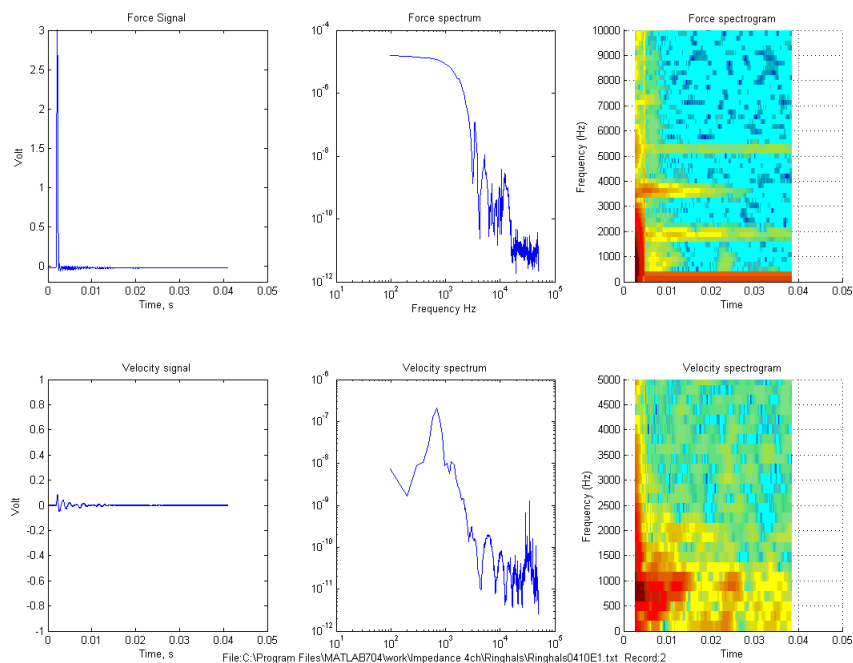
Försök 4: Figur 4.1 – 4.15

FÖRSÖK 1: Thorace hammare och kombinationshandtag

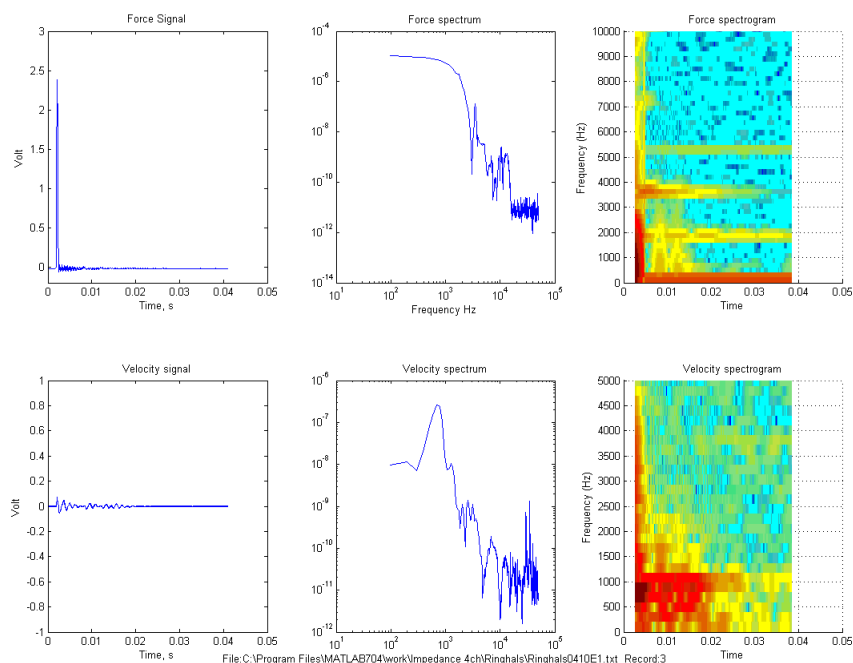
Mätplats:	Ringhals rum 0410, östra väggen. Vertikal linje med 15 punkter på 0.1 m avstånd. Mätning startar 1.5 m ovan golv (Punkt 1) och slutar 0.1 m ovan golv (Punkt 15). Delaminering från punkt 8 till 13.
Energikälla:	Rekylfri hammare ("Dead blow hammer")
Mätmetod:	Kombinationshandtag med givare för kraft och hastighet.
Givare:	Kraftgivare och hastighetsgivare (geofon) i kombinationshandtag
Trigging:	Sker på signalen från kraftgivaren (tröskelvärde)
Presenteras:	Kraft och hastighet
Presentation:	Signal (tid), Spektrum (frekvens) och spektrogram (frekvens – tid). Den första bilden i sekvensen är vriden och förstorad i syfte att göra rubrikerna tydligt läsbara, resterande figurer har mindre skala i syfte att spara plats.



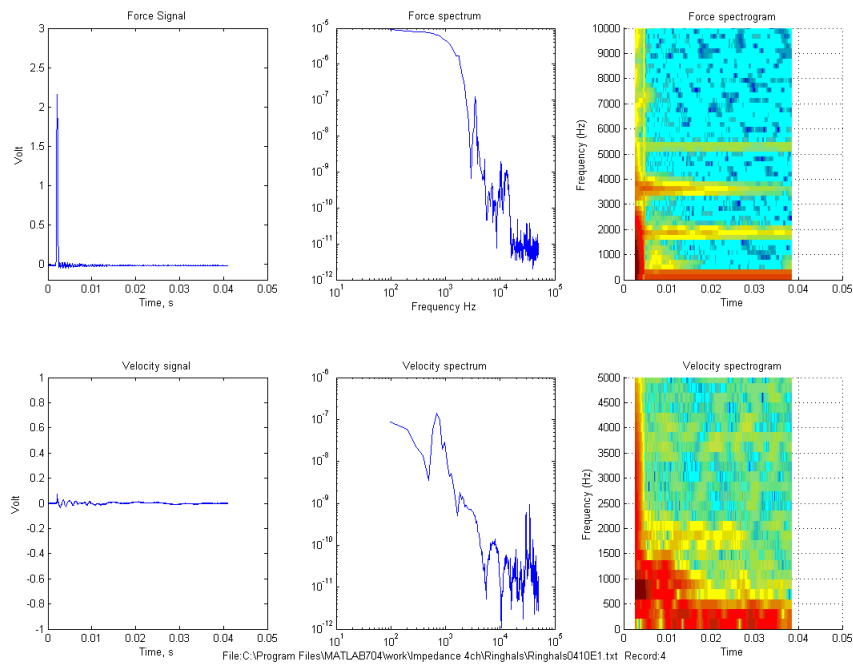
Figur 1.1. Kraft och hastighet i punkt 1



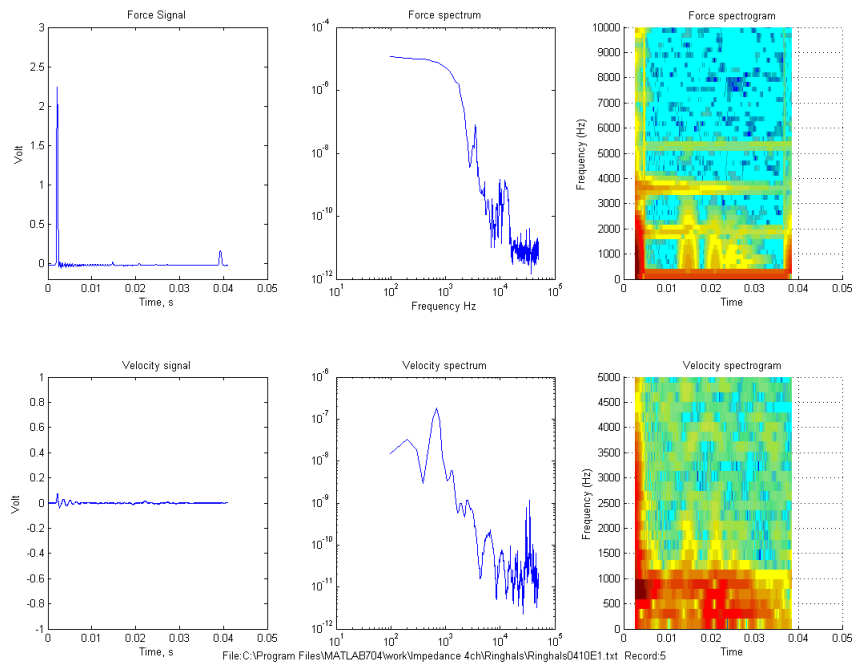
Figur 1.2. Kraft och hastighet i punkt 2



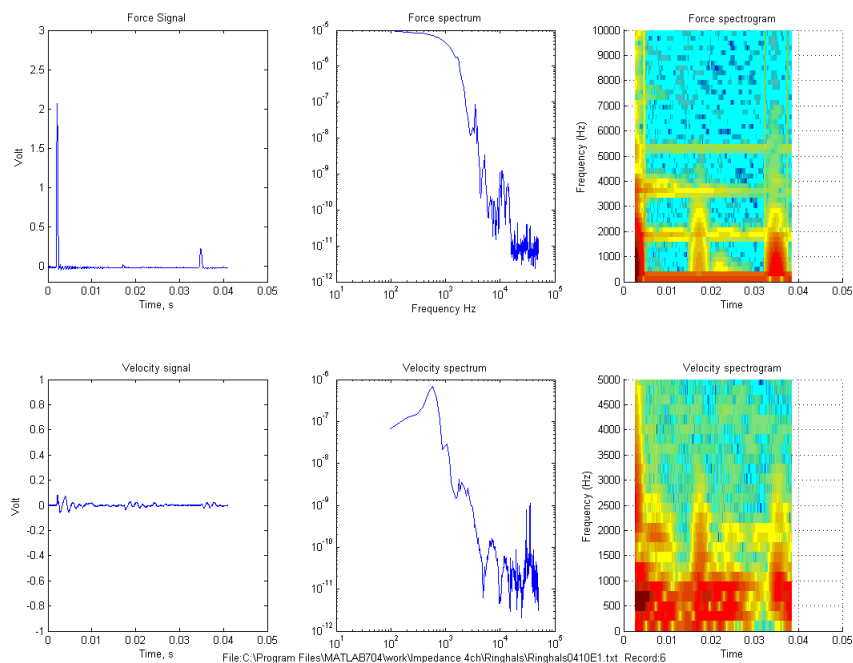
Figur 1.3. Kraft och hastighet i punkt 3



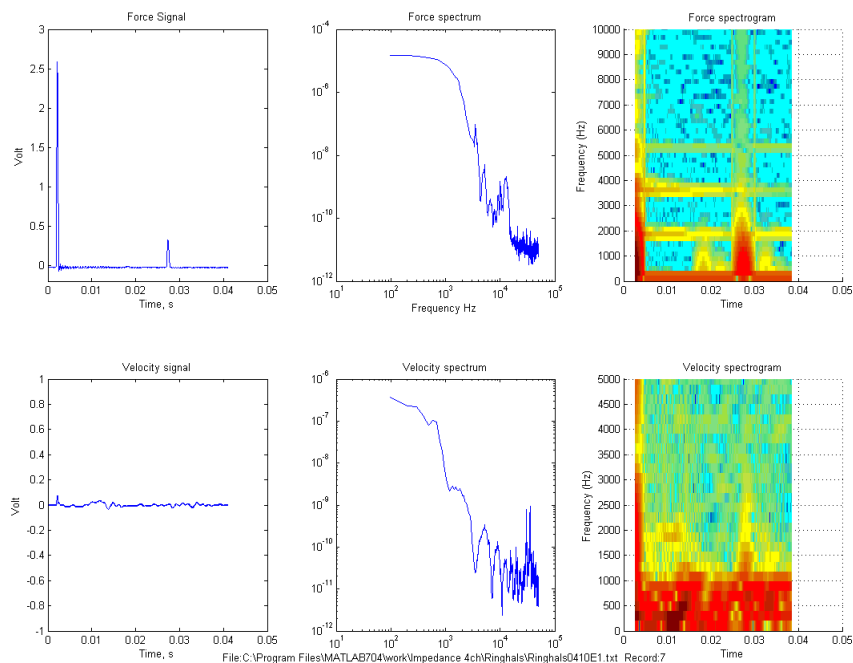
Figur 1.4. Kraft och hastighet i punkt 4



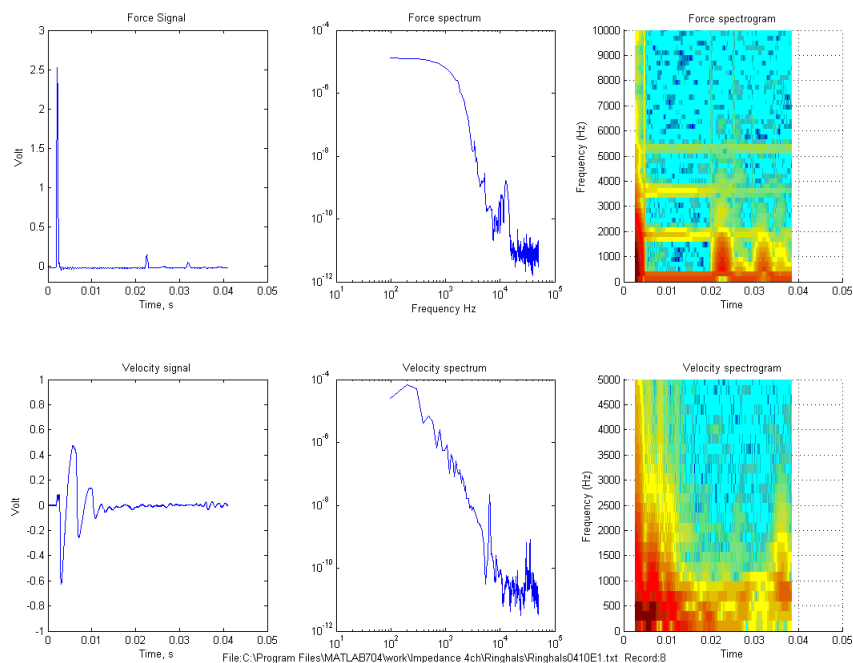
Figur 1.5. Kraft och hastighet i punkt 5



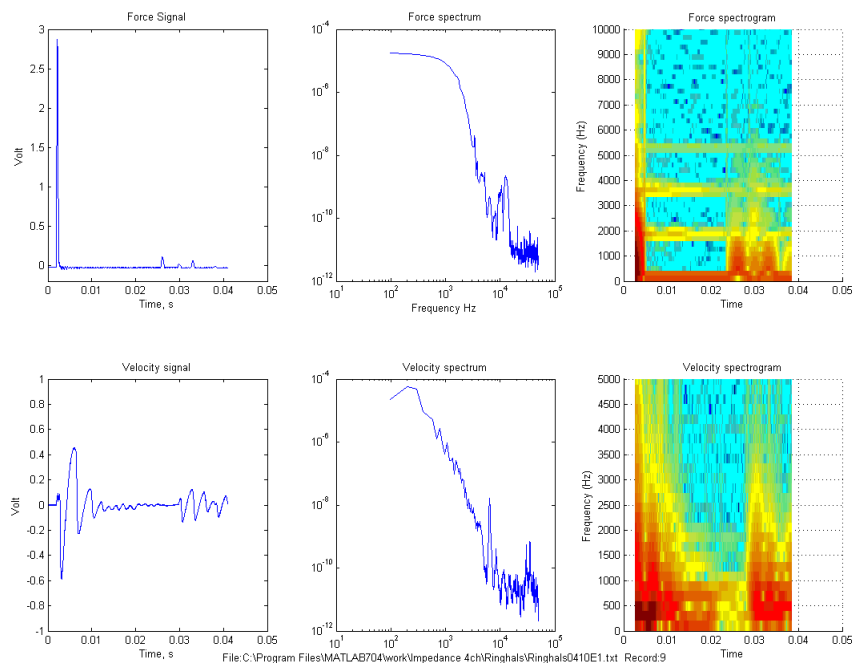
Figur 1.6. Kraft och hastighet i punkt 6



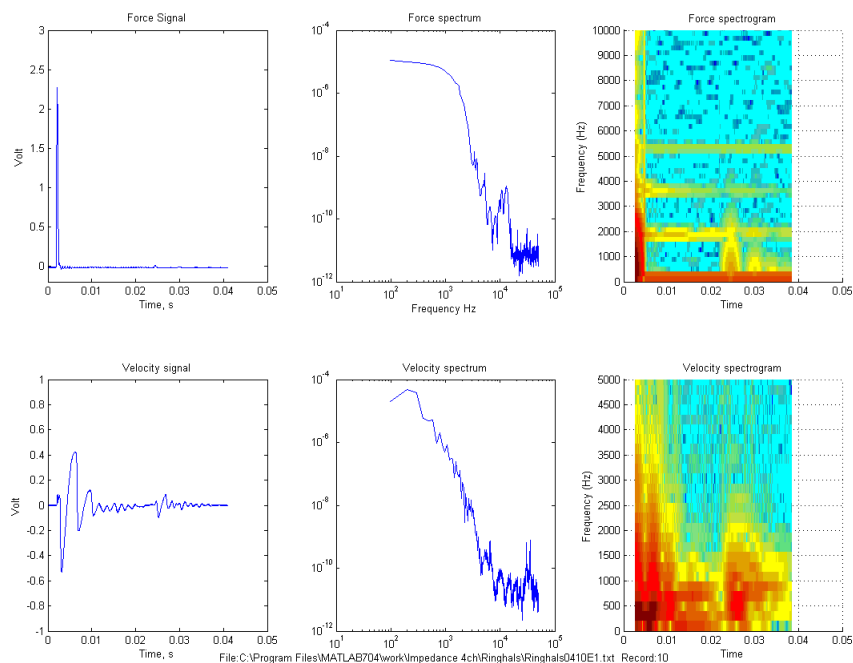
Figur 1.7. Kraft och hastighet i punkt 7



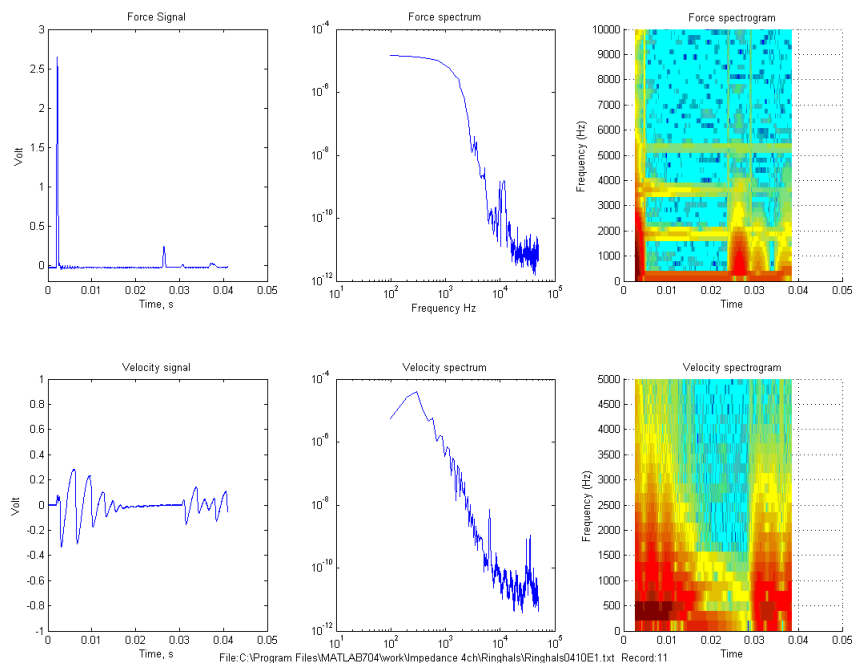
Figur 1.8. Kraft och hastighet i punkt 8



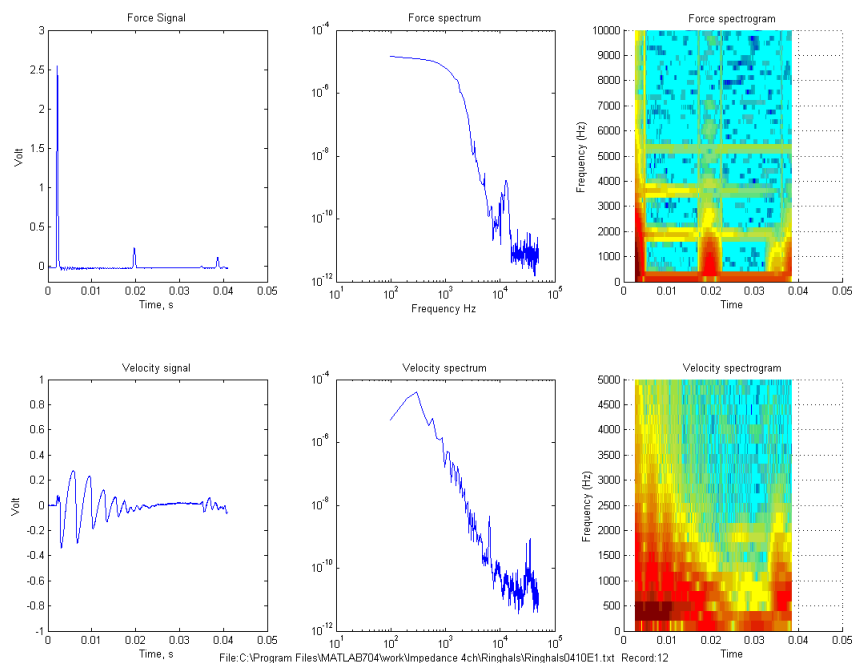
Figur 1.9. Kraft och hastighet i punkt 9



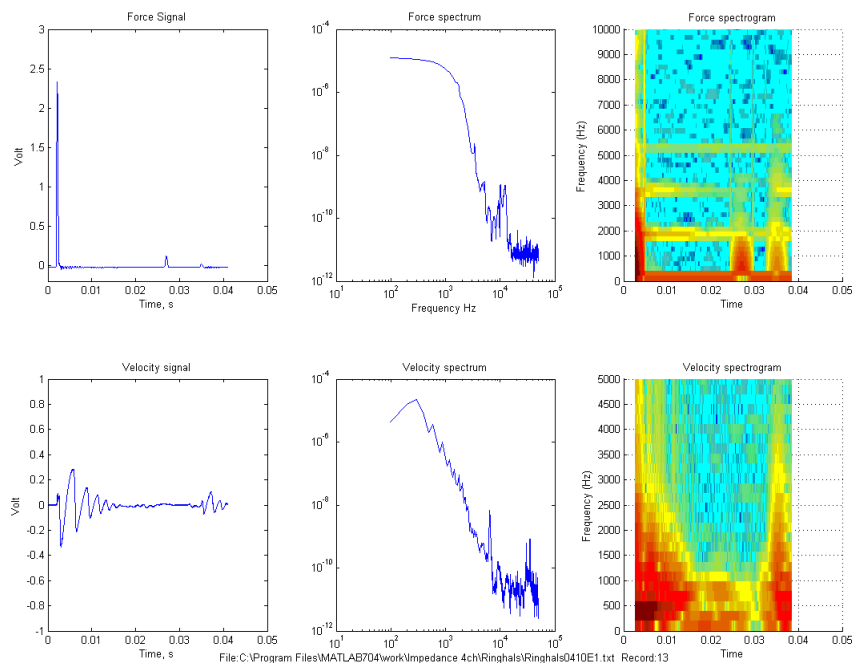
Figur 1.10. Kraft och hastighet i punkt 10



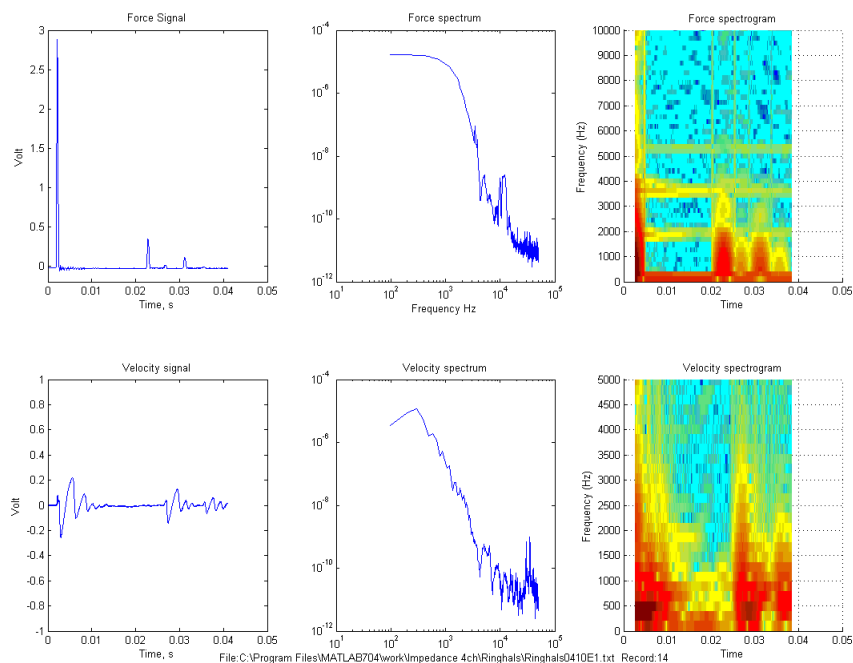
Figur 1.11. Kraft och hastighet i punkt 11



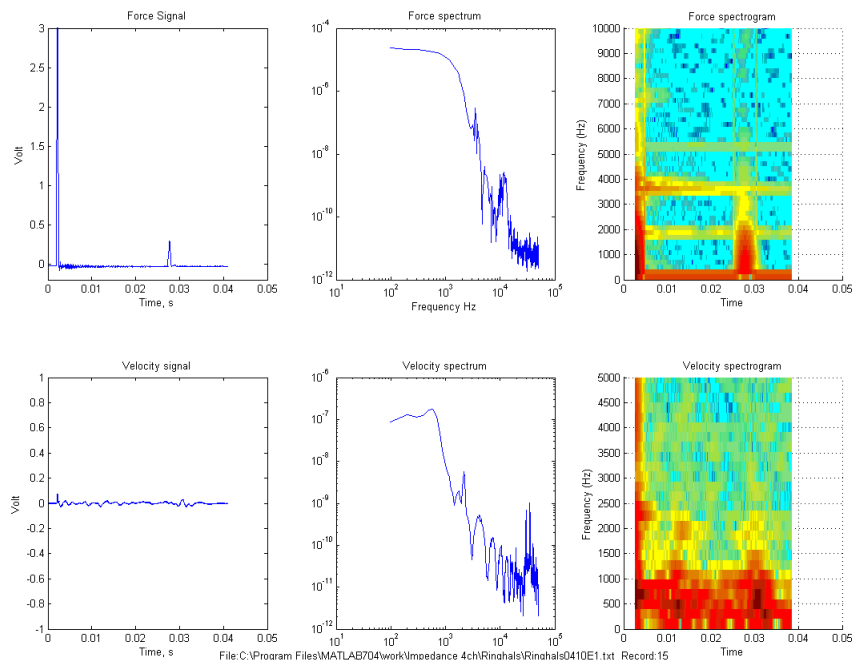
Figur 1.12. Kraft och hastighet i punkt 12



Figur 1.13. Kraft och hastighet i punkt 13



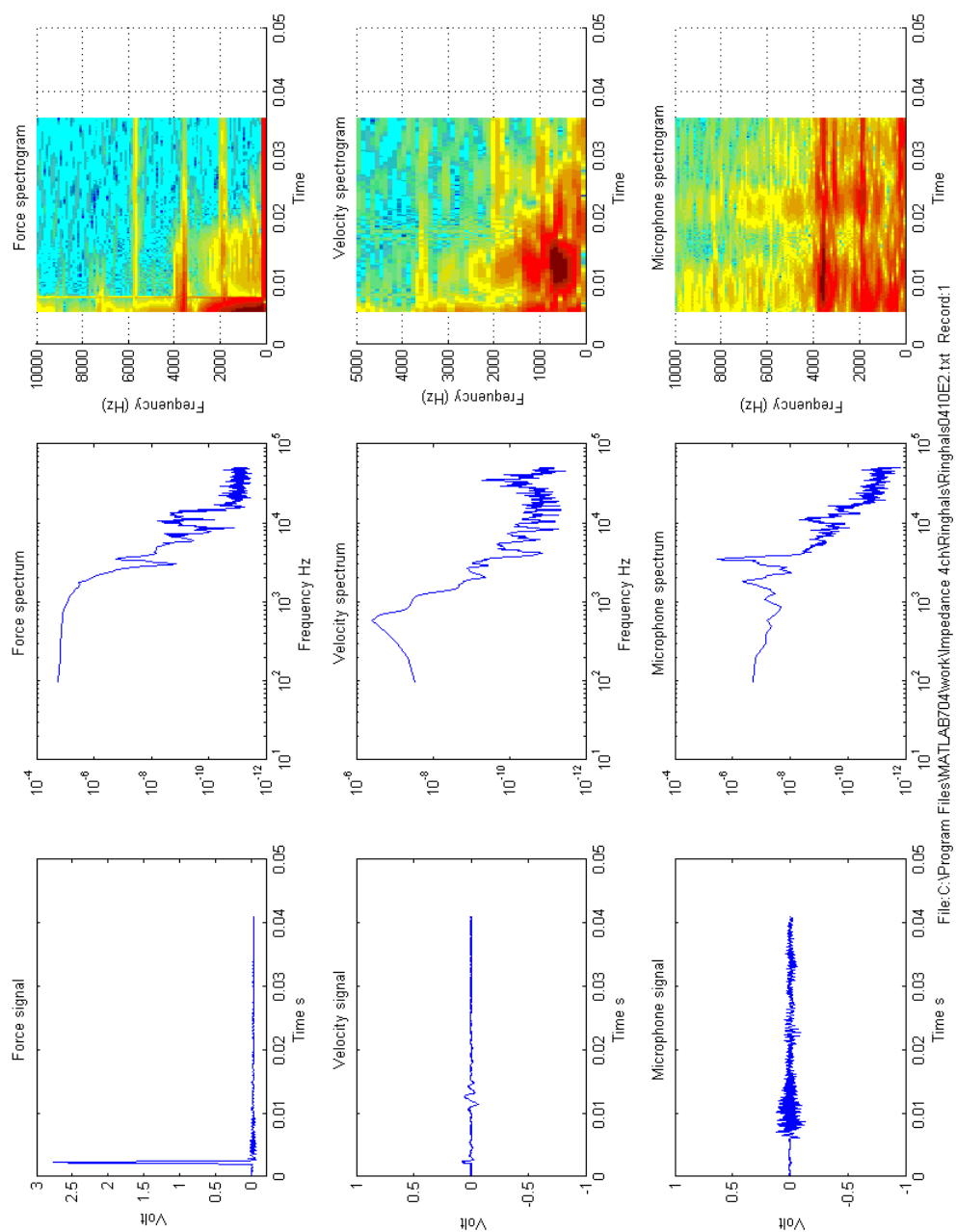
Figur 1.14. Kraft och hastighet i punkt 14



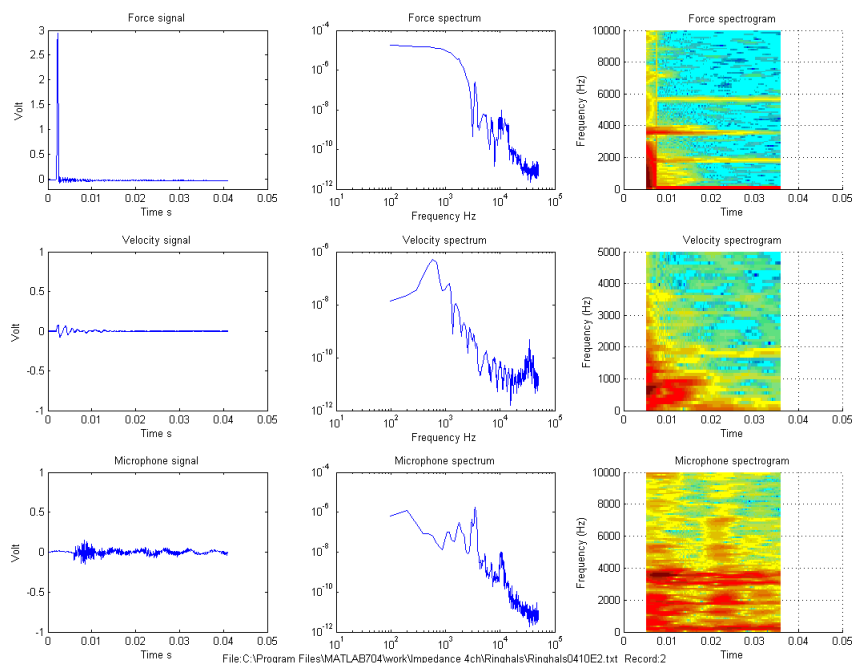
Figur 1.15. Kraft och hastighet i punkt 15

FÖRSÖK 2: Thorace hammare, kombinationshandtag och fast mikrofon

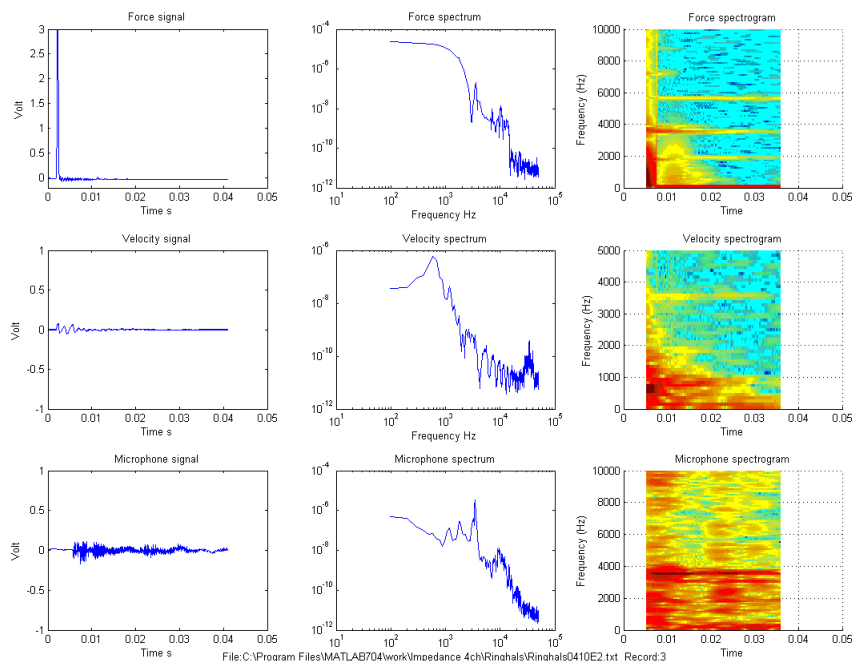
Mätplats:	Ringhals rum 0410 , östra väggen. Vertikal linje med 15 punkter på 0.1 m avstånd. Mätning startar 1.5 m ovan golv (Punkt 1) och slutar 0.1 m ovan golv (Punkt 15). Delaminering från punkt 8 till 13.
Energikälla:	Rekylfri hammare ("Dead blow hammer")
Mätmetod:	Kombinationshandtag med givare för kraft och hastighet. Ljudsignal.
Givare:	Kraftgivare och hastighetsgivare (geofon) i kombinationshandtag. Fast mikrofon på mätbord c:a 1.5 m från den undersökta väggen
Triggning:	Sker på signalen från kraftgivaren (tröskelvärde)
Presenteras:	Kraft, hastighet och ljudsignal
Presentation:	Signal (tid), Spektrum (frekvens) och spektrogram (frekvens – tid). Den första bilden i sekvensen är vriden och förstorad i syfte att göra rubrikerna tydligt läsbara, resterande figurer har mindre skala i syfte att spara plats.



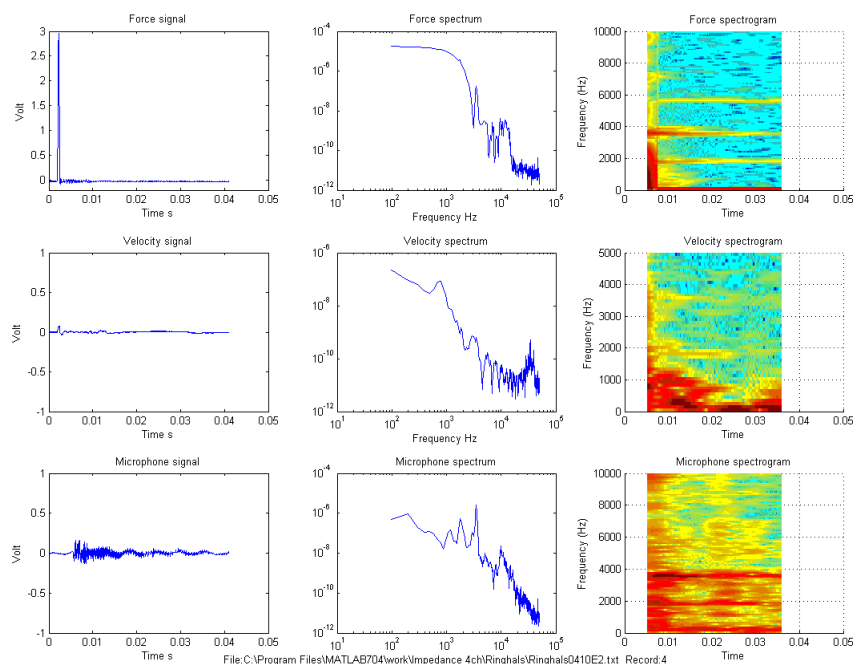
Figur 2.1. Kraft, hastighet och ljudsignal i punkt 2



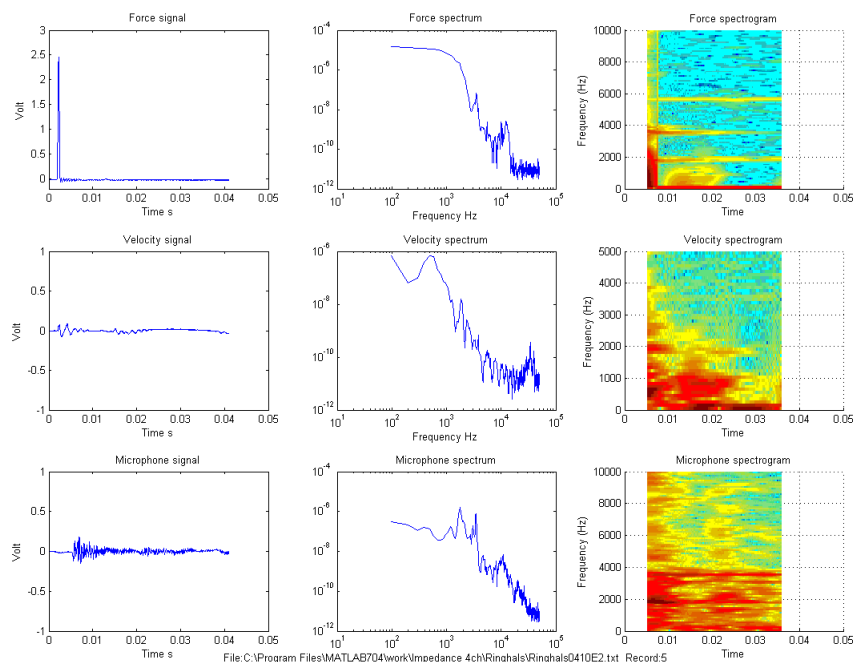
Figur 2.2. Kraft, hastighet och ljudsignal i punkt 2



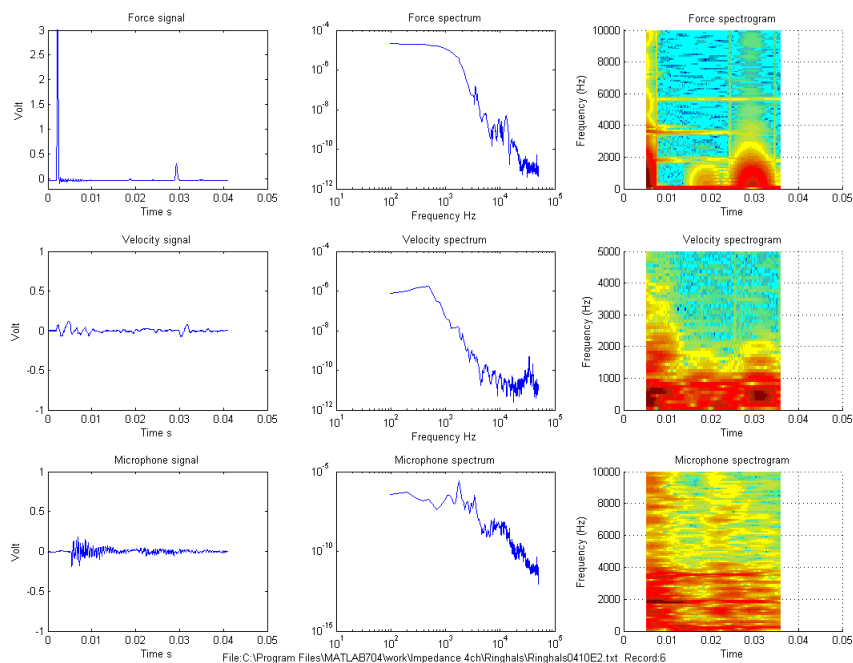
Figur 2.3. Kraft, hastighet och ljudsignal i punkt 3



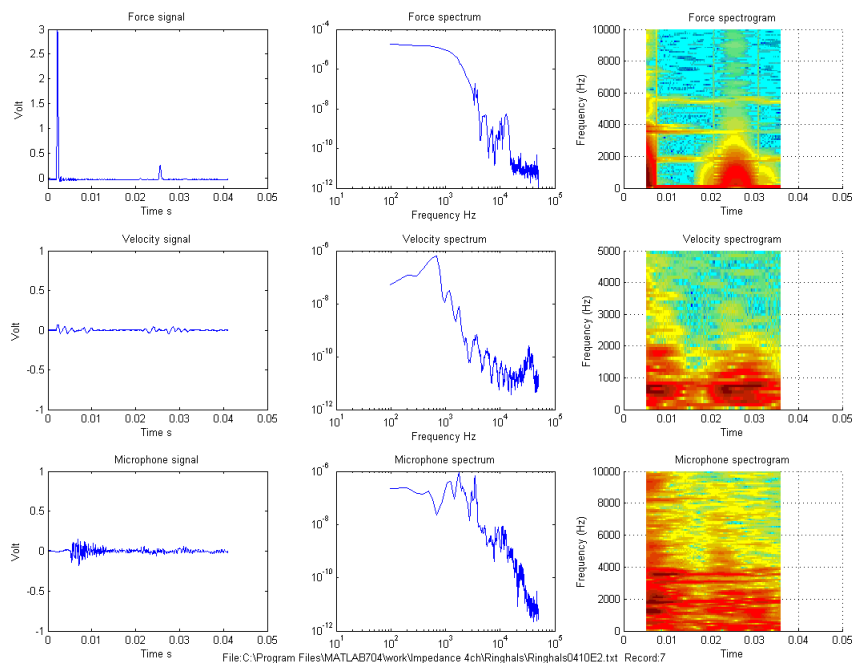
Figur 2.4. Kraft, hastighet och ljudsignal i punkt 4



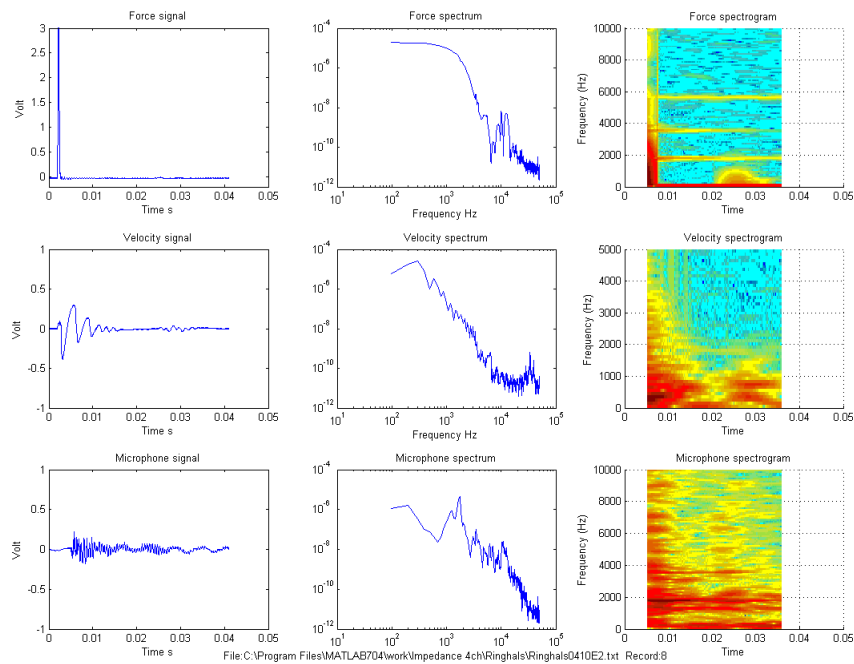
Figur 2.5. Kraft, hastighet och ljudsignal i punkt 5



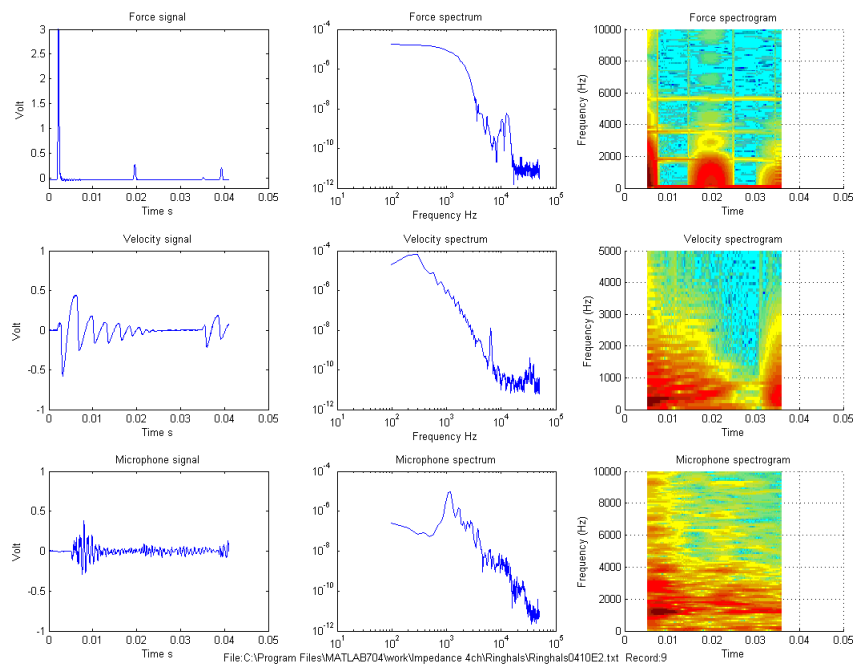
Figur 2.6. Kraft, hastighet och ljudsignal i punkt 6



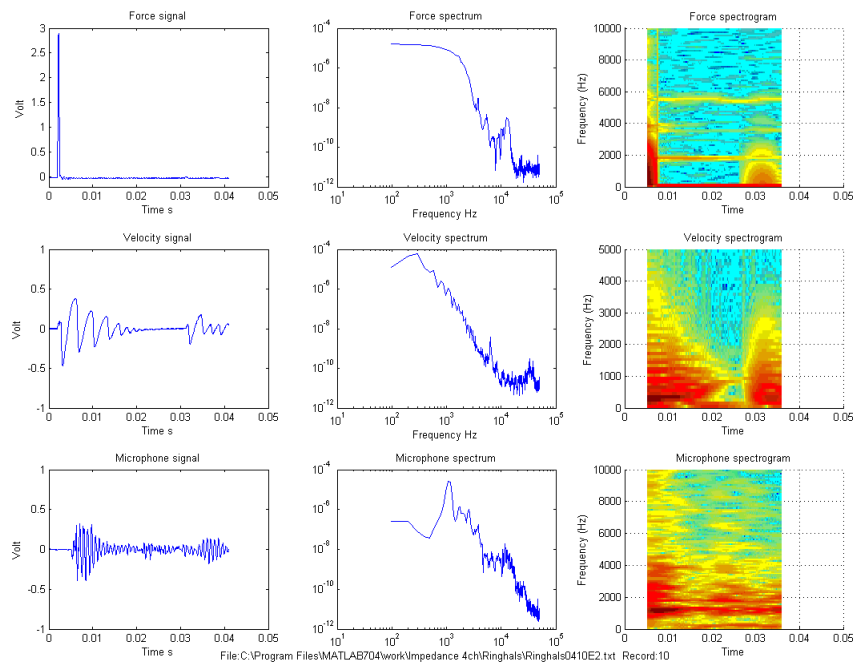
Figur 2.7. Kraft, hastighet och ljudsignal i punkt 7



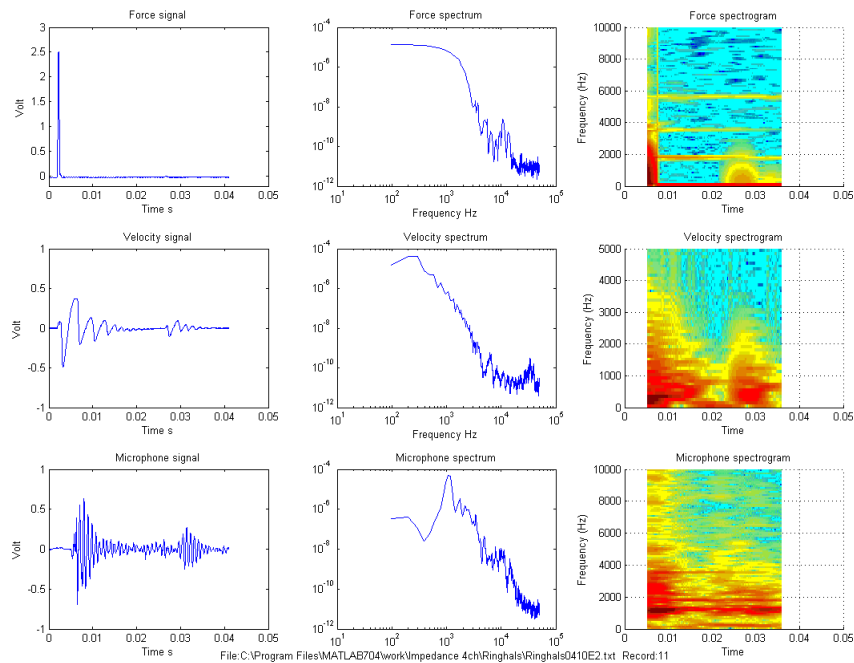
Figur 2.8. Kraft, hastighet och ljudsignal i punkt 8



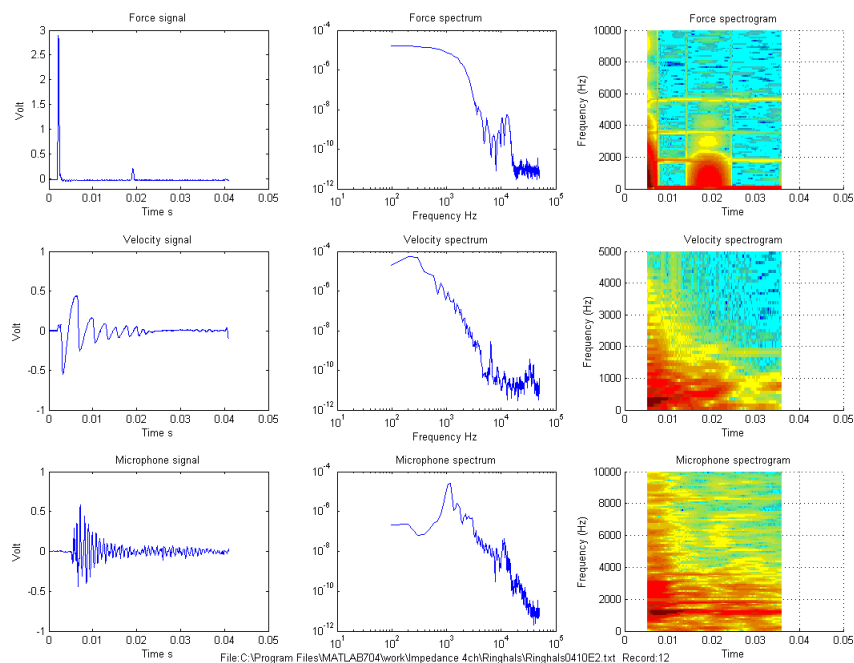
Figur 2.9. Kraft, hastighet och ljudsignal i punkt 9



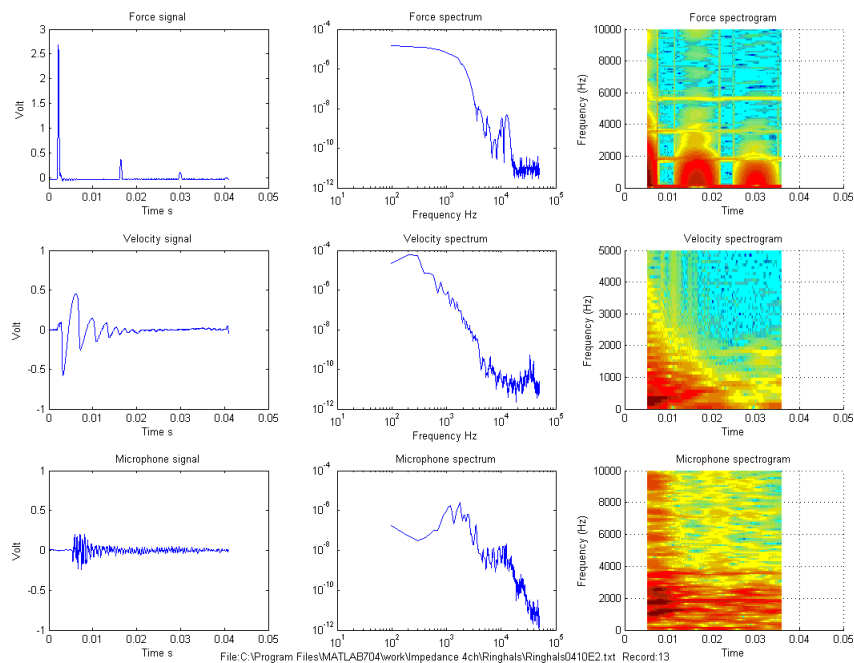
Figur 2.10. Kraft, hastighet och ljudsignal i punkt 10



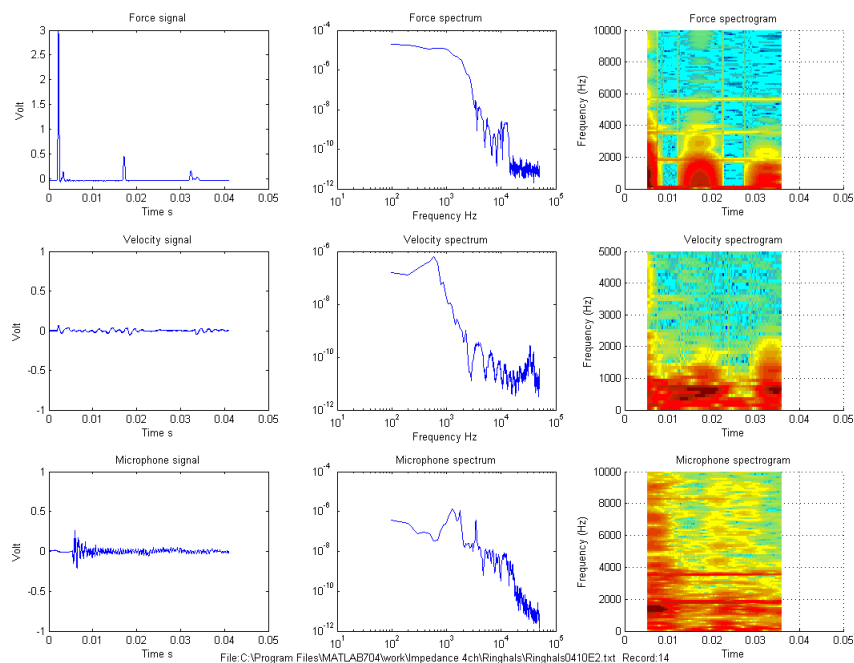
Figur 2.11. Kraft, hastighet och ljudsignal i punkt 11



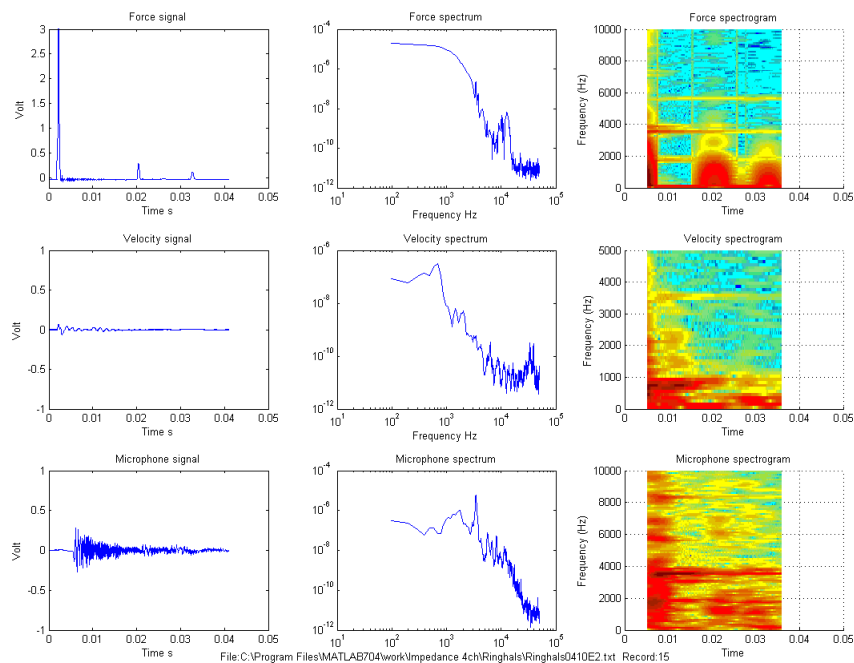
Figur 2.12. Kraft, hastighet och ljudsignal i punkt 12



Figur 2.13. Kraft, hastighet och ljudsignal i punkt 13



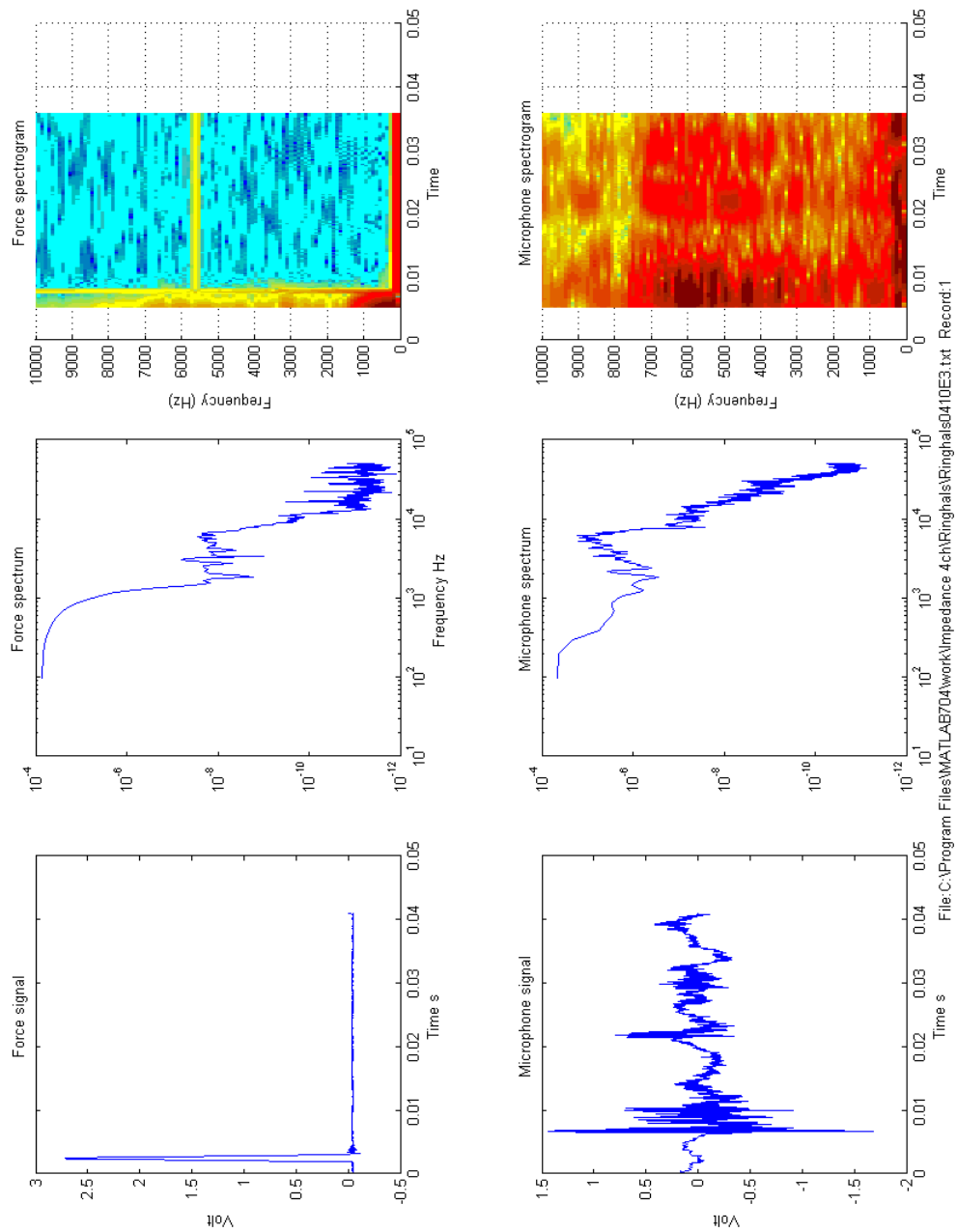
Figur 2.14. Kraft, hastighet och ljudsignal i punkt 14



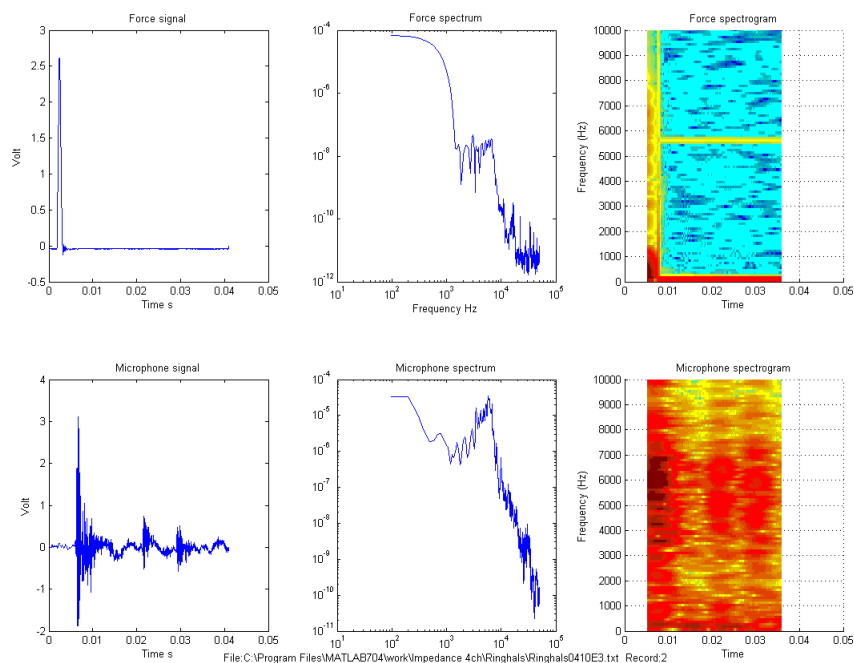
Figur 2.15. Kraft, hastighet och ljudsignal i punkt 15

FÖRSÖK 3: PCB hammare och fast mikrofon

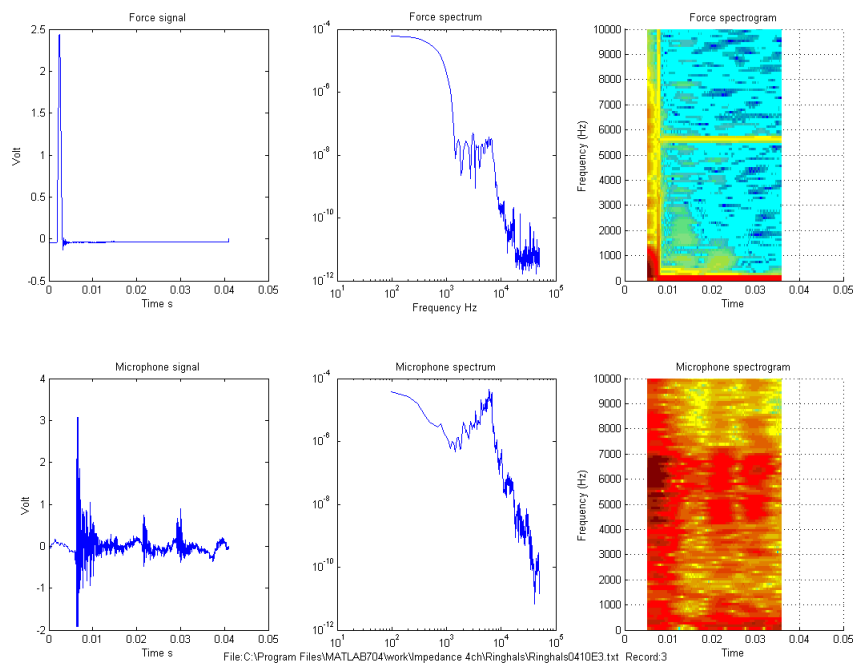
Mätplats:	Ringhals rum 0410 , östra väggen. Vertikal linje med 15 punkter på 0.1 m avstånd. Mätning startar 1.5 m ovan golv (Punkt 1) och slutar 0.1 m ovan golv (Punkt 15). Delaminering från punkt 8 till 13.
Energikälla:	PCB XXX, stor "modally tuned" hammare med kraftgivare inbyggd
Mätmetod:	Kraft och ljudsignal
Givare:	Kraftgivare i hammaren och mikrofon på mätbordet 1.5 m från väggen
Triggning:	Sker på signalen från kraftgivaren (tröskelvärde)
Presenteras:	Kraft och ljudsignal
Presentation:	Signal (tid), Spektrum (frekvens) och spektrogram (frekvens – tid). Den första bilden i sekvensen är vriden och förstorad i syfte att göra rubrikerna tydligt läsbara, resterande figurer har mindre skala i syfte att spara plats.



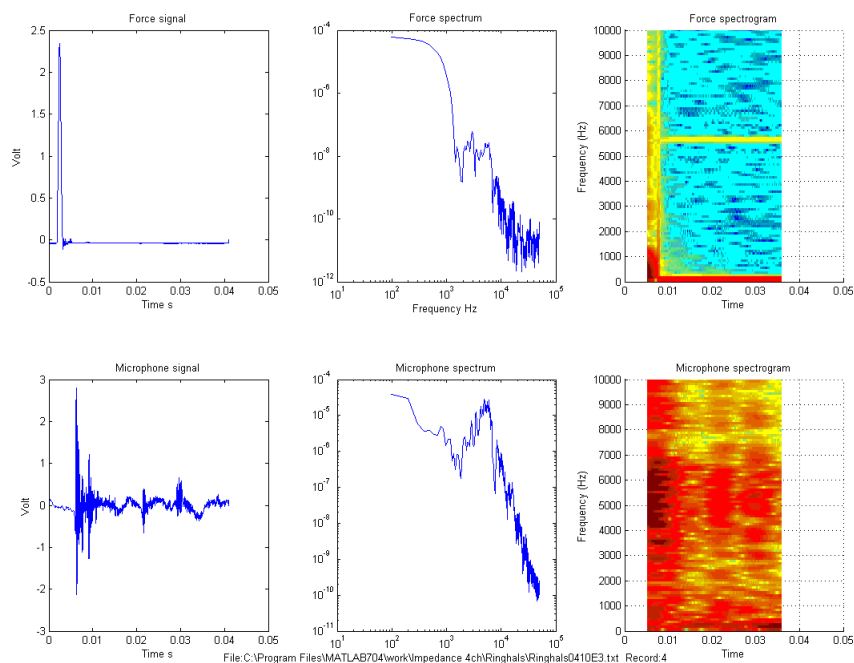
Figur 3.1. Kraft och ljudsignal i punkt 1



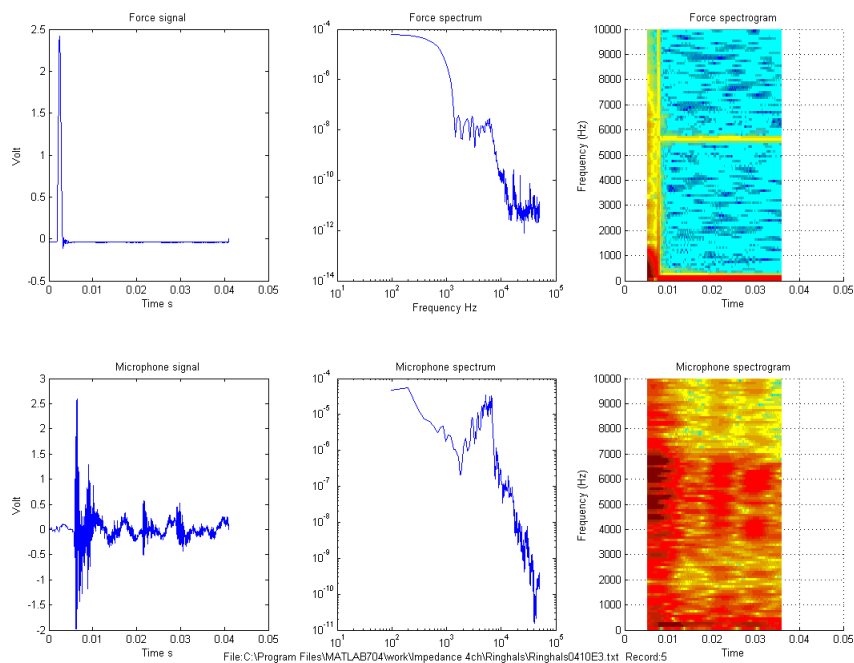
Figur 3.2. Kraft och ljudsignal i punkt 2



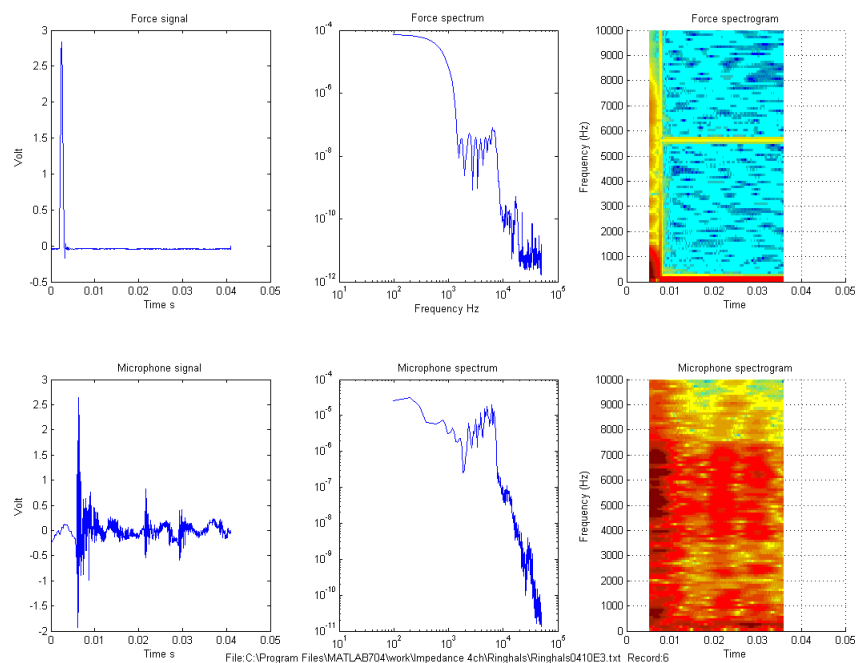
Figur 3.3. Kraft och ljudsignal i punkt 3



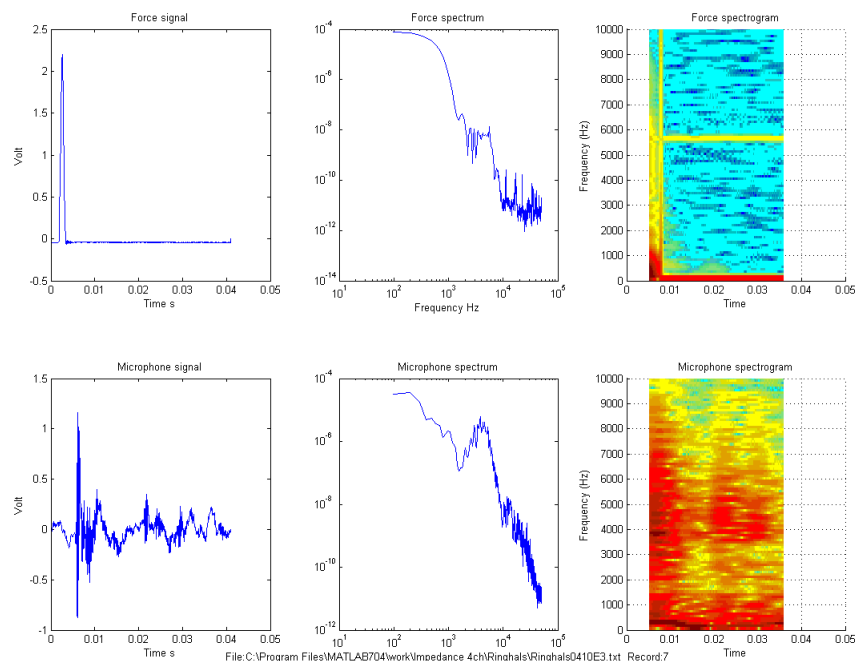
Figur 3.4. Kraft och ljudsignal i punkt 4



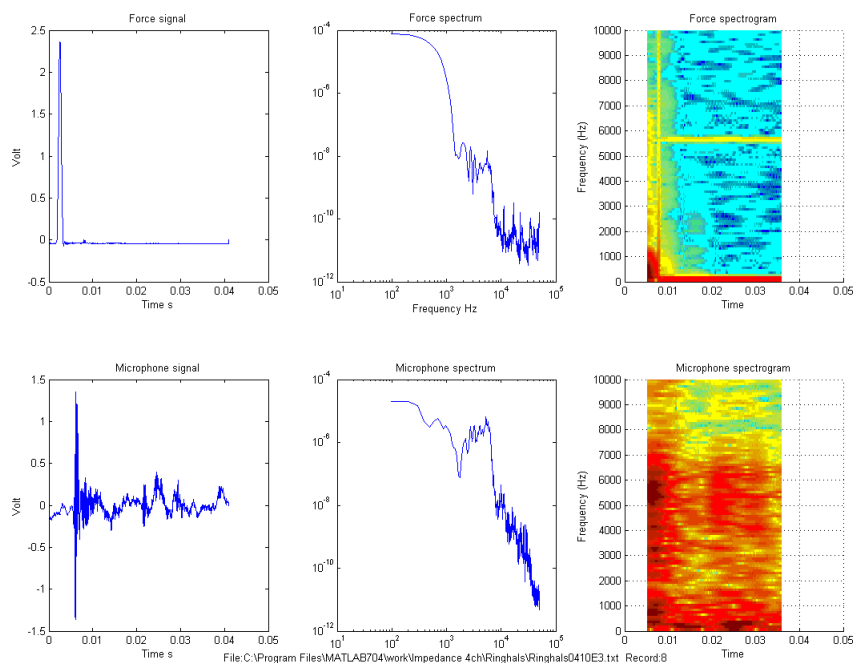
Figur 3.5. Kraft och ljudsignal i punkt 5



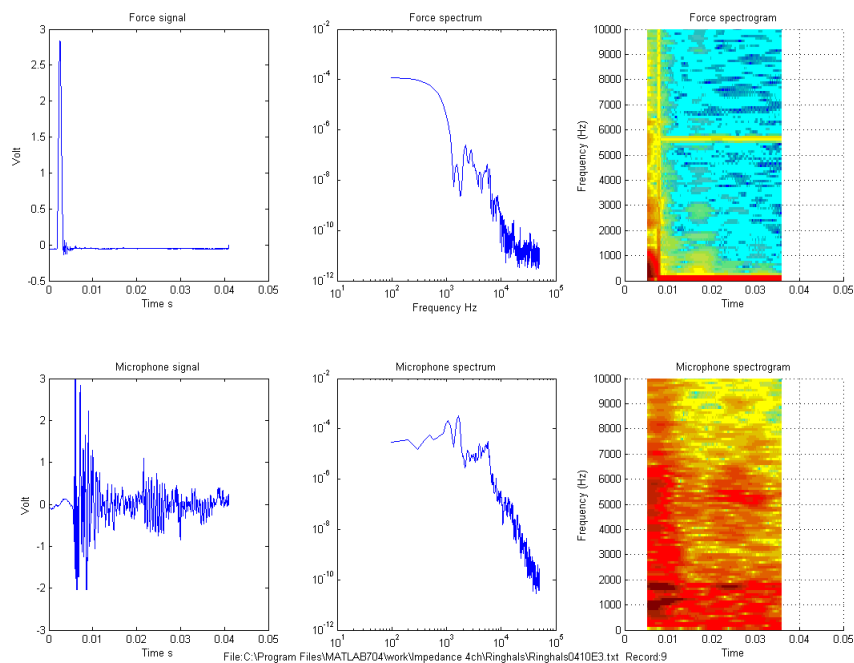
Figur 3.6. Kraft och ljudsignal i punkt 6



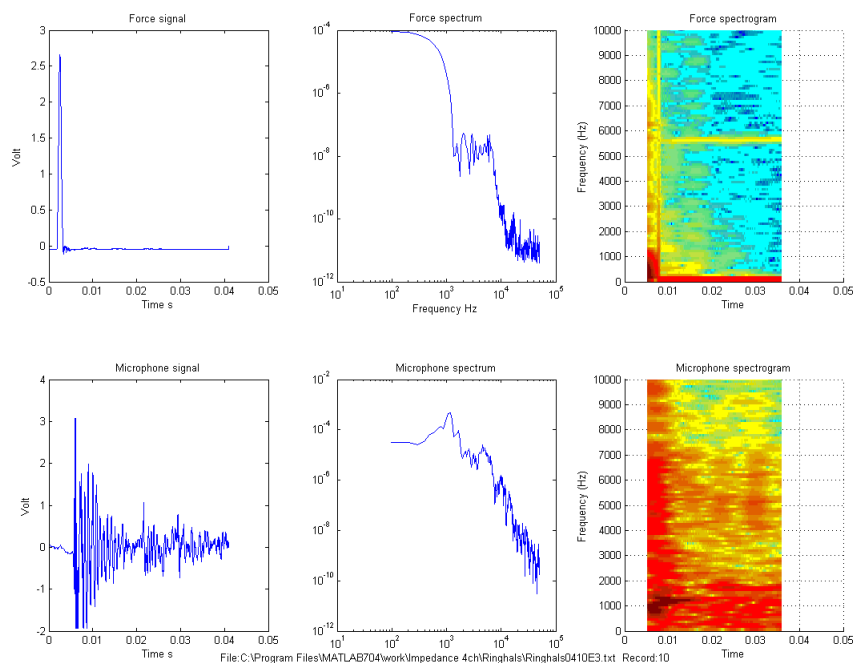
Figur 3.7. Kraft och ljudsignal i punkt 7



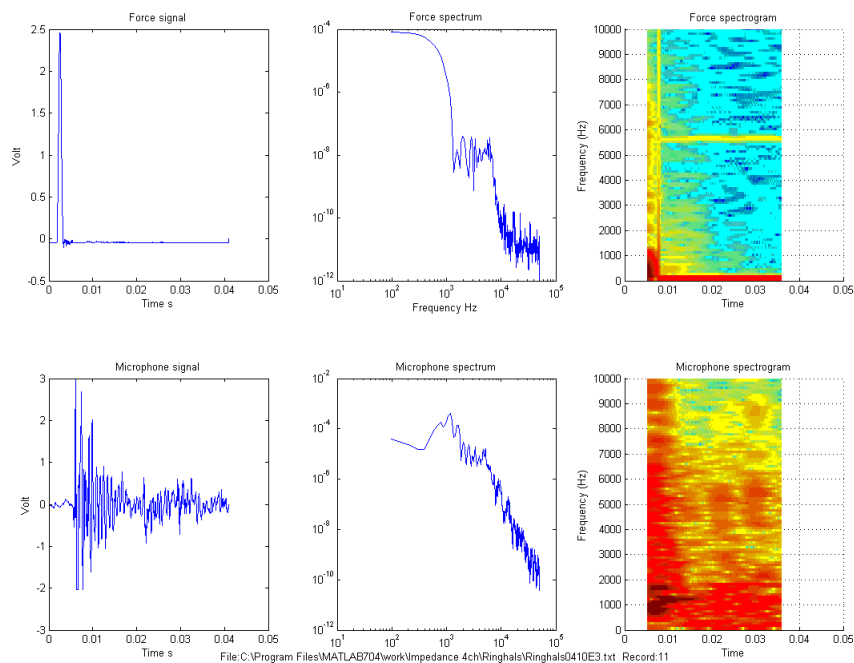
Figur 3.8. Kraft och ljudsignal i punkt 8



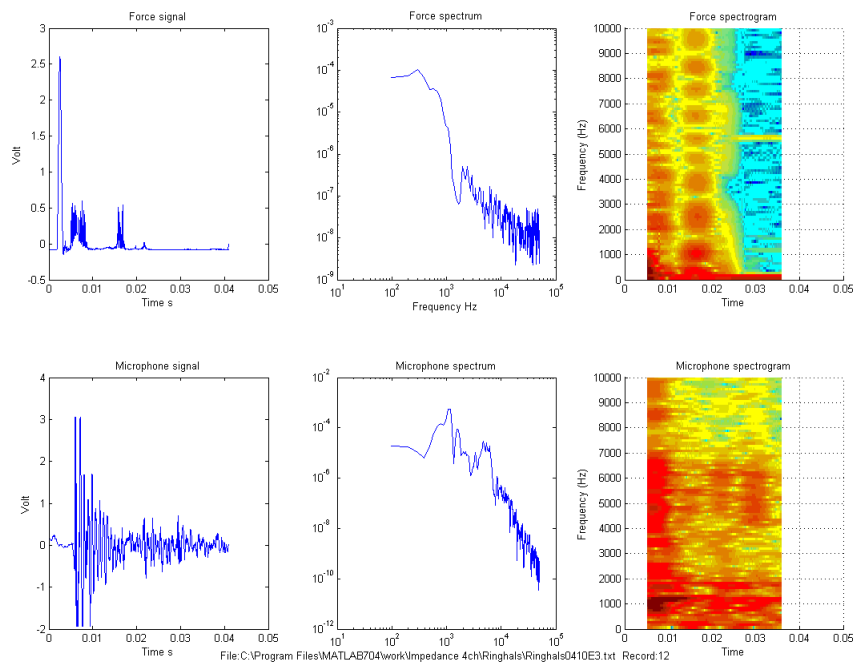
Figur 3.9. Kraft och ljudsignal i punkt 9



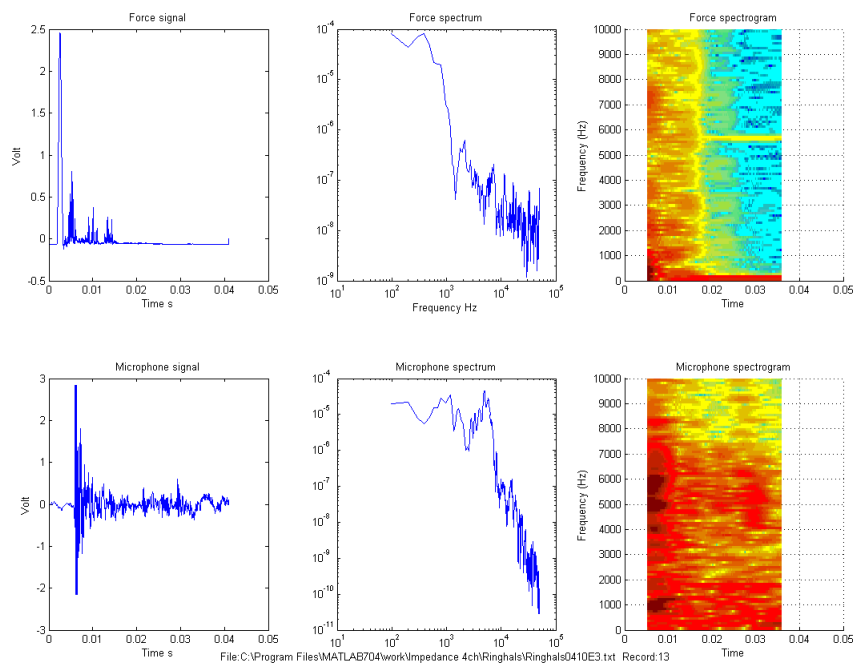
Figur 3.10. Kraft och ljudsignal i punkt 10



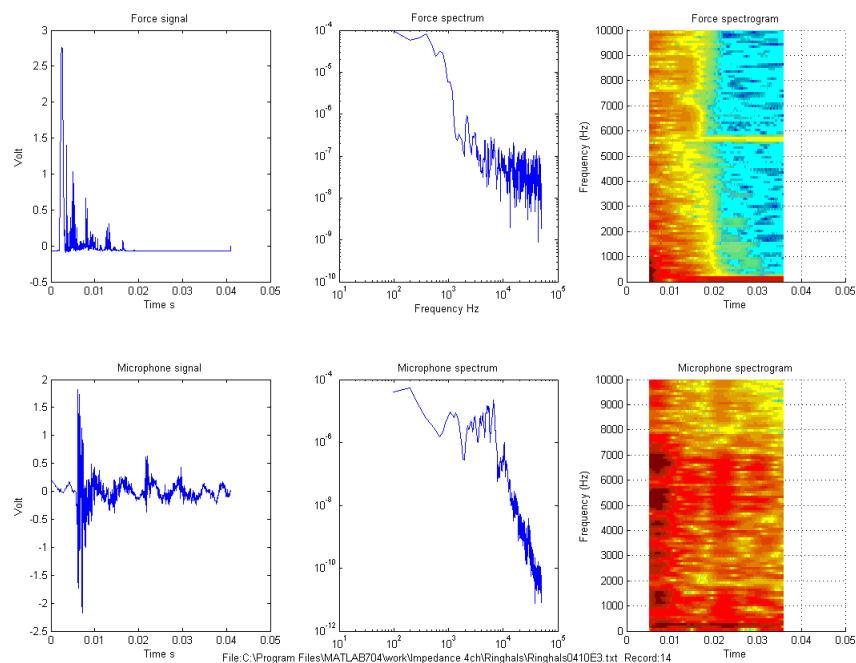
Figur 3.11. Kraft och ljudsignal i punkt 11



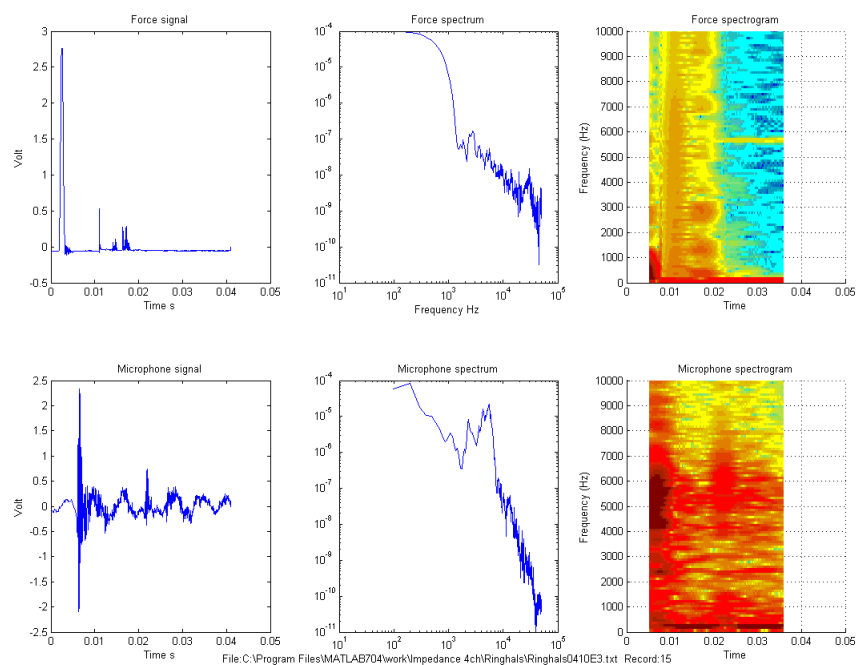
Figur 3.12. Kraft och ljudsignal i punkt 12



Figur 3.13. Kraft och ljudsignal i punkt 13



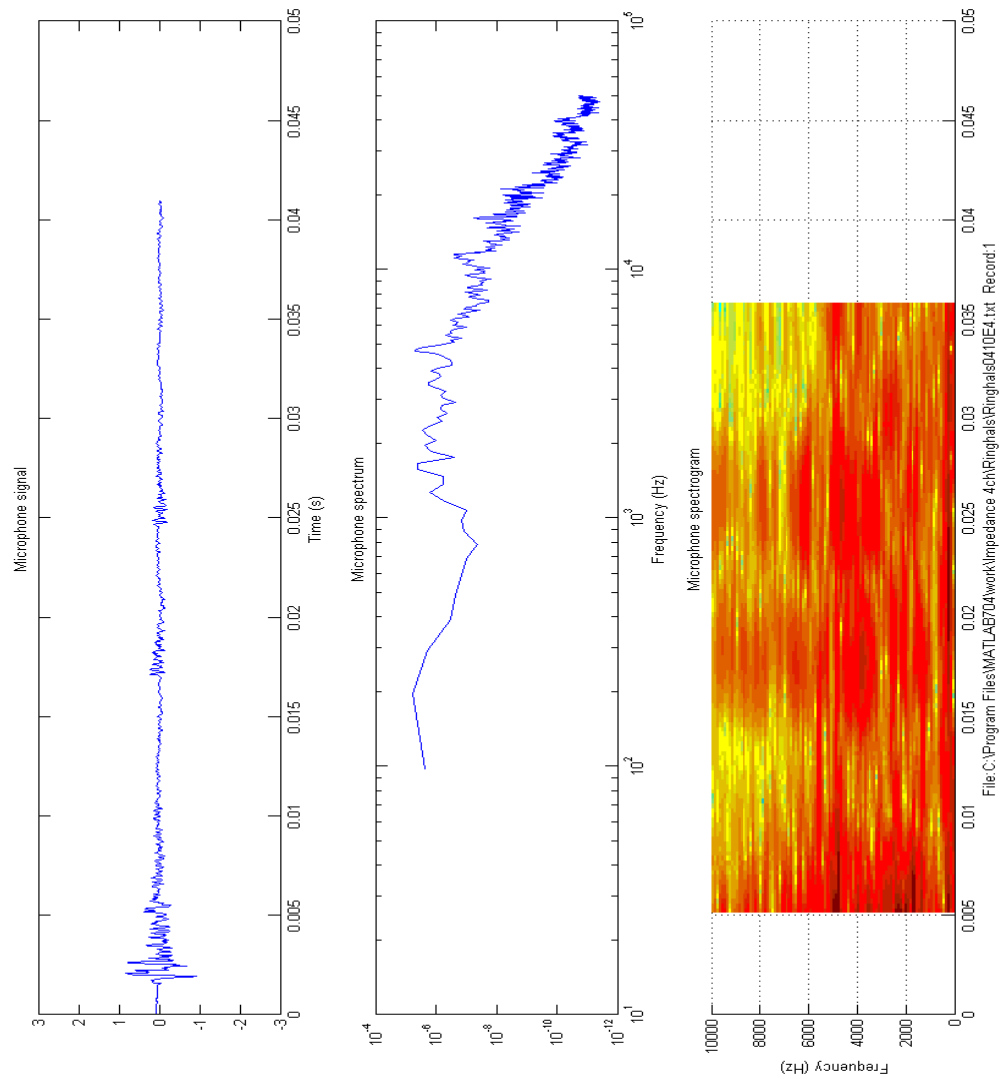
Figur 3.14. Kraft och ljudsignal i punkt 14



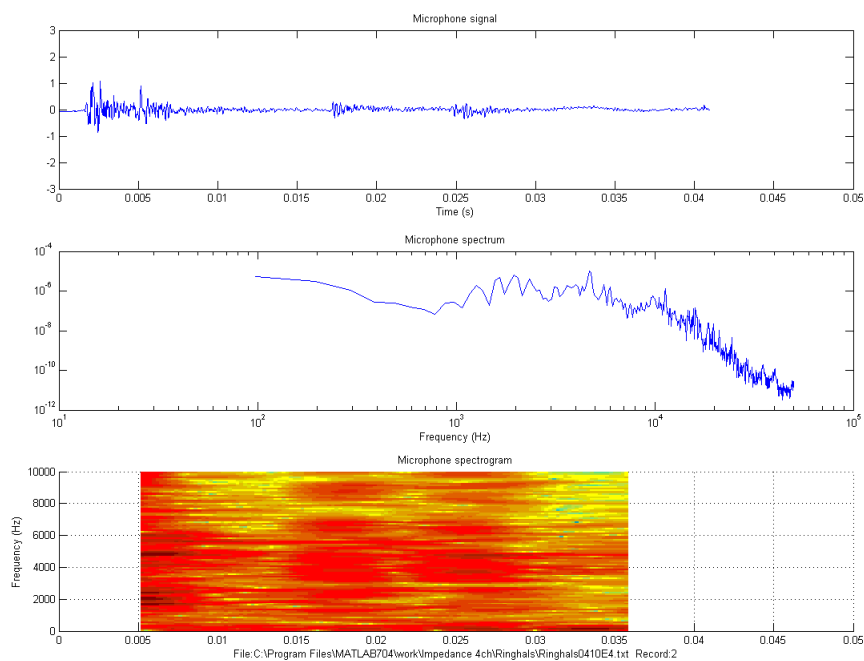
Figur 3.15. Kraft och ljudsignal i punkt 15

FÖRSÖK 4: Snickarhammare och fast mikrofon

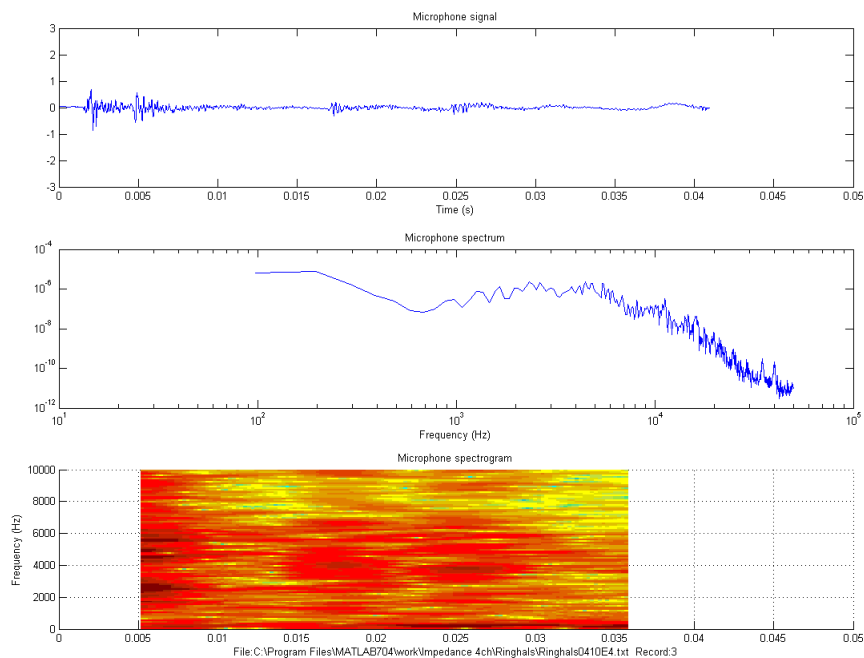
Mätplats:	Ringhals rum 0410 , östra väggen. Vertikal linje med 15 punkter på 0.1 m avstånd. Mätning startar 1.5 m ovan golv (Punkt 1) och slutar 0.1 m ovan golv (Punkt 15). Delaminering från punkt 8 till 13.
Energikälla:	Oinstrumenterad snickarhammare
Mätmetod:	Endast ljudsignal
Givare:	Mikrofon på mätbordet 1.5 m från väggen
Triggning:	Sker på signalen från mikrofonen (tröskelvärde)
Presenteras:	Ljudsignal
Presentation:	Signal (tid), Spektrum (frekvens) och spektrogram (frekvens – tid). Den första bilden i sekvensen är vriden och förstorad i syfte att göra rubrikerna tydligt läsbara, resterande figurer har mindre skala i syfte att spara plats.



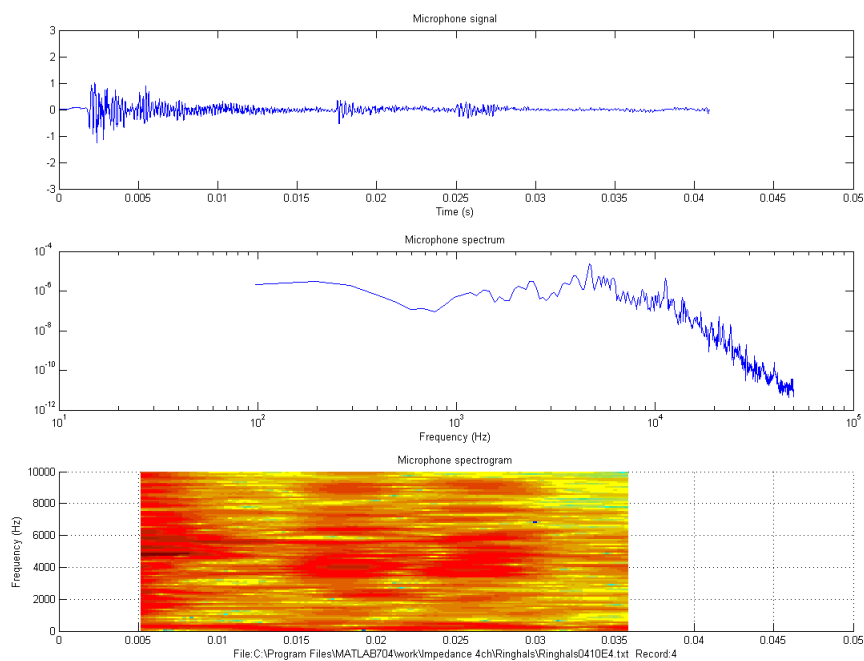
Figur 4.1. Ljudsignal i punkt 1



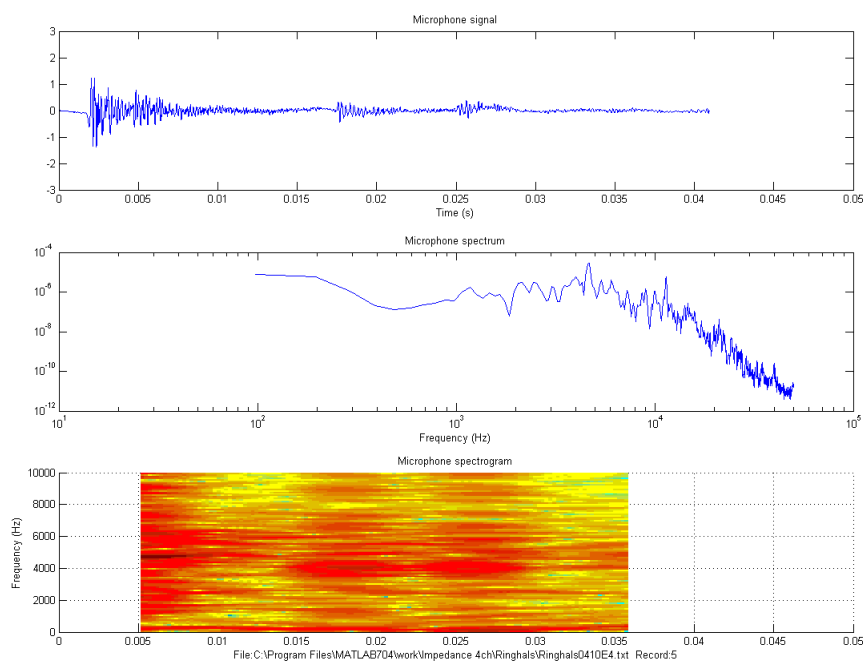
Figur 4.2. Ljudsignal i punkt 2



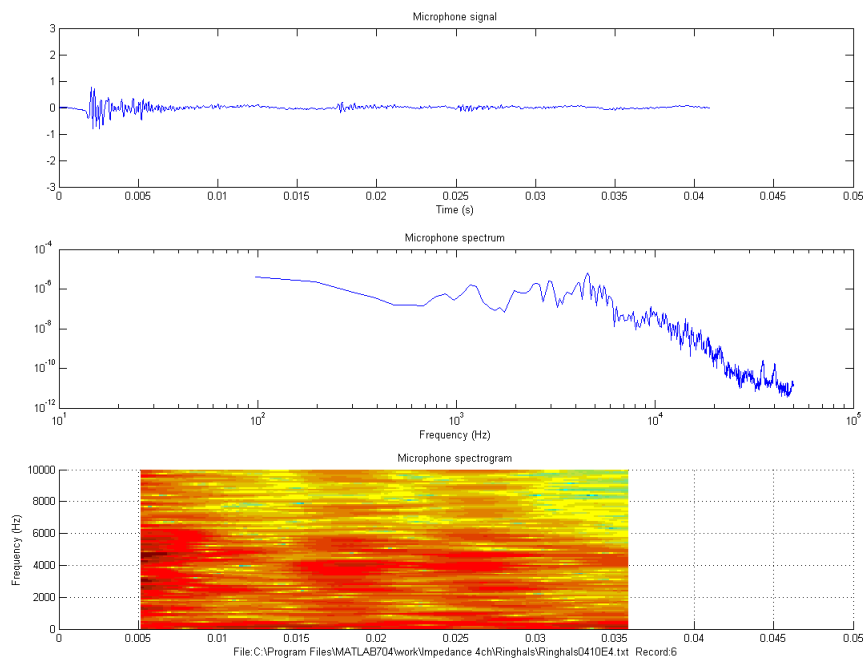
Figur 4.3. Ljudsignal i punkt 3



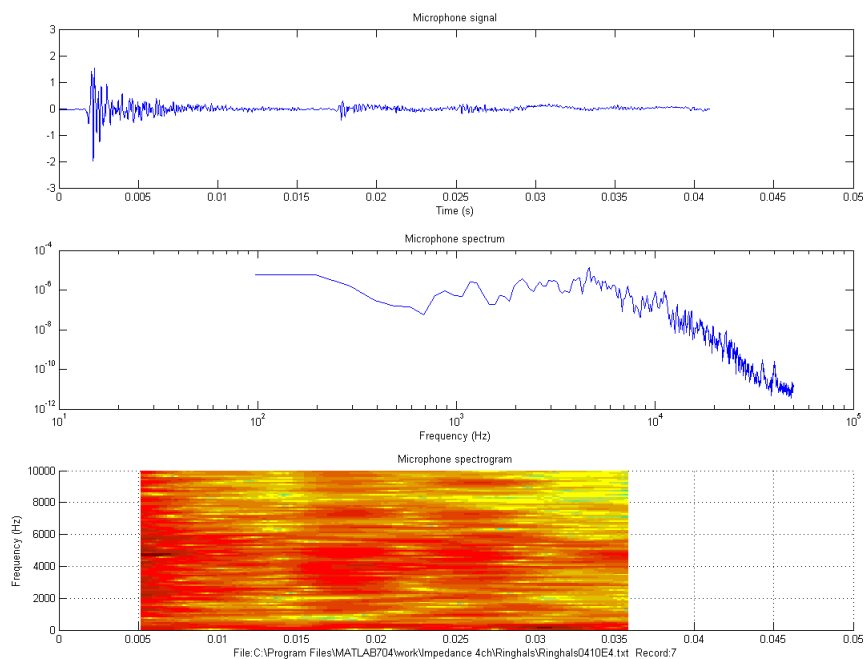
Figur 4.4. Ljudsignal i punkt 4



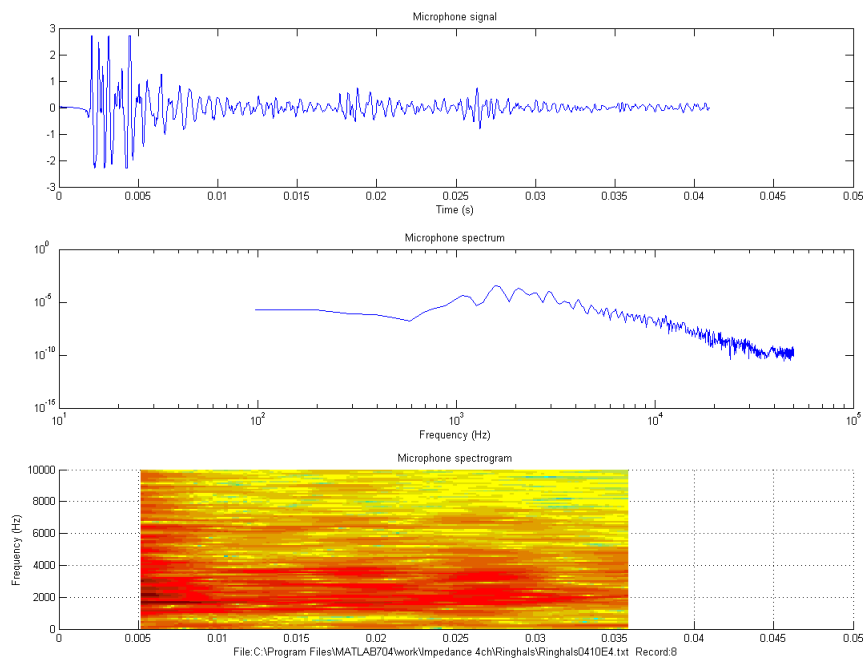
Figur 4.5. Ljudsignal i punkt 5



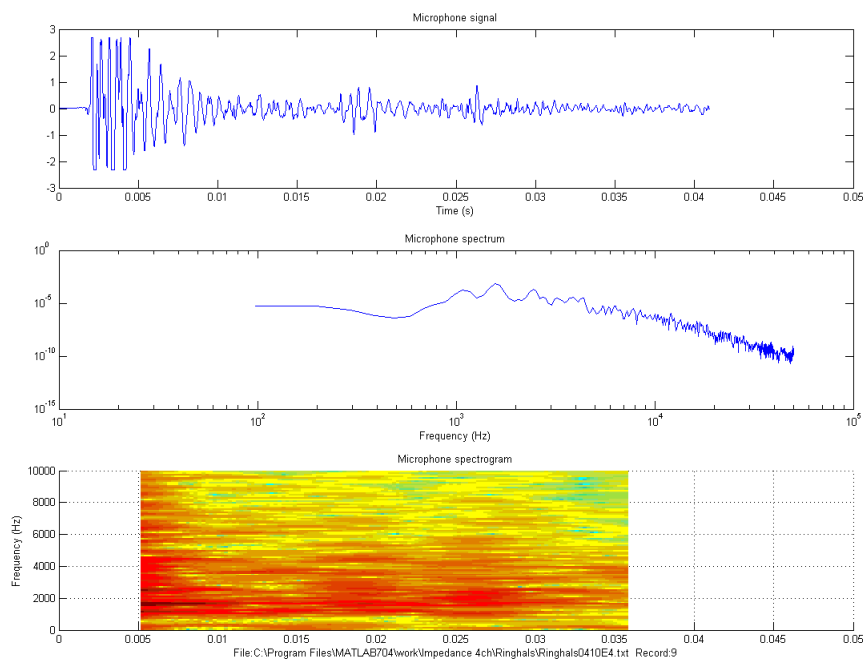
Figur 4.6. Ljudsignal i punkt 6



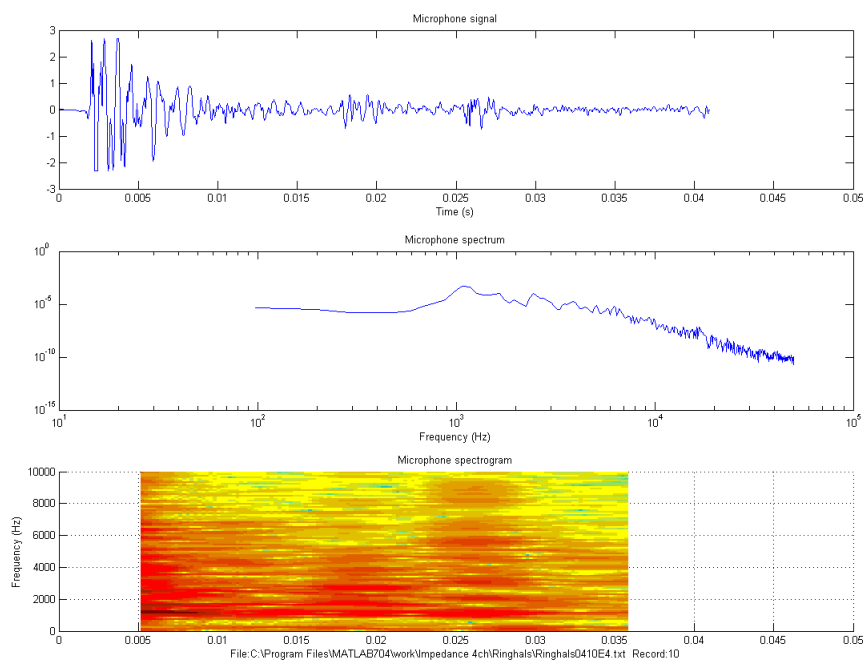
Figur 4.7. Ljudsignal i punkt 7



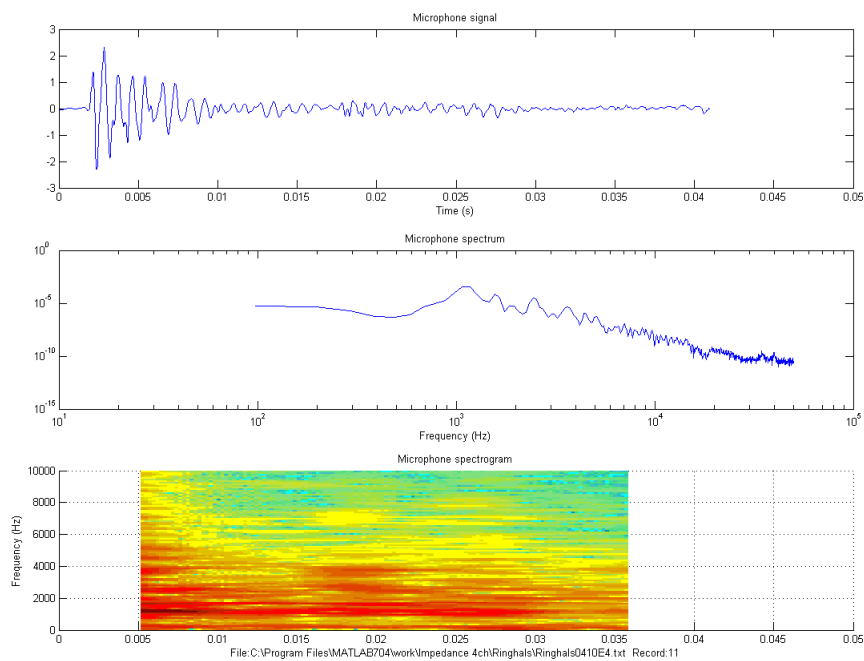
Figur 4.8. Ljudsignal i punkt 8



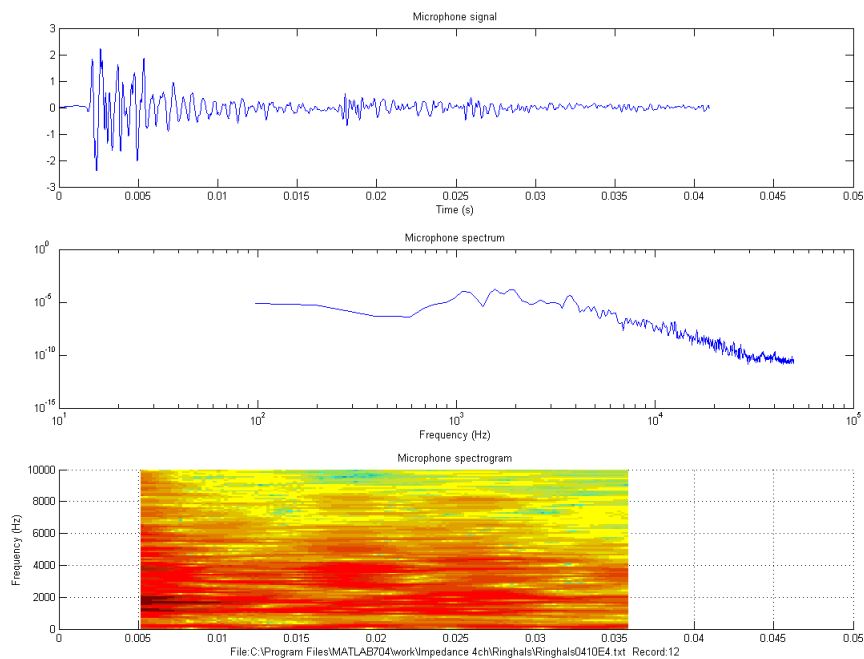
Figur 4.9. Ljudsignal i punkt 9



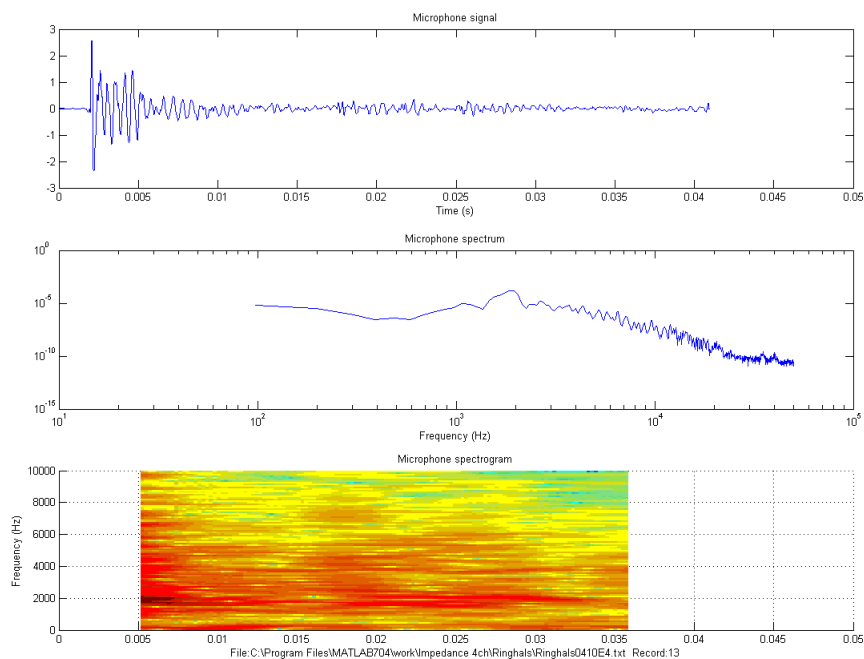
Figur 4.10. Ljudsignal i punkt 10



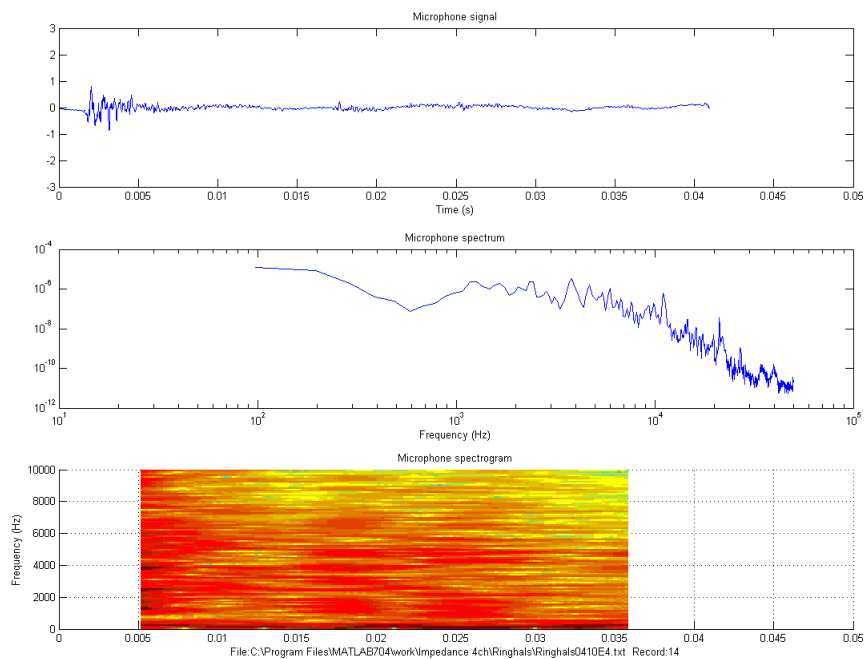
Figur 4.11. Ljudsignal i punkt 11



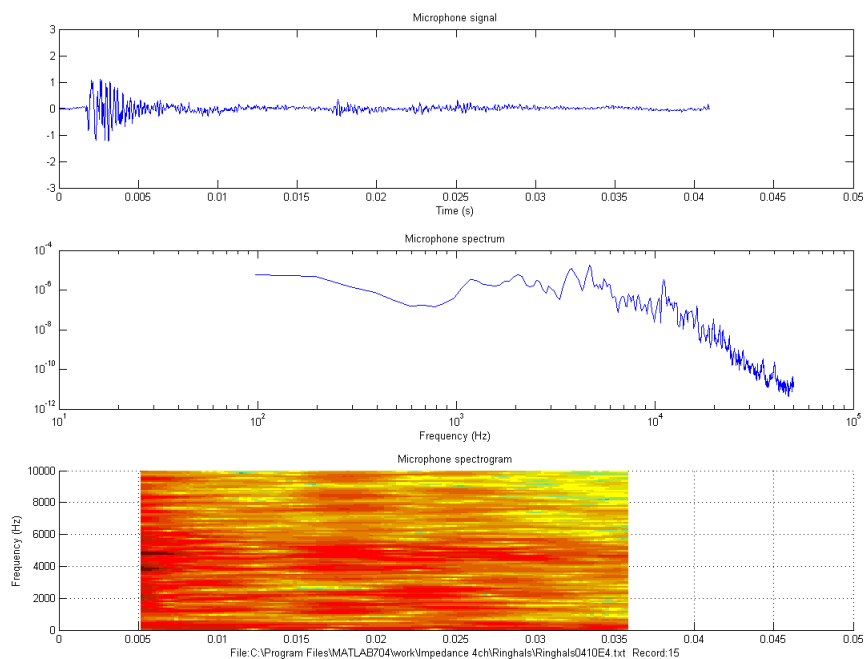
Figur 4.12. Ljudsignal i punkt 12



Figur 4.13. Ljudsignal i punkt 13



Figur 4.14. Ljudsignal i punkt 14



Figur 4.15. Ljudsignal i punkt 15

ELFORSK

SVENSKA ELFÖRETAGENS FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGS - ELFORSK - AB

Elforsk AB, 101 53 Stockholm. Besöksadress: Olof Palmes Gata 31
Telefon: 08-677 25 30, Telefax: 08-677 25 35
www.elforsk.se