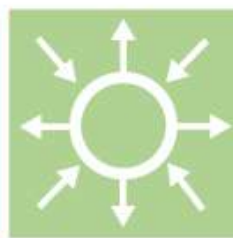




Impulsresponsmätningars beroende av sprickdjup

Delaminering

Elforsk rapport 11:11



Peter Ulriksen

Februari 2011

ELFORSK

Impulsresponsmätningars beroende av sprickdjup

Delaminering

Elforsk rapport 11:11

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, " Impulsresponsmätningars beroende av sprickdjup (Elforsk-projekt BET 012)" genomförts. Projektet syftar till att kontrollera hur djupt en delaminering i betong kan vara belägen och ändå upptäckas med den sk. impuls-respons-metoden. Applicerbara och rättvisande oförstörande provningsmetoder (OFP) blir ett mycket viktigt framtida verktyg för att kunna bedöma statusen på de stora betongkonstruktioner som finns inom kärnkraftverken. I en inledande studie (Elforsk-rapport 10:85) undersöktes vilka metoder som kan vara lämpliga för att lokalisera delaminering i framförallt kylvattenkanaler i 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, Philip Persson och Marcus Edin Vattenfall Forsmark, Daniel Eklund 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 februari 2011

Lars Wrangensten

Elforsk AB

Programområde Kärnkraft.

Sammanfattning

Projektet syftar till att undersöka impulsresponsmetodens förmåga att detektera delaminering vid olika djup i betong. Denna metod har särskilt intresse eftersom den i vissa realiseringar starkt påminner om den etablerade metoden bomknackning. Den personal som kommer att utföra framtida mätningar bör känna förtroende för och bekantskap med de metoder som används, och då är det en fördel om nyintroducerade metoder kan anknyta till äldre accepterade metoder. Projektet omfattar tre olika moment:

Det första momentet utförs med en vibrator, som via ett sk impedanshuvud är kopplat till försöksytorna vilka innehåller delaminering på olika djup. Därigenom erhålles en fullständig belysning av betongens beteende för olika delamineringsdjup över vibrators och impedanshuvudets funktionsspektrum. Eftersom vibratoren och impedanshuvudet måste limmas mot betongytan är denna metod endast av laborativt intresse, men den ger besked om vilka frekvenser man skall vara särskilt observant vid i de fortsatta mätningarna. Av försöket med vibrator kan man dra slutsatsen att man via en tydlig resonansfrekvens kan lokalisera delaminering ner till ett djup av 80 – 100 mm. Resonansfrekvensen innehåller information om delamineringsdjupet. Denna information är emellertid svår att utnyttja då vi inte känner delaminerings utsträckning, vilken också påverkar resonansfrekvensen. För det fall man gör en undersökning med litet avstånd mellan mätpunkterna jämfört med delaminerings utsträckning erhålles information om utsträckningen och då kan man teoretiskt beräkna delamineringsdjupet med ledning av resonansfrekvensen.

Det andra momentet avser slag med instrumenterad hammare mot de olika delamineringsdjupen. Hammaren är utrustad med en kraftgivare som gör att man kan mäta kraften i slaget. När man slår en hammare mot en betongyta alstras ett bestämt frekvensspektrum som beror av hammarens vikt och betongens elasticitet. Det fungerar som ett enkelt massa-fjäder system. En tung hammare ger upphov till lägre frekvenser än en lätt hammare. Försök utfördes med tre olika hammare. Betongytans vibrationer registrerades dels med en accelerometer pressad med handkraft mot betongytan, dels med en mikrofon placerad intill slagpunkten. Vi ser tydligt att en liten hammare är mest lämpad för att excitera resonanstoppar och att registreringen kan ske med samma goda resultat för accelerometer- och mikrofonsignal upp till ett delamineringsdjup uppgående till 120 mm. Detta är något större än det delamineringsdjup som kunde detekteras med vibrator och impedanshuvud, vilket kanske kan tillskrivas att det är mer energi i hammarslaget. För den mellanstora hammaren är mikrofonsignalen mer lämpad för detektion än accelerometer-signalen. Den stora hammaren är inte lämpad för bestämning av delamineringsförekomst med ledning av tydliga resonanstoppar. Möjligheten att använda mikrofon för analysen öppnar för att ha en i rummet fast monterad mikrofon som samlar upp ljud från alla slag mot betongytan. Detta underlättar mätningen, i synnerhet om man inte bryr sig om att mäta kraften i hammarslaget utan endast registrerar resonanstopparna. Det finns behov av att man använder en s.k. "modally tuned" hammare, så att man undviker att hammaren studsar flera gånger mot betongen vid varje slag.

Det tredje momentet avser slag med stor hammare mot två olika prototyper till impedanshuvud vilka dels mäter kraft och hastighet, dels mäter kraft och acceleration. Det tredje momentet omfattar tre delar a-c:

a) Den första delen visade att de små hårdmetallstiften som monterats för att få bättre grepp i betongen försämrar resultatet vid användning av det impedanshuvud som innehåller sensorer för kraft och hastighet (F/v). De har därför inte använts i efterföljande försök.

b) I andra delen visade försöken att det impedanshuvud som baseras på kraft och hastighet ger resultat som bättre kopplar mot storheter som delamineringens djup och dess spännvidd än det impedanshuvud som baseras på kraft och acceleration. De visade också att de två parametrar som mäts i tidsdomänen, nämligen den impedans som beräknas med hjälp av $F_{\max}/v_{\max}$ samt betongytans fjäderkonstant F/d kopplar väl till delamineringens egenskaper när ett F/v -impedanshuvud används, däremot inte när ett F/a impedanshuvud används. Försöken visar att fjäderkonstanten skall mätas under betongytans återfjädrande fas.

c) Den tredje delen visade att det går att använda det konstruerade impedanshuvudet F/v för mätningar i frekvensdomän. Dock erhöles inte samma dominerande frekvens som erhöles med vibrator eller slag med liten eller mellanstor hammare. Möjligen kan det förklaras av att den stora hammaren, på grund av sin begränsade förmåga att alstra höga frekvenser, inte förmår excitera den resonansfrekvens som uppmätts tidigare. Då kan en lägre frekvens framstå som dominerande i spektrumet.

Ett kommande fjärde moment planeras omfatta mätning med en accelerometer monterad på en liten tryckluftscylinder. Tanken är då att anslaget alstrar en svängningsrörelse i betongen och att man under den tiden accelerometern hålls tryckt mot betongytan hinner registrera det frekvensspektrum som uppstår vis slaget mot betongytan.

Från de genomförda laborieförsöken kan man konstatera att stor hammare och impedanshuvud F/V är lämpligast för mätningar i tidsdomän, medan mindre instrumenterad hammare och accelerometer eller mikrofon är lämpligast för mätningar i frekvensdomän. I frekvensdomänen har delaminering konstaterats ner till djupet 120 mm medan i tidsdomänen djup ner till minst 180 mm, det största undersökta djupet, verkar vara detekterbara.

Om både membranresonansfrekvensen och stående vågresonansfrekvensen kan bestämmas är det teoretiskt möjligt att bestämma både delamineringens djup och dess spännvidd under förutsättning att betongens elasticitetsmodul och tvärkontraktionstal kunnat bestämmas med en annan metod t. ex. ytvågsmetoden MASW. Kommande fältförsök får avgöra vilken domän som innehåller den säkraste diskrimineringsstorheten i verkliga konstruktioner.

Klart är att den lättaste parametern att bestämma experimentellt och beräkningsmässigt är $F_{\max}/v_{\max}$ – impedansen. Det vid bomknackning upplevda ljudet är lågfrekvent och alstras inte av de uppmätta resonansfrekvenserna utan snarare av den initiala oscillationen av betongytan efter slaget, vilket är den rörelse som skapar $F_{\max}/v_{\max}$.

Summary

The purpose of the project is to investigate the impulse-response method's ability to detect delamination at different depths. This method is of particular interest, since some of its realizations strongly resembles established methods like "bomknackning". Since the personnel that will be responsible for future measurements with new technology, should feel confidence in new methods, it is an advantage if the new methods connect to older, accepted methods. The project consists of three parts and a fourth planned.

The first part of the investigation is made with a vibrator connected to an impedance head which in turn is connected to the surface of the concrete test specimen with internal delaminations at different depths. The vibrator is controlled by a dynamic signal analyzer, which also measures the force- and acceleration signals from the impedance head and convert them to impedance. Since the impedance head must be glued to the surface of the concrete this method is only of laboratory interest. This method gives a complete description of the behaviour of the concrete for the frequencies investigated. Thus in following investigations the frequencies of interest are known. From the experiment it follows that delamination down to a depth of 80-100 mm can be detected through a clear and solitary resonance peak. This resonance frequency is a function of concrete slab thickness and extension, so if the extension can be measured it may be possible to calculate depth.

The second part of the investigation is about using an instrumented hammer to hit the different delamination specimens. The hammer is equipped with a force transducer giving an opportunity to measure the force exerted by the strike against the concrete surface. When a hammer is struck against a concrete surface a spectrum of vibrations is created, dependent on the weight of the hammer and the elasticity of the concrete. A light hammer generates higher frequencies than a heavy one. Three different hammer sizes were used. The vibrations of the concrete surface was measured with an accelerometer pushed manually to the surface and also by an adjacent microphone. The results indicate clearly that the small hammer generates a spectrum better suited to the present resonance frequencies and that both the accelerometer- and microphone signals can be used to detect delamination down to a depth of 120 mm. This is somewhat deeper than what was possible with the vibrator and impedance head, which may be attributed to higher energy in the hammer blows. The large hammer was not suited for the present resonance frequencies. The possibility of using a microphone as a vibration sensor opens for a remote application, when the microphone is fixed in the room and only a modally tuned hammer is used for striking the concrete.

The third part of the project is using the big hammer to strike two types of handheld impedance heads. One measures force and velocity F/v the other measures force and acceleration F/a . There are three experiments in the third part a-c.

a) The first experiment showed that the small hard-metal points used to improve contact with the concrete contributed undesired oscillations in the F/v impedance head. For this reason these points have not been used in further experiments.

b) The second experiment showed that the F/v impedance head produce results that better couple to the properties like delamination depth and width than does the F/a impedance head. It also showed that the two parameters measured in the time domain: F_{max}/v_{max} -impedance and concrete spring constant F/d are good indicators of these delamination properties. The experiment demonstrated that it is best to measure the spring constant in the rebound movement of the concrete surface.

c) The third experiment demonstrated that it is possible to use the F/v-impedance head for measurements in the frequency domain. However the dominating frequency was lower than that obtained with the vibrator and with the small hammers. It could possibly be explained by the low frequency content of the big hammer blows. If these do not contain the resonance frequencies previously obtained some other frequency will dominate the spectrum.

A future fourth part is planned to use an accelerometer attached to a pneumatic cylinder. The idea is that the impact generates an oscillation in the concrete and that during the short period the accelerometer is forced against the concrete, it is possible to record the generated spectrum of the oscillation.

From the laboratory experiments one can draw the conclusion that the big hammer and the F/v impedance head is best suited for measurements in the time domain, while the smaller hammers are best suited for measurements in the frequency domain. In the frequency domain delamination has been detected down to a depth of 120 mm, while in the time domain delamination has been detected down to 180 mm, the largest investigated delamination depth.

If both the membrane and standing wave resonance can be determined it is theoretically possible to calculate both the depth and the width of a delamination provided that the concrete Youngs modulus and Poissons ratio have been determined by other methods like e.g. MASW. Future field tests in real constructions will reveal which method provides the best discrimination between good and defect concrete.

It is clear that the simplest parameter to determine experimentally and mathematically is the F_{max}/v_{max} -impedance. The typical sound experienced when delaminated concrete is hit by a hammer is of a low frequency and is not related to the measured resonance frequencies. Rather it is generated during the first oscillation by the concrete surface as it is hit by the hammer. It is during this oscillation that the F_{max}/v_{max} -impedance is measured.

Innehåll

Kapitel 1	Bakgrund	1
Kapitel 2	Litteraturstudie	3
Kapitel 3	Tillvägagångssätt	11
Kapitel 4	Försök med vibrator	13
Kapitel 5	Försök med hammarslag	19
Kapitel 6	Försök med impedanshuvud	26
6.1.1	Inledande försök med impedanshuvud F/v	26
6.1.2	Resultat	27
6.2.1	Detektion av delamineringsdjup och –spännvidd	30
6.2.2	Resultat	31
6.3.1	Hammare och impedanshuvud F/v i frekvensdomän	36
6.3.2	Resultat	37
6.4	Slutsatser	38
Kapitel 7	Tryckluftcylinder	40
Kapitel 8	Slutsatser	42
Bilaga 1	Försök med vibrator	44
Bilaga 2	Försök med hammare, accelerometer och mikrofon	51
Bilaga 3	Tester med impedanshuvud	81
B3.1	Test med impedanshuvud F/v -delamineringsdjup	82
B3.2	Test med impedanshuvud F/v – delamineringsspännvid	95
B3.3	Test med impedanshuvud F/a – delamineringsdjup	108
B3.4	Test med impedanshuvud F/a – delamineringsspännvidd	118
B3.5	Test med impedanshuvud F/V – Olika hammartype	131

1 Bakgrund

Detta är det tredje projektet i en serie som avser att ge förslag till lämplig metodik för att bestämma betongkonstruktioners hållfasthetsegenskaper. Det första projektet innebar en genomgång av de senaste tio årens oförstörande provningsinsatser i kärnkraftens betongkonstruktioner och rekommendationer om vilka metoder som lämpar sig för vilket syfte. De metoder som bäst kopplar till betongens hållfasthet är de som baseras på mekanisk vågutbredning. Det andra projektet avsåg mer specifikt delaminering och förklaring till varför ett torrkopplat ultraljudinstrument med multipla sensorer baserat på skjuvvågor ger så goda resultat i betong. Provkroppar tillverkades med delaminering på djup från 40 till 180 mm och en scanner användes för att framställa tredimensionella bilder. Med ultraljud kunde delamineringar på samtliga djup avbildas såväl med skjuvvågor som med p-vågor. Således är det främst de multipla sensorerna som ger instrumentet dess goda egenskaper. Eftersom skjuvvåghastigheten endast är ungefär halva kompressionsvåghastigheten blir pulslängden kortare med skjuvvågor och därmed upplösningen bättre.

Föreliggande projekt syftar till att undersöka impulsresponsmetodens förmåga att detektera delaminering vid olika djup i betong. Denna metod har särskilt intresse eftersom den i vissa realiseringar starkt påminner om den sedan länge etablerade och av personalen accepterade metoden bomknackning. Eftersom den personal som kommer att utföra framtida mätningar bör känna förtroende för och bekantskap med de metoder som används, är det en fördel om nyintroducerade metoder kan anknyta till accepterad teknik.

Bomknackning går till så att man slår med en vanlig snickarhammare på betongytan och lyssnar på det ljud som uppstår. Vem som helst kan höra när tydlig delaminering föreligger respektive när betongen är av god kvalitet. Delaminering skapar ett ljud av klart lågfrekvent natur. Andra sätt att utföra bomknackning är att stöta ett kvastskäft mot betongytan eller att rassla med en tung kedja, det senare vanligt i USA där metoden går under beteckningen "chain dragging" och brukar utföras för kontroll av betongbroars farbanor.

Delamineringen uppstår ofta på samma nivå som ytarmeringen ligger och kan då orsakas av att inträngande vatten fått armeringen att korrodera. Korrosionsprodukterna sväller och då sprängs en skiva av betongen lös från underlaget.

Bomknackningen har emellertid den betydande nackdelen att endast kunna avgöra om delaminering föreligger eller inte och att den inte möjliggör någon dokumentation. Genom att använda sensorer i samband med bomknackningen kan utslaget graderas. Om man dessutom kan bestämma var slaget utfördes eller styra var det sker kan man kanske framställa en karta över delamineringens utbredning och djup.

Impact echo (IE) är en metod som är en sorts impulsresponsmätning. Man använder t ex små stålkulor som slås mot betongytan, vilket ger en puls med högre frekvensinnehåll än bomknackning ger. Med metoden antog man ursprungligen att det uppstår en stående våg, med halva våglängden lika med djupet till delamineringen. Emellertid har det visat sig att detta är ett förenk-

lat antagande, då man i själva verket exciterar en svängningsmod i hela det delaminerade skiktet. För att få den typ av renodlad reflektion man föreställer sig krävs mycket kortare våglängder än de relevanta materialtjocklekarna. För sådan reflektion erfordras ultraljudfrekvenser.

I sin ursprungliga form tog IE-metoden endast hänsyn till fenomen i frekvensdomän. Med beteckningen impulsrespons avser författaren att täcka in mätningar i såväl frekvens- som tidsdomän. Med IE-metoden mäter man i akustisk mening knappast några ekon utan snarare efterklang. Ett eko bör ju vara skilt från den utsända signalen för att uppfattas som just ett eko. Typexempel från vardagen är sonar och radar. Att sjunga i kyrkan ger upphov till efterklang medan att ropa mot en avlägsen bergvägg ger upphov till ett eko. Impulsresponsmätningar registrerar efterklangsförlopp medan ultraljudmätningar registrerar verkliga ekon. Förutsättningen för ett eko är att pulslängden är väsentligt kortare än materialets tjocklek. Impulsresponsmätningar utnyttjar våglängder som är i samma storleksordning som testobjektets dimensioner.

Slutligen är de frekvenser som registreras med IE-metoden belägna väsentligt högre i frekvens än det ljudfenomen som man kopplar till bomknackning, vilket är ett gott skäl att göra en bred undersökning av impulsresponsfenomenet.

2 Litteraturstudie

Delvis har tidigare sökresultat utnyttjats i nedanstående kortfattade redovisning, vilken är indelad i fem avsnitt omfattande Teori, Mätteknik, Analys, Referenslista och en kortfattad Bibliografi om metoden Impact-Echo (IE) eftersom den har en omfattande användning för detektering av delaminering.

Teori

Punktimpedans definieras som

$$Z = \frac{F}{v} \quad \text{Ekv 1}$$

där

F= kraft (N)

v= hastighet (m/s)

dess invers kallas mobilitet M

$$M = \frac{v}{F} \quad \text{Ekv 2}$$

Enligt (10) är mobilitet ett mått på hur lättexciterad en struktur är. Flera mobilitetsmått är relevanta

accelerans = acceleration / kraft Ekv 3

mobilitet = hastighet / kraft Ekv 4

eftergivlighet = rörelse / kraft Ekv 5

där den andra termen, impedansens invers, och den sista, invers arbetskurva är av särskilt intresse. Man stegar sig upp i listan genom att integrera rörelsedelen.

För en sinusoidal rörelse är enligt (11) acceleration, hastighet och rörelse förenade genom de komplexa relationerna

$$a = j\omega v = -\omega^2 d \quad \text{Ekv 6}$$

$$v = j\omega d = (1/j\omega)a \quad \text{Ekv 7}$$

$$d = (1/j\omega)v = (1/-\omega^2)a \quad \text{Ekv 8}$$

där $\omega = 2 \pi f$

Den andra relationen utnyttjas för att omvandla uppmätt acceleration till hastighet och därefter beräkna impedans eller mobilitet.

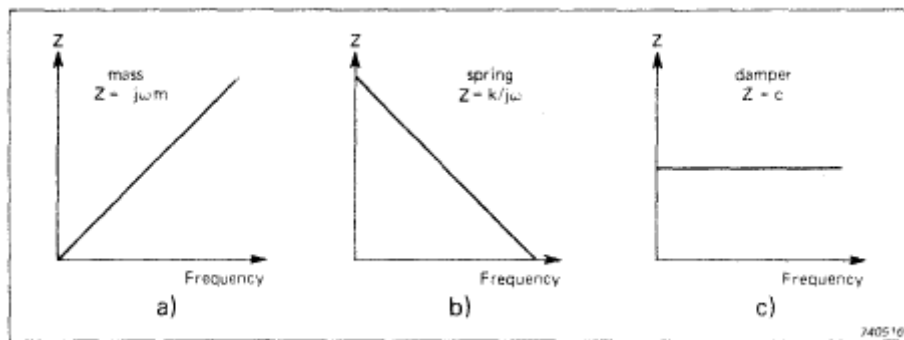
Den utövade kraften har tre komponenter relaterade till massa, styvhet och dämpning enligt relationerna

$$F = m \cdot a \quad \text{för massa } m \text{ och acceleration } a \quad \text{Ekv 9}$$

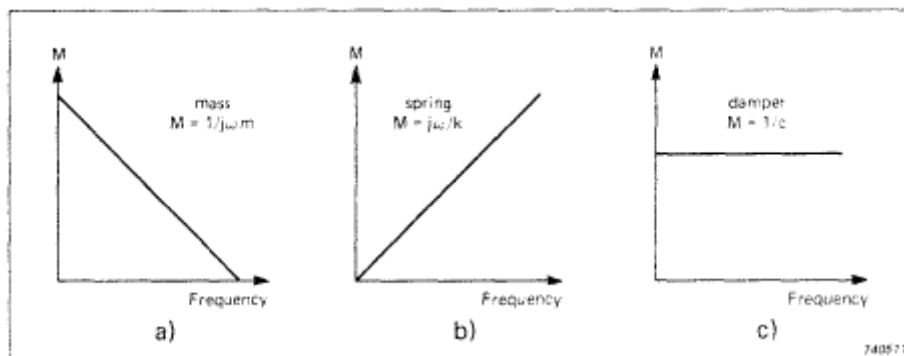
$$F = k \cdot d \quad \text{för styvhet } k \text{ och rörelse } d \quad \text{Ekv 10}$$

$$F = c \cdot v \quad \text{för dämpning } c \text{ och hastighet } v \quad \text{Ekv 11}$$

Om motsvarande tre impedanskomponenter plottas i ett log-log diagram med frekvens på horisontella axeln och impedans på den vertikala erhålls för massa en rak linje med positiv lutningskoefficient $j\omega m$, för styvheten en rak linje med negativ lutningskoefficient $k/j\omega$ och för dämpningen en horisontell linje på nivån c . För mobiliteten blir det motsatta tecken och inverterade lutningskoefficienter eller konstanter.



Figur 1. Impedansens tre beståndsdelar Bruel&Kjaer (11)

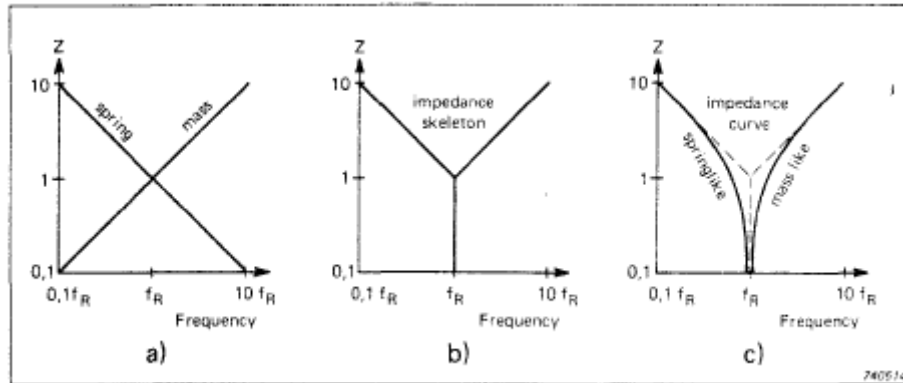


Figur 2. Motsvarande mobiliteter Bruel&Kjaer (11)

I ett verkligt, odämpat system kommer för låga frekvenser impedansen att styras av styvheten k och för högre frekvenser av massan m . Mellan dessa två delar kan finnas ett område där styvhet och massa samverkar, så att impedansen blir noll. I denna punkt uppstår en resonansfrekvens.

$$Z = Z_m + Z_k = j\omega m + k/j\omega = j(\omega m - k/\omega) \quad \text{Ekv 12}$$

När uttrycket inom parentesen till höger blir noll uppstår resonans, vilket illustreras i nedanstående figur.



Figur 3. Resonans uppstår när massa och fjäderkomponenter tar ut varandra
Brüel & Kjaer (11)

Från föregående uttryck framgår att vinkelhastigheten ω_0 vid resonans kan beräknas som

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (\text{rad/s}) \quad \text{Ekv 13}$$

$$\omega = 2 \pi f \quad \text{Ekv 14}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (\text{Hz}) \quad \text{Ekv 15}$$

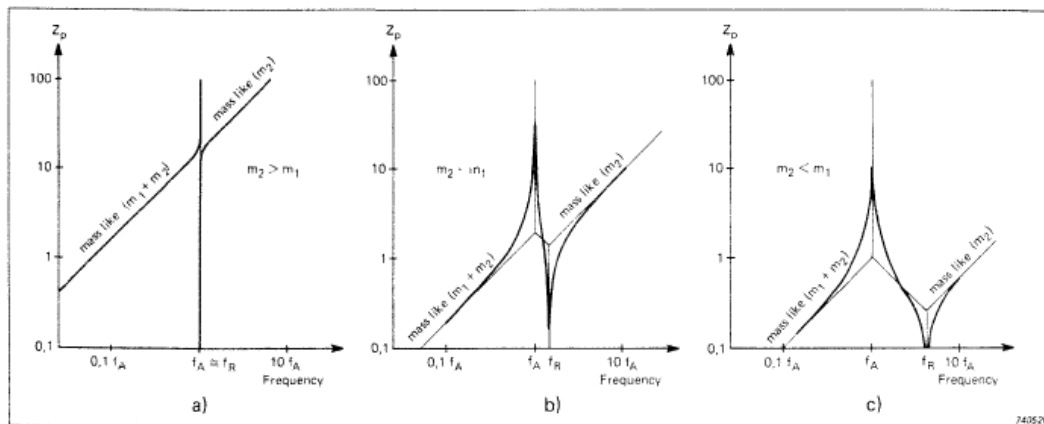
När vi monterar en vibrator med massa m_1 mot en kropp med massa m_2 erhålles två frihetsgrader och en situation med såväl resonans som antiresonans. Vid denna frekvens övergår punktimpedansen från att vara obegränsat masskontrollerad till att vara obegränsat styvhetskontrollerad. Detta sker under ett 180 graders fasskift

Antiresonans uppstår vid frekvensen f_a

$$f_a = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m_1}} \quad \text{Ekv 16}$$

och resonans vid frekvensen f_r

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k(m_1 + m_2)}{m_1 m_2}} \quad \text{Ekv 17}$$



Figur 4. Impedanskurvans utseende för tre olika kvoter för m_1/m_2 Bruel&Kjaer (11)

Punktimpedansen är en komplex, frekvensberoende storhet. Icke desto mindre förekommer det att man beräknar ett punktimpedansvärde som kvoten mellan maximal kraft och maximal hastighet (12)

$$Z = \frac{F_{\max}}{v_{\max}}$$

Ekv 18

Man bör inte kalla denna storhet för impedansmax, därför att Z kan vara större för ett mindre värde på nämnaren $v_{\max}$. Uttrycket kan ha ett värde när man utvärderar transienta mätningar, som t ex när man slår en kraftgivarförsedd hammare mot en yta vars rörelse registreras med en accelerometer eller geofon.

Första resonansmoden vid delaminering är enligt (2, 4) membranresonansen (skivan svänger som ett trumskinn). Detta bekräftas av (13) som också visar att det finns en stående våg i det delaminerade skiktet, mellan ytan och delamineringen. Impact-Echo-metoden IE har länge utgett sig för att mäta denna stående våg. IE har studerats noggrant (9) och redovisar att det inte är en egentlig stående våg man mäter med IE utan att det är första ordningens symmetriska ytvågmod (S1-mod) i en fritt upplagd platta, med grupp hastigheten noll i mätpunkten (15). Det senare betyder att energin inte fortplantar sig i horisontell riktning i plattan. Av detta skäl är det nödvändigt att införa en korrektionsfaktor β i uttrycket för resonansfrekvensen som uppmäts med IE-metoden.

Det är intressant att jämföra uttrycken för den första membranresonansen enligt (4)

$$f_0 = 0.47 \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho \cdot (1 - \nu^2)}} \cdot \frac{h}{d^2}$$

Ekv 19

E = Elasticitetsmodulen N/m^2

ρ = Densiteten kg/m^3
 v = Tvärkontraktionstalet (-)
 h = Delamineringens tjocklek (m)
 d = Delaminerade ytans diameter (m)

och uttrycket för IE-metodens fundamentala resonans (13)

$$f_0 = \frac{\beta \cdot C_p}{2 \cdot h} \quad \text{Ekv 20}$$

där

β = konstant som för en plattliknande struktur är 0.96. Hade IE mätt en stående våg skulle faktorn β ha varit 1, men randvillkoren komplicerar sambandet.

C_p = kompressionsvågshastigheten i materialet

h = det delaminerade skiktets tjocklek

Det framgår nämligen att för ökande delamineringstjocklek ökar resonansfrekvensen för membranmoden medan den minskar för den stående vågen. Med ökad tjocklek på delamineringen tilltar alltså skillnaden mellan dessa två frekvenser. Det är också intressant att göra iakttagelsen att medan den stående vågfrekvensen synbarligen är oberoende av delamineringens omfattning så påverkas membranresonansen av denna. Vi har alltså två ekvationer med två obekanta. Vi kan därför i princip lösa ut både delamineringens omfattning och dess tjocklek om vi kan mäta båda dessa resonanser. Betongens elastiska egenskaper kan bestämmas med ytvågsmetoden och densiteten kan uppskattas med tillräcklig noggrannhet.

Impedansmetoden fungerar enligt (5) bäst mot styva konstruktioner, vilket ger stöd för att impedansmätningar borde fungera i kylvattenkanaler, då ju betongkonstruktioner kan anses vara styva.

I (7) redovisas försök att med hjälp av reflekterat ljud bestämma såväl den specifika impedansen i reflektorn som absorptionskoefficienten. Uppmätt signal divideras med utsänd signal vilket ger den komplexa reflektionskoefficienten. Från denna kan man räkna fram den specifika impedansen och absorptionskoefficienten.

Om man integrerar hastigheten erhålles deformationen d . Ett diagram som presenterar kraft mot deformation motsvarar en arbetskurva, fast man då vanligen dividerar kraften med den tvärsnittsytan den verkar i och redovisar en spänning. Ett uppenbart mått att studera vid delaminering är då denna kurvas lutning, vilken återger betongytans fjäderkonstant k , enligt Ekv 10.

Mätteknik

I (2) framhålls att det är en fördel med pulsexcitering (t. ex. bomknackning) framför kontinuerlig excitering (vibrator) därför att man undviker störande reflexer från testobjektets kantlinjer. Detta beror på att dessa reflexer inte hinner fram till mätpunkten innan det intressanta förloppet är över. För långvariga resonanser kan interferens med kantreflexer uppstå.

I (9) framhålls att det är en stor fördel att scanna IE eftersom mätningar i en diskret punkt kan bli helt felaktiga beroende på betongens egenskaper just invid mätpunkten, t ex luftfyllda porer.

I (6) rekommenderas att geofoner används i stället för accelerometrar, då geofoner har bättre stabilitet vid låga frekvenser. Detta är sant, men å andra sidan är geofoner inte bra mottagare för frekvenser högre än några hundra Hz.

I (13) redovisas försök att använda en mikrofon som sensor i stället för accelerometrar. Detta går bra för registrering av membranresonanser men för att kunna registrera IE resonanser krävs att man har en mikrofon känslig upp i ultraljudområdet. Det innebär att man måste ha en kondensatormikrofon, vilken är väsentligt dyrare än en vanlig elektretmikrofon.

Analys

I (14) nämns den i USA vanliga bomknackningsmetoden "chain dragging". Man visar också att spektrogram ger en bättre bild av förloppet vid pulsexcitering än ett totalspektrum. Orsaken är att man redovisar frekvensförloppet som en funktion av tiden. Man ser då tydligt om en frekvenstopps energi i totalspektrumet orsakas av en hög kortvarig topp från själva slaget eller om den orsakas av en resonans med lång varaktighet efter slaget.

I (6) använder man mobiliteten som presentationsparameter.

Genom att multiplicera ett antal spektra registrerade på olika avstånd från slagpunkten, visar man i (3) att man erhåller en förstärkning av den domineranta frekvenstoppen och en kraftig, minst sagt, undertryckning av andra frekvenser vid t ex impact-echo- eller bomknackningsmätningar.

Referenslista

- 1 Hirao, M., H. Ogi, et al. (2004). "Interface Delamination of Layered Media: Acoustic Spectroscopy and Modal Analysis." Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on **51**(4): 439-443.
- 2 Cawley, P. (1990). "The detection of delaminations using flexural waves." NDT International **23**(4): 207-213.
- 3 Medina, R. and M. Garrido (2007). "Improving impact-echo method by using cross-spectral density." Journal of Sound and Vibration **304**(3-5): 769-778.
- 4 Cawley, P. (1987). "The sensitivity of the mechanical impedance method of non-destructive testing." NDT International **20**(4): 209-215.
- 5 Cawley, P. (1984). "The impedance method of non-destructive inspection." NDT International **17**(2): 59-65.
- 6 Davis, A. G., M. K. Lim, et al. (2005). "Rapid and economical evaluation of concrete tunnel linings with impulse response and impulse radar non-destructive methods." NDT and E International **38**(3): 181-186.
- 7 Mommertz, E. (1995). "Angle-Dependent In-situ Measurements of Reflection Coefficients Using a Subtraction Technique." Applied Acoustics **46**(3): 251-263.
- 8 Krause, M., M. Barmann, et al. (1997). "Comparison of pulse-echo methods for testing concrete." NDT and E International **30**(4): 195-204.
- 9 Schubert, F. and B. Köhler (2008). Ten Lectures on Impact-Echo. Journal of Nondestructive Evaluation **27**: 5-21.
- 10 Gatzwiller K, and Herlufsen, H., Bruel & Kjaer Application Note: Mobility measurements
- 11 Olesen, H., P. and Randall, R., B., "A Guide to Mechanical Impedance and Structural Response Techniques", Bruel & Kjaer
- 12 Tamura, T. and Sakai, T, "Measurement of the Degree of Compaction by the Impedance Method"
- 13 Zhu, J. and Popovics, John S., "Air-Coupled Impact-Echo Method for NDT of Concrete Review of Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol 35, ed. by D., O. Thompson and D.e. Chimentic, c. 2006 American Institute of Physics 0.7354-0312-0/06
- 14 Shokouhi, P., Gucunski, N. and Maher, A., "Time-Frequency Techniques for the Impact-Echo Data Analysis and Interpretations, ECNDT 2006- Tu.1.3.4
- 15 Gibson , Popovics, J.,S., "Lamb-wave basis for impact-echo method analysis", ASCE J. Eng. Mech., **131**(4), 438-443 (2005)

Kort Impact-Echo bibliografi

Sansalone, M. and Carino, N., J., "Impact-Echo Method", ACI Annual Convention, San Antonio, March 1987

Sansalone, M. and Carino, N., J., Hsu, N., "A Finite Element Study of the Interaction of Transients Stress Waves with Planar Flaws", Journal of Research of the National Bureau of Standards, 1987

Sansalone, M. and Carino, N., J., "Detecting Delaminations in Concrete Slabs with and without Overlays Using the Impact-Echo Method", ACI Materials Journal, Technical paper, Vol 86, No. 2, March-April 1989

Lin, Y., Sansalone, M. and Carino, N., J., "Finite Element Studies of the Impact-Echo Response of Plates Containing Thin Layers and Voids", Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 9, No. 1, 1990

Carino, N., J., "Detection of Voids in Grouted Ducts using the Impact-Echo Method", RILEM: Testing During Concrete Construction, Proceedings, Chapman and Hall, London, U.K., 1990

Sansalone, M., Lin, Y., Pratt, D., and Cheng, C., "Advancements and New Applications in Impact-Echo Testing", ACI International Conference on Evaluation and Rehabilitation of Concrete Structures and Innovations in Design, Hong Kong, Dec. 1991

Cheng, C. and Sansalone, M., "The Impact-Echo Response of Concrete Plates Containing delaminations: Numerical, Experimental and Field Studies", Materials and Structures, 1993, **26**, 274-285

3 Tillvägagångssätt

Det inledande försöket utförs med en vibrator, som via ett sk impedanshuvud är kopplat till försöksytorna med delaminering på olika djup, Kapitel 4. Därigenom erhålles en fullständig belysning av betongens beteende för olika delamineringsdjup över vibratorns och impedanshuvudets funktionsspektrum. Eftersom vibratoren och impedanshuvudet måste limmas mot betongytan är denna metod endast av laborativt intresse, men den ger besked om vilka frekvenser man skall vara särskilt observant vid i de fortsatta mätningarna.

Det andra försöket avser slag med instrumenterad hammare mot de olika delamineringsdjupen, Kapitel 5. Hammaren är utrustad med en kraftgivare som gör att man kan mäta kraften i slaget. När man slår en hammare mot en betongyta alstras ett bestämt frekvensspektrum som beror av hammarens vikt och betongens elasticitet / impedans. Det fungerar som ett enkelt massa/fjäder system. En tung hammare ger upphov till lägre frekvenser än en lätt hammare. Tre olika hammare provades. Betongytans vibrationer registrerades dels med en accelerometer pressad med handkraft mot betongytan, dels med en mikrofon placerad intill slagpunkten.

Det tredje försöket avser tester med två första prototyper till fältmässigt verktyg för instrumenterad bomknackning, Kapitel 6. Den första består av en kraftgivare monterad på ett stålrör. Inuti stålröret finns en fjäderbelastad geofon. En geofon ger en utsignal proportionell mot hastighet, varför man med en sådan konfiguration kan mäta impedansen direkt. Den andra består av en hopmonterad kraftgivare och en accelerometer. Man måste då integrera accelerometersignalen för att få hastighet, vilket kan skapa numeriska problem. Fördelen är att en accelerometer klarar att mäta högre frekvenser än en geofon. Fördelen med arrangemangen i övrigt är att man inte behöver ha någon kabel till hammaren.

Ett fjärde försök planeras omfatta mätning med en accelerometer monterad på en liten tryckluftscylinder, Kapitel 7. Tanken är då att anslaget alstrar en svängningsrörelse i betongen och att man under den tiden accelerometern hålls tryckt mot betongytan hinner registrera det frekvensspektrum som uppstår vid slaget mot betongytan.

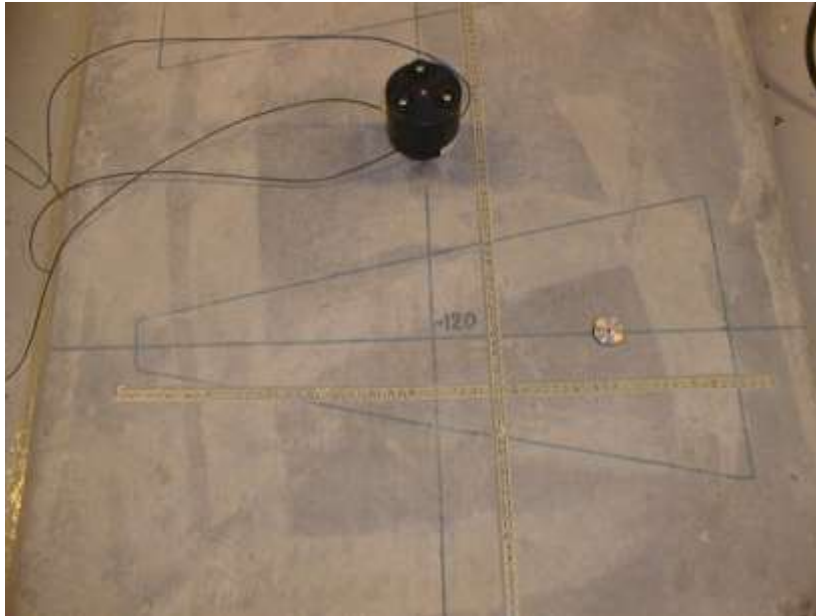
4 Försök med vibrator

En serie försök har utförts på de två provkroppar med ingjutna cellplastskivor, som tillverkats vid LTH. Fyra triangulära cellplastskivor är ingjutna på ett sådant sätt att de kommer att ligga på djup från 40 mm till 180 mm i steg om 20 mm, sett från de båda provkropparnas vardera två ytor, se Figur 1. Det finns således fyra provtyper P1s1, P1s2, P2s1 och P2s2. I vardera provytan finns det två målytor.



Figur 5. Provyta P2s2 sedd underifrån vid igjutningen av cellplastskivan på djupet 120 mm. Skivan klistrades fast på ett 120 mm tjockt betongskikt så fort detta härdat.

Försöken går ut på att bestämma impedansens frekvensberoende för delaminering på olika djup. Som mätpunkt har använts centrum i den största cirkel som kan skrivas in i de triangulära cellplastskivornas kontur, se Figur 2. För att få en referenskurva har en mätning utförts mitt emellan områdena med delaminering.

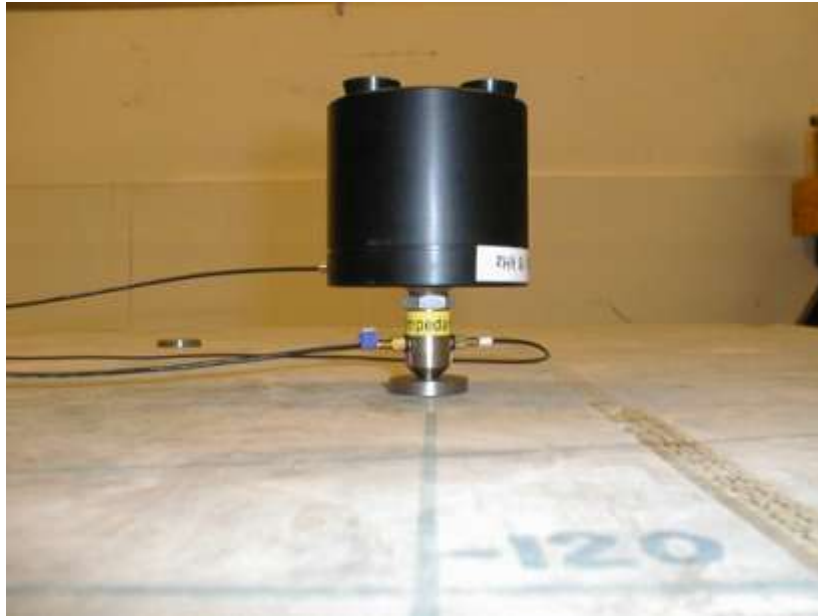


Figur 6. Konturerna av den ingjutna 7 mm tjocka cellplastskivan, ingjuten på djupet 120 mm, som simulerar delaminering. Vibratorn är i detta fall, för att få en referensmätning, monterad i provkroppens centrum där ingen delaminering finns. Provyta P2s2. Metallbrickan som används för fästning av vibratorn syns hitom vibratorn till höger.

Metoden som har använts är vibrator och impedanshuvud, se Figur 6 och 7. Mätinstrumentet är en Hewlett-Packard 35655 Dynamic signal analyzer som styr vibratorn och mäter signalerna från impedanshuvudet. Analysatorn stegar sig genom frekvensintervallet 51.2 – 10.000 Hz i 801 steg. Denna signal leds via en 6 W effektförstärkare till vibratorn, vilken är monterad ovanpå impedanshuvudet. I detta sitter sensorer för kraft och acceleration. Impedansen definieras som den kraft som utövas mot betongytan dividerad med betongytans resulterande hastighet och storheten är frekvensberoende. Accelerationen måste alltså integreras till hastighet. Detta sker i frekvensdomän i analysatorn, vilket innebär att accelerationsspektrum divideras med $j\omega$, där ω = vinkelfrekvensen $2\pi f$. Se Ekv 1 och Ekv 7.

$$Z(f) = \frac{F(f)}{a(f)} \cdot j\omega \quad \text{Ekv 21}$$

Därigenom blir impedansen en komplex storhet och kan redovisas som magnitud och fas för de analyserade frekvenserna. Det är regel att det uppstår ett fassprång vid resonansfrekvensen.



Figur 7. Vibrator överst ansluten till impedanshuvud monterat i metallbricka som klistrats mot betongen. Texten "120" avser den simulerade delamineringens djup i mm. De tre ledningarna driver vibratorn samt lämnar signal från kraft- och accelerationsgivare.

Impedansen Z beräknas, som tidigare nämnts, som kraft F dividerad med hastighet v

$$Z(f) = \frac{F(f)}{v(f)} \quad \text{Ekv 1}$$

Vi kan då förvänta oss att det vid resonans i ett förlustfritt material inträffar att impedansen går mot noll. Detta sker därför att amplituden på svängningsrörelsen ökar kraftigt samtidigt som den erforderliga kraften för detta blir allt mindre. Jämför med pojkestrecket att knuffa till en lyktstolpe i rätt ögonblick i svängningscykeln och därigenom få svängningsamplituden att växa tills lyktstolpen går av. Vi dividerar alltså ett litet värde på kraft med ett stort värde för hastighet.

Resonansfrekvensen f_0 för en skiva delaminerad betong kan räknas fram med hjälp av uttrycket

$$f_0 = 0.47 \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho \cdot (1 - \nu^2)}} \cdot \frac{h}{d^2} \quad \text{Ekv 19}$$

E = Elasticitetsmodulen N/m^2

ρ = Densiteten kg/m^3

ν = Tvärkontraktionstalet (-)

h = Delamineringens tjocklek (m)

d = Delaminerade ytans diameter (m)

Den stående vågen, enligt Ekv 20 i kapitel 1, ligger över den frekvens vibratorn kan excitera i betongen, nämligen i intervallet 13 – 60 kHz för delaminering i intervallet 180 till 40 mm.

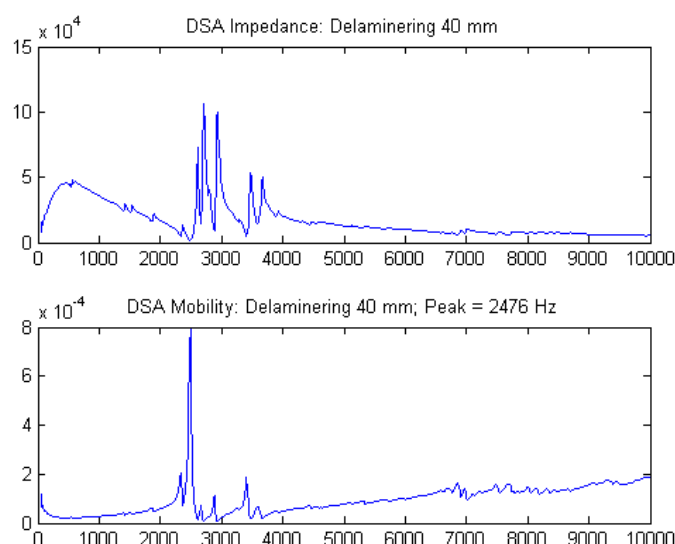
Vi ser alltså att enligt denna modell, Ekv 19, kommer resonansfrekvensen att öka då lagret (h) blir tjockare eller diametern (d) mindre. Som i vanliga svängande system innebär modellen också att resonansfrekvensen ökar när E-modulen ökar och minskar när densiteten ökar. Vad som inte framgår av modellen är att det krävs mer energi för att driva ett tjockt lager med liten diameter.

Resultat

I Bilaga 1 presenteras resultaten för samtliga mätningar på de åtta olika fallen av delamineringsdjup. Dessutom har en mätning i centrum av provkropp 2 utförts för att få ett resultat från betong utan simulerad delaminering.

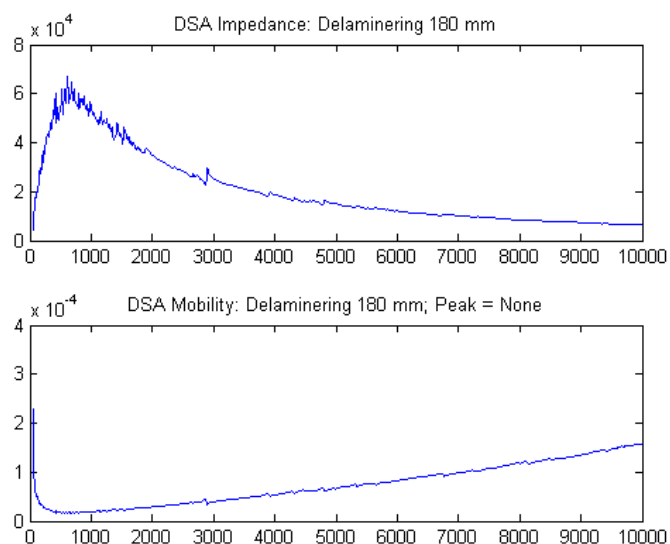
För varje mätobjekt presenteras impedans och mobilitet. Aktuellt delamineringsdjup anges liksom i förekommande fall resonansfrekvens. Resonansfrekvensen är den frekvens vid vilken impedansen uppvisar sitt första minimum. Det kan finnas impedansminimum vid högre frekvenser, men då är det sannolikt frågan om övertoner eller högre svängningsmoder.

Nedan visas resultatet för delaminering på djupet 40 mm. Vi ser att mobiliteten har sitt maximum vid frekvensen 2476 Hz. Impedansen går ner mot noll vid denna frekvens. Mobiliteten är en tydligare indikator än impedansen. I figuren motsvarar x-axeln frekvens i Hz medan y-axeln är okalibrerad.

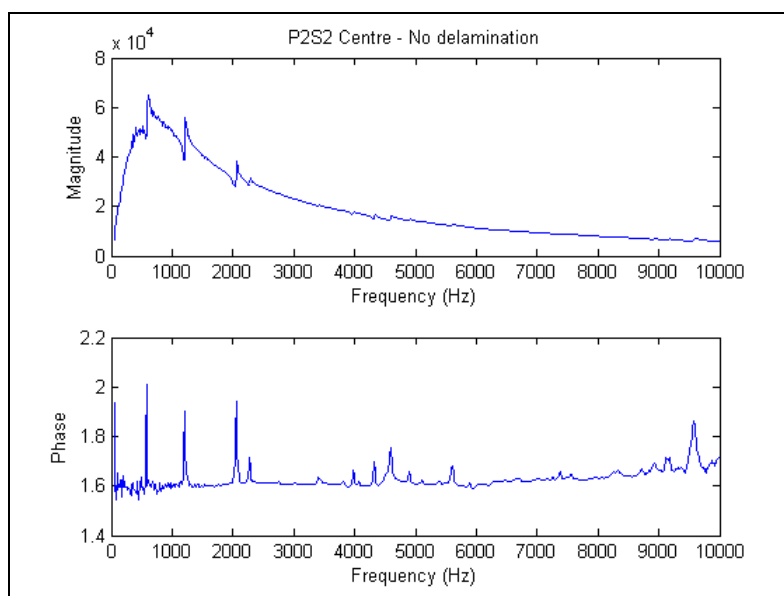


Figur 8. Delamineringsdjup 40 mm, resonansfrekvens 2476 Hz. Tydligt impedansminimum/Mobilitetsmaximum

För delamineringarna på större djup kommer impedansen inte att falla lika långt ner mot nollinjen och för delamineringsdjup större än 120 mm framträder inte något impedansminimum. Detta framgår tydligt av mätningen mot delamineringsdjupet 180 mm, vilket inte går att skilja från mätningen i referenspunkten utan delaminering. Båda fallen redovisas nedan.

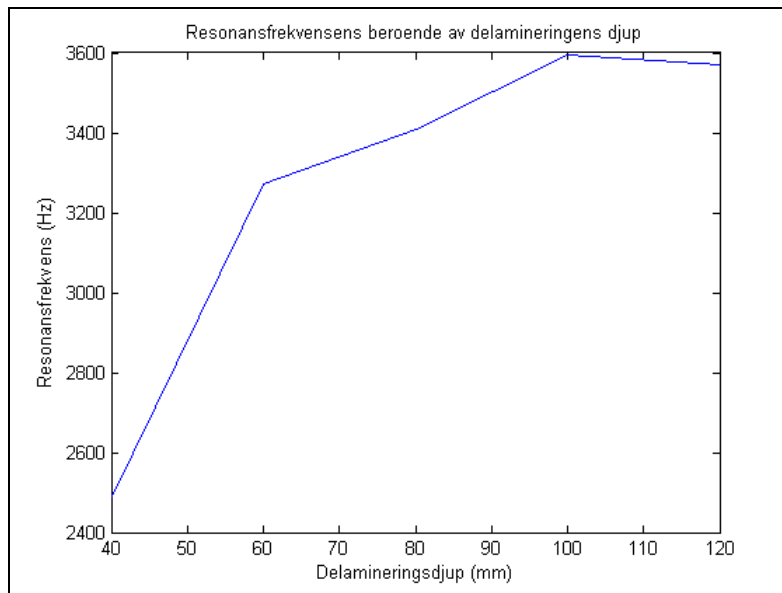


Figur 9. Delamineringsdjup 180 mm, ingen resonansfrekvens framträder.



Figur 10. Referensmätning där ingen delaminering finns.

Om man sammanställer resonansfrekvenserna / impedansminima för delamineringsdjupen 40 – 120 mm framträder följande bild.



Figur 11. Resonansfrekvensen funktion av delamineringsdjupet

Vi ser att resonansfrekvensen stiger med ökande delamineringsdjup upp till 100 mm, men inte linjärt som kan förväntas enligt det teoretiska uttrycket, Ekv19. En förklaring kan vara att det delaminerade skiktet inte är cirkulärt i det mätta fallet utan triangulärt. Det innebär att den kvadratiske termen i d inte är väldefinierad. Över 100 mm delamineringsdjup sjunker frekvensen något, vilket inte har någon teoretisk förklaring.

Slutsats

Slutsatsen är att förekomsten av tydliga resonansfrekvenser / impedansminima kan användas för att detektera förekomsten av delaminering ned till djup om ca 100 mm samt att resonansfrekvensen även innehåller information om delamineringsdjupet. Denna information är emellertid svår att utnyttja då vi inte känner delamineringens utsträckning, parametern d , i Ekv 19. För det fall man gör en undersökning med tätt mellan mätpunkterna erhålles denna information och då kan man kanske beräkna delamineringsdjupet ur resonansfrekvensen. Kan man även mäta den mycket högre IE-frekvensen kan i princip delamineringens utsträckning beräknas.

Då delamineringarnas utsträckning i de undersökta provkropparna är liten i förhållande till de i verkliga betongkonstruktioner förekommande, kan man av försöket dra slutsatsen att man via en tydlig resonansfrekvens kan lokalisera delaminering ner till ett djup av 80 – 100 mm. Större delamineringar kommer att ge tydligare resonansfrekvenser / impedansminima.

5 Försök med hammarslag

För dessa försök användes tre instrumenterade hammare från PCB Piezoelectronics. De olika hammartyperna är försedda med en kraftgivare som mäter kraften under slaget. Denna information är nödvändig om man skall bestämma impedansen. Samtliga hammare är enligt leverantören "modally tuned", varmed skall förstås att det endast blir ett enda slag när hammaren träffar betongytan. En vanlig snickarhammare uppvisar ett flertal studsar i mycket snabb följd när man slår den mot betongytan. Detta kan inte tillåtas om man avser mäta betongytans vibrationer efter slaget. Hammartyperna betecknas liten (L), mellanstor (M) och stor (S), se Figur 8.



Figur 12. De tre använda hammartyperna L, M och S

Utöver kraftgivaren i hammaren har vid försöken också använts en accelerometer, vilken manuellts pressats mot betongytan bredvid slagpunkten. För att få god kontakt är accelerometern försedd med en hårdmetallspets, se Figur 13.

En mikrofon kopplades också in i mätningen för att göra det möjligt att objektivt studera vad det är man hör när bomknackning indikerar delaminering.



Figur 13. Accelerometer med hårdmetallspets

För varje mätning erhålles således tre kanaler mätdata: kraft, acceleration och ljud, alla som funktion av tiden. För att analysera dessa signalers informationsinnehåll beräknas dels ett spektrum för hela den registrerade signalen, dels ett spektrogram, vilket visar frekvensinnehållets variation med tiden. Då det finns tre hammartyper och åtta delamineringar resulterar mätningarna i 24 olika diagram. Dessutom har några referensmätningar utförts för att säkerställa resultaten. Alla mätningar presenteras i Bilaga 2. Nedan diskuteras de mest informationsrika resultaten. Notera att alla skalor utom tids- och frekvensaxeln ändrar sig beroende på mätdatas värde.

Resultat

I Figur 14 visas insamlade data och analysresultatet för ett slag med liten hammare mot delaminering på 40 mm djup. Den vänstra kolumnen innehåller kraft-, accelerations- och mikrofonsignalerna som funktion av tiden. Här kan man notera att kraften i slaget överförs under mycket kort tid i förhållande till den tid under vilken accelerations- och mikrofonsignalerna varar. I den mellersta kolumnen finns spektra för signalernas hela varaktighet. Informationen ger frekvensinnehållet i hammarslaget, vilket sträcker sig från DC till 10 kHz för den lilla hammaren samt tydliga resonanstoppar vid 2539 Hz i spektra från accelerometern och mikrofonen. Dessa tydliga toppar är lätta att analysera i en automatiserad version av datainsamling. I den högra kolumnen visas spektrogram över signalerna. Dessa visar framförallt hur länge signalerna varar, särskilt resonanserna. Eftersom spektrogrammet arbetar med korta fönster som förskjuts längs tidsaxeln kommer kraftsignalen att förefalla längre

än den är i verkligheten. De intressantaste spektrogrammen är de som avbildar accelerometer och mikrofonsignal, eftersom dessa visar hur länge resonansfenomenet varar efter ett slag. Detta kan man också illustrera genom att spela upp den insamlade mikrofonsignalen med en mycket lägre samplingshastighet än den är mätt vid. Resultatet blir en utdragen signal där man tydligt kan höra skillnaden mellan olika hammare och delamineringsdjup.

I Figur 15 visas motsvarande resultat med den mellanstora hammaren. Även med denna hammare ser vi tydliga resonanstoppar vid 2539 Hz i signalerna från accelerometer och mikrofon.

I Figur 16 visas resultaten med den stora hammaren. Vi ser här att hammarslagets frekvensinnehåll faller för att vara mycket litet över 1 kHz. Alltså täcker hammarslagets frekvensinnehåll inte in den aktuella resonansfrekvensen för det delaminerade lagret, 2539 Hz. Följaktligen ser vi inte heller några resonanstoppar i associerade spektra.

Analysen av försöket går ut på att ta reda på för vilka kombinationer av hammare och delamineringsdjup vi erhåller tydliga resonanstoppar i signalerna från accelerometer och mikrofon. För att illustrera visas i Figur 17 att inte ens med den lilla hammaren erhålles några resonanser för delamineringsdjupet 140 mm. Nedan visas sammanställningen av tydliga, solitära resonanstoppar för de olika fallen. Med solitär avses att toppen är ensamt maximum i spektra.

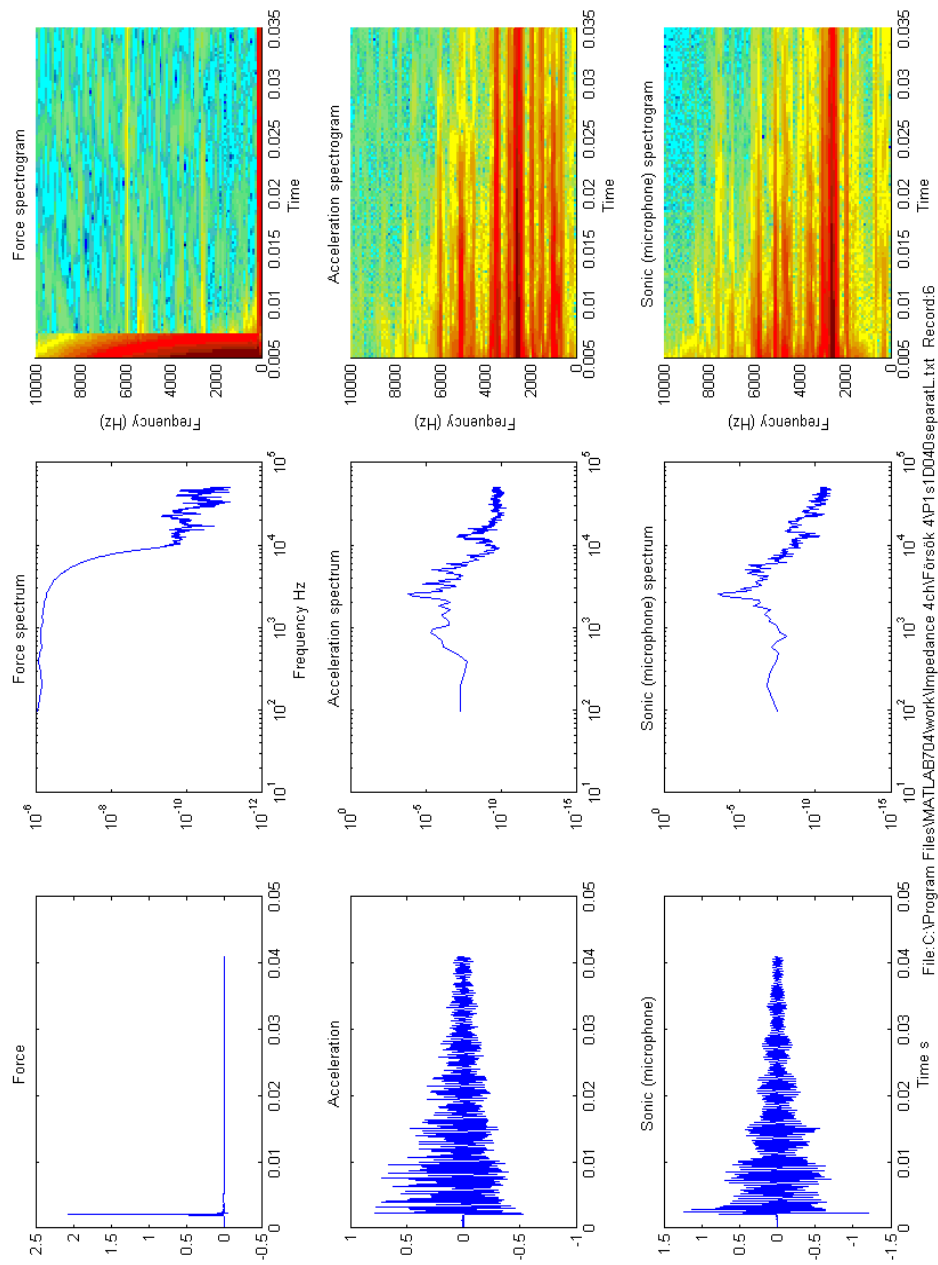
Tabell 1. Tydliga, solitära resonanstoppar

Hammartyp:	Liten	Liten	Mellan	Mellan	Stor	Stor
Objekt	Acc	Mik	Acc	Mik	Acc	Mik
D040mm	2539	2539	2539	2539	-	-
D060mm	3320	3223	-	3223	-	-
D080mm	3418	3418	-	-	-	-
D100mm	3711	3711	-	3711	-	-
D120mm	3613	3613	-	3125	-	-
D140mm	-	-	-	-	-	-
D160mm	-	-	-	(3223)	-	-
D180mm	-	-	-	-	-	-

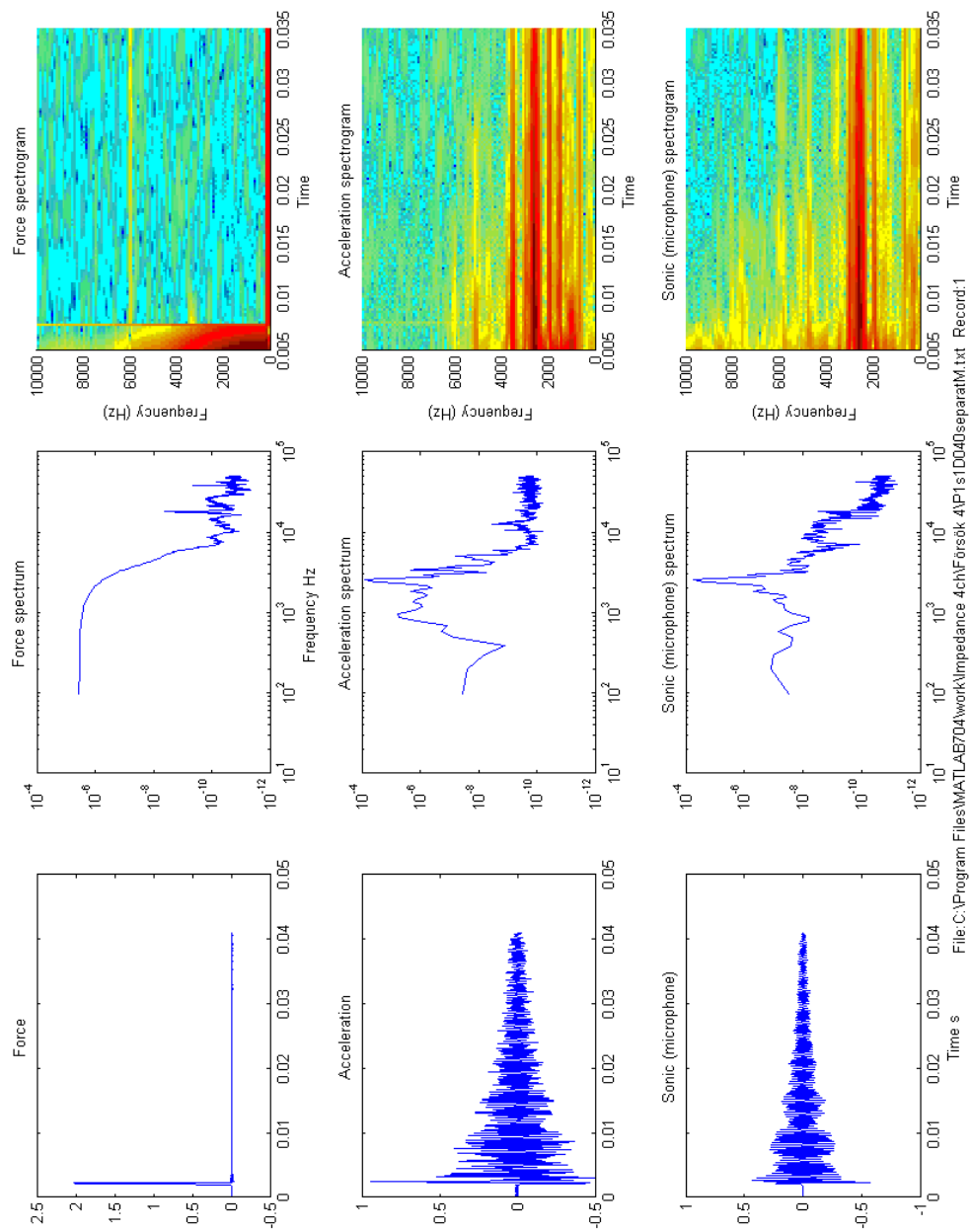
Resultatet för delamineringsdjupet 60 mm är satt inom parentes därför att det inte anses trovärdigt. Antagligen har slaget mot delamineringen på 160 mm djup exciterat delamineringen på 60 mm djup, vilken ligger i samma delyta, P1s2.

Slutsats

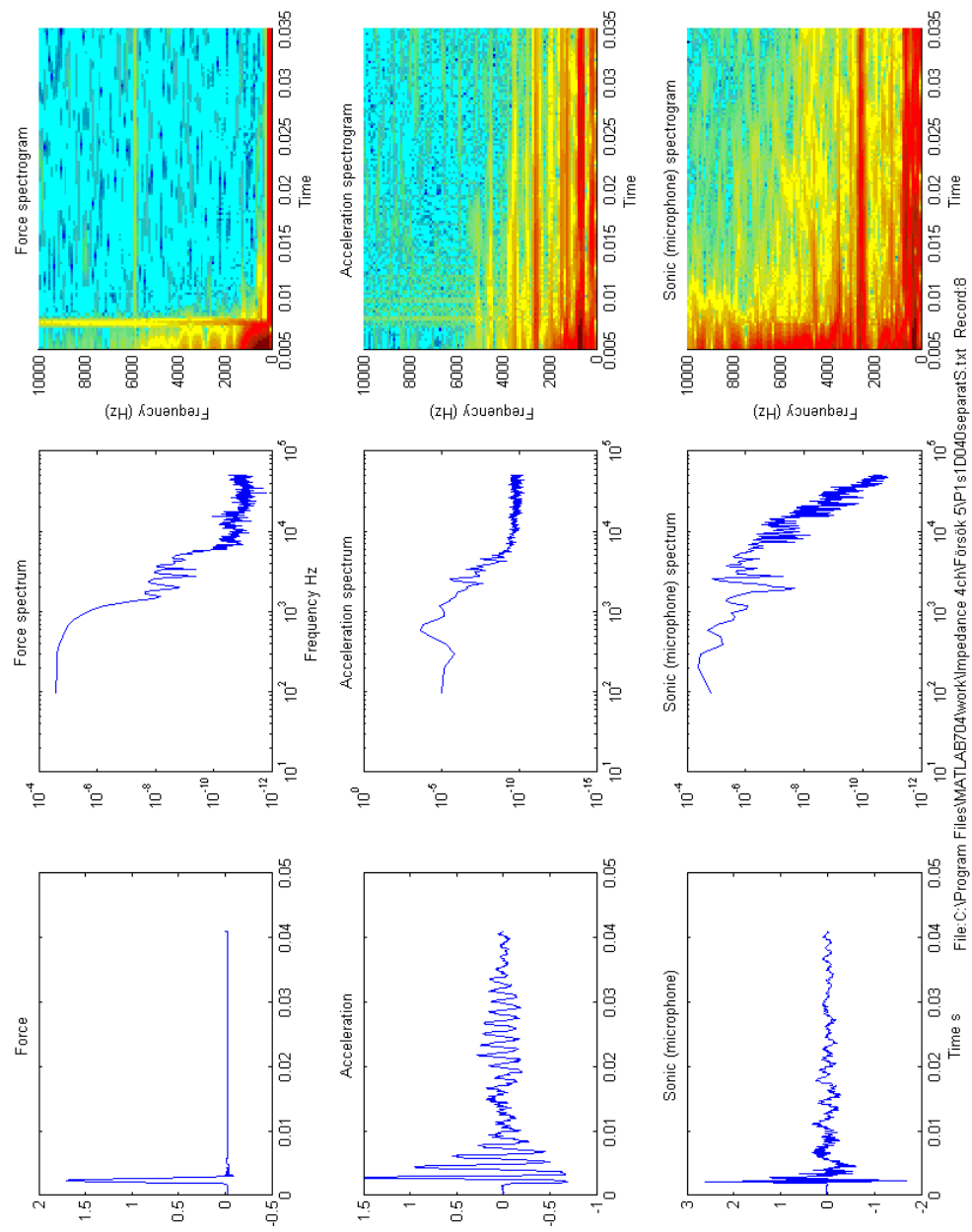
Vi ser tydligt att den lilla hammaren är mest lämpad för att excitera resonanstoppar och att detta kan ske med samma goda resultat för accelerometer- och mikrofonsignal upp till ett delamineringsdjup uppgående till 120 mm. Detta är något större än det delamineringsdjup som kunde detekteras med vibrator och impedanshuvud, vilket kanske kan tillskrivas att det är mer energi i hammarslaget. För den mellanstora hammaren är mikrofonsignalen mer lämpad för detektion. Den stora hammaren är inte lämpad för bestämning av delamineringsförekomst med ledning av tydliga resonanstoppar.



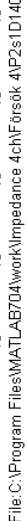
Figur 14. Analysresultat från slag med liten hammare mot delaminering på 40 mm djup



Figur 15. Analysresultat från slag med mellanstor hammare mot delaminering på 40 mm djup



Figur 16. Analysresultat från slag med stor hammare mot delaminering på 40 mm djup



25

6 Försök med Impedanshuvud

6.1.1 Inledande försök med impedanshuvud F/v

I syfte att underlätta mätningarna i fält provades att montera in en kraftgivare och en geofon i ett handtag. Eftersom geofonen avger en signal som är proportionell mot hastighet, ger denna kombination direkt möjlighet att mäta impedansen i betongytan, handtaget är alltså en slags impedanshuvud. Handtaget är utformat med en slagdyna mot vilken ett slag från en "modally tuned" hammare anbringas. Som nämnts avser uttrycket att det endast uppstår ett enda slag när hammaren träffar slagdynan, det blir inga studsar. Handtaget, 50 mm i diameter, är försett med skyddsring, så att man inte riskerar att slå sig på handen, den övre ringen, samt en tryckring för att pressa handtaget mot betongytan, den nedre ringen, se Figur 18.



Figur 18. Impedanshuvud med kraft- och hastighetsgivare

Geofonen, hastighetsgivaren, sitter monterad i ett fjäderbelastat hus av plast inuti det rör som utgör handtagets utsida. Syftet är att koppla isär slaget mot slagdynan, som sitter på kraftgivaren från geofonen. Den tid det tar för stöt-

vågen att gå genom hela fjädertrådens längd är större än den tid det tar för slagkraften att passera genom stålröret ner i betongen. Alltså anländer inte slagenergin via fjädern till geofonen under själva slaget. I Figur 19 visas hur kombinationshandtaget ser ut undertill. I mitten ser vi geofonens fjäderbelastade hus av plast och tre hårdmetallstift på den undre ringen, vilka är till för att skapa god kontakt med betongytan. Tre stift måste alltid ligga an mot ytan. Alternativt kan stiften demonteras och då kommer stålröret att ligga an mot betongytan. En förklarande sprängbild av handtagets konstruktion visas i Bilaga 3.



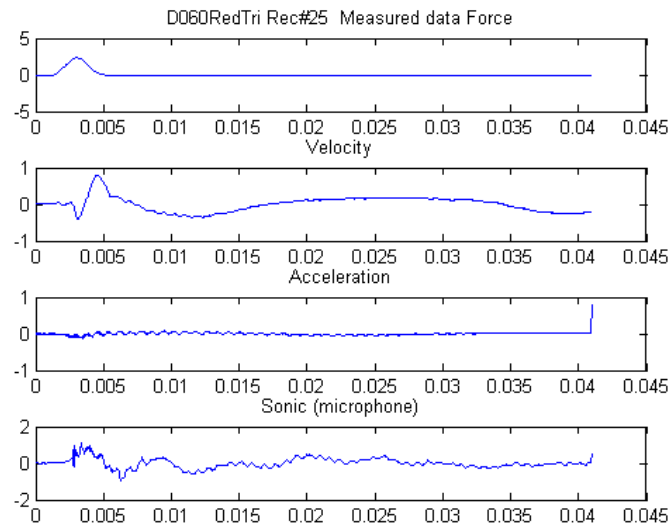
Figur 19. Kombinationshandtaget sett underifrån. Den runda plattan i mitten är geofonens plasthylsa

Med kombinationshandtaget slipper man att ha en kabel kopplad till hammaren. Det har visat sig att denna koppling är svår att få tillfredställande vid längre användning, då slagen gör att det uppstår glappkontakt.

6.1.2 Resultat

Alla försök med kombinationshandtaget utfördes med den stora hammaren. Till denna hammare kan man montera slagdynor med olika hårdhet.

Det första försöket utfördes med den röda, näst hårdaste, slagdynan monterad på hammaren. Resultatet från de olika mätkanalerna framgår av Figur 20. Mätdata består av signal från kombinationshandtagets kraftgivare och geofon samt från en accelerometer fast monterad mitt på provkroppen och en mikrofon uppställd vid sidan av provkroppen.

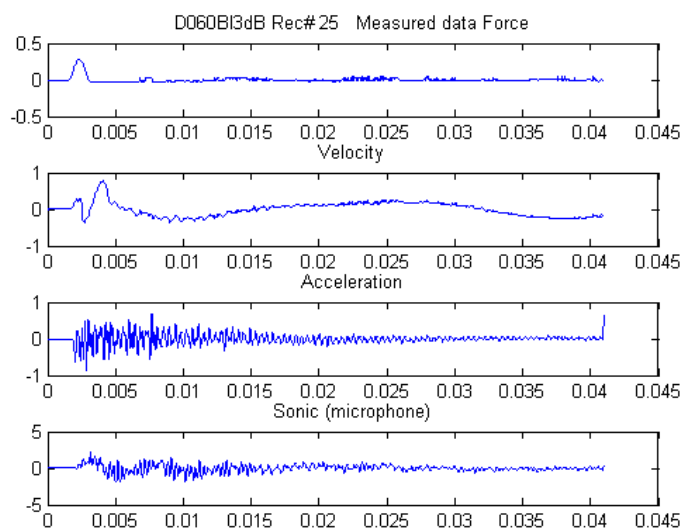


Figur 20. Mätning med kombinationshandtag, stor hammare med röd (mjuk) slagspets och 60 mm djup delaminering. De fyra kurvorna visar kraft, hastighet, acceleration och mikrofonsignal.

Slagen blir väldigt mjuka och utdragna i kraftkurvan, som man kan vänta sig när den mjukare röda slagdynan användes. Det framgår tydligt av den utdragna kraftsignalen och den lågfrekventa utstyrningen av geofonsignalen. Även mikrofonsignalen innehåller mycket lågfrekvens, medan däremot accelerometersignalen har ett mer högfrekvent innehåll. Detta beror på accelerometers oförmåga att mäta låga frekvenser.

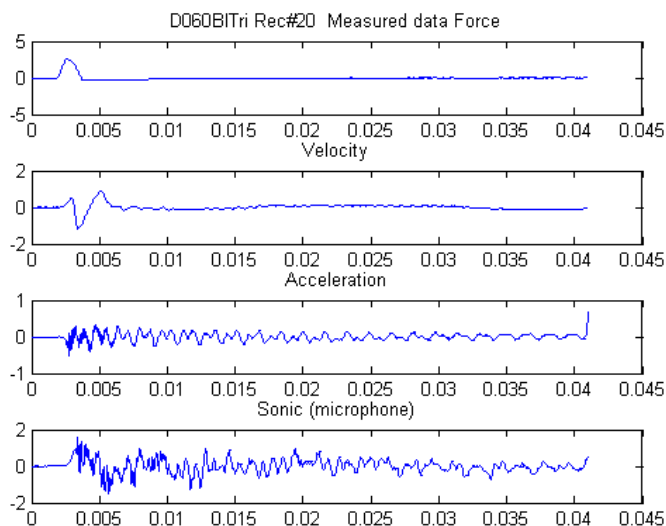
Därefter monterades hårdmetallstiften bort och den röda slagspetsen på den stora hammaren ersattes med den svarta, som är betydligt hårdare. Eftersom kraftsignalen då blev för stark för att kunna digitaliseras med den använda AD-omvandlaren kopplades en -3dB dämpsats in för denna signal. Resultatet framgår av Figur 21.

Det framgår omedelbart att den svarta slagspetsen alstrar en kortare kraftpuls än den röda. Därmed ökas frekvensinnehållet vilket omedelbart återspeglas i de uppmätta signalernas frekvensinnehåll, geofon, accelerometer och mikrofon.



Figur 21. Mätning med kombinationshandtag utan hårdmetallstift, stor hammare med svart slagspets (hård) och 60 mm djup delaminering samt -3dB dämpsats för kraftkanalen

I Figur 22 har hårdmetallstiften åter monterats och det framgår att kanalernas informationsinnehåll är snarlikt det som erhöles utan stiften i Figur 21, men att det tillkommit en oscillation som kanske orsakas av hårdmetallspetsarnas elastiska infästning.



Figur 22. Mätning med kombinationshandtag med hårdmetallstift, stor hammare med svart slagspets (fast) och 60 mm djup delaminering samt med -3dB dämpsats för kraftkanalen

6.2.1 Detektion av delamineringsdjup och -spännvidd

Vi övergår nu till att studera inverkan av delamineringsdjup och delamineringspännvidd för mätningar med hammarslag mot impedanshuvud. De impedanshuvud som använts består dels av det i Figur 18 och 19 visade handtaget, som är ett impedanshuvud av typen F/v (kraft och hastighet) och dels ett impedanshuvud av typen F/a (kraft och acceleration), som visas i Figur 23. Det senare impedanshuvudet har ställt ihopmonterade sensorer för kraft och acceleration och anbringas mot betongen med en hårdmetallspets av samma typ som de tre som användes med handtaget i tidigare försök. I dessa mätningar fokuseras på de två storheterna som kan uppmätas i tidsdomänen, nämligen $F_{\max}/v_{\max}$ respektive lutningen på den kurva som beskriver relationen mellan kraft och deformation, dvs fjäderkonstanten F/d . Eftersom uppmätta rörelsemått avser hastighet och acceleration krävs integrering för att få fram de önskade måtten.



Figur 23. Impedanshuvud bestående av kraftgivare och accelerometer.

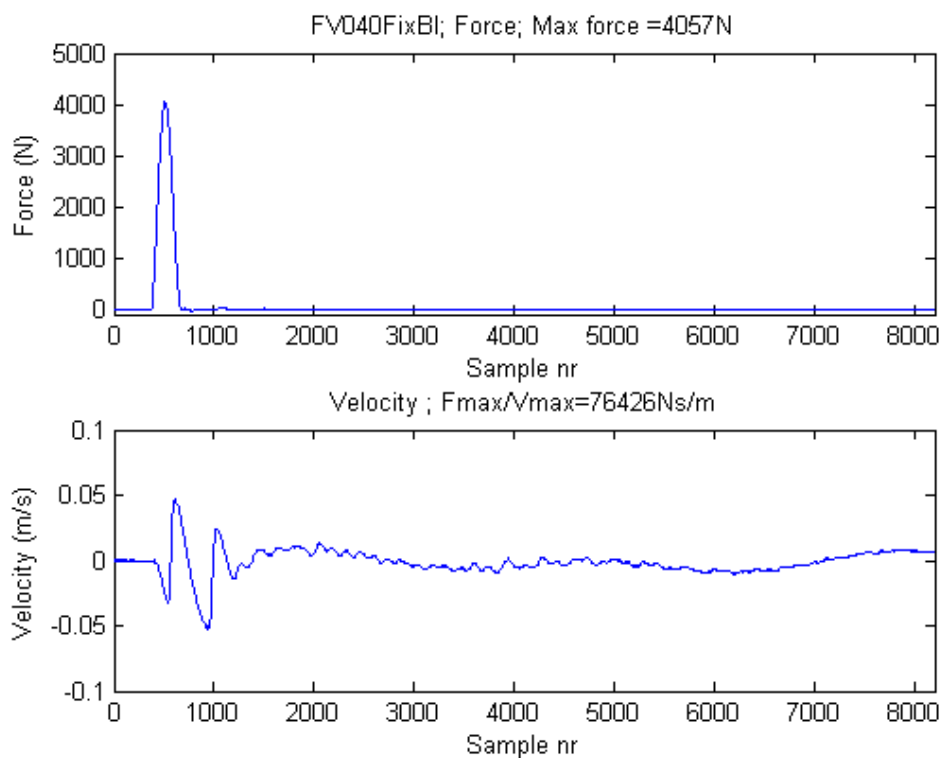
Mätserierna avseende delamineringsdjup utnyttjar de tillverkade provkropparna med delamineringsdjup i intervallet 40 – 180 mm. Seriernas för undersökning av delamineringspännviddens inverkan är alla utförda på den delaminering som ligger på 40 mm djup längs en linje i delamineringens huvudaxel. Delamineringen är 500 mm bred i startpunkten, som ligger i delamineringens ena kant och 50 mm bred i slutpunkten som ligger i den andra kanten, en figur i Bilaga 3 visar linjens orientering. Mätningarna längs linjen är gjorda med 50 mm intervall. Den stora hammaren med röd slagdyna har använts i försöken 1-4. En dämpsats har satts in i signalen från accelerometern för att anpassa den till AD-omvandlarens mätområde.

6.2.2 Resultat

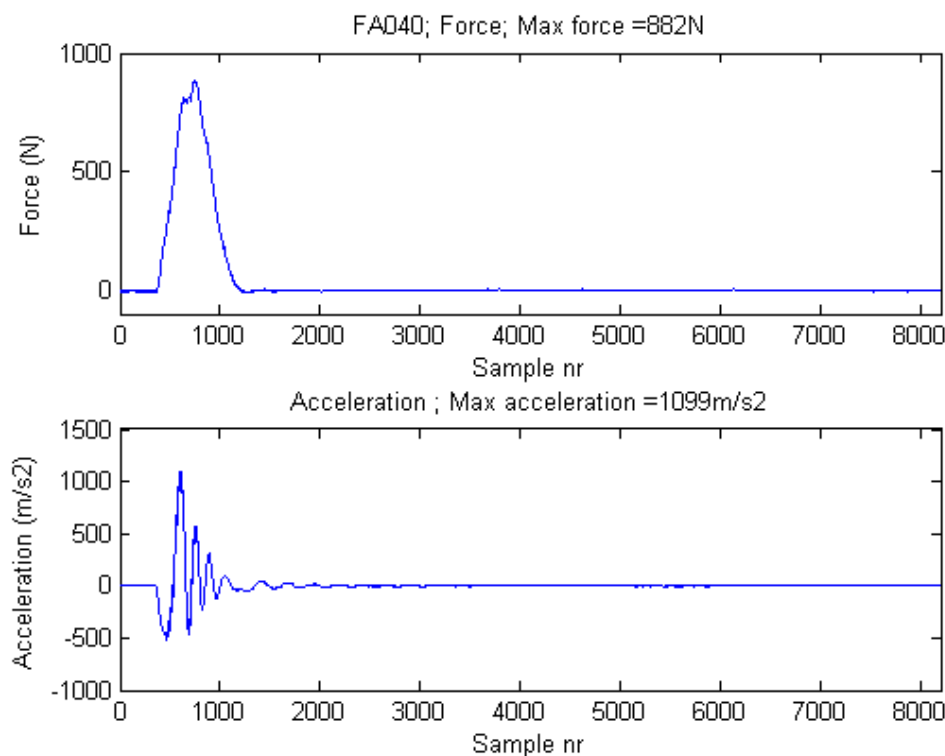
Resultaten av dessa försök är mycket omfattande och de presenteras därför i sin helhet i Bilaga 3. I detta kapitel visas endast de viktigaste resultaten.

Bilaga 3 är uppbyggd på följande sätt:

1. Inverkan av delamineringens djup FV (F/v)
2. Inverkan av delamineringens spännvidd FV (F/v)
3. Inverkan av delamineringens djup FA (F/a)
4. Inverkan av delamineringens spännvidd FA (F/a)
5. Inverkan på frekvensinnehåll av olika slagdynor på hammaren



Figur 24. Exempel på registrering med impedanshuvud för kraft och hastighet



Figur 25 Exempel på registrering med impedanshuvud för kraft och acceleration

Nedan redovisas i tabellform de viktigaste resultaten. De ansluter till teorikapitlets Ekv 18 och består av kvoten mellan högsta uppmätta kraft $F_{\max}$ dividerad med högsta uppmätta eller framintegrerade hastighet $v_{\max}$, samt två olika lutningsmått på kraft-deformationssambandet betecknade röd respektive grön. Dessa lutningsmått är beräknade med linjär regression och läget för de ingående datapunkterna framgår av färgen på kurvorna i Bilaga 3.

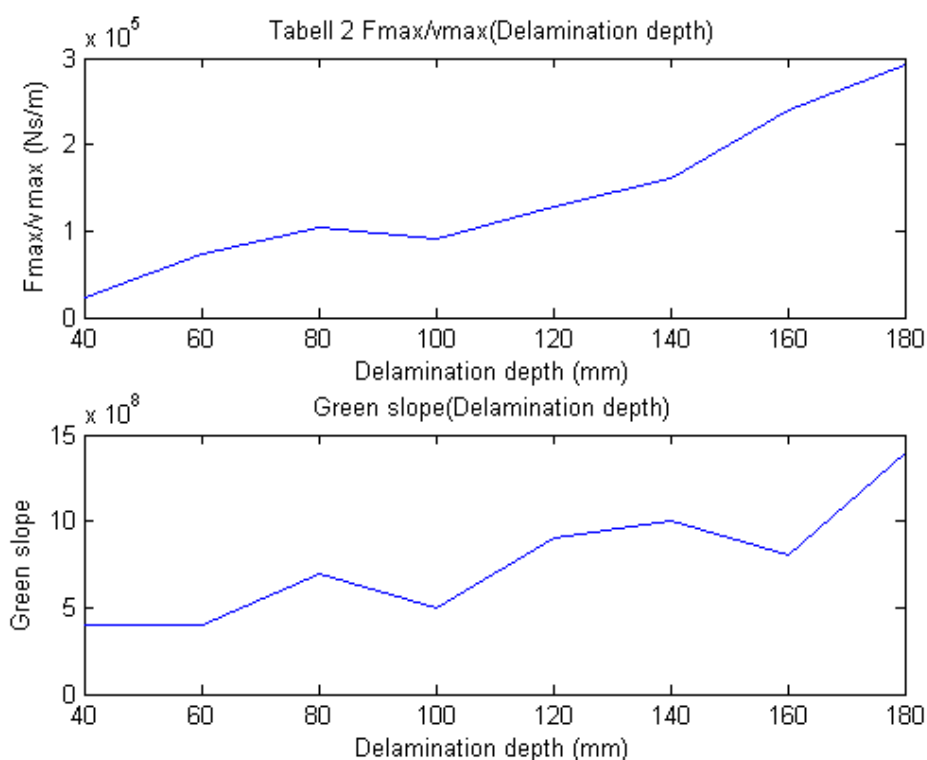
Röd lutning avser tiden omedelbart efter slaget när betongytan är på väg nedåt. Den gröna lutningen inträffar när betongytan fortfarande är nedpressad, men är på väg upp mot utgångsläget. Man kan också säga att grön avspeglar betongytans återfjädring efter slaget. Dessa beräkningar är automatiska och valda parametrar samma för alla datafiler och kan därför ge egendomliga resultat när förutsättningarna inte stämmer med antagandena.

Mätningen av spännviddens inverkan, Tabell 3, har en indirekt referens i läget längs delamineringen på betongens yta. Position 000 mm befinner sig ovanför den delamineringskant som är 300 mm bred och position 500 mm befinner sig ovanför den delamineringskant som är 50 mm bred. Det råder därför ett linjärt samband mellan position och delamineringens spännvidd.

Tabell 2. Inverkan av delamineringens djup (F/v)

Djup	$F_{\max}/v_{\max}$	Red slope	Green slope
40	22136	$-6 \cdot 10^9$	$4 \cdot 10^8$
60	73597	-4	4
80	104700	-5	7
100	91505	-5	5
120	127632	-7	9
140	160822	-6	10
160	239051	-6	8
180	292118	-6	14

Detta är mätningar med kraftgivare (F) och geofon (v). Tabell 2 visar att kvoten mellan max kraft och hastighet har en stark proportionalitet mot delamineringsdjupet och proportionaliteten sträcker sig ner till det största förekommande delamineringsdjupet i försöket, nämligen 180 mm. Det röda lutningsmåttet ger ingen proportionalitet, medan däremot det gröna gör det.

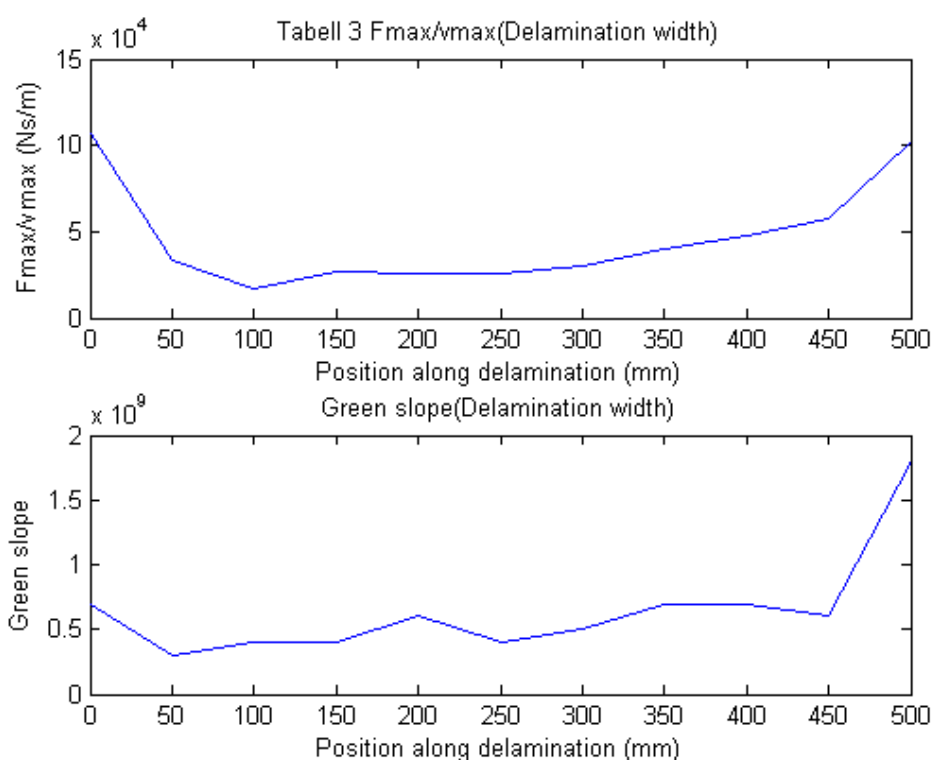


Figur 26. Grafisk återgivning av de signifikanta parametrarna i Tabell 2. "Green slope" är betongytans fjäderkonstant F/d uppmätt i betongytans återfjädrande fas.

Tabell 3. Inverkan av delamineringens spännvidd (F/v)

Pos(mm)	$F_{\max}/v_{\max}$	Red slope	Green slope
000	107237	$-192 \cdot 10^8$	$7 \cdot 10^8$
050	33097	-75	3
100	16943	-300	4
150	26501	-227	4
200	25227	+471	6
250	26059	-303	4
300	30226	-157	5
350	39825	+394	7
400	47471	-30	7
450	57940	-201	6
500	102790	-783	18

Tabell 3 visar att kvoten mellan max kraft och hastighet har en stark omvänd proportionalitet mot delamineringens spännvidd. På delamineringens kanter är kvoten hög, då man delvis verkar mot homogen betong (punkterna 00,50). Över delamineringen ökar kvoten med minskande spännvidd för delamineringen. Samma tendens kan ses för grön lutning.



Figur 27. Grafisk återgivning av de signifikanta parametrarna i Tabell 3. Värdena för position 0 respektive 500 mm är mätta på delamineringens kant och avviker därför från trenden. "Green slope" är betongytans fjäderkonstant F/d .

Tabell 4. Inverkan av delamineringens djup F/a

Djup	$F_{\max}/v_{\max}$	Red slope	Green slope
40	4994	$-8 \cdot 10^9$	-3
60	5868	-10	-2
80	9674	-16	-8
100	11514	-16	-8
120	9365	-15	-10
140	2833	-3	-1
160	7363	-13	-5
180	6683	-11	-5

Detta är mätningar med kraftgivare (F) och accelerometer (a). Det går inte att spåra någon proportionalitet mellan de beräknade storheterna och delamineringens djup. Möjligen kan detta tillskrivas att hårdmetallspetsen pressas in i betongen vid slaget. Det skulle kunna åtgärdas genom att använda en sfärisk eller plan anliggningsyta. En annan möjlig felkälla är att accelerationen måste integreras numeriskt för att få fram hastigheten.

Tabell 5. Inverkan av delamineringens spännvidd F/a

Pos(mm)	$F_{\max}/v_{\max}$	Red slope	Green slope
000	6095	$-10 \cdot 10^9$	-4
050	6213	-10	-3
100	5325	-10	-2
150	6348	-14	-3
200	7438	-24	-7
250	6706	-12	-4
300	6187	-11	-4
350	7675	-12	-6
400	7091	-14	-7
450	7587	-11	-4
500	6423	-9	-4

I Tabell 5 kan man inte se någon tydlig proportionalitet mellan delamineringens spännvidd och någon av de beräknade storheterna.

Slutligen redovisas de frekvensområden, Tabell 5, den stora hammaren ger upphov till vid slag mot impedanshuvudet innehållande kraft- och hastighetsgivare, när olika slagdynor användes. Varje slagdyna (Svart, Röd, Brun, Grå) har testats utan och med en extra mässingsvikt (M), om 534 gram anbringad på hammaren, som i sig själv väger 1500 gram, se figur i Bilaga 3. För att få så bra värden som möjligt har geofonhuset klistrats mot betongytan (Fix) i dessa mätningar, vilka alla genomfördes mot delamineringen som ligger på 40 mm djup.

Tabell 6. Frekvensområde i kraftsignalen för olika slagdynor och vikter

Svart, hårdast, utan vikt	<1020 Hz
Svart, hårdast, med vikt	<990
Röd, näst hårdast, utan vikt	<800
Röd, näst hårdast, med vikt	<800
Brun, näst mjukast, utan vikt	<600
Brun, näst mjukast, med vikt	<500
Grå, mjukast, utan vikt	<600
Grå, mjukast, med vikt	<500

Av tabellen framgår att den stora hammaren endast är användbar för mätningarna i tidsdomän. Som väntat ger hårdare slagdyna upphov till en mer högfrekvent kraftpuls, dvs en kortare puls. I inget fall täcker hammarens kraftspektrum det frekvensområde som den fundamentala svängningsmoden befinner sig i. Detta resultat överensstämmer med resultaten i Kapitel 5, fast då provades endast den röda slagdynan.

6.3.1 Hammare och impedanshuvud (F/v) i frekvensdomän

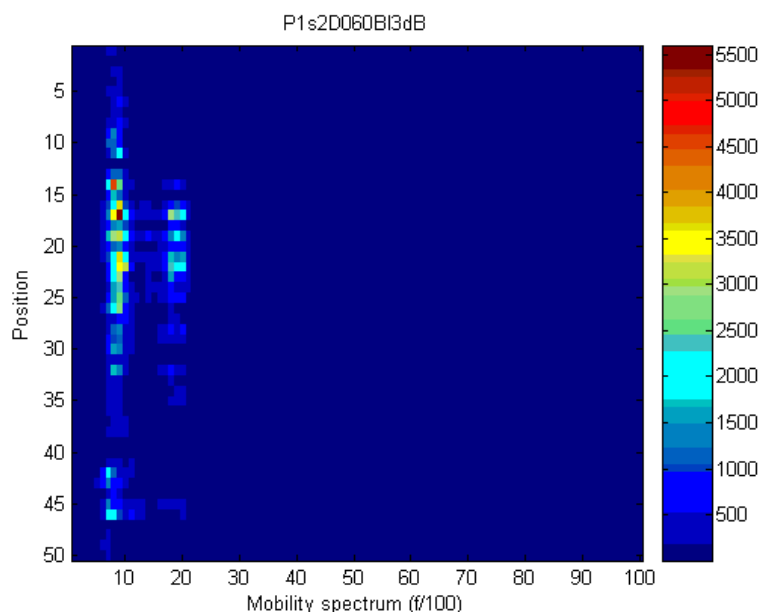
För att studera kombinationshandtagets förmåga att detektera delaminering i frekvensdomänen utfördes ett antal slag med 1 cm mellanrum från solid betong över den del av betongen som innehåller en delaminering på djupet 60 mm och ut över solid betong igen. Mätlinjen illustreras av Figur 28.



Figur 28. Mätlinjen är placerad längs den vertikala mittlinjen i figuren och går alltså från solid betong över delaminering och ut över solid betong igen. Den aktuella figuren avser delaminering på 100 mm djup, men försöket är gjort med delaminering på 60 mm djup.

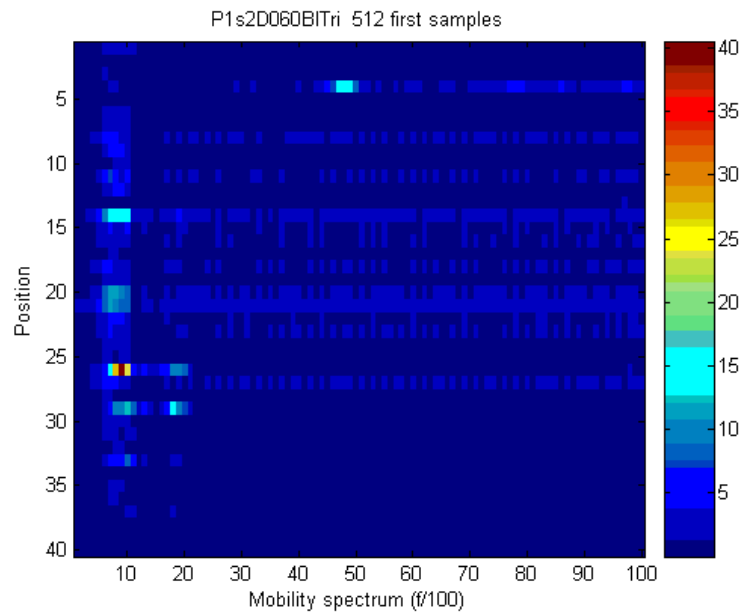
6.3.2 Resultat

Den parameter som presenteras är mobiliteten, alltså inversen till impedansen. Diagrammet, Figur 29, är så konstruerat att den vertikala axeln anger slagets position längs en linje i provkroppens mitt, se Figur 26 ovan, vilken går tvärs över delamineringen. På den horisontella axeln visas mobilitetens frekvensberoende. Vi ser då att mobiliteten har stora värden för c:a 2000 Hz längs den delen av profilen som ligger ovanför delamineringen på 60 mm djup, dvs. i positionerna 15 - 35. Denna resonansfrekvens är lägre än den som erhållits med de andra metoderna, nämligen drygt 3000 Hz. Eventuellt kan detta ha med den stora hammarens lägre frekvensomfång att göra. Kan inte resonansfrekvensen exciteras kanske en lägre frekvens blir dominerande i spektrum.



Figur 29. Mobilitetsprofilering över delaminering med kombinationshandtag utan hårdmetallstift, stor hammare med svart slagdyna (hårdast) och 60 mm djup delaminering och med -3dB dämpsats för kraftkanalen. 50 slag ingår i profilen som är centrerad över delamineringen. Slag 25 motsvarar signalen i Figur 21.

Försöket upprepades med hårdmetallstiften monterade och då erhölls det resultat vi kan se i Figur 30. Som framgår får man då en dålig indikering av det delaminerade området när hårdmetallstiften är monterade. Möjligen kan detta tillskrivas att den nedre ringen har så stor flexibilitet vid slaget att inte lika mycket energi kan gå ner i betongen som då man slår direkt med stålroret.



Figur 30. Mobilitetsprofilering över delaminering med kombinationshandtag med hårdmetallstift, stor hammare med svart slagspets (fast) och 60 mm djup delaminering och med -3dB dämpsats för kraftkanalen. 40 slag ingår i profilen som är centrerad över delamineringen. Slag 20 motsvarar signalen i Figur 22.

6.4 Slutsatser

De inledande försöken visade att de små hårdmetallstiften försämrar resultatet vid användning av det impedanshuvud som innehåller sensorer för kraft och hastighet (F/v). Försöket demonstrerade att en hårdare slagdyna ger upphov till en mer högfrekvent kraftpuls än vad en mjukare slagdyna gör.

Det andra försöket visade att det impedanshuvud som baseras på kraftgivare och geofon ger resultat som bättre kopplar mot storheter som delamineringens djup och dess spännvidd än det impedanshuvud som består av kraftgivare och accelerometer. Det visade också att de två parametrar som mäts i tidsdomän, nämligen den impedans som beräknas med hjälp av kraftmaximum $F_{\max}$ dividerat med hastighetsmaximum $v_{\max}$ samt betongytans fjäderkonstant kopplar väl till delamineringens egenskaper när ett F/v -impedanshuvud används. Fjäderkonstanten skall mätas under betongytans uppåtgående fas. Provet med olika slagdynor och hammarvikter visade som förväntat att mjukare slagdyna och tyngre hammare ger upphov till lägre frekvenser.

Det tredje försöket visade att det går att använda det konstruerade impedanshuvudet F/v för mätningar i frekvensdomän. Dock erhöles inte samma resonansfrekvens som erhöles med vibrator eller slag med liten eller mellanstor hammare. Möjligen kan det förklaras av att den stora hammaren, på

grund av sin begränsade förmåga att alstra höga frekvenser, inte förmår excitera den resonansfrekvens som uppmätts tidigare. Då kan en lägre frekvens framstå som dominerande i spektrumet.

7 Tryckluftcylinder

De tidigare utförda försöken antyder att resonansfrekvensen är en god indikator på delaminering liksom förhållandet $F_{\max}/v_{\max}$ och betongytans fjäderkonstant F/d i det uppåtgående skedet av betongytans nedpressning.

Det kan då vara aktuellt att studera en teknik som inte mäter alla parametrar som krävs för att bestämma impedansen. Att man måste mäta både kraft och hastighet/acceleration beror ju på att de senare parametrarna beror av kraftens storlek. Resonansfrekvensen däremot beror inte av kraftens storlek. Kraften påverkar bara resonansfrekvensens amplitud.

Man kan då tänka sig att montera en accelerometer på en liten tryckluftcylinder. Med lämplig elektromekanisk ventil kan en sådan cylinder fås att skjuta ut på ett explosivt sätt och därmed överföra en rejäl kraftimpuls till betongytan. Denna kraftimpuls kommer att excitera resonansfrekvenser i betongen inom kraftpulsens bandbredd, dvs inom dess spektrum. Ett montage av en lämplig kombination av elektromekanisk ventil och tryckluftcylinder visas i Figur 31.



Figur 31. Elektromekanisk ventil med tryckluftcylinder monterad på skanner

Om man då skjuter ned accelerometern mot betongen och håller kvar trycket en bråkdel av en sekund, kommer accelerometern att dels överföra slagets

energi till betongen och därmed excitera resonansfrekvenser, men den kommer också att kunna mäta resonansfrekvenserna under den tid accelerometern pressas mot betongytan efter slaget.

Nedan visas i Figur 32 hur tryckluftscylindern monterats på den vid LTH befintliga skannern. Framför skannern ligger de två betongprovkroppar som alla försök utförts på.



Figur 32. Tryckluftscylindern monterad på skannern för genomförande av avbildande försök baserat på resonansfrekvenser i delaminerad betong.

I princip bör det inte heller vara något problem att mäta både kraft och acceleration om ett impedanshuvud monteras på tryckluftscylindern.

Metoden har likheter med Schmitt-hammaren, som är ett vanligt verktyg för provning av betongs E-modul / hållfasthet. En sådan hammare kan också bli föremål för kommande försök.

Fördelen med att använda en tryckluftbaserad kraftkälla är naturligtvis att det kan bli ganska ansträngande att slå ett stort antal hammarslag mot betongytorna som skall undersökas. Ett verktyg i stil med en spikpistol skulle underlätta arbetet väsentligt.

8 Slutsatser

8.1 Vibrator

Förekomsten av tydliga resonansfrekvenser / impedansminima kan användas för att detektera delaminering ned till djup om c:a 100 mm. Resonansfrekvensen innehåller information om delamineringsdjupet. Denna information är emellertid svår att utnyttja då vi inte känner delamineringens utsträckning, vilken också påverkar resonansfrekvensen. För det fall man gör en undersökning med litet avstånd mellan mätpunkterna jämfört med delamineringens utsträckning erhålles denna information och då kan man teoretiskt beräkna delamineringsdjupet med ledning av resonansfrekvensen.

Då de undersökta delamineringarnas utsträckning är liten i förhållande till de i betongkonstruktionerna förekommande, kan man av försöket dra slutsatsen att man via en tydlig resonansfrekvens kan lokalisera delaminering ner till ett djup av 80 – 100 mm. Större delamineringar kommer att ge tydligare resonansfrekvenser / impedansminima / mobilitetsmaxima.

8.2 Hammare av olika storlek

Vi ser tydligt att den lilla hammaren är mest lämpad för att excitera resonans-toppar och att detta kan ske med samma goda resultat för accelerometer- och mikrofonsignal upp till ett delamineringsdjup uppgående till 120 mm. Detta är något större än det delamineringsdjup som kunde detekteras med vibrator och impedanshuvud, vilket kanske kan tillskrivas att det är mer energi i hammerslaget. För den mellanstora hammaren är mikrofonsignalen mer lämpad för detektion. Den stora hammaren är inte lämpad för bestämning av delamineringsförekomst med ledning av tydliga resonanstoppa. Möjligheten att använda mikrofon för analysen öppnar för att ha en i rummet fast monterad mikrofon som samlar upp ljud från alla slag mot betongytan. Detta underlättar mätningen, i synnerhet om man inte bryr sig om att mäta kraften i hammerslaget, vilket inte behövs vid mätningar i frekvensdomän.

8.3 Kombinationshandtag / Impedanshuvud F/v och F/a

De inledande försöken visade att de små hårdmetallstiften försämrar resultatet vid användning av det impedanshuvud som innehåller sensorer för kraft och hastighet (F/v).

Det andra försöket visade att det impedanshuvud som baseras på kraftgivare och geofon ger resultat som bättre kopplar mot storheter som delamineringens djup och dess spännvidd än det impedanshuvud som består av kraftgivare och accelerometer. Det visade också att de två parametrar som mäts i tidsdomän, nämligen den impedans som beräknas med hjälp av kraftmaximum $F_{\max}$ och hastighetsmaximum $v_{\max}$ samt betongytans fjäderkonstant kopplar väl till delamineringens egenskaper när ett F/v-impedanshuvud används. Fjäderkonstanten skall mätas under betongytans uppgående fas.

Det tredje försöket visade att det går att använda det konstruerade impedanshuvudet F/v för mätningar i frekvensdomän. Dock erhöles inte samma resonansfrekvens som erhöles med vibrator eller slag med liten eller mellanstor hammare. Möjligen kan det förklaras av att den stora hammaren, på grund av sin begränsade förmåga att alstra höga frekvenser, inte förmår excitera den resonansfrekvens som uppmätts tidigare. Då kan en lägre frekvens framstå som dominerande i spektrumet.

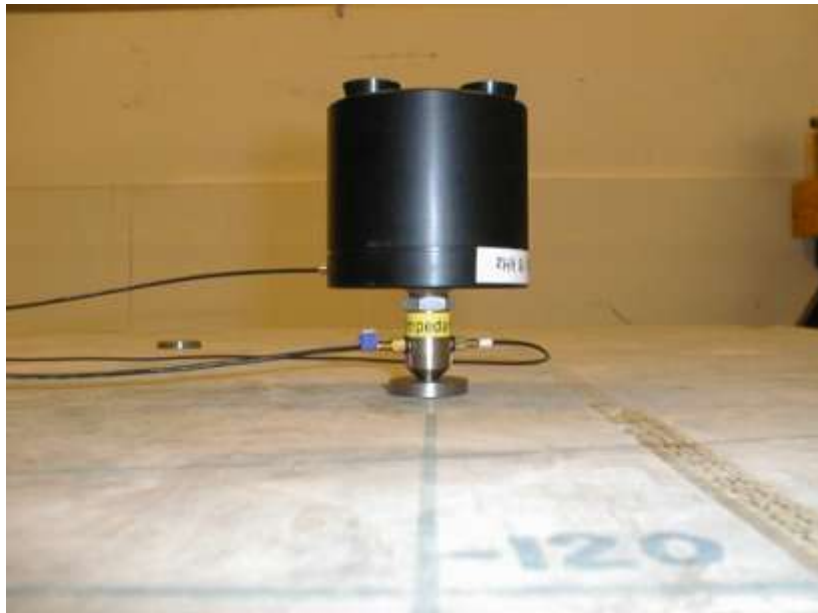
8.4 Allmänt

I laboratorieförsöken kan man konstatera att stor hammare och impedanshuvud F/V är lämpligast för mätningar i tidsdomän, medan mindre hammare och accelerometer eller mikrofon är lämpligast för mätningar i frekvensdomän. I frekvensdomän har delaminering konstaterats ner till djupet 120 mm medan i tidsdomänen djup ner till 180 mm verkar vara detekterbara. Kommande försök får avgöra vilken domän som innehåller den säkraste diskrimineringsstorheten i verkliga konstruktioner.

Det vid bomknackning upplevda ljudet är lågfrekvent och alstras inte av de uppmätta resonansfrekvenserna utan snarare av den initiala oscillationen av betongytan efter slaget. Provkropparna kan inte efterlikna alla aspekter av verklig delaminering, då de är jämförelsevis små och de "fria" skivorna trots allt är fast inspända i omgivande betong längs ränderna.

BILAGA 1

Försök med vibrator



I detta försök har en Hewlett Packard Dynamic Signal Analyser HP 35655 (DSA) använts. Denna innehåller en signalkälla som automatiskt kan stegas genom ett förvalt frekvensintervall och mäta två storheter som resulterar av den utsända frekvensen, samt utföra omedelbara beräkningar på dessa storheter.

Den utsända signalen leds via en effektförstärkare till vibratorn som är av modell Bruel & Kjaer 4810. Mellan vibratorn och betongytan sitter ett impedanshuvud Bruel & Kjaer 8001, vilket innehåller en kraftgivare och en accelerometer, vilkas ut signaler leds via en förstärkare, Bruel & Kjaer Nexus, till analysatorns två ingångar. Analysatorn integrerar accelerationen till hastighet och beräknar därefter impedansen som kraft dividerat med impedans.

För att vibratorn skall kunna överföra en kraftcykel innehållande både tryck och drag måste impedanshuvudet fästas mot betongen. Detta sker med en liten stålbricka som limmas mot betongytan och har ett gängat hål.

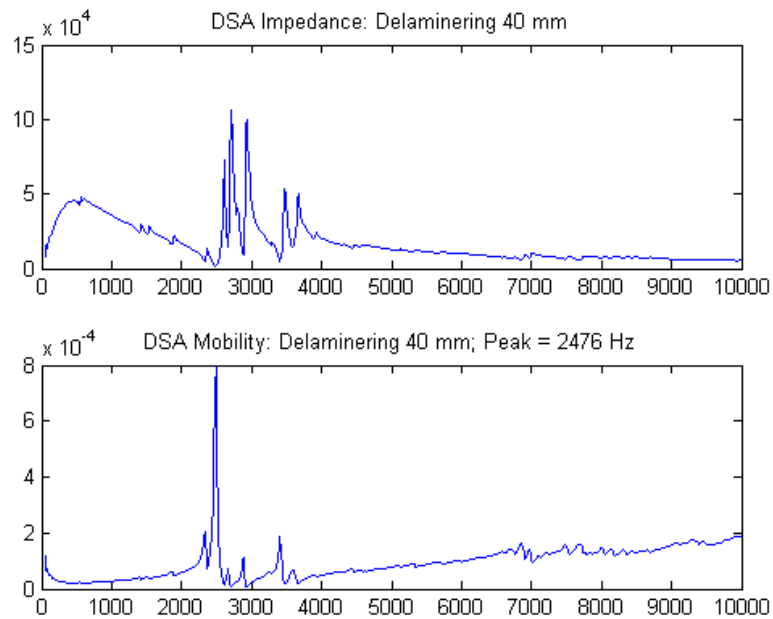
I försöken har frekvensområdet upp till 10 kHz använts, eftersom det uppges vara impedanshuvudets arbetsområde, dvs frekvensgången för de två sensorerna är rak upp till denna frekvens.

I redovisningsprogrammet omvandlas impedansen till mobilitet genom invertering.

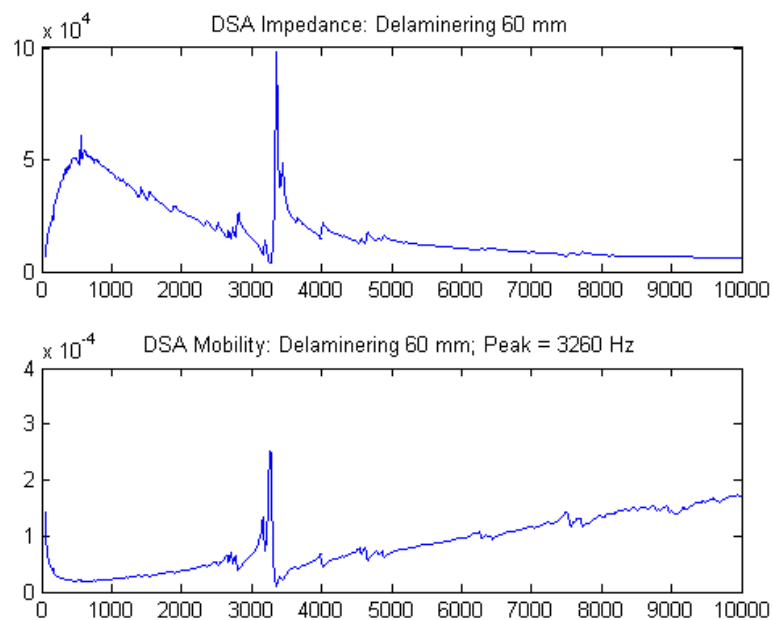
Bilagan innehåller följande bilder:

Figur 1-8 Impedans och mobilitet för delamineringsdjupen 40-180 mm.

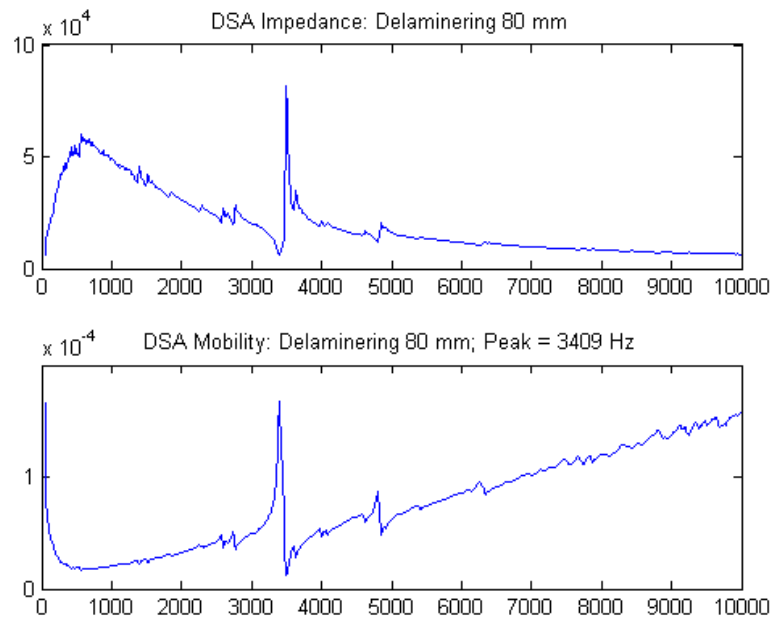
Figur 9. Impedansens magnitud och fasfunktion för solid betong



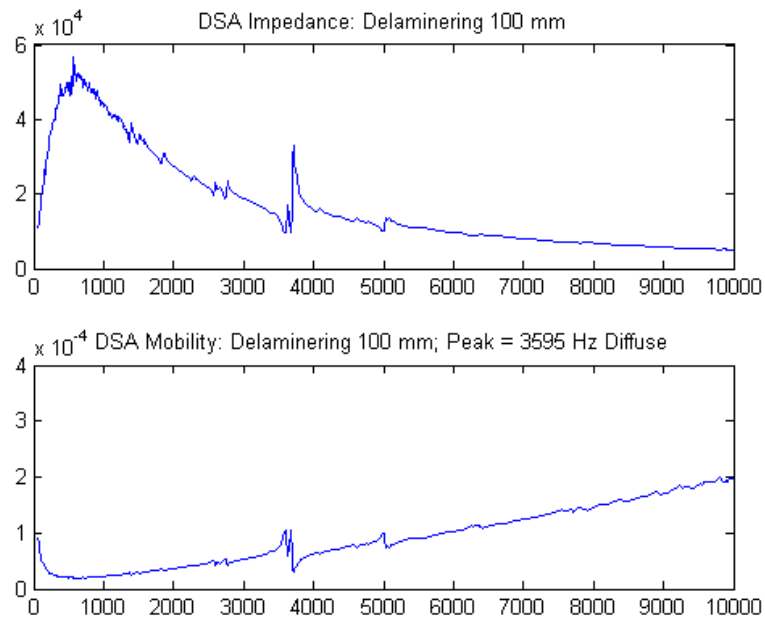
Figur 1. *Delaminering djup 40 mm, tydligt impedansminimum / resonansfrekvens/mobilitetsmaximum*



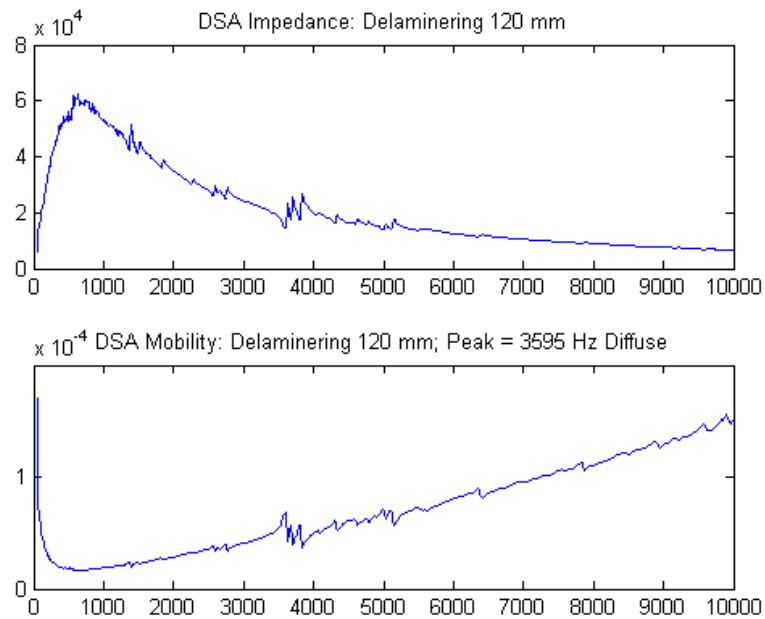
Figur 2. *Delaminering djup 60 mm, tydligt impedansminimum / resonansfrekvens/mobilitetsmaximum*



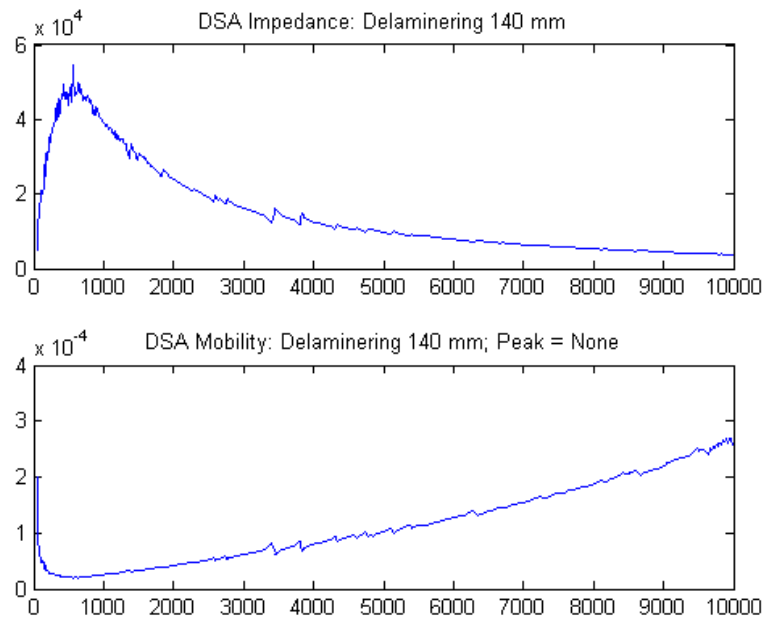
Figur 3. *Delaminering djup 80 mm, tydligt impedansminimum / resonansfrekvens/mobilitetsmaximum*



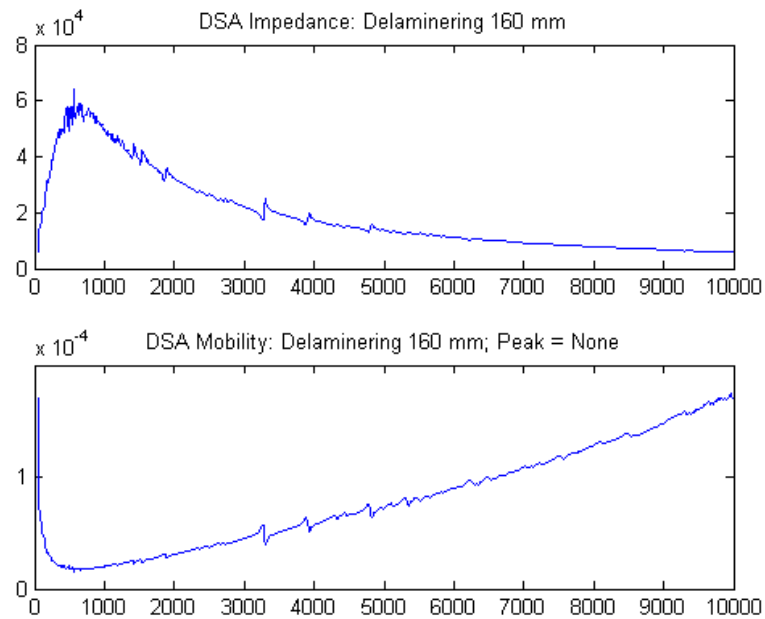
Figur 4. *Delaminering djup 100 mm, impedansminimum inte längre tydligt*



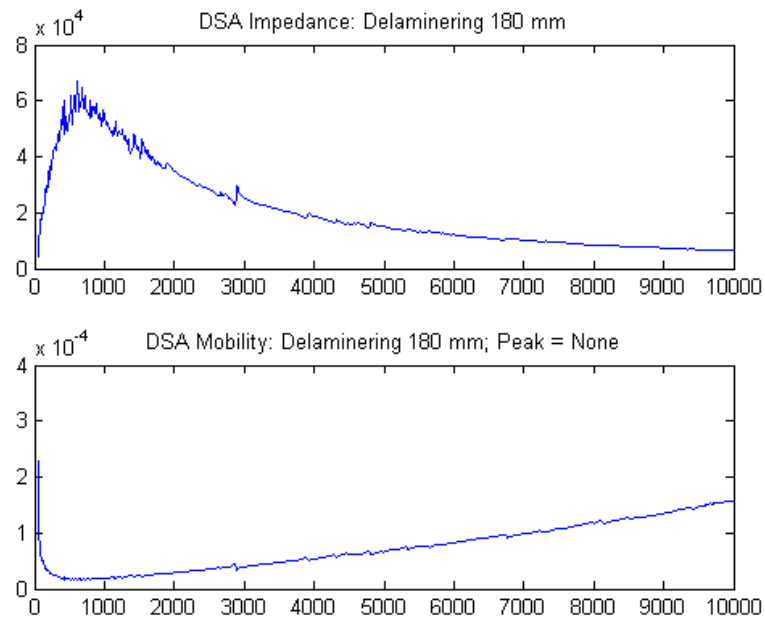
Figur 5. *Delaminering djup 120 mm, lokalt impedansminimum skönjbart, liksom mobilitetsmaximum*



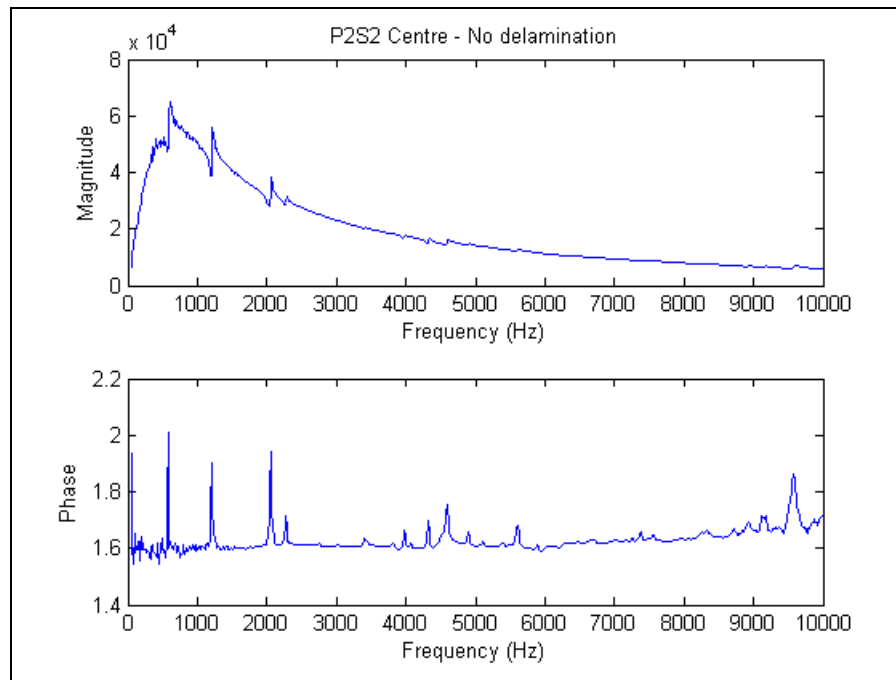
Figur 6. *Delaminering djup 140 mm, impedansminimum/mobilitets-maximum saknas*



Figur 7. *Delaminering djup 160 mm, impedansminimum/mobilitets-maximum saknas*



Figur 8. *Delaminering djup 180 mm, impedansminimum/mobilitets-maximum saknas*



Figur 9. Referensmätning i centrum av provyta P2s2 utan delaminering

BILAGA 2

Försök med hammare och fristående
accelerometer och mikrofon



Hammarslag mot delaminerad betongyta. Tre hammartyper använda: liten (L), mellan (M) och stor (S), alla med inbyggd kraftgivare.

Delamineringarna ligger parvis i de två provkropparna P1 och P2, vilka har vardera två sidor s1 och s2 från vilka de sammanlagt fyra delamineringsimulerande frigolitskivorna nås på olika djup.

P1s1: 160, 40 mm delamineringsdjup
P1s2: 60, 180 mm delamineringsdjup

P2s1: 140, 100 mm delamineringsdjup
P2s2: 80, 120 mm delamineringsdjup

De två provkropparna erbjuder därför en serie delamineringsdjup med 20 mm intervall, nämligen 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160 och 180 mm, vilka alla testades

Mätdata har digitaliserats med omvandlingshastigheten 100 kSa/s och med upplösningen 16 bitar.

Innehåll

Figur 1,3,5: 40 mm djup delaminering med L, M, S

Figur 2,4,6: Referensmätningar mot solid betong med de tre hammartyperna.

Figur 7,8,9: 60 mm djup delaminering med L, M, S

Figur 10: Slag med S mot 60 mm delaminering. Referensmätning på lastpallen som bär betongprovkropparna. Accelerometern flyttad till virket i lastpallen. Lastpallen verkar ha resonansfrekvenser vid 900 och 1100 Hz, vilket ligger under de resonansfrekvenser vi förväntar oss hos de delaminerade skikten i betongen. Alltså inverkar inte lastpallen negativt på mätningarna.

Figur 11,12,13: 80 mm djup delaminering med L, M, S hammare

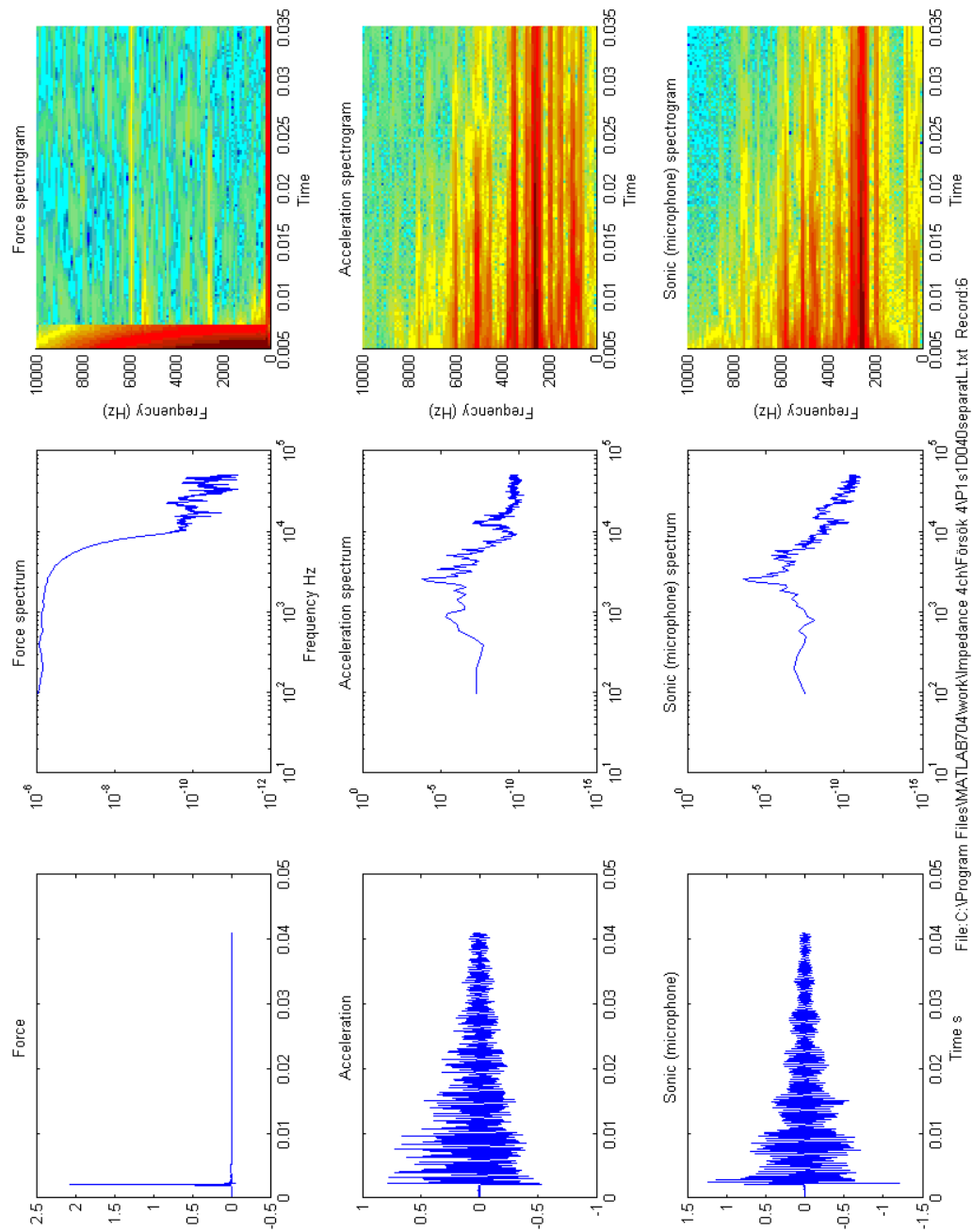
Figur 14,15,16: 100 mm djup delaminering med L, M, S hammare

Figur 17, 18, 19: 120 mm djup delaminering med L, M, S hammare

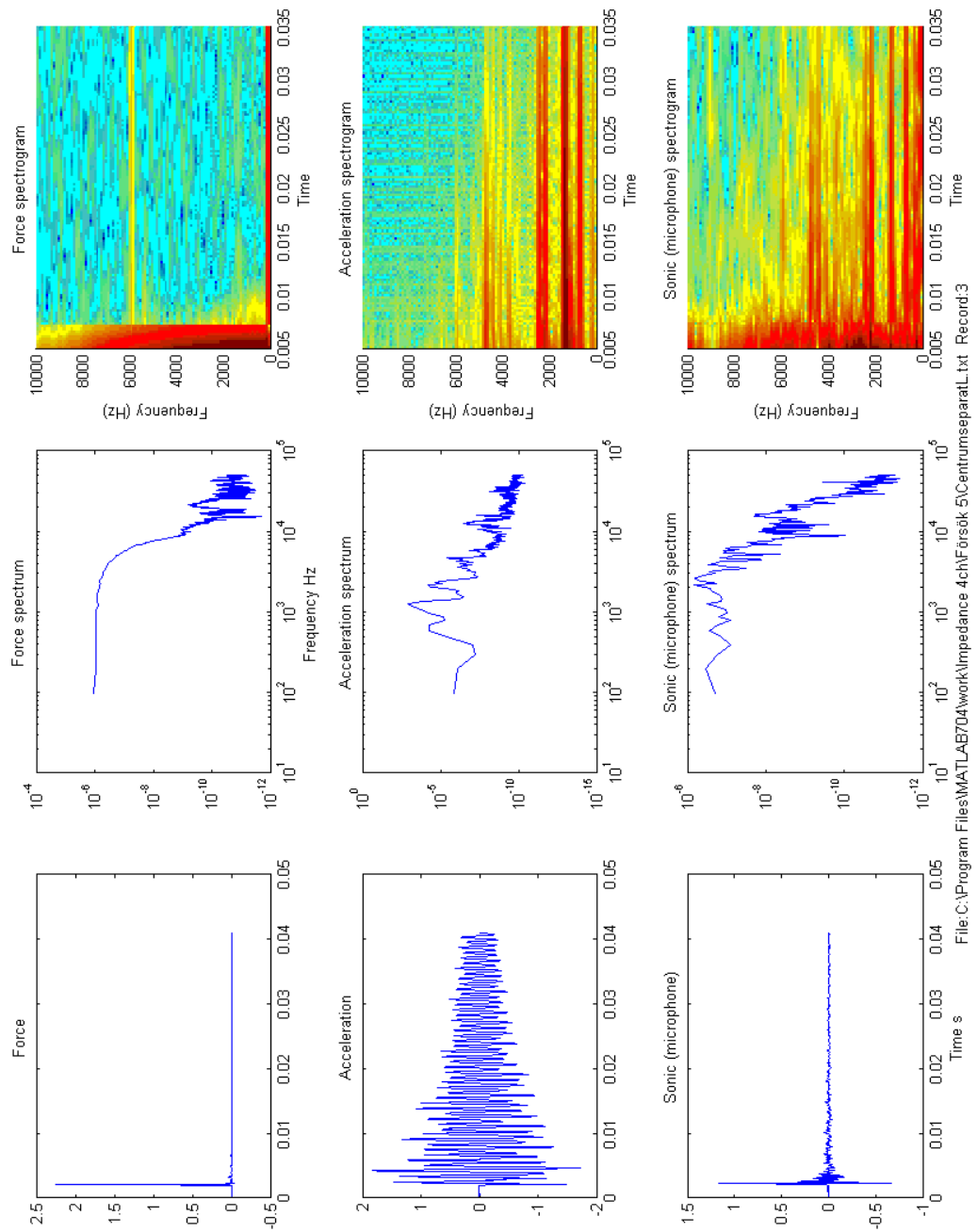
Figur 20, 21, 22: 140 mm djup delaminering med L, M, S hammare

Figur 23, 24, 25: 160 mm djup delaminering med L, M, S hammare

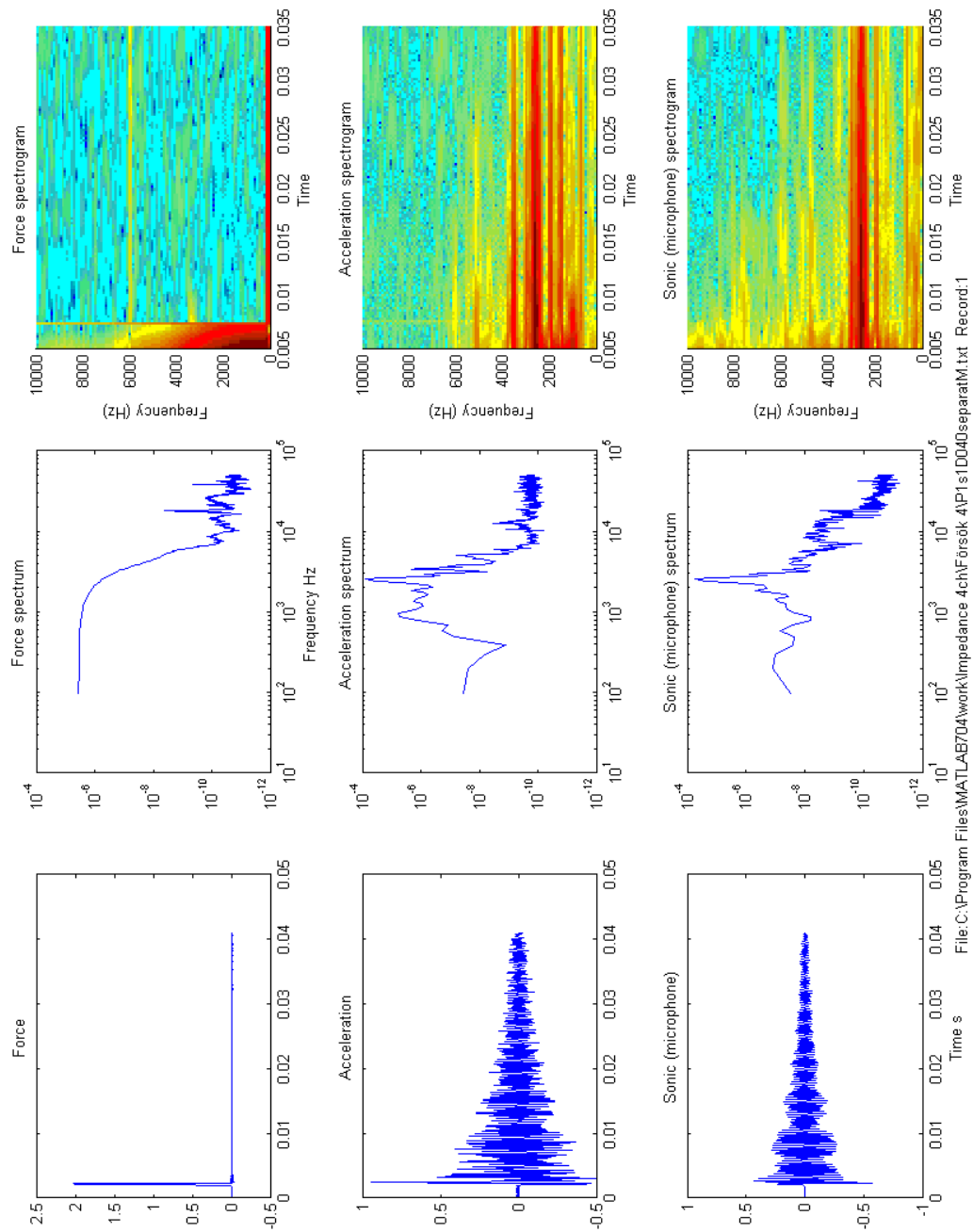
Figur 26, 27, 28: 180 mm djup delaminering med L, M, S hammare



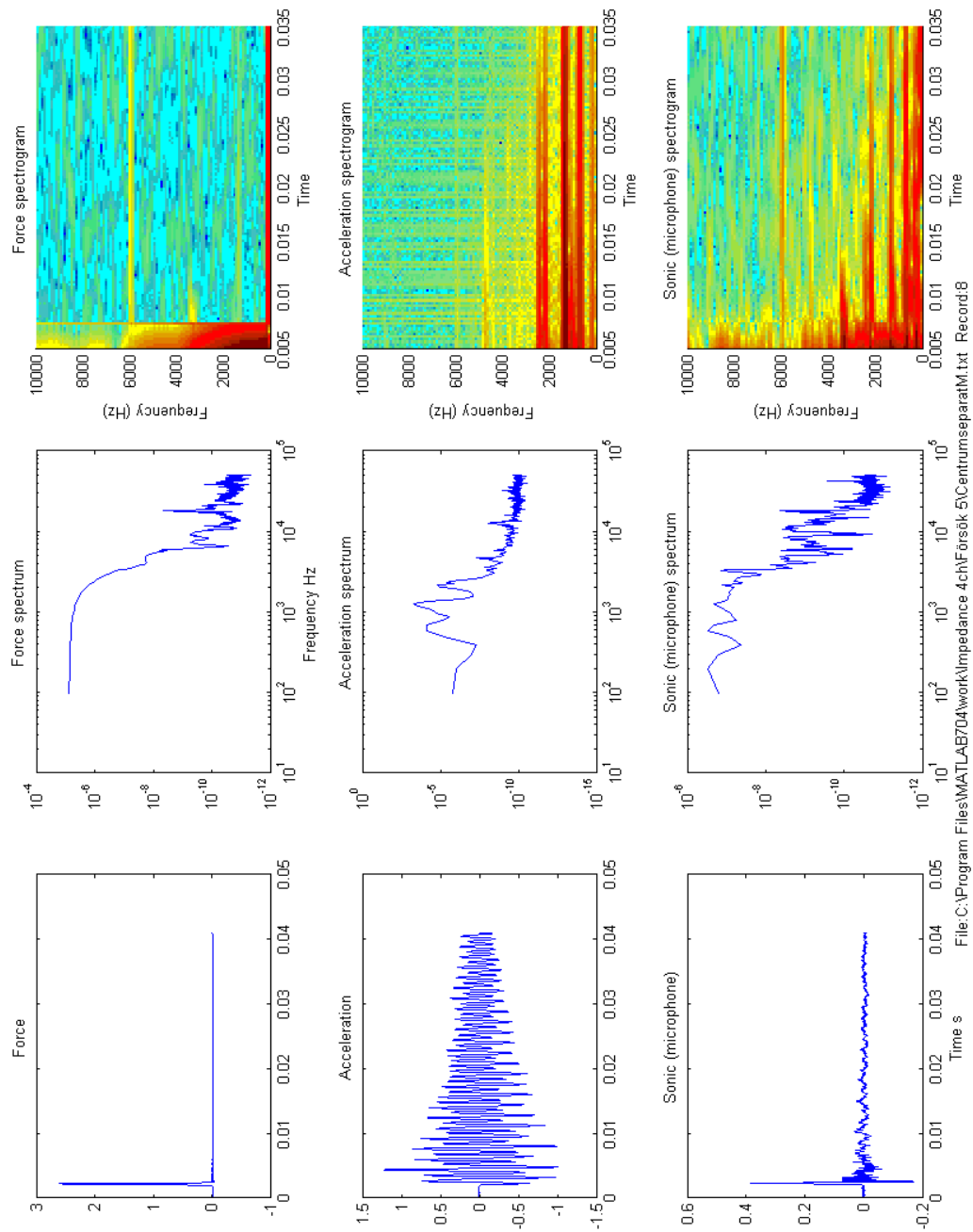
Figur 1. Slag med liten hammare mot delaminering på 40 mm djup



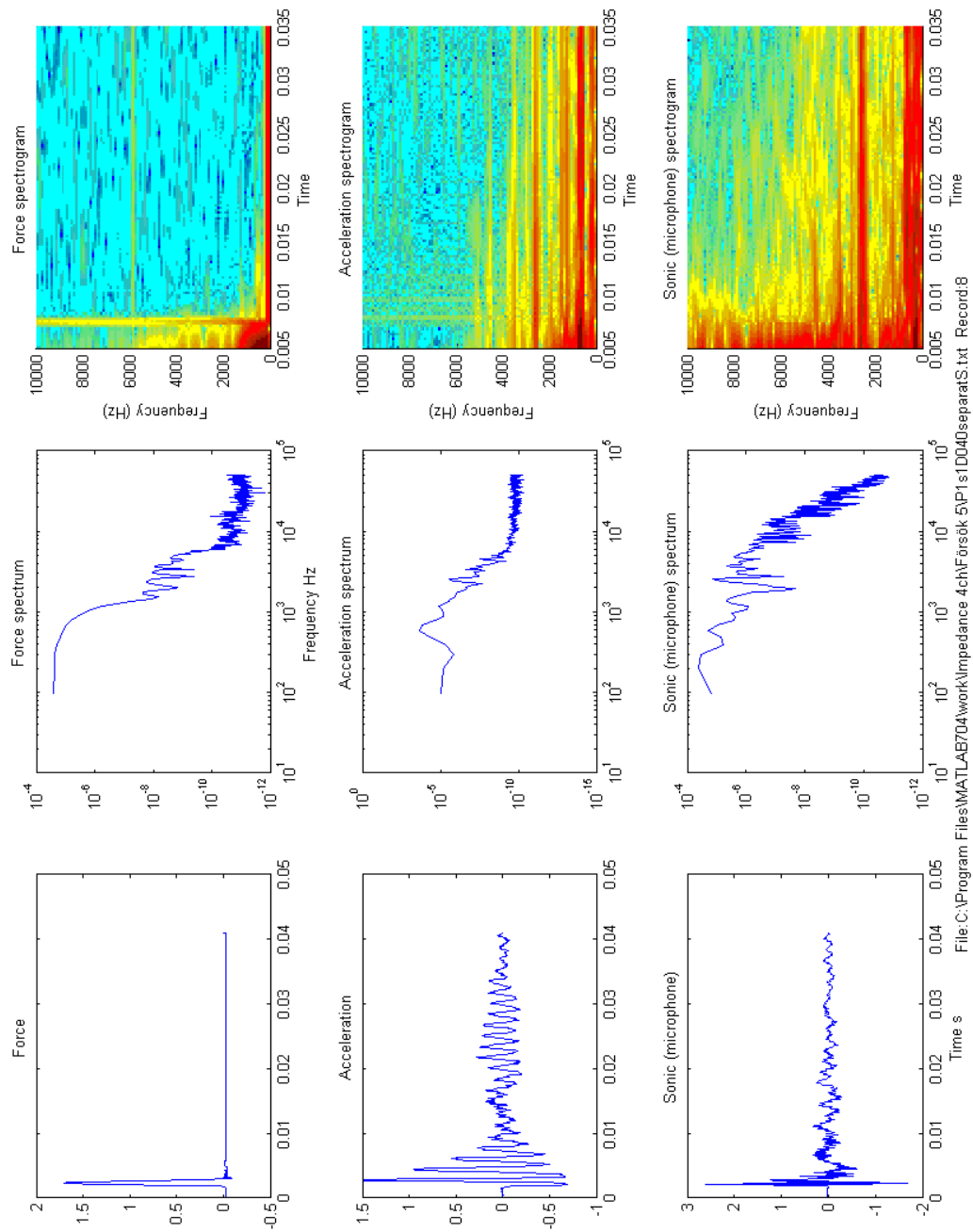
Figur 2. Slag med liten hammare mot solid betong



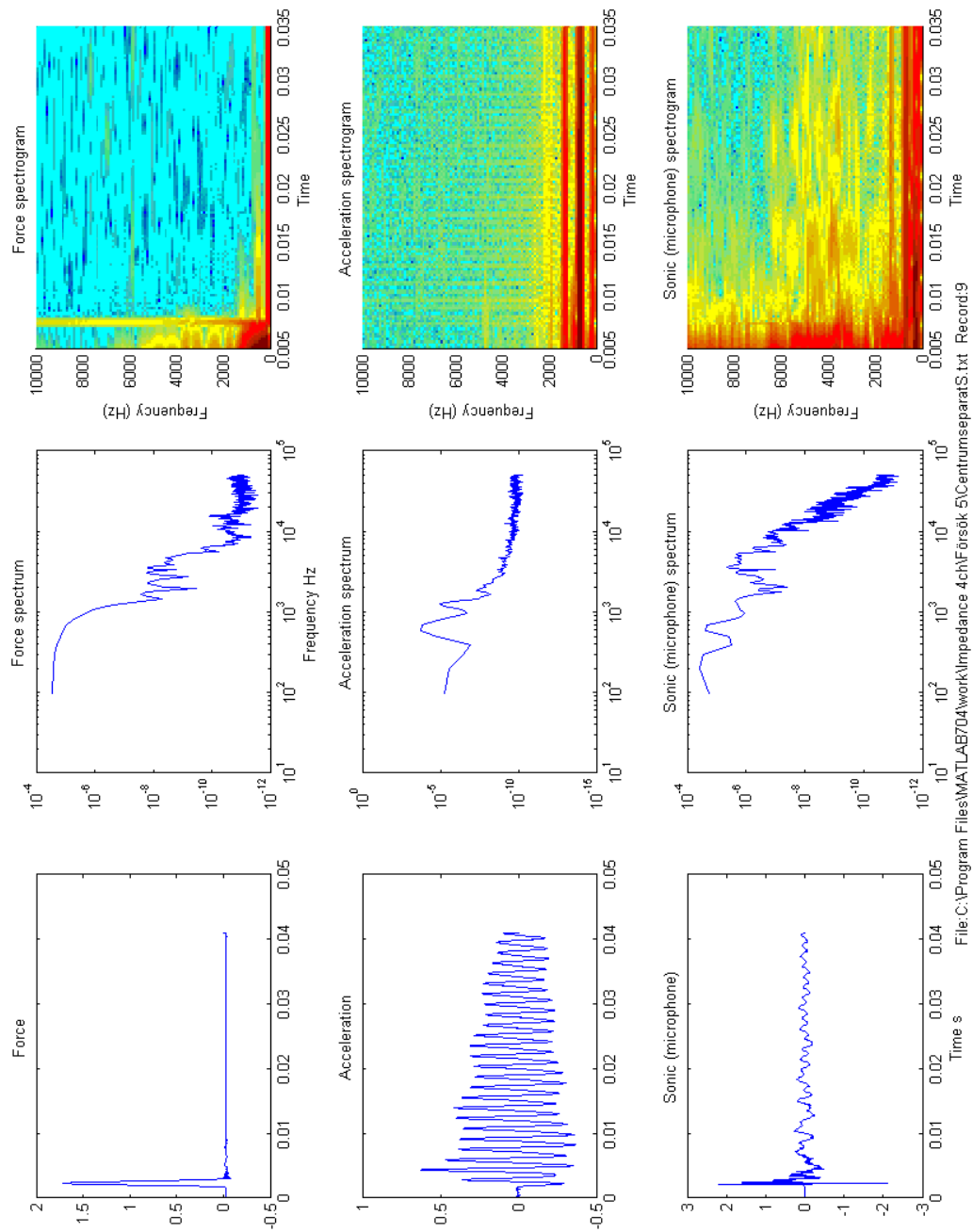
Figur 3. Slag med mellanstor hammare mot delaminering på 40 mm djup



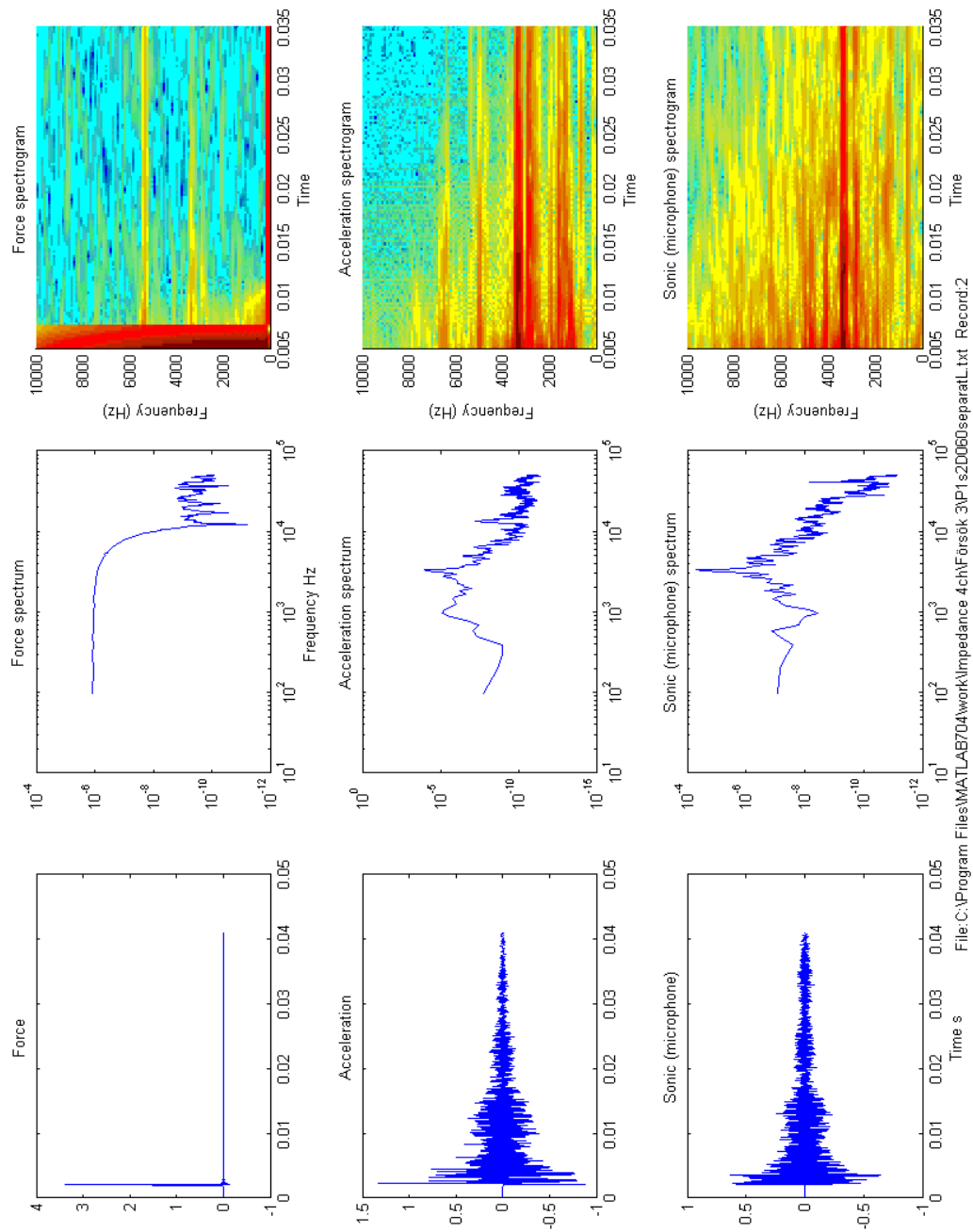
Figur 4. Slag med mellanstor hammare mot solid betong



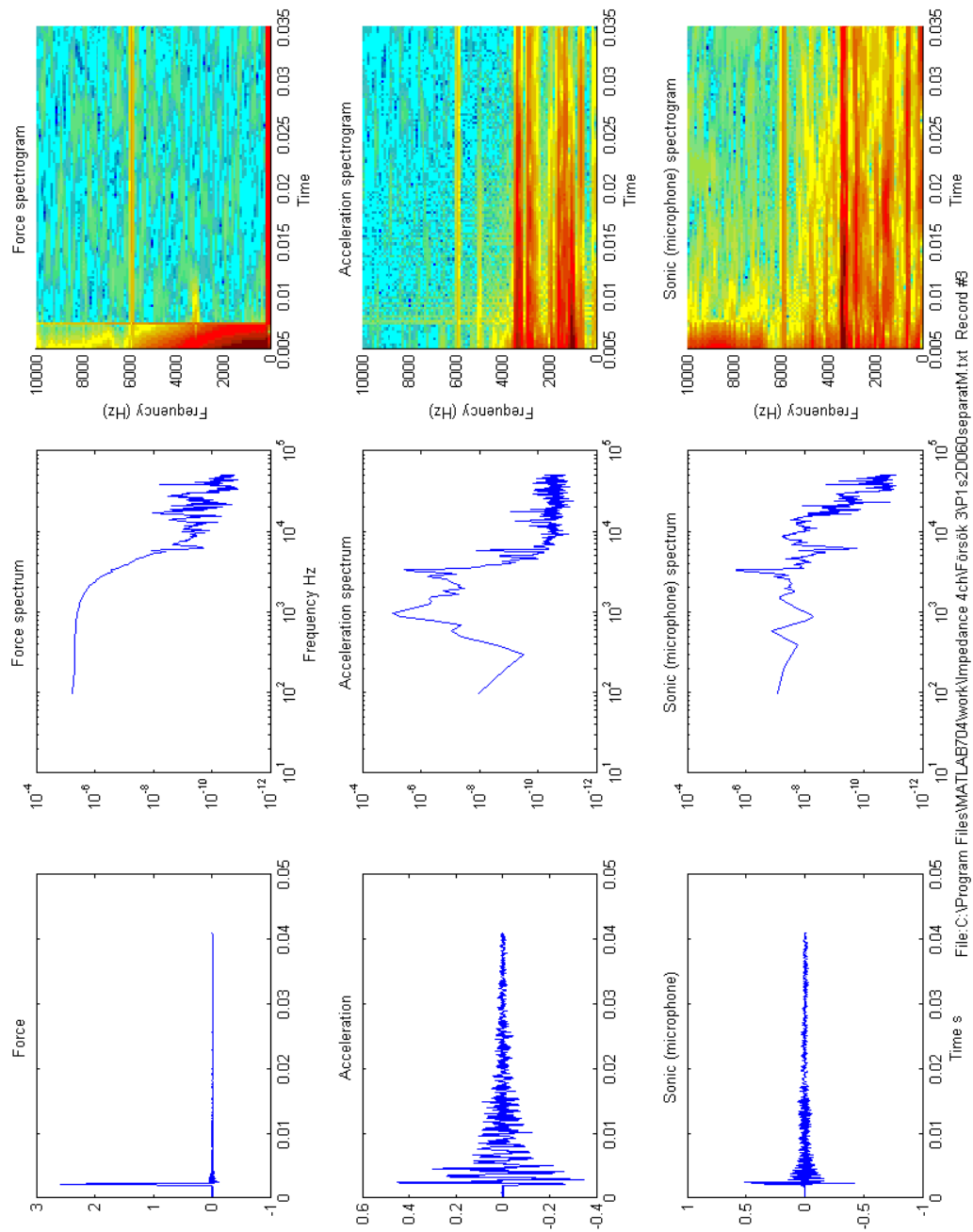
Figur 5. Slag med stor hammare mot delaminering på 40 mm djup



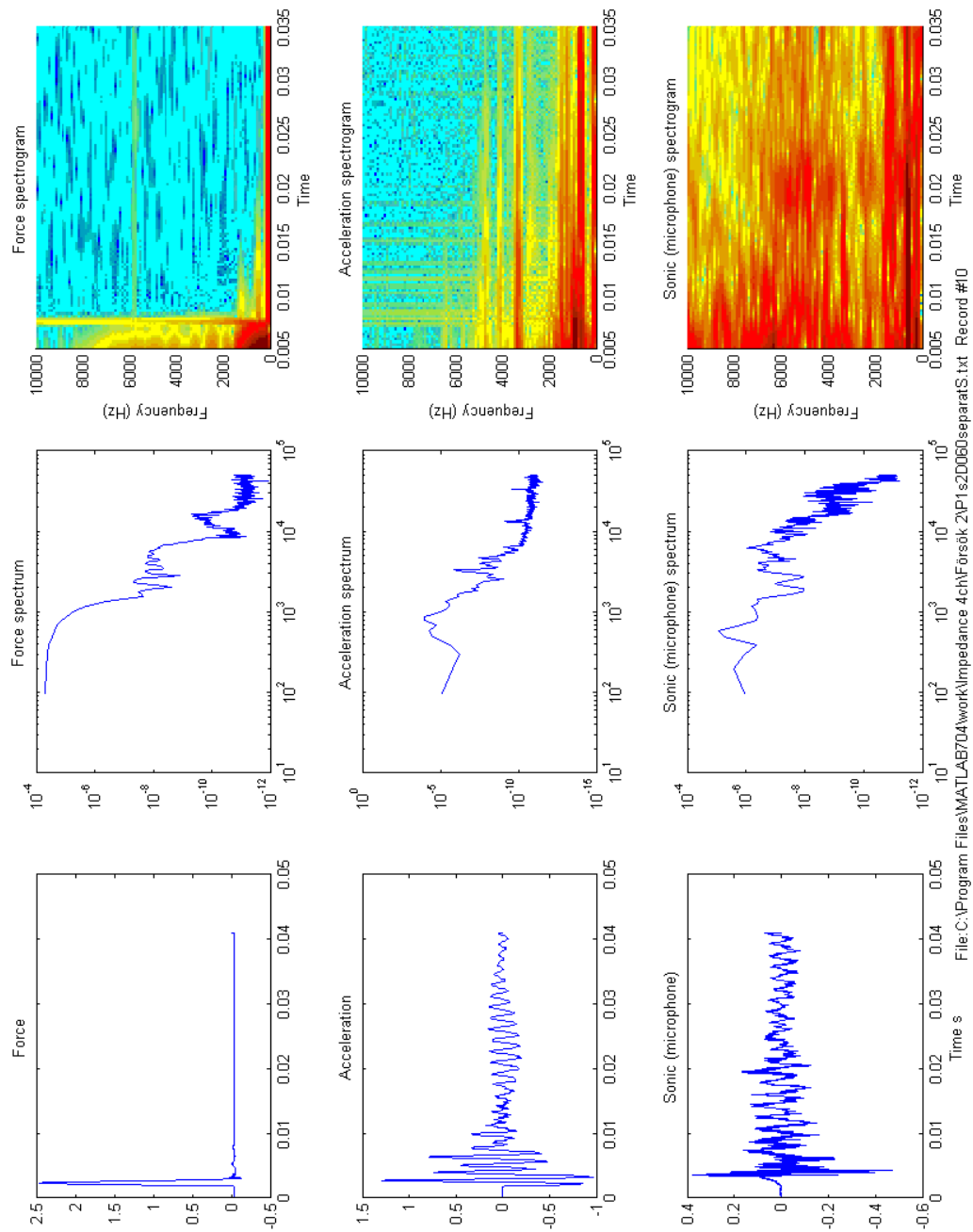
Figur 6. Slag med stor hammare mot solid betong



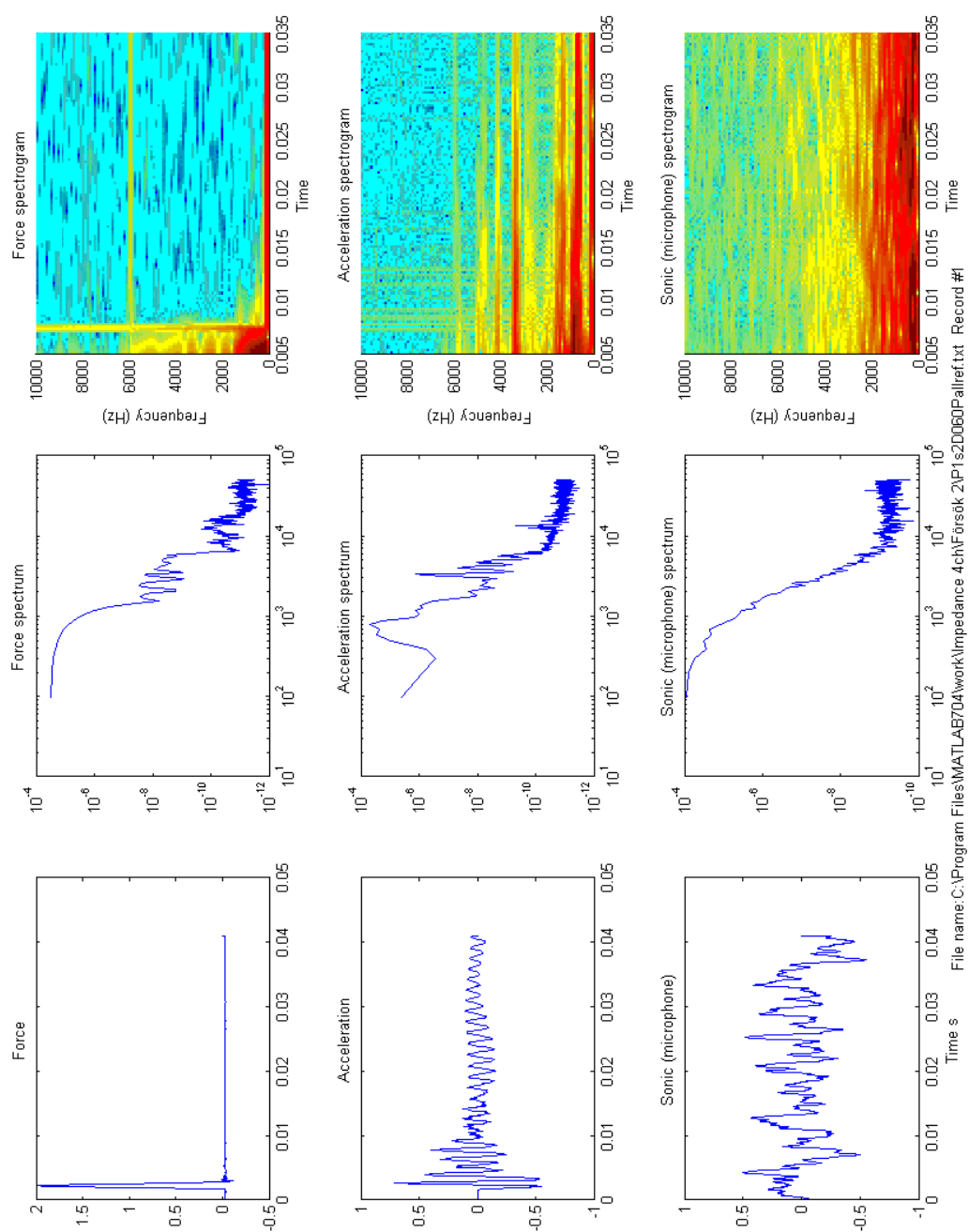
Figur 7. Slag med liten hammare mot delaminering på 60 mm djup



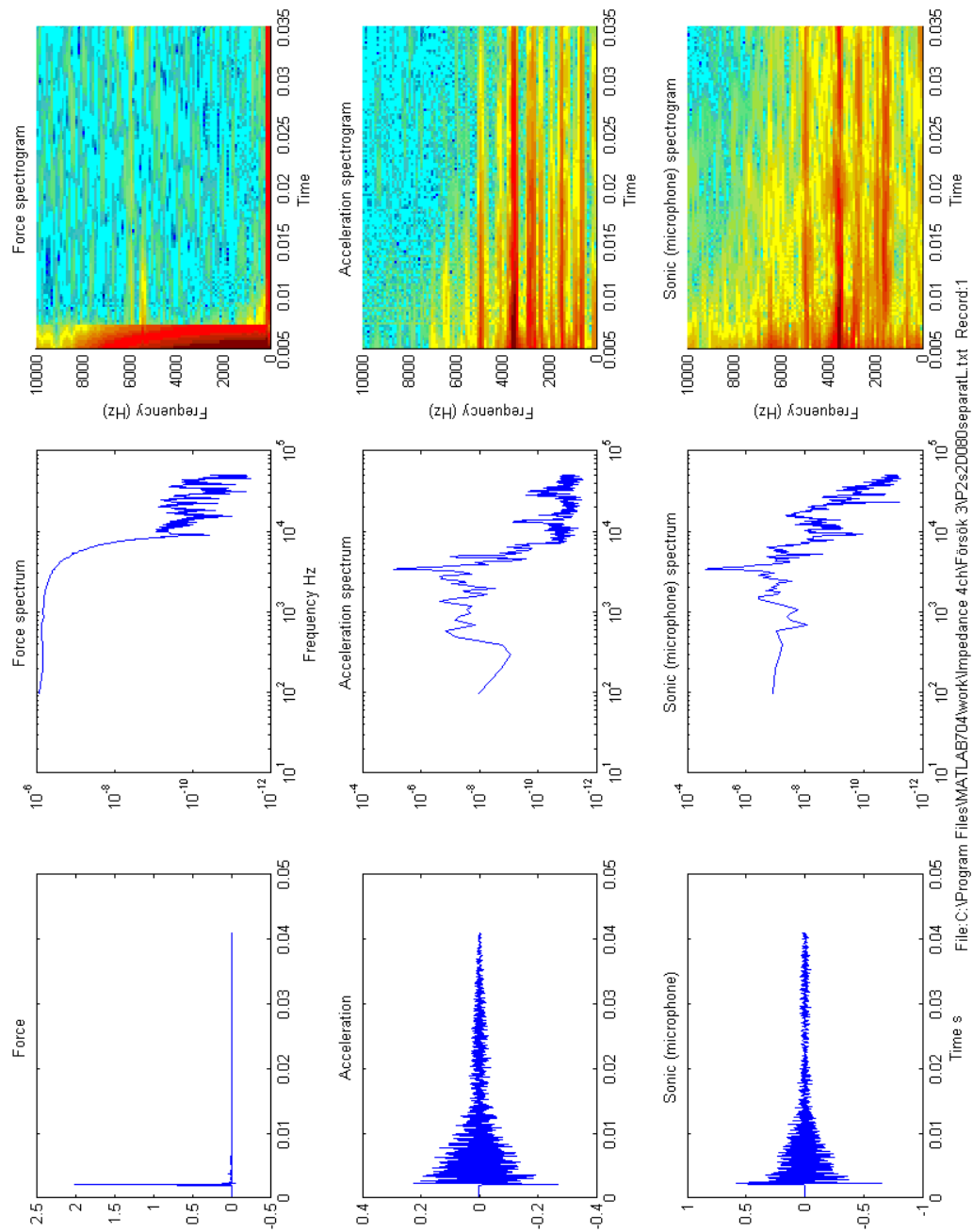
Figur 8, Slag med mellanstor hammare mot delaminering på 60 mm djup



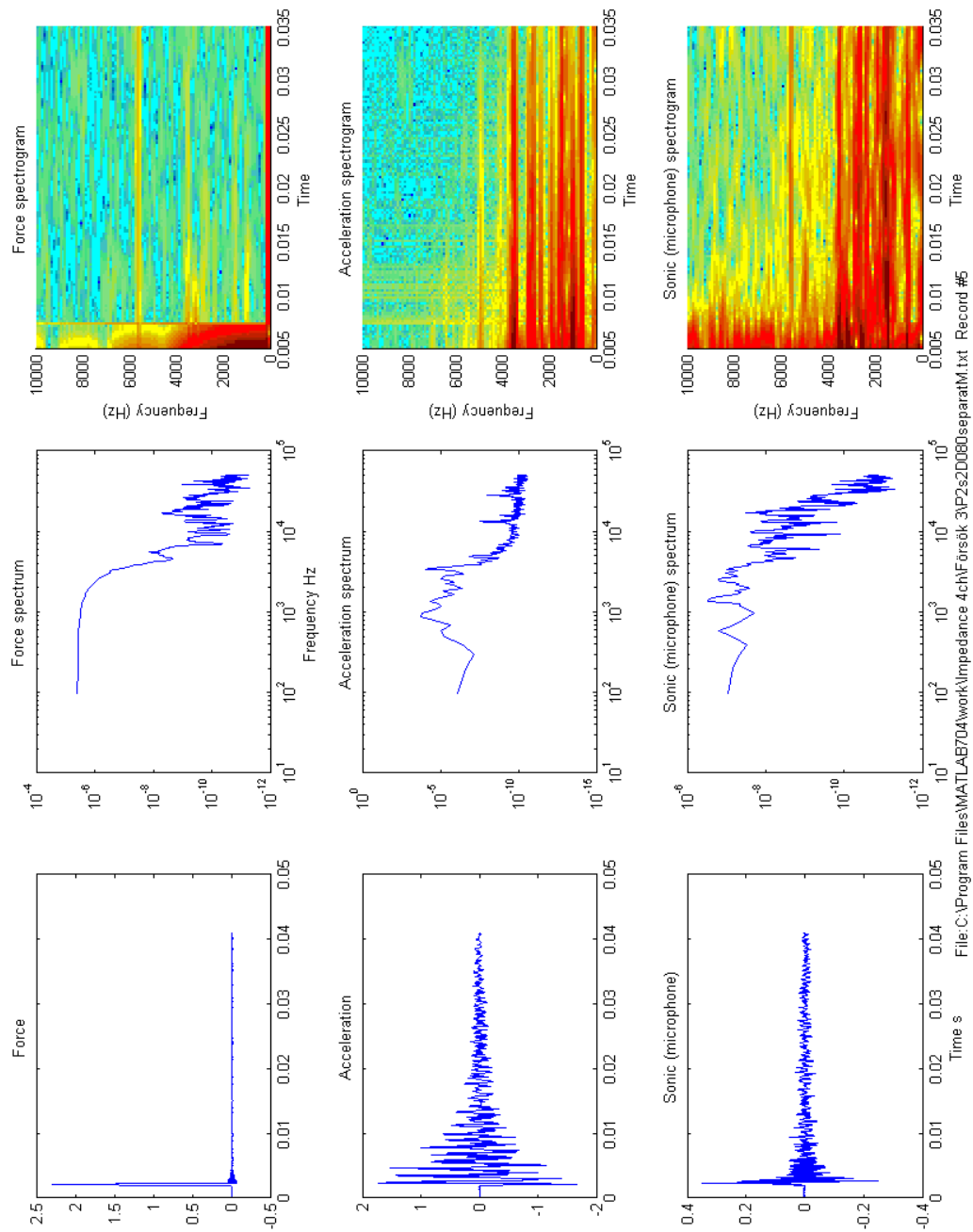
Figur 9. Slag med stor hammare mot delaminering på 60 mm djup



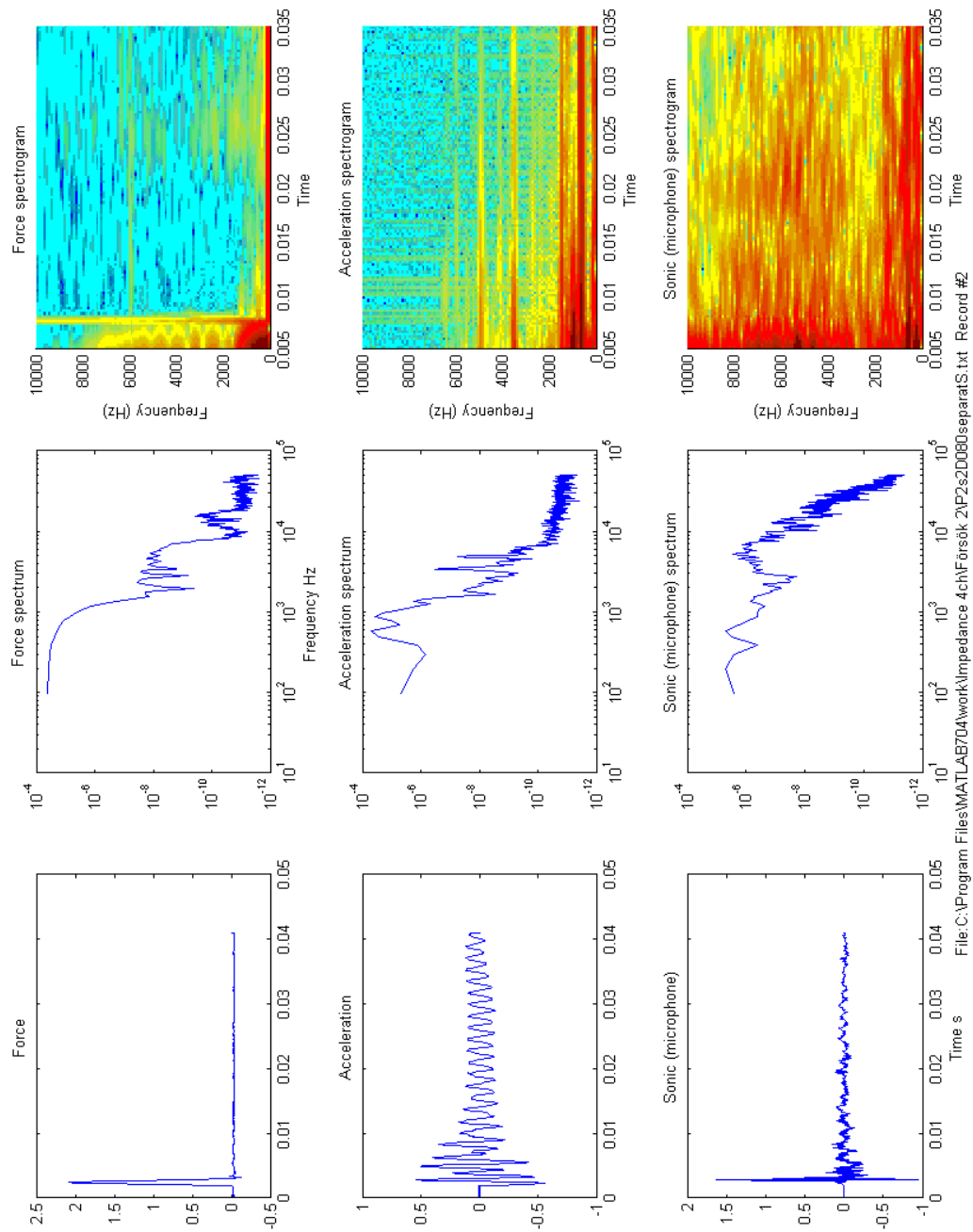
Figur 10. Slag med stor hammare mot delaminerad betong på 60 mm djup.
Accelerometern placerad på lastpallens träkonstruktion.



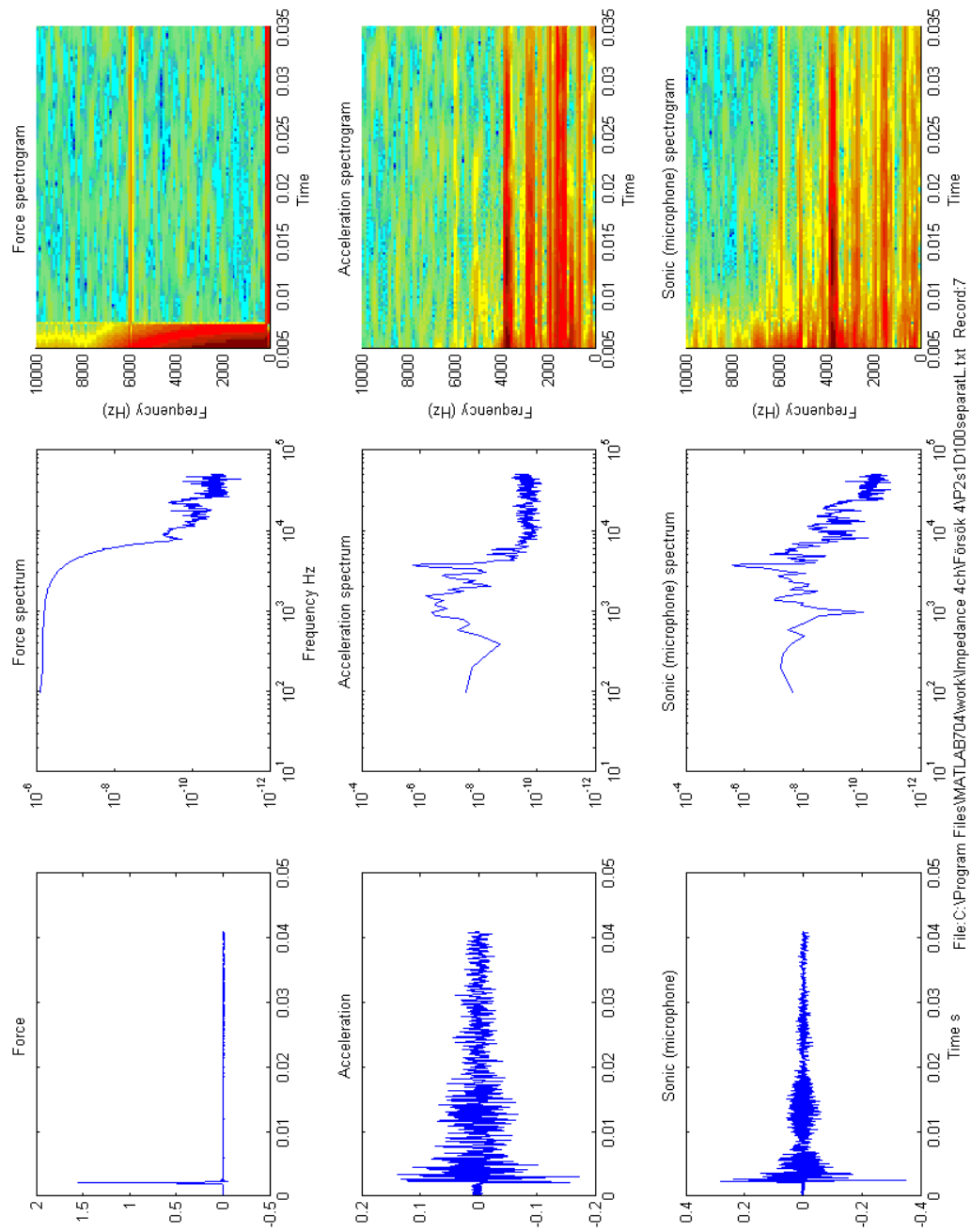
Figur 11. Slag med liten hammare mot delaminering på 80 mm djup



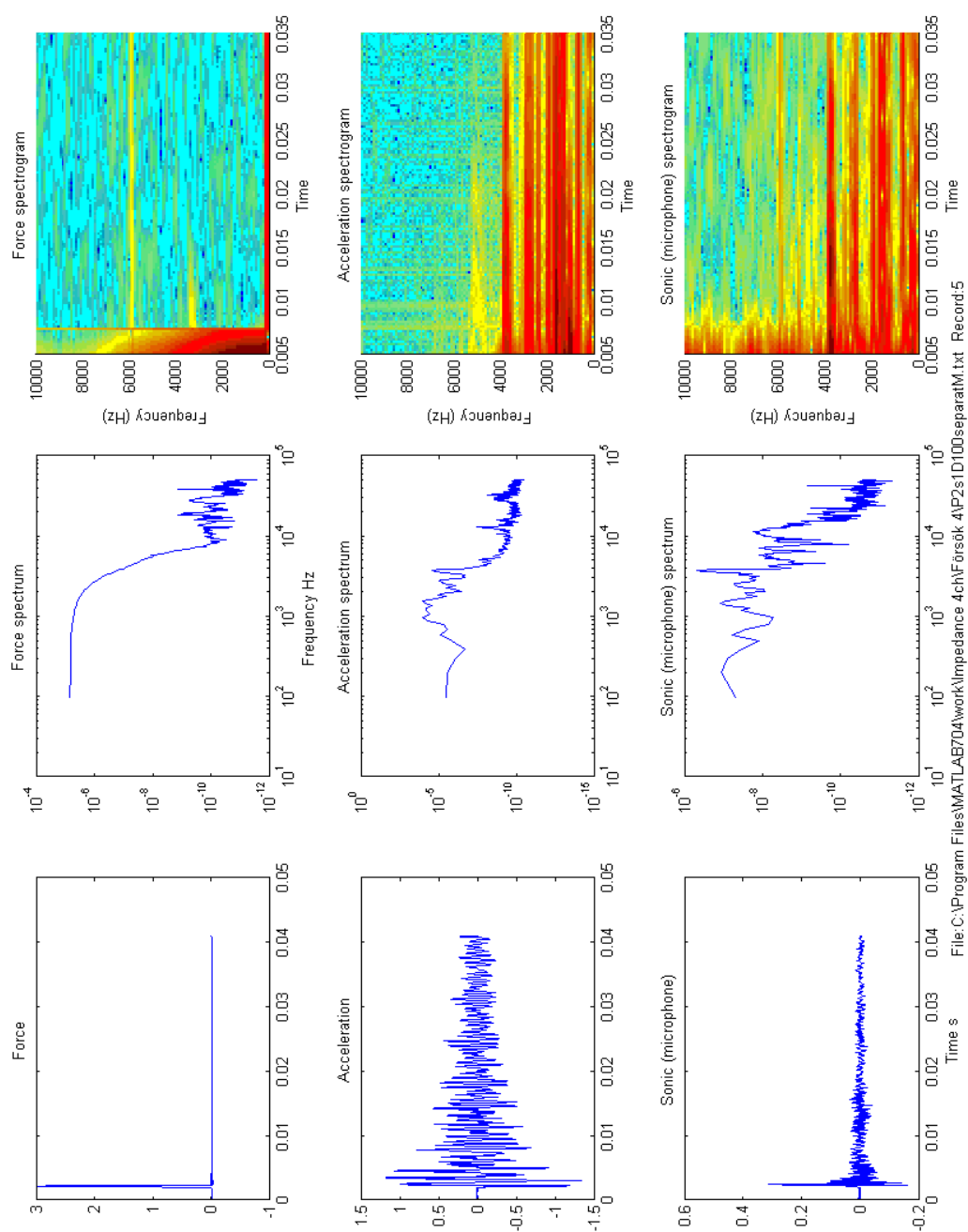
Figur 12. Slag med mellanstor hammare mot delaminering på 80 mm djup



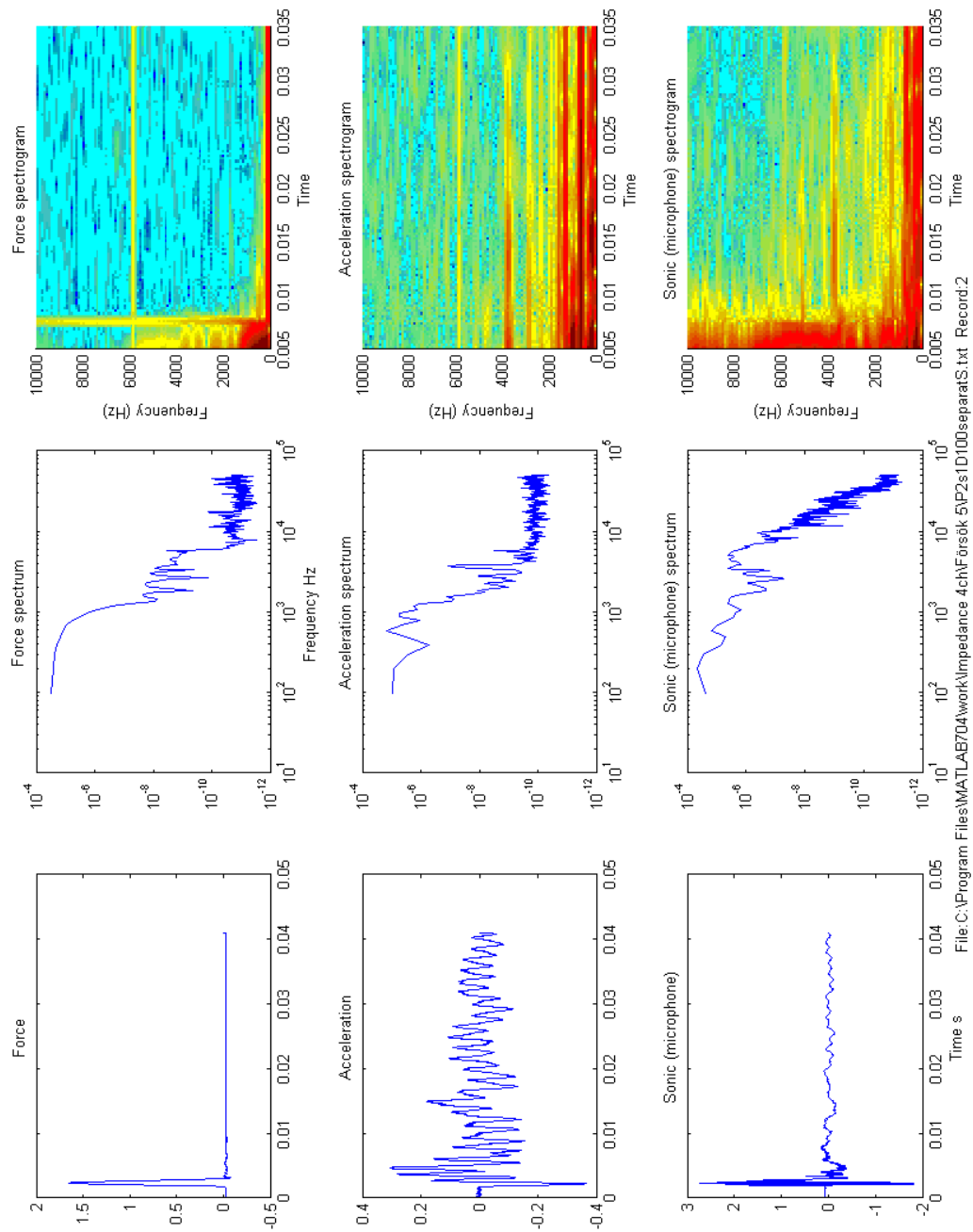
Figur 13. Slag med stor hammare mot delaminering på 80 mm djup



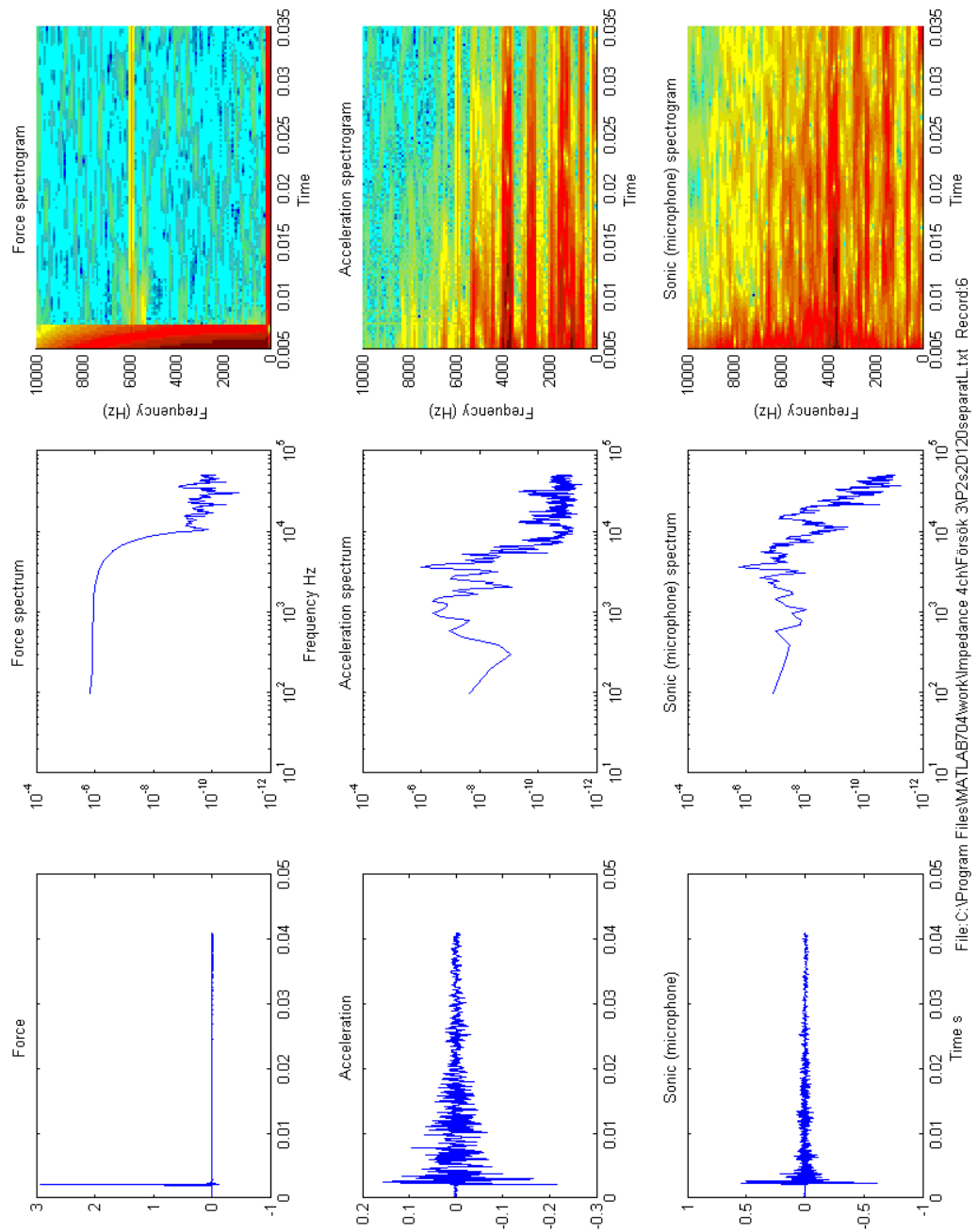
Figur 14. Slag med liten hammare mot delaminering på 100 mm djup



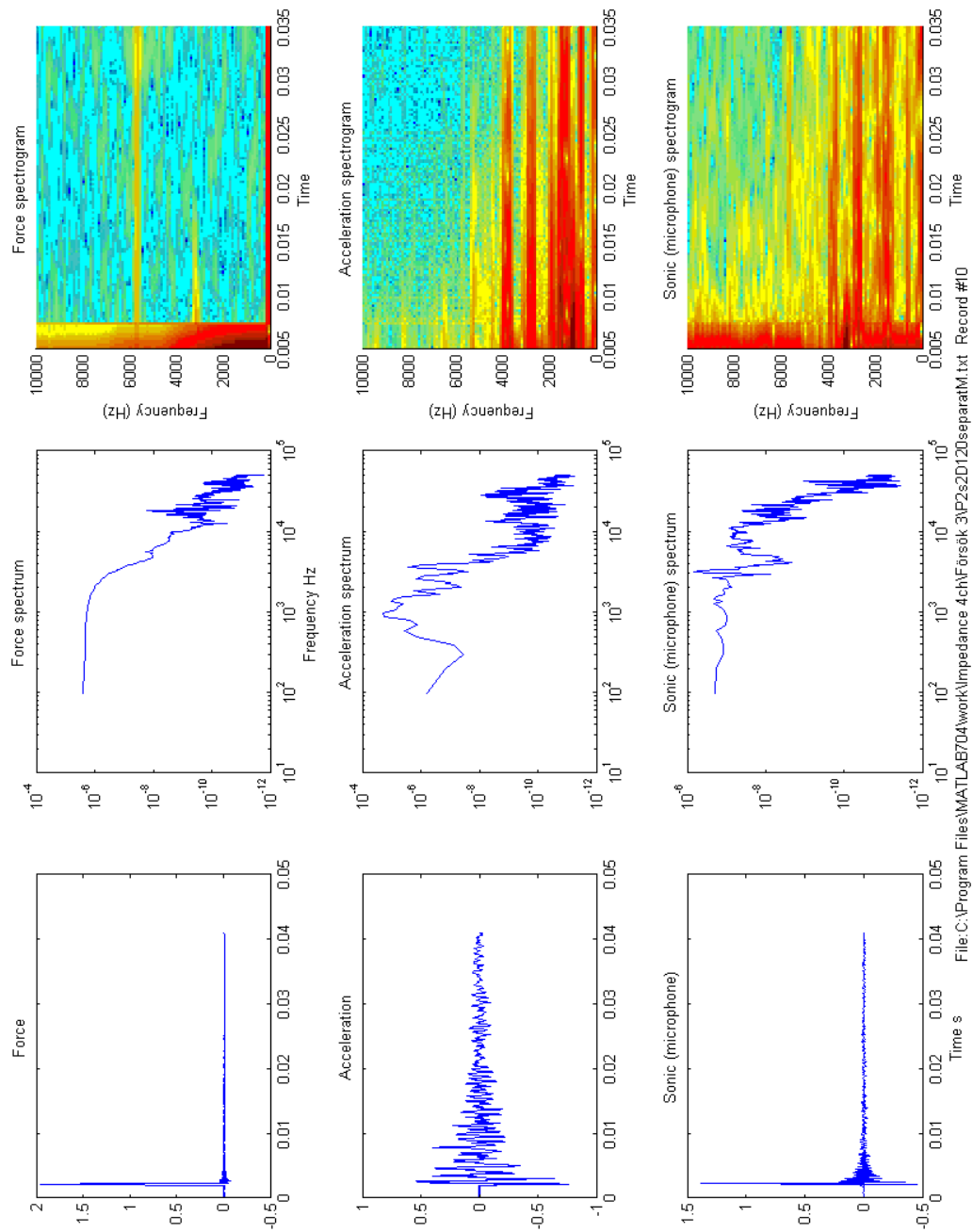
Figur 15. Slag med mellanstor hammare mot delaminering på 100 mm djup



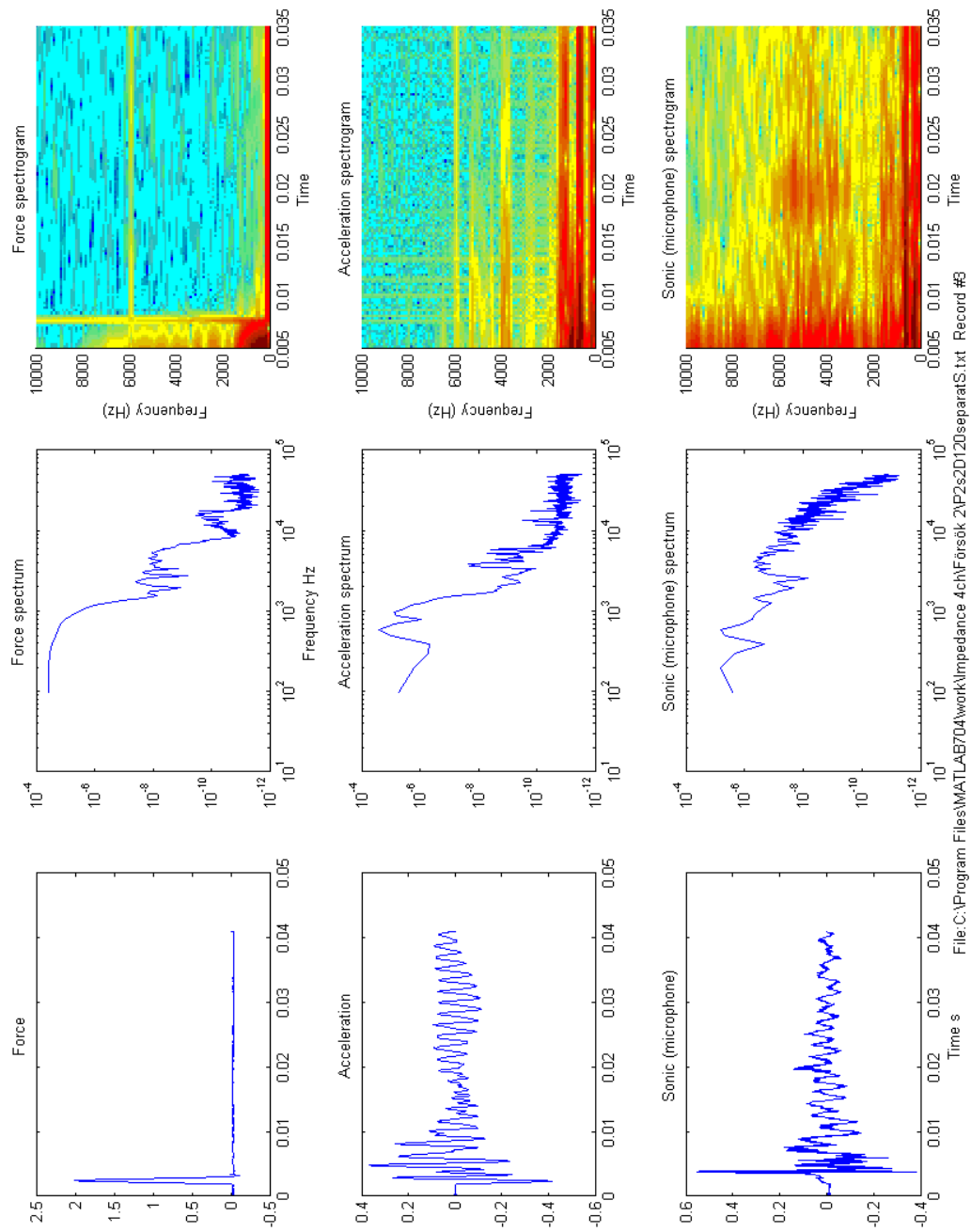
Figur 16. Slag med stor hammare mot delaminering på 100 mm djup



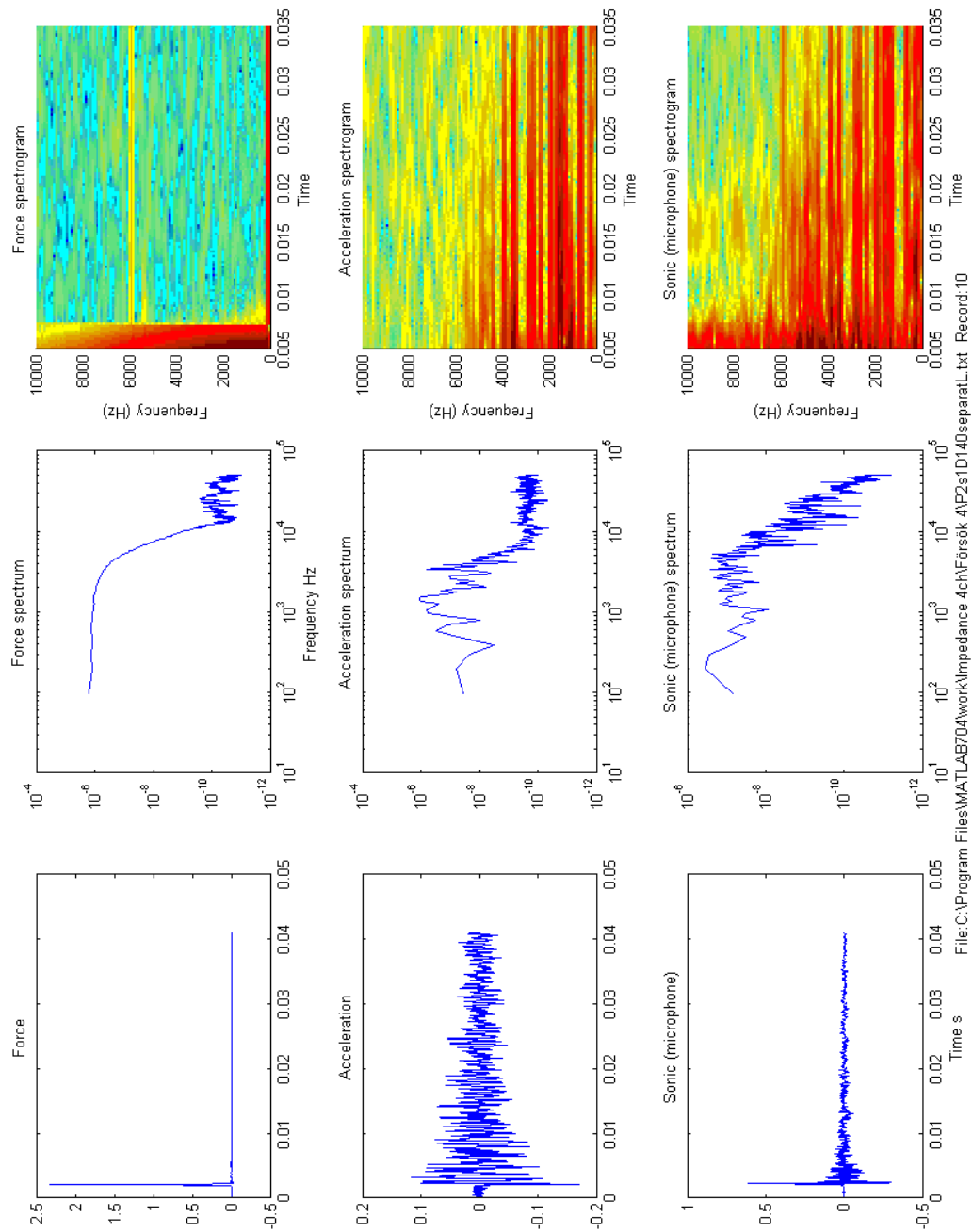
Figur 17. Slag med liten hammare mot delaminering på 120 mm djup



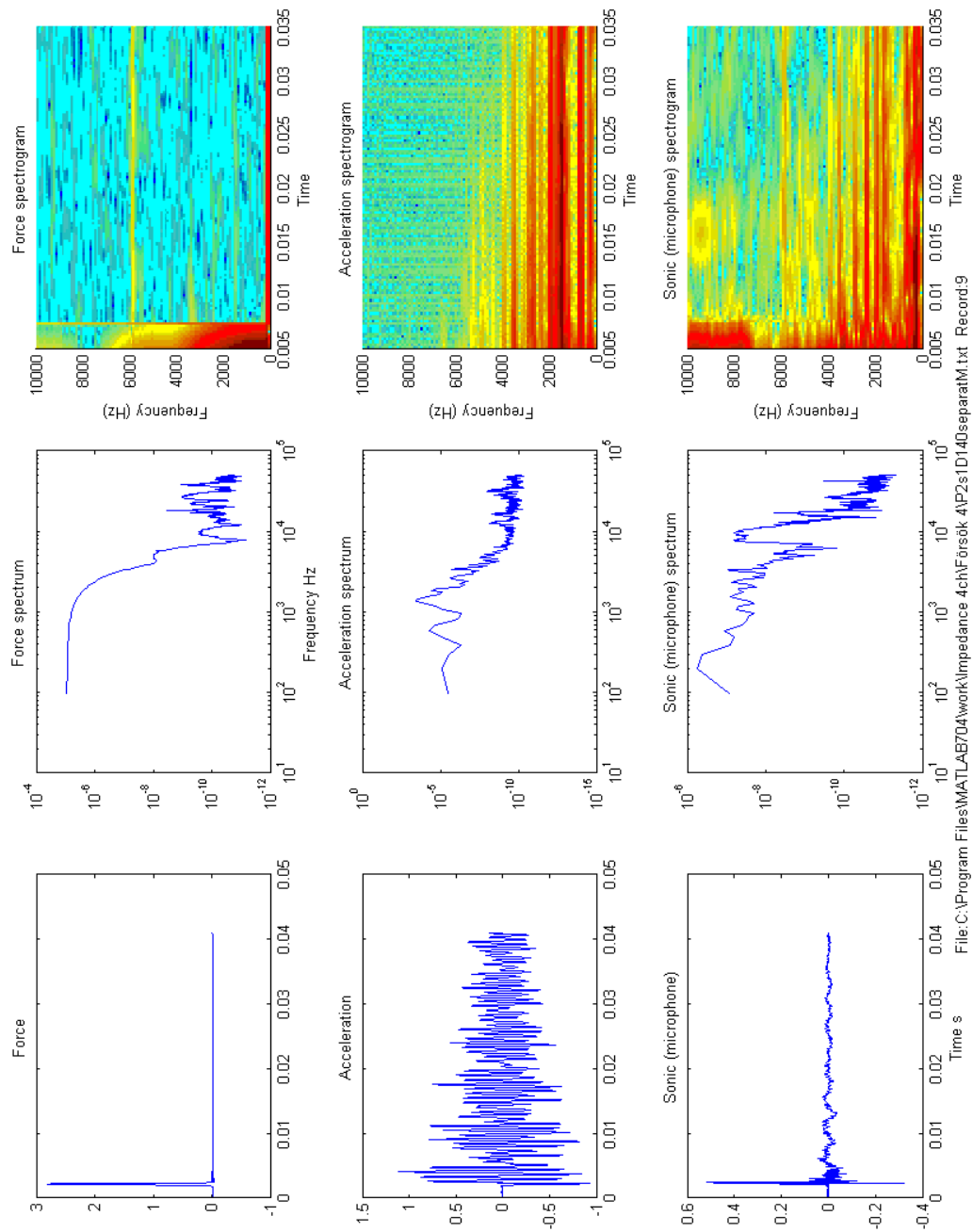
Figur 18. Slag med mellanstor hammare mot delaminering på 120 mm djup



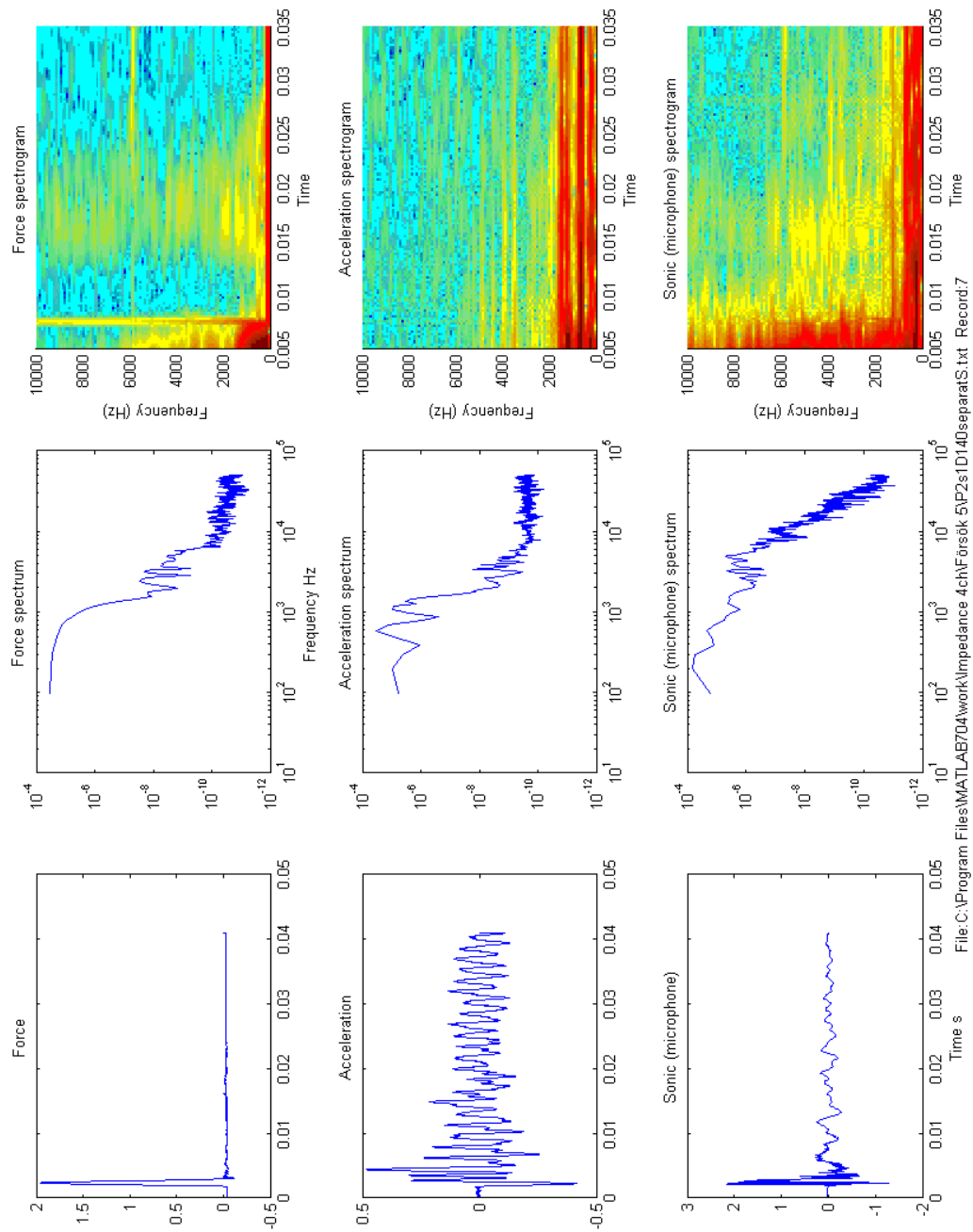
Figur 19. Slag med stor hammare mot delaminering på 120 mm djup



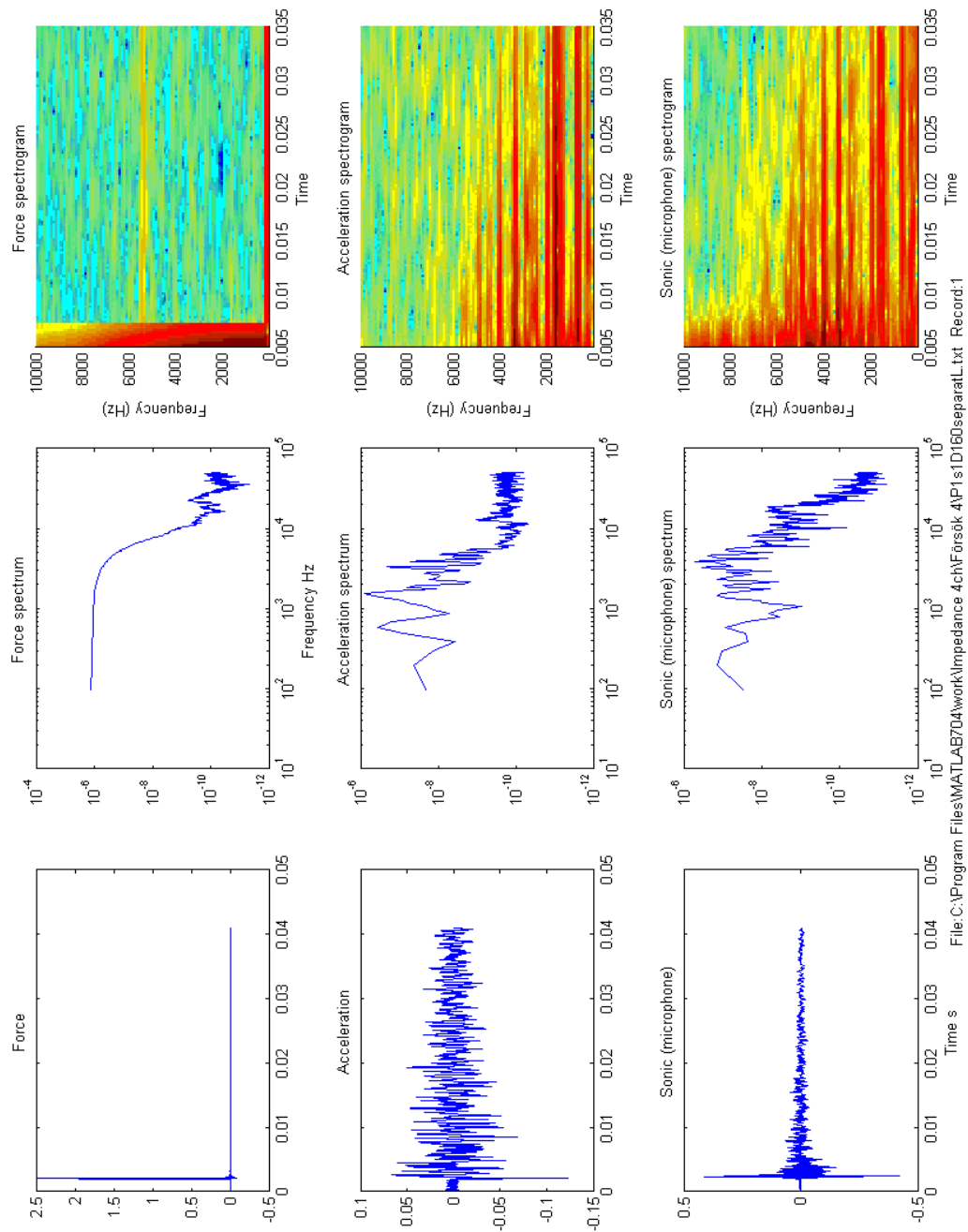
Figur 20. Slag med liten hammare mot delaminering på 140 mm djup



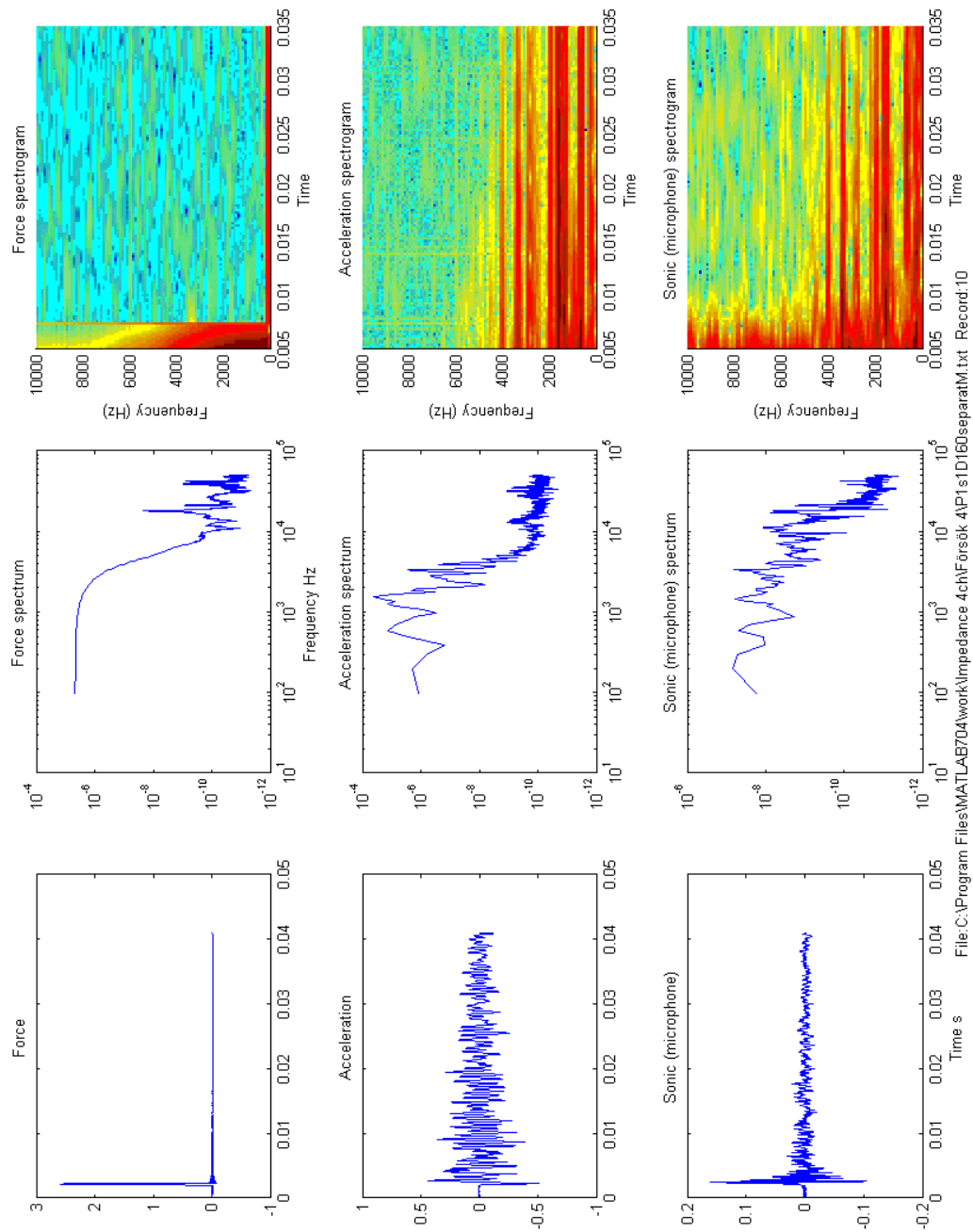
Figur 21. Slag med mellanstor hammare mot delaminering på 140 mm djup



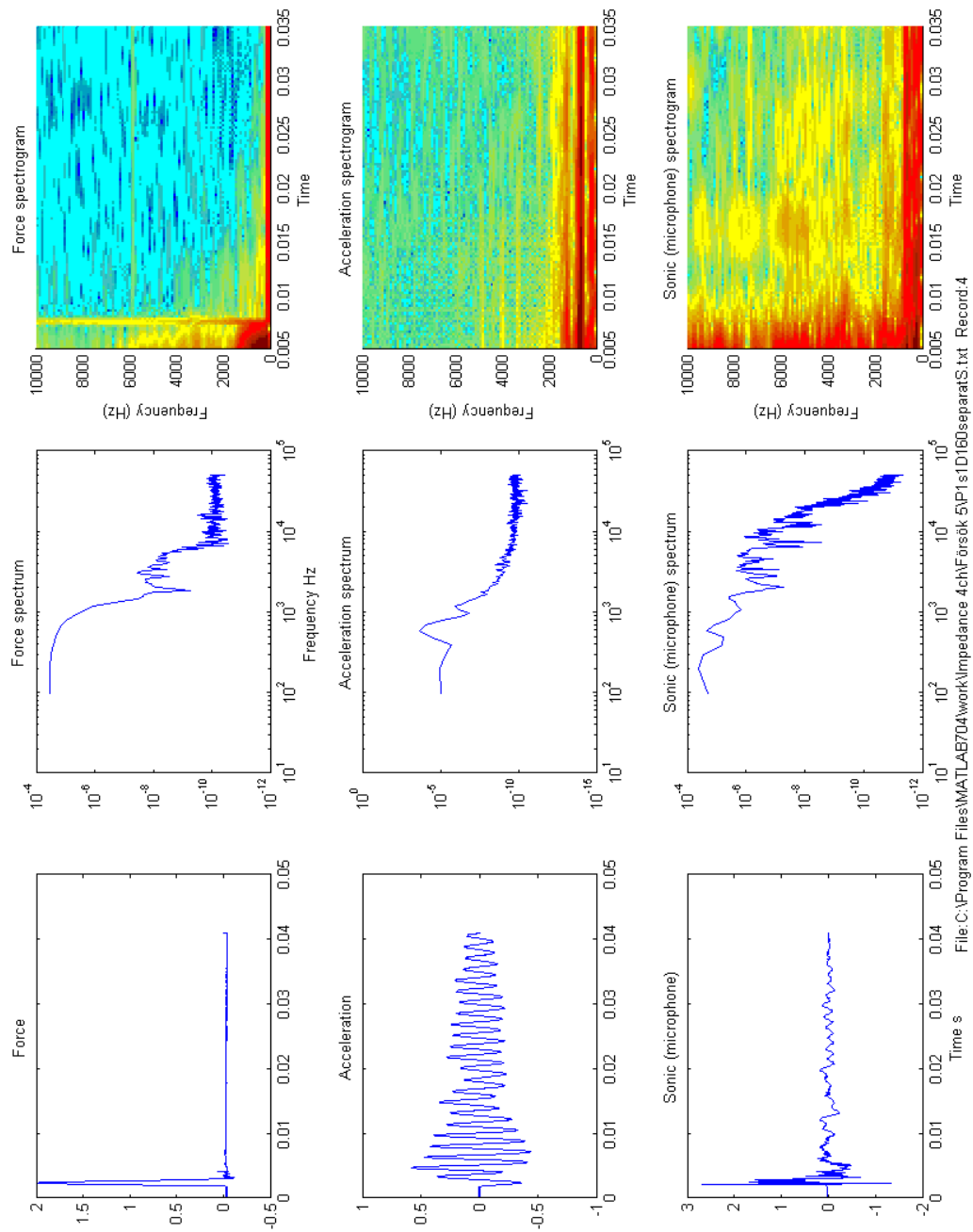
Figur 22. Slag med stor hammare mot delaminering på 140 mm djup



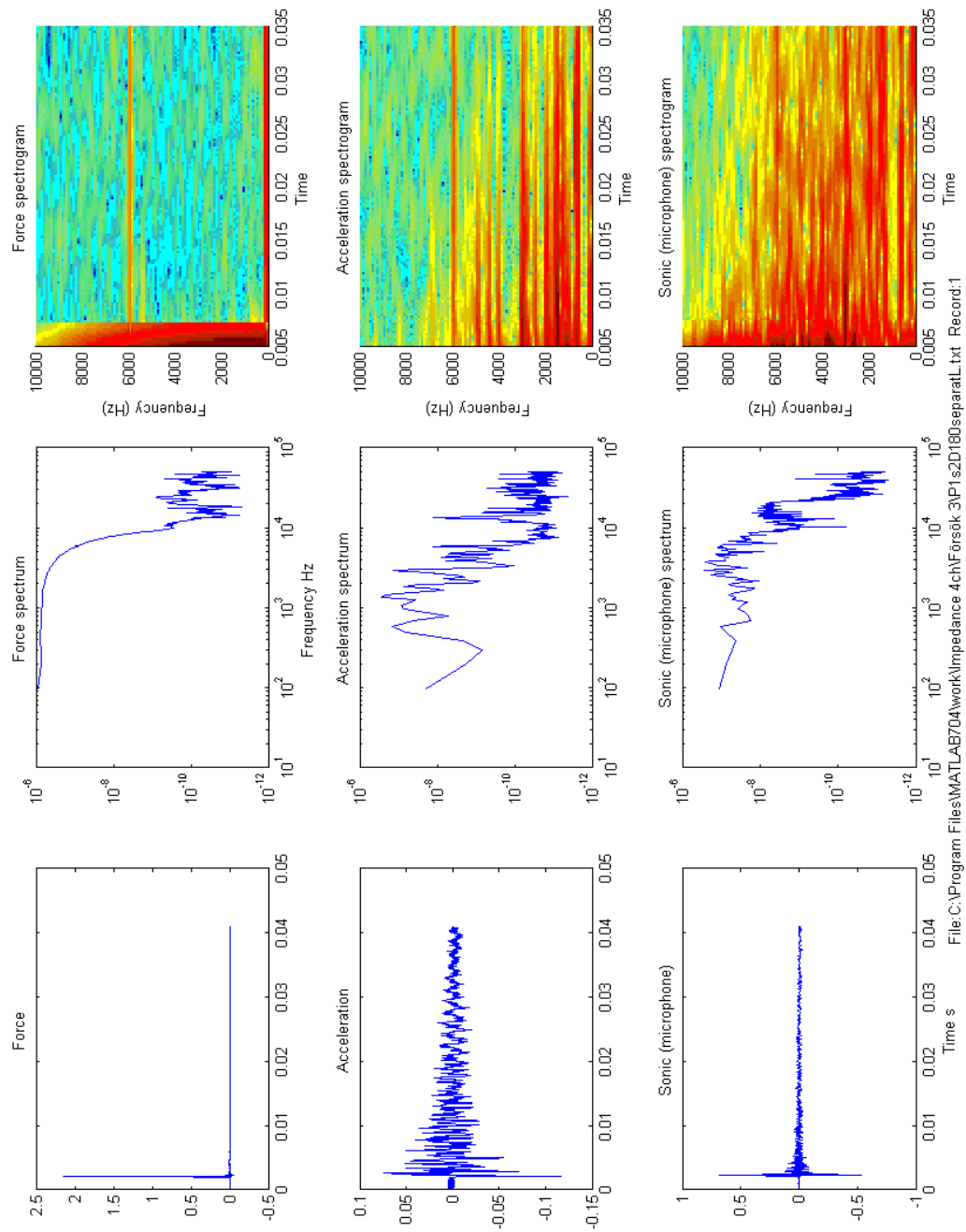
Figur 23. Slag med liten hammare mot delaminering på 160 mm djup



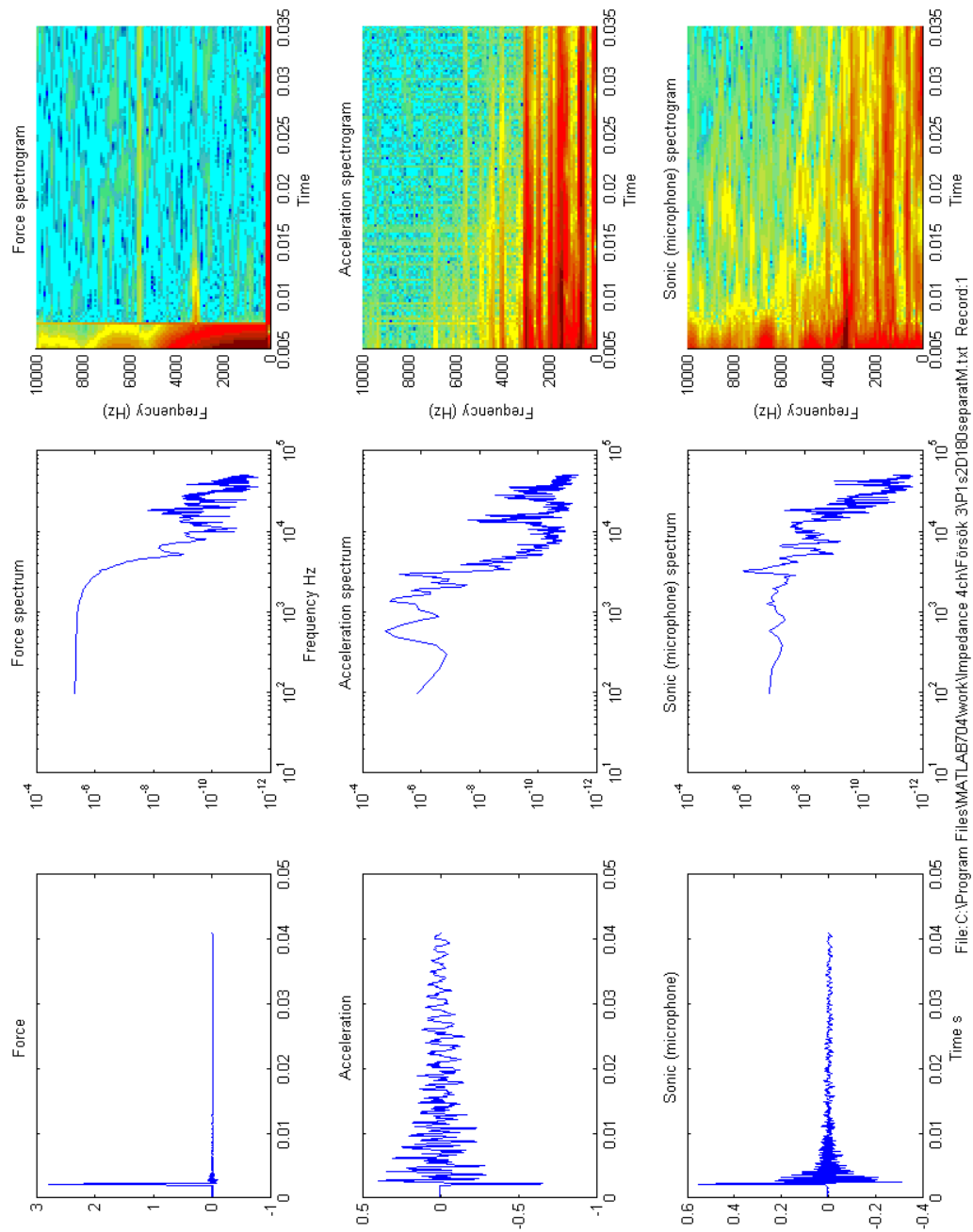
Figur 24. Slag med mellanstor hammare mot delaminering på 160 mm djup



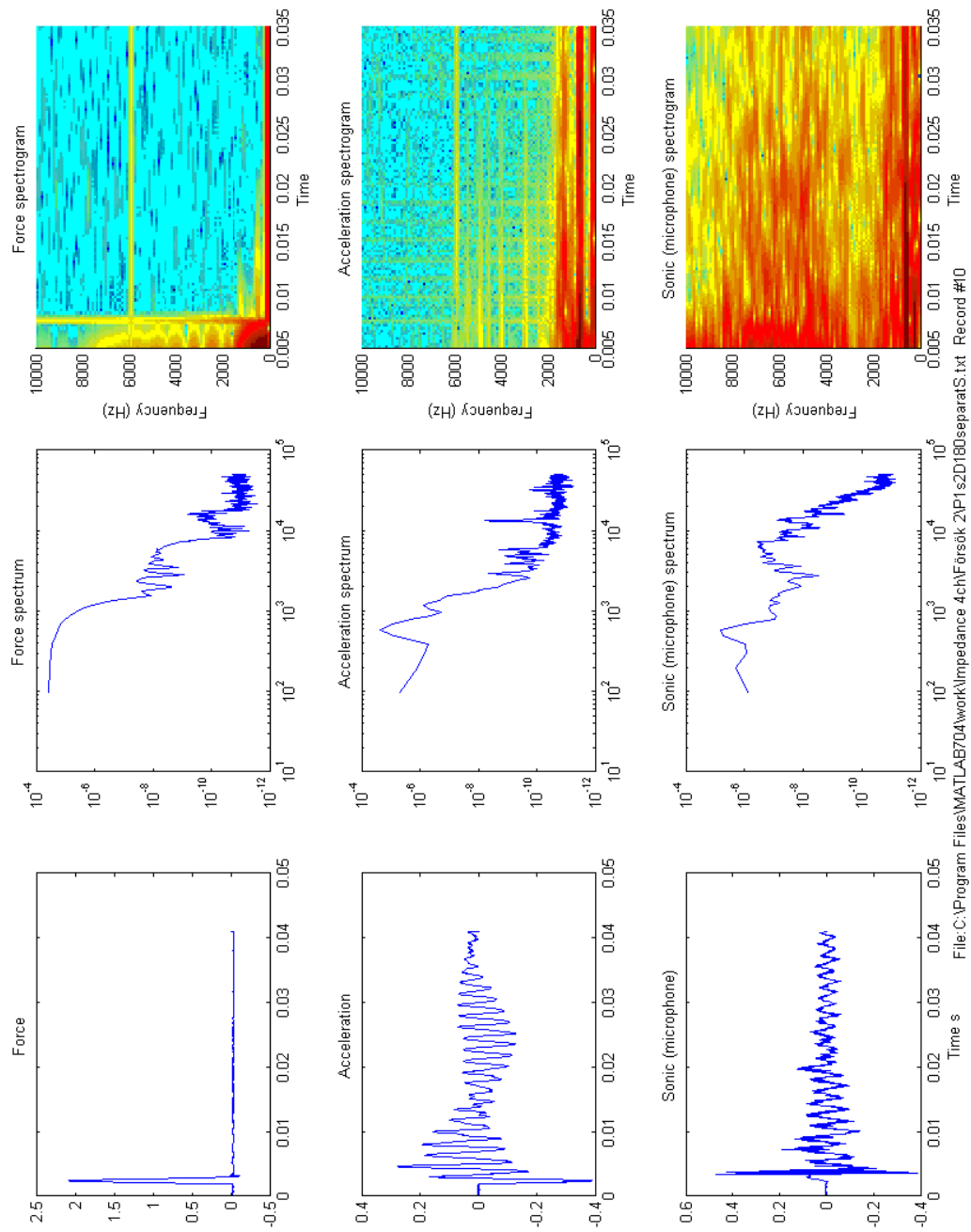
Figur 25. Slag med stor hammare mot delaminering på 160 mm djup



Figur 26. Slag med liten hammare mot delaminering på 180 mm djup



Figur 27. Slag med mellanstor hammare mot delaminering på 180 mm djup



Figur 28. Slag med stor hammare mot delaminering på 180 mm djup

Bilaga 3 Tester med impedanshuvud

a) Kraft och hastighet (F/v)

-Inverkan av delamineringsdjup

-Inverkan av spännvidd

b) Kraft och acceleration (F/a)

-Inverkan av delamineringsdjup

-Inverkan av spännvidd

c) Hammare med olika hårdhet och vikt

Test med impedanshuvud (F/V): -Inverkan av delamineringsdjup



Sprängbild av handtagets konstruktion. I handtagets översta del sitter en kraftgivare. Den blanka cylindern nertill är en geofon (hastighetsgivare). Fjädern isolerar geofonen från slaget och pressar den mot betongytan.



Delamineringens kontur projicerad på betongytan. Testerna mot olika delamineringsdjup 40-180 mm är utförda i den markerade punkten till vänster på mittlinjen i konturen, 10 cm in från vänstra kantlinjen, för varje delamineringsfall.

Kraftgivare: PCB typ 200C20 med känsligheten 0.0574 mV/N
Kraftgivarens förstärkare: PCB-förstärkare typ 480E09 inställd på Gain=10

Geofon: Geospace GS-20DM (28Hz) känsligheten 0.151 V/cm/s
Geofonen kopplad direkt till AD-omvandlaren

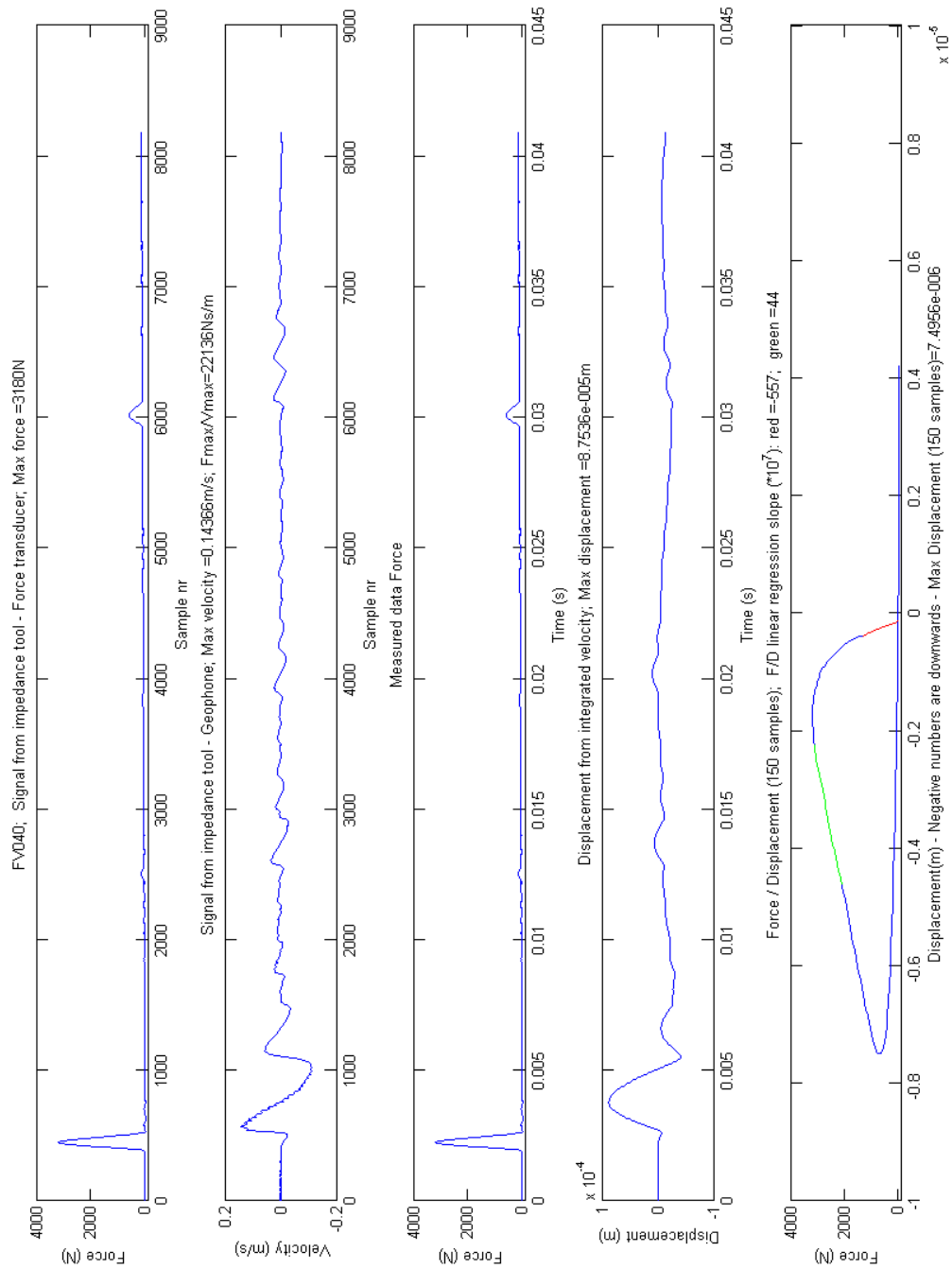
Presenterade figurer:

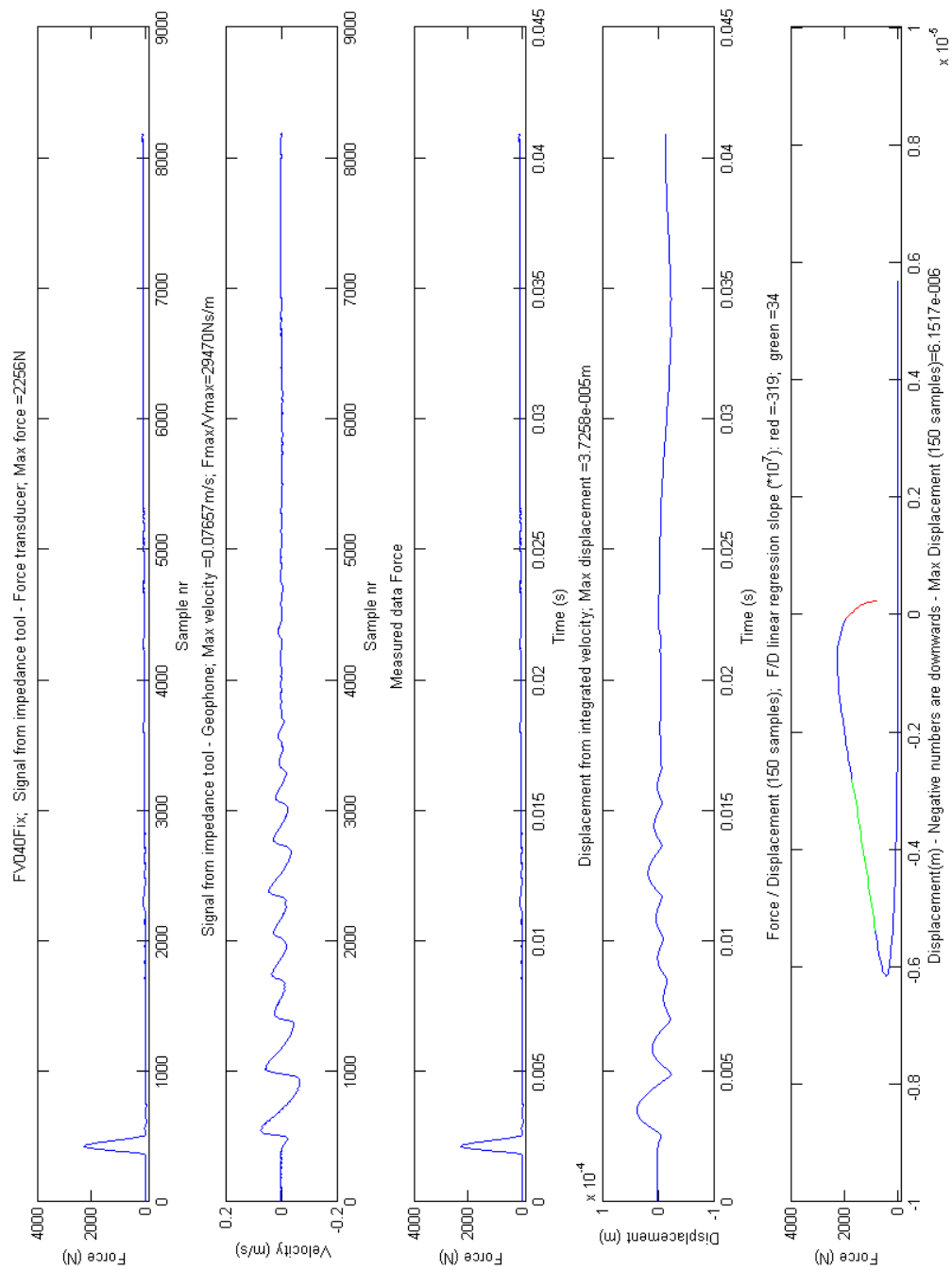
FV040	40 mm djup delaminering
FV040Fix	D:o Fastklistrad geofon
FV060	60 mm djup delaminering
FV080	80 mm djup delaminering
FV100	100 mm djup delaminering
FV120	120 mm djup delaminering
FV140	140 mm djup delaminering
FV160	160 mm djup delaminering
FV180	180 mm djup delaminering

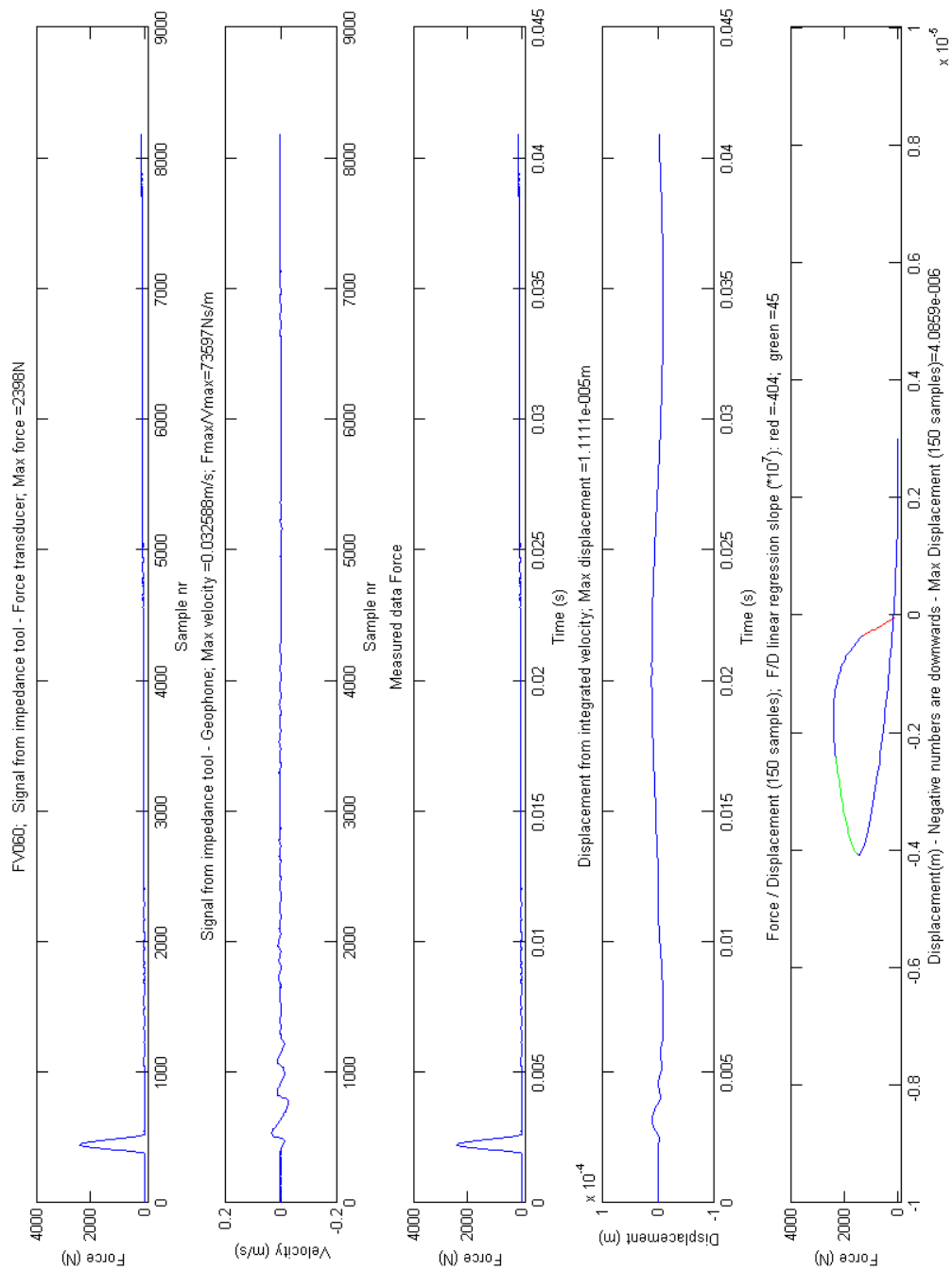
CenterP1s1 Referensmätning i solid betong, provkropp 1
CenterP2s1 Referensmätning i solid betong, provkropp 2

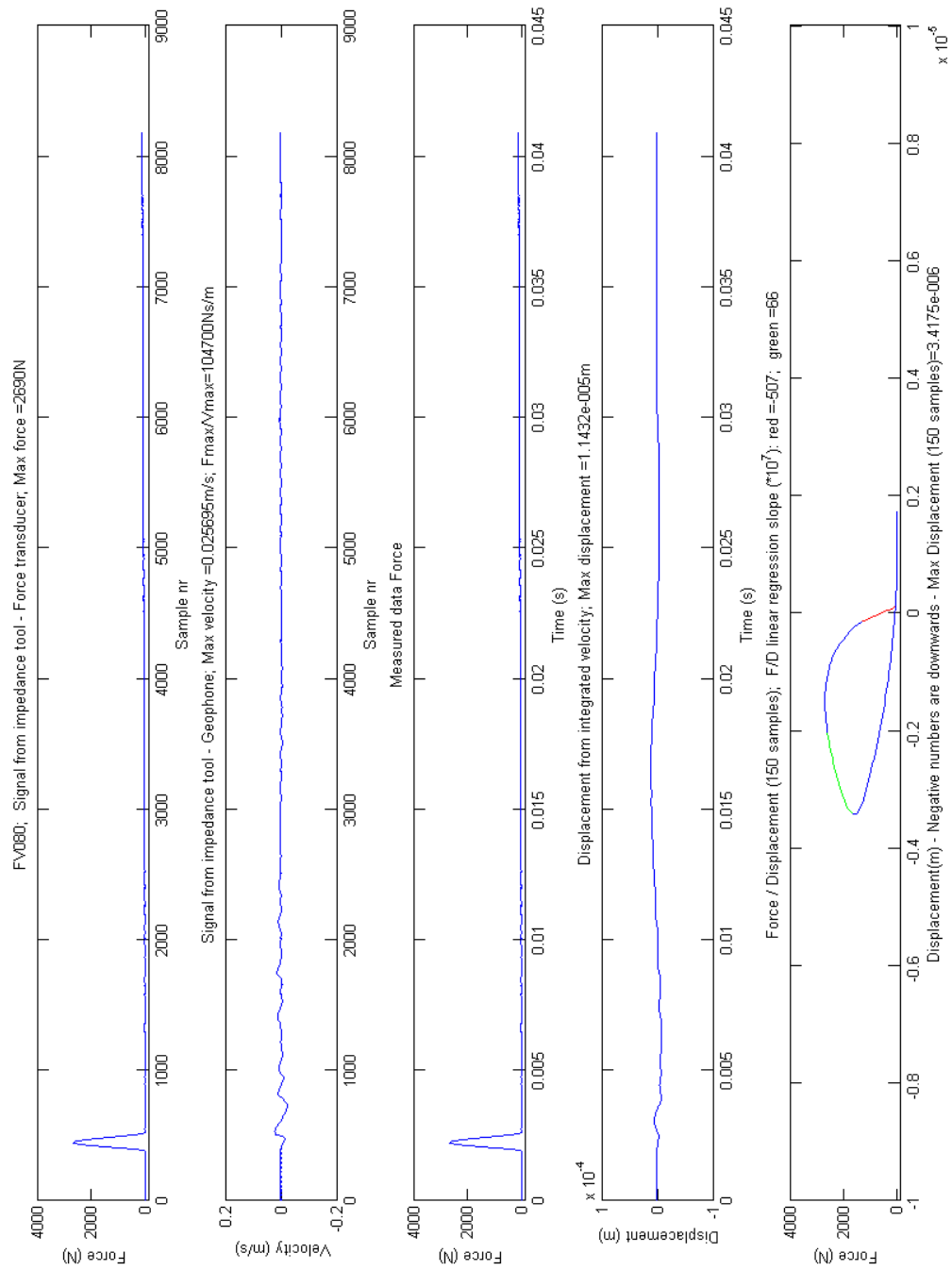
Figurernas innehåll:

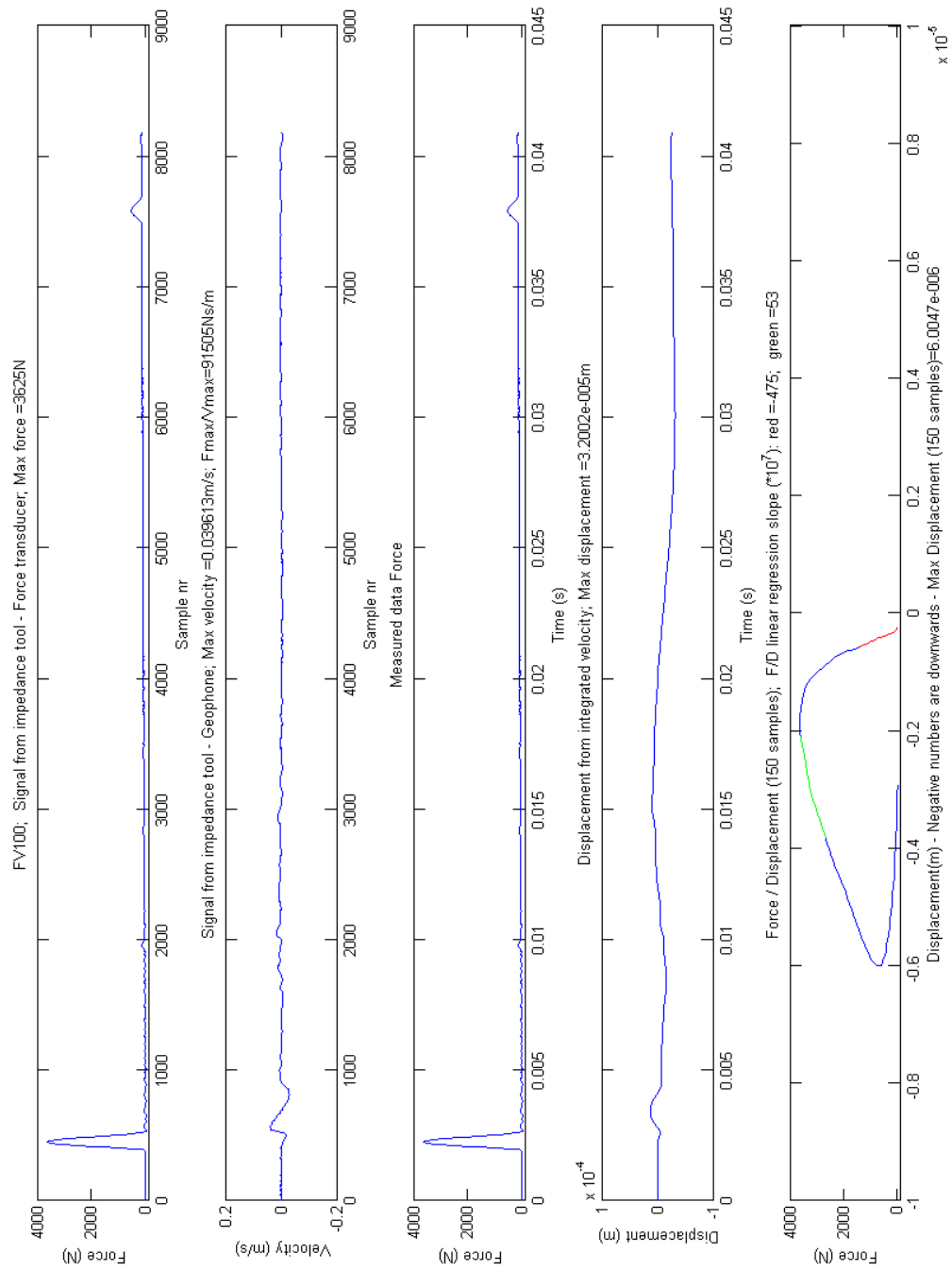
Diagram 1: Kraften som funktion av 8192 samples @ 200 kSa/s, 14 bits, F_{max}
Diagram 2: Hastigheten som funktion av 8192 samples @ 200 kSa/s, 14 bits, V_{max} , F_{max}/V_{max}
Diagram 3: Kraften som funktion av tid
Diagram 4: Rörelsen som funktion av tid, integrerad från hastighetsförloppet, D_{max}
Diagram 5: Kraft som funktion av rörelse med olika gradienter , Röd, Grön)

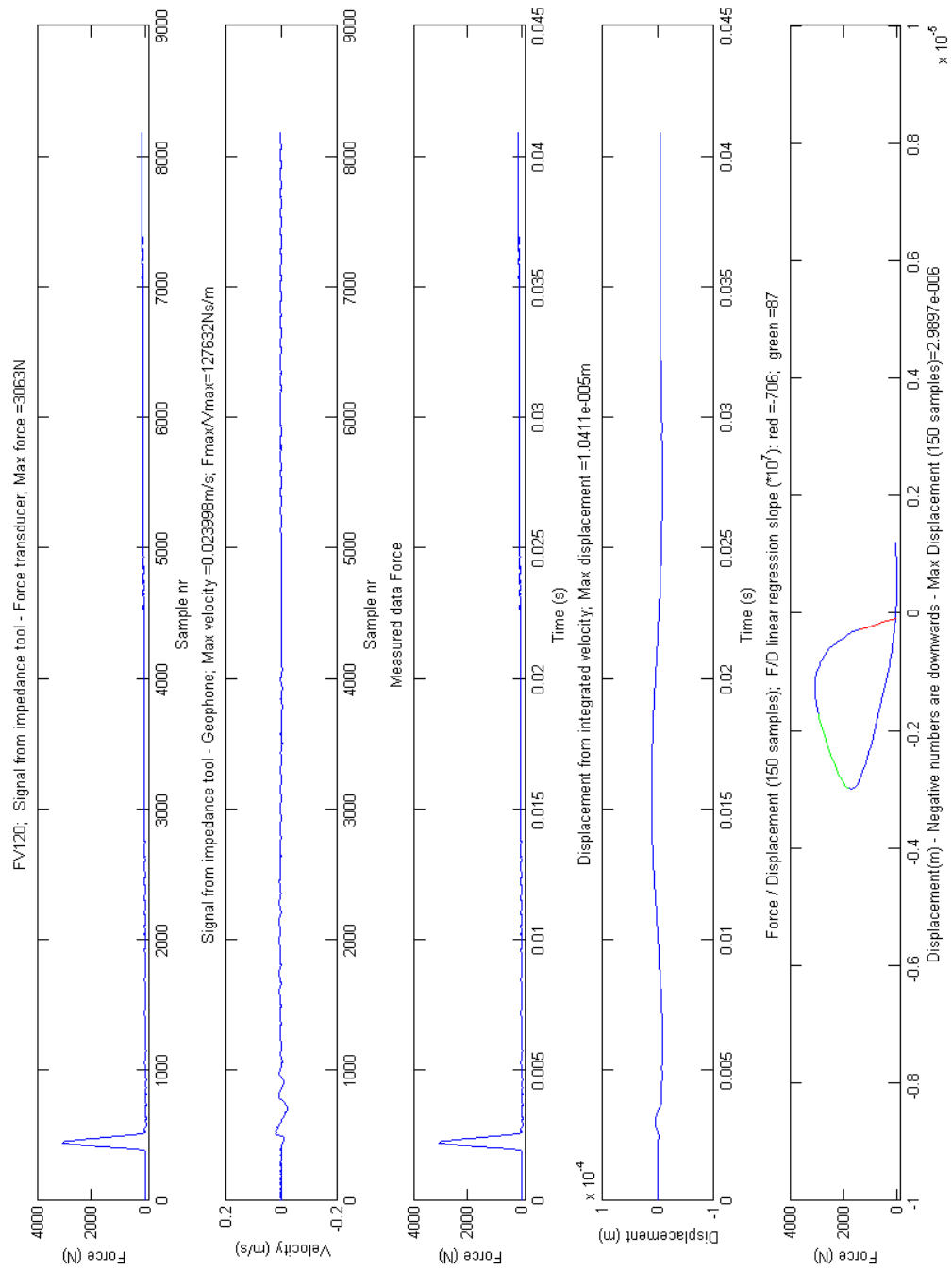


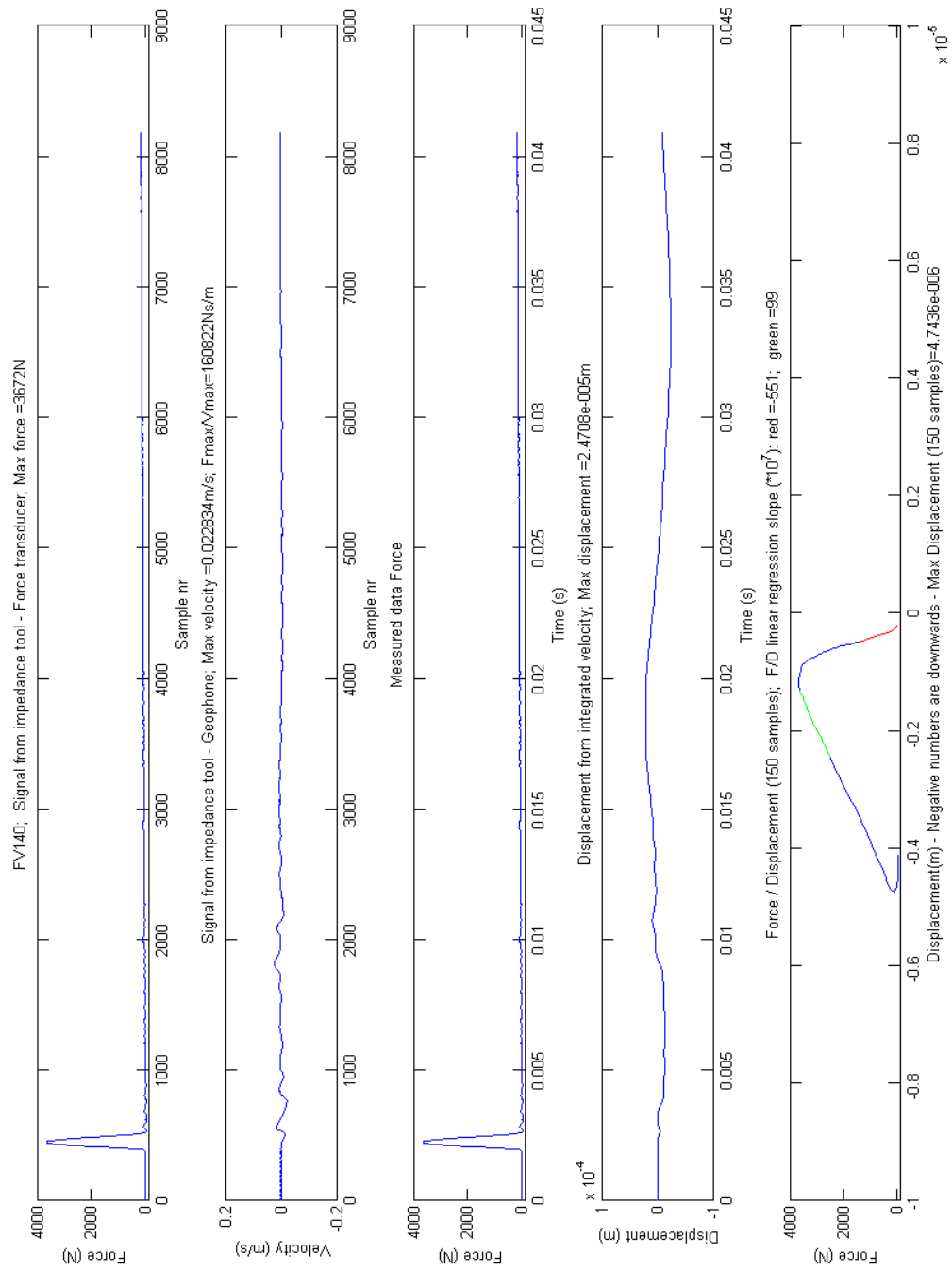


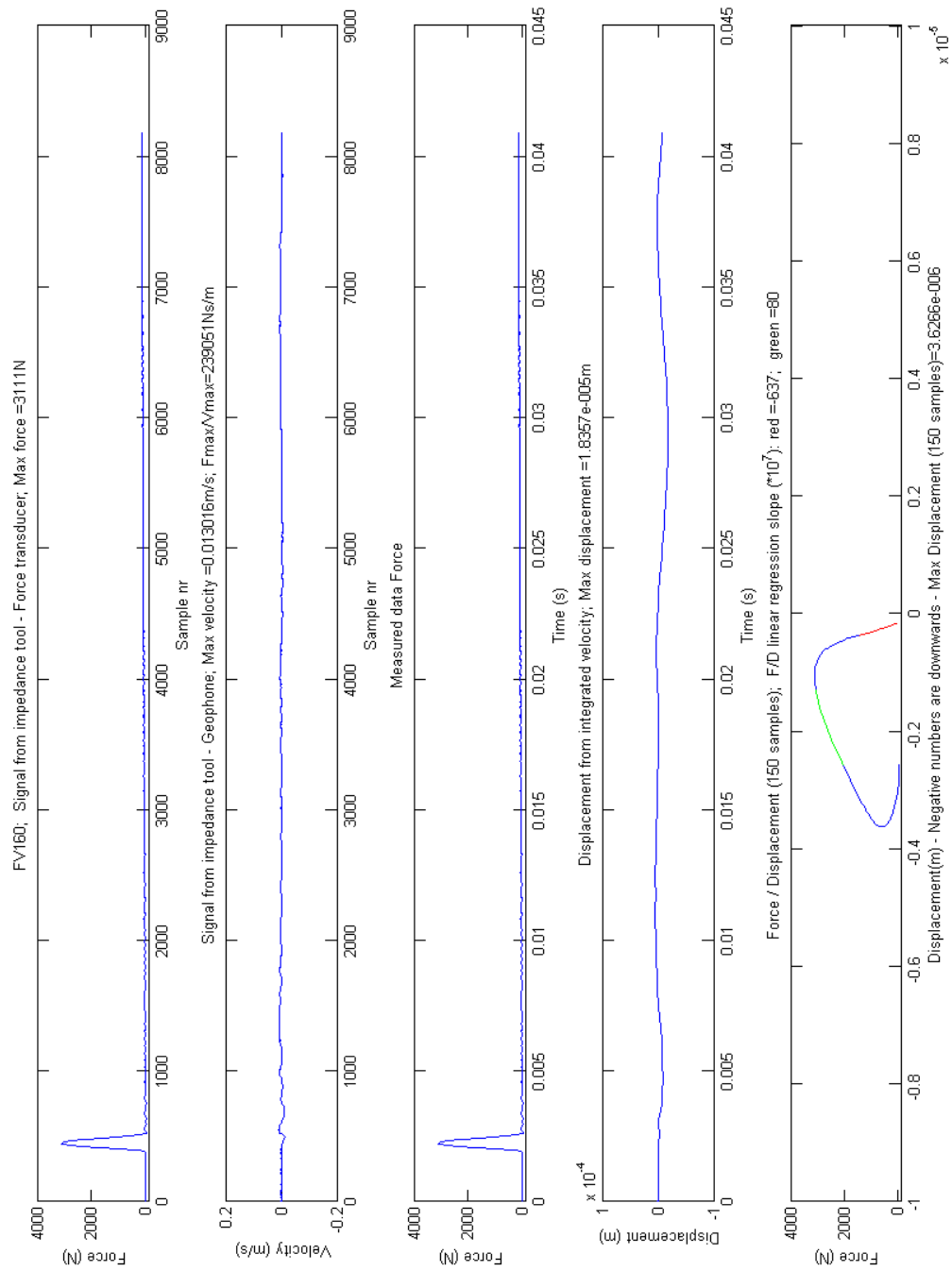


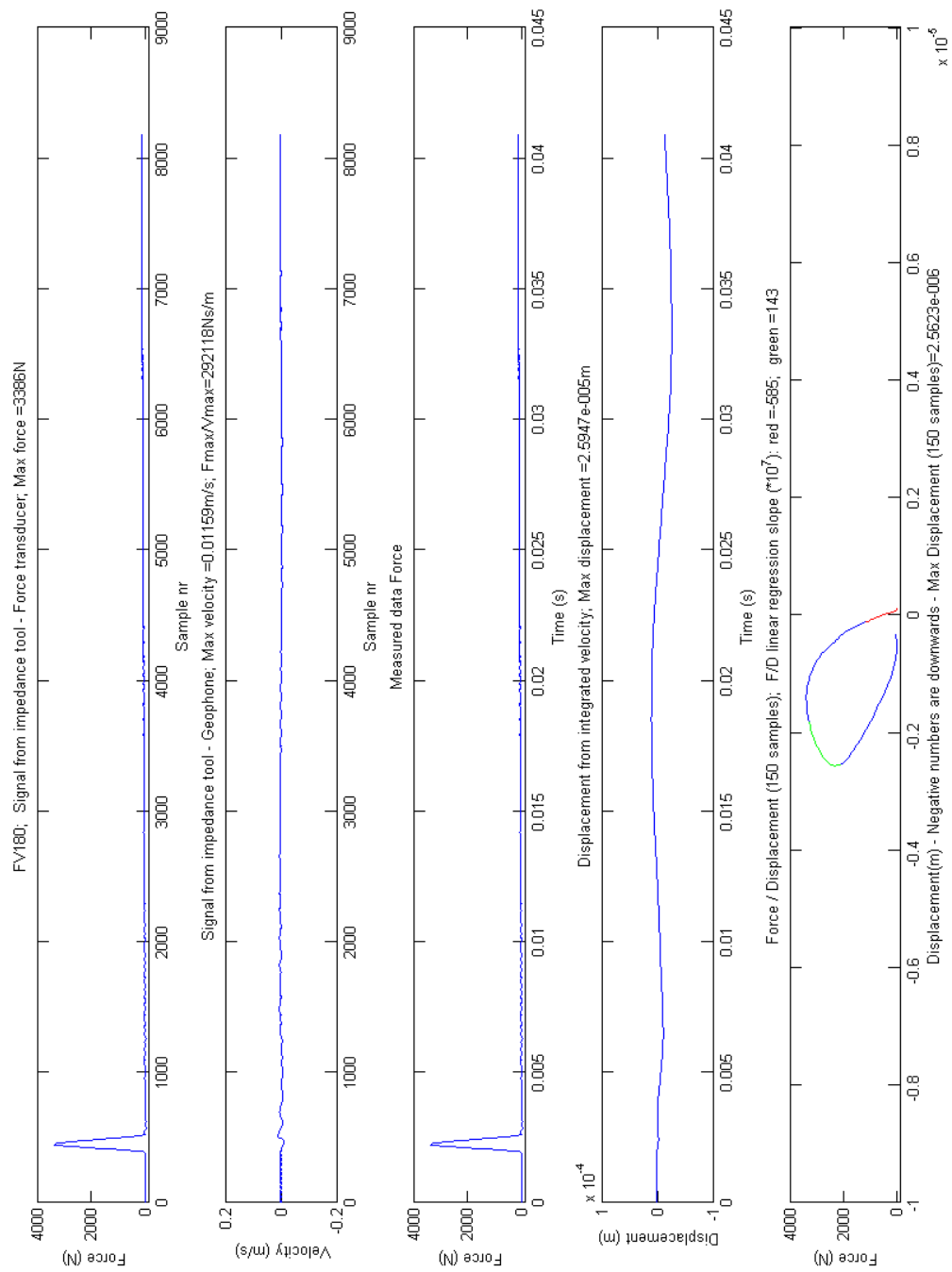


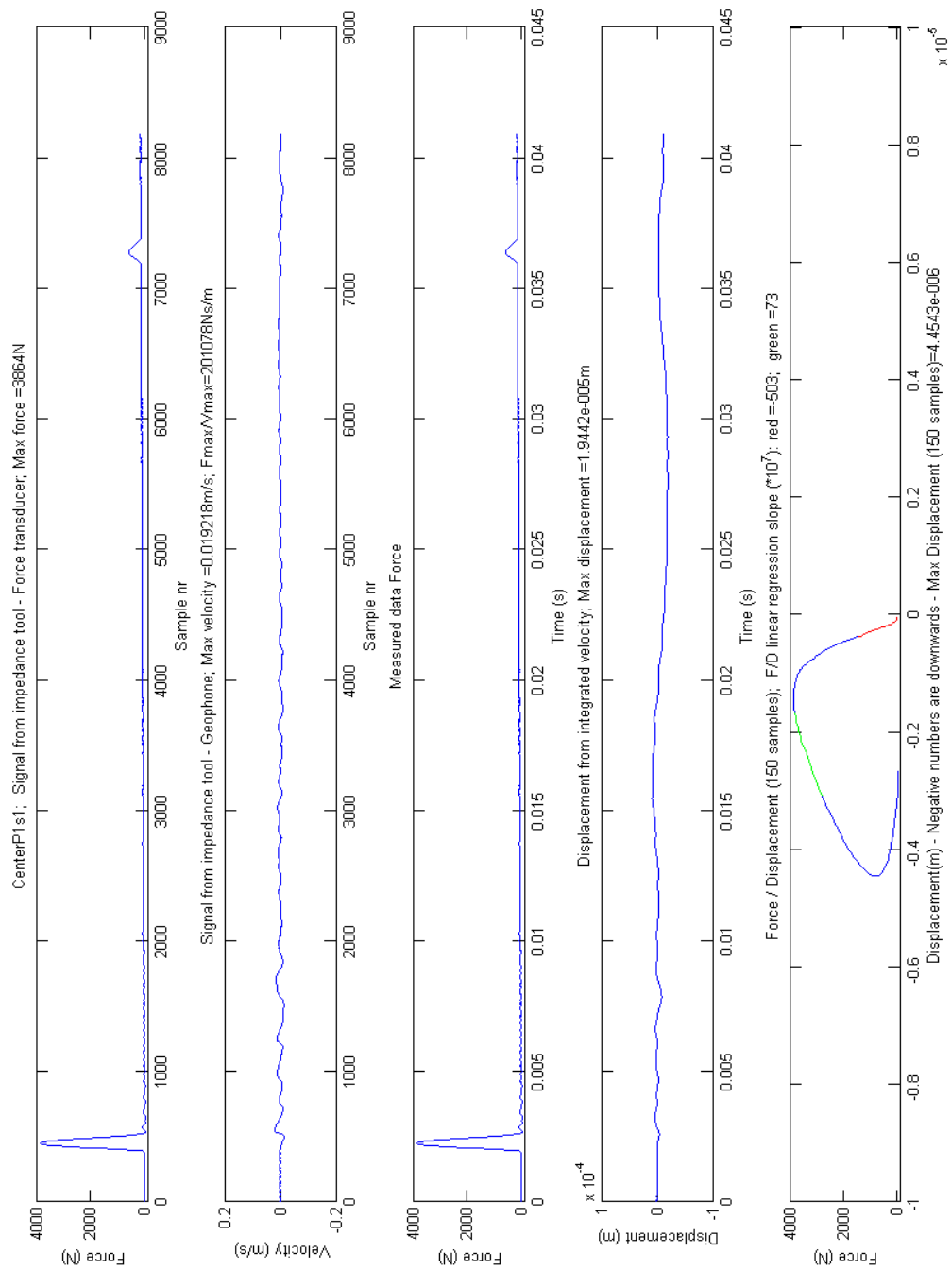


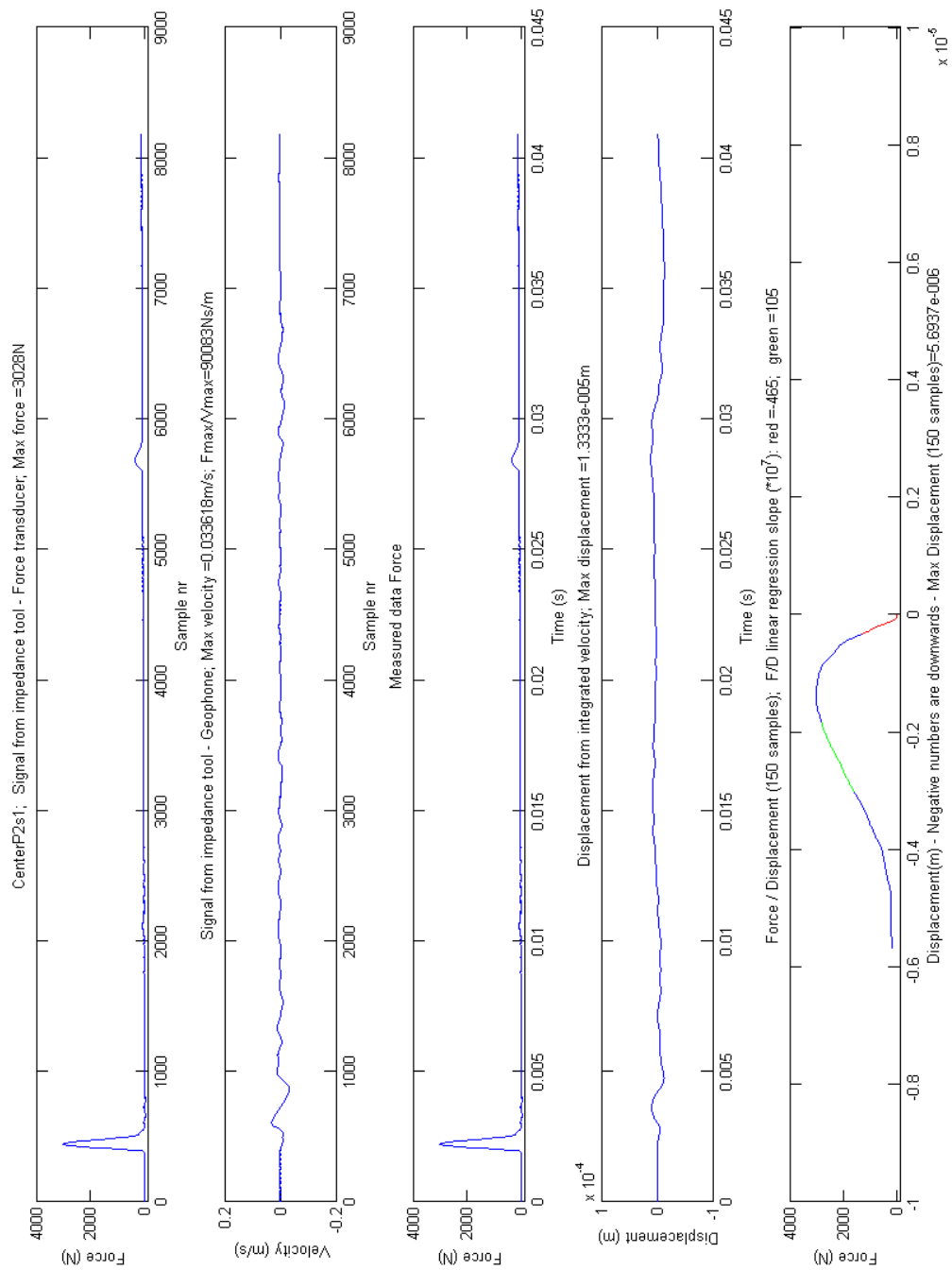












Test med impedanshuvud (F/v): -Inverkan av spännvidd



Apparatur använd i dessa försök. T.v handtaget med kraftgivare och geofon (hastighet). T.h. en sk "dead-blow" (studsfri) hammare.



Mätlinjen går längs delamineringens centerlinje med 00 till vänster och 50 till höger i kanterna. Mätningarna i 00 och 50 cm sker alltså på delamineringens kant. Alla mätningar är utförda på den delaminering som ligger på 40 mm djup och syftet med mätserien är att utvärdera inverkan av delamineringens spännvidd.

Kraftgivare: PCB typ 200C20 med känsligheten 0.0574 mV/N
Kraftgivarens förstärkare: PCB-förstärkare typ 480E09 inställd på Gain=10

Geofon: Geospace GS-20DM (28Hz) känsligheten 0.151 V/cm/s
Geofonen kopplad direkt till AD-omvandlaren

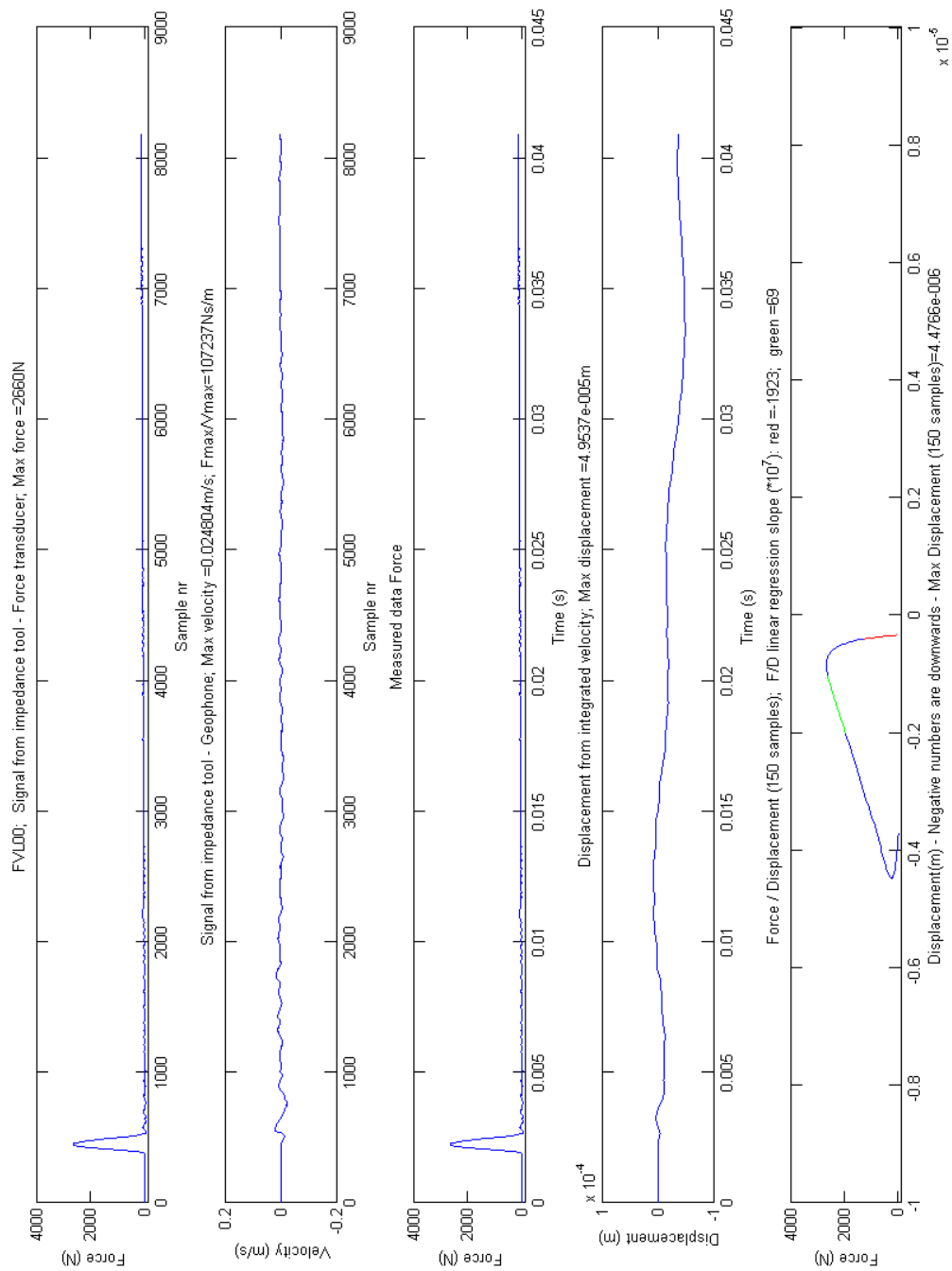
Hammare: THORACE Dead Blow Hammer 12/2. Hammaren är ihålig och hålrummet är fyllt med små blykuler som förhindrar inre stötvågor att lyfta hammaren efter den första träffen.

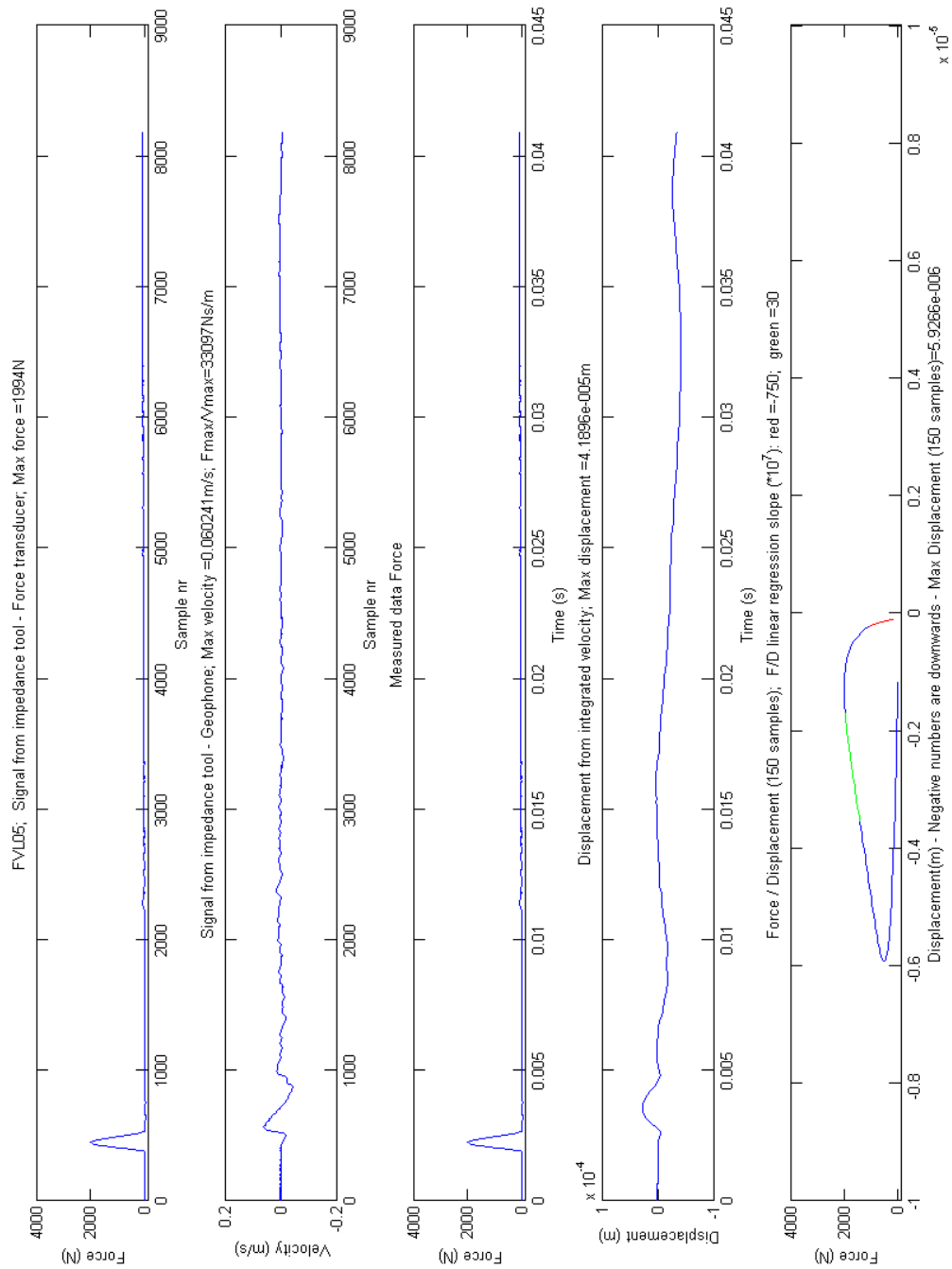
Presenterade figurer:

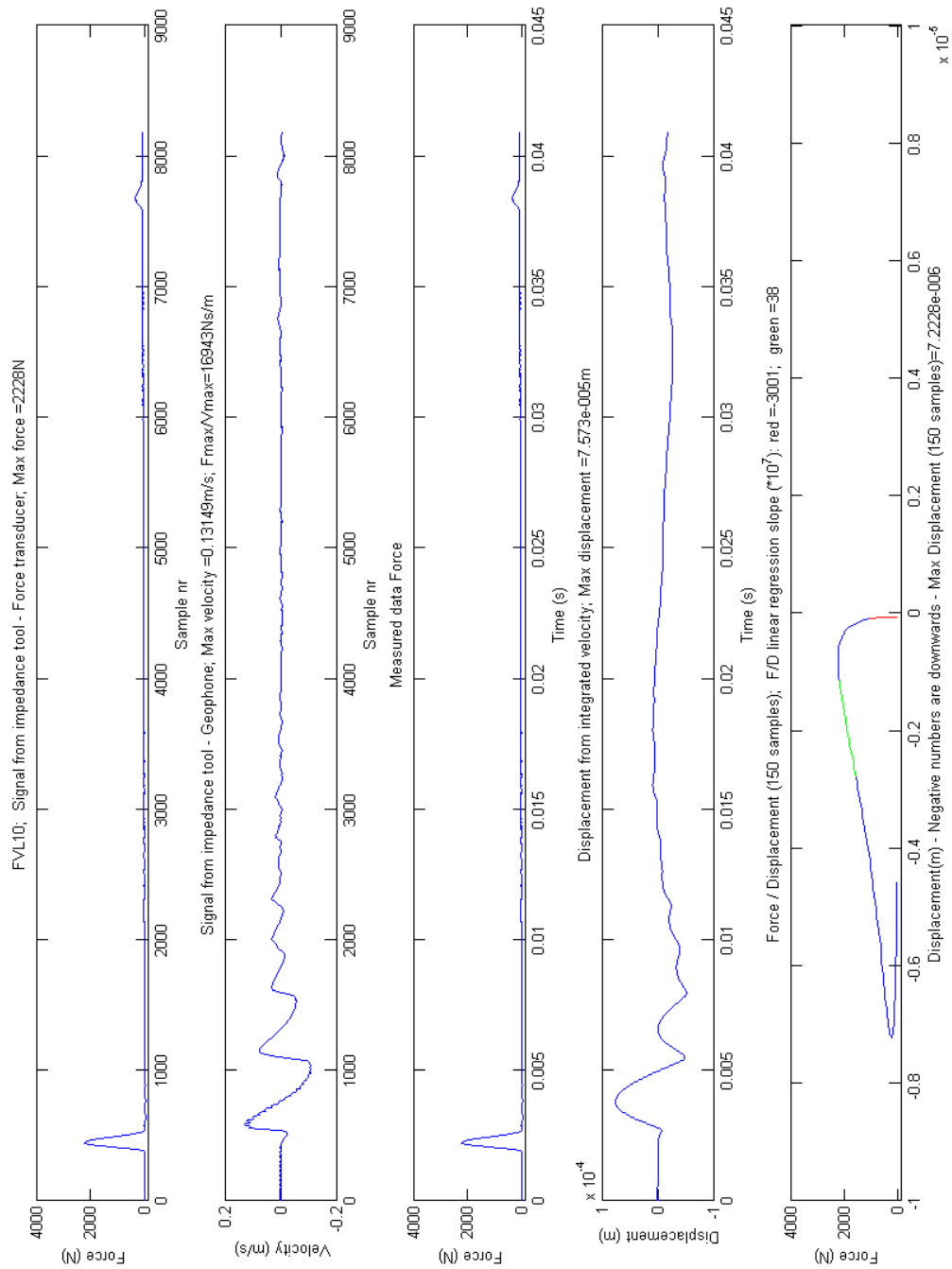
FVL00	Mätning i position 0 cm, över delamineringens kant
FVL05	Mätning i position 5 cm längs mittlinjen
FVL10	Mätning i position 10 cm längs mittlinjen
FVL15	Mätning i position 15 cm längs mittlinjen
FVL20	Mätning i position 20 cm längs mittlinjen
FVL25	Mätning i position 25 cm längs mittlinjen
FVL30	Mätning i position 30 cm längs mittlinjen
FVL35	Mätning i position 35 cm längs mittlinjen
FVL40	Mätning i position 40 cm längs mittlinjen
FVL45	Mätning i position 45 cm längs mittlinjen
FVL50	Mätning i position 50 cm, över delamineringens kant

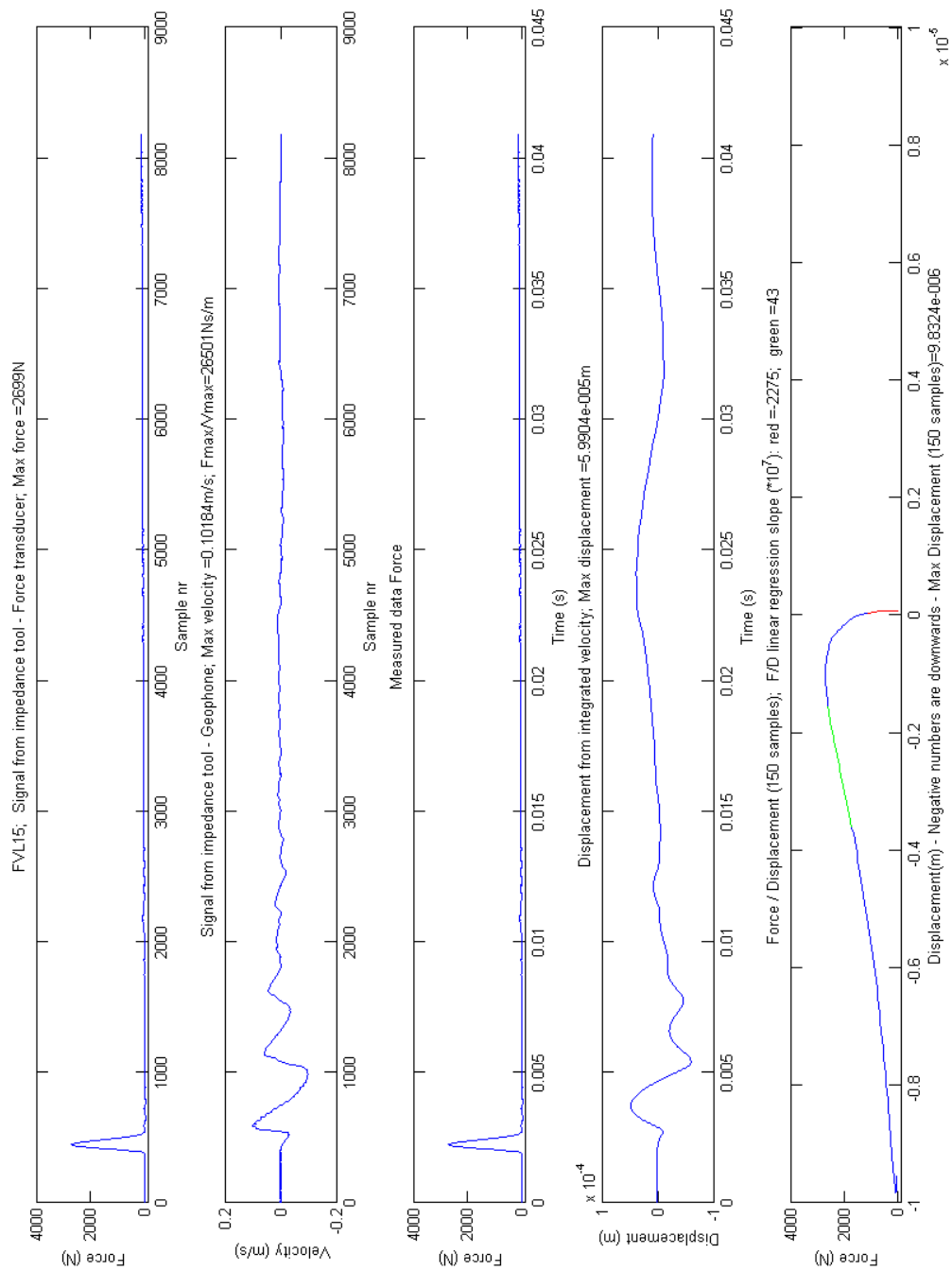
Figurernas innehåll:

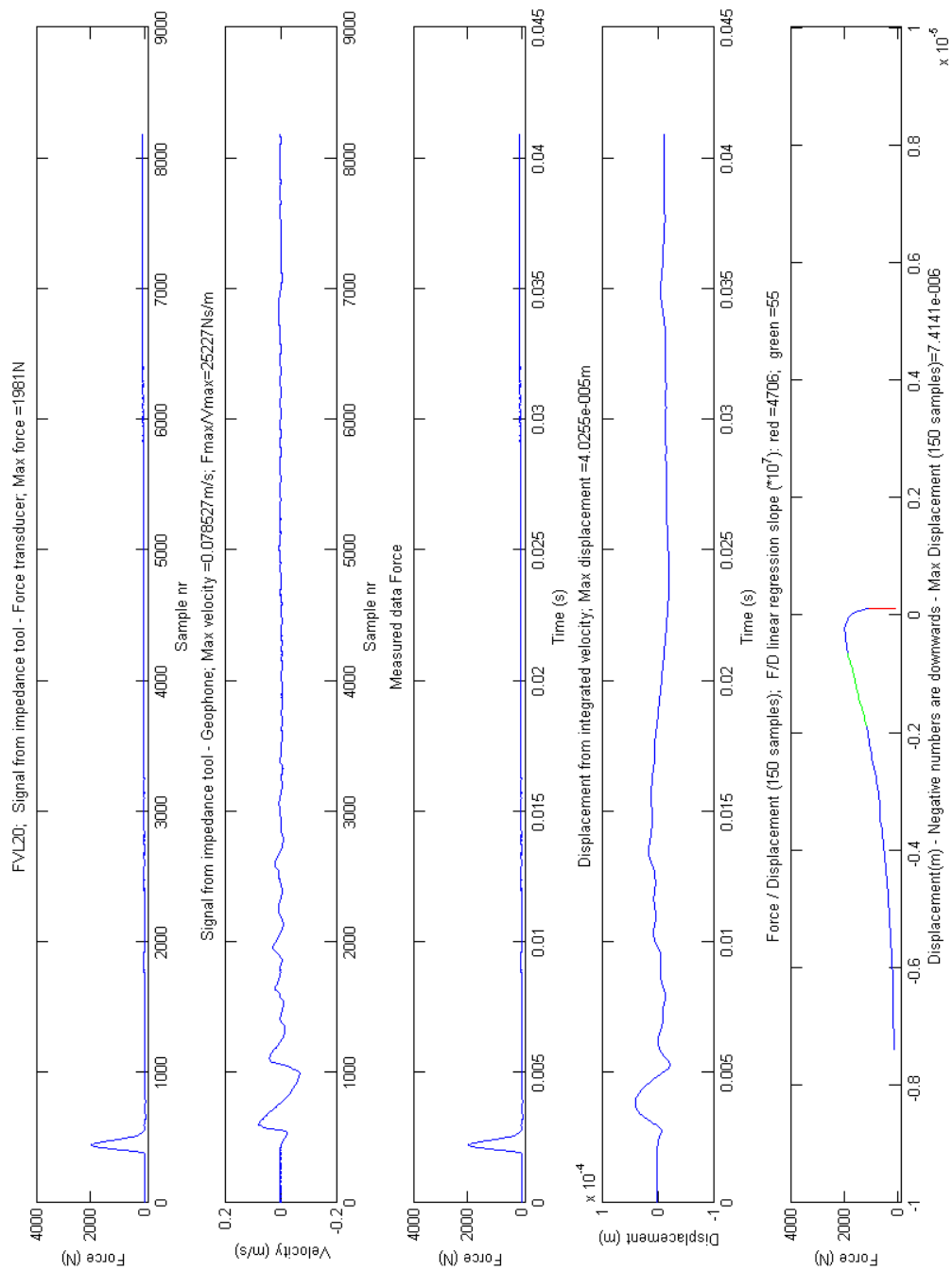
Diagram 1: Kraften som funktion av 8192 samples @ 200 kSa/s, 14 bits, F_{max}
Diagram 2: Hastigheten som funktion av 8192 samples @ 200 kSa/s, 14 bits, V_{max} , F_{max}/V_{max}
Diagram 3: Kraften som funktion av tid
Diagram 4: Rörelsen som funktion av tid, integrerad från hastighetsförloppet, D_{max}
Diagram 5: Kraft som funktion av rörelse med olika gradienter , Röd, Grön)

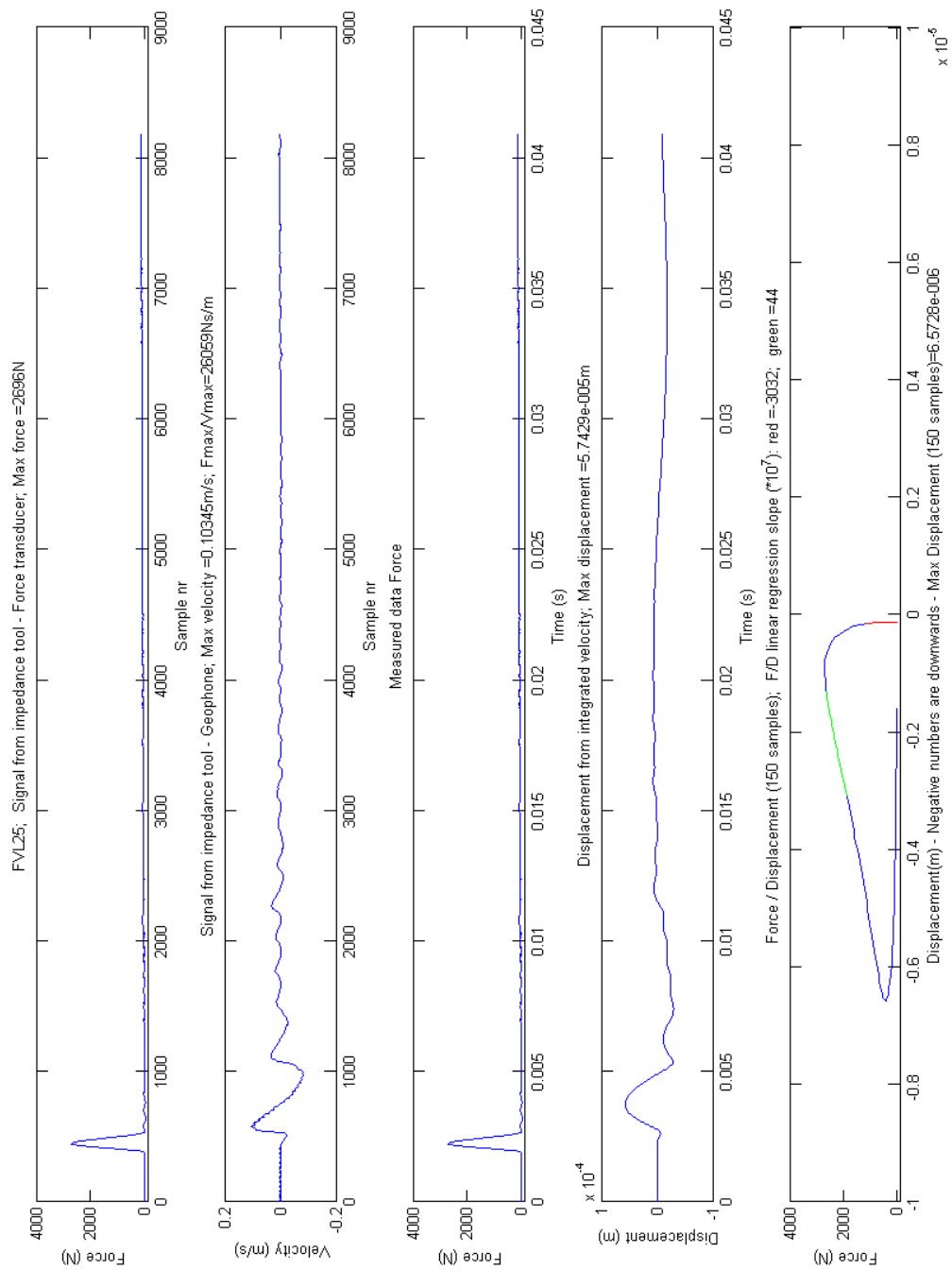


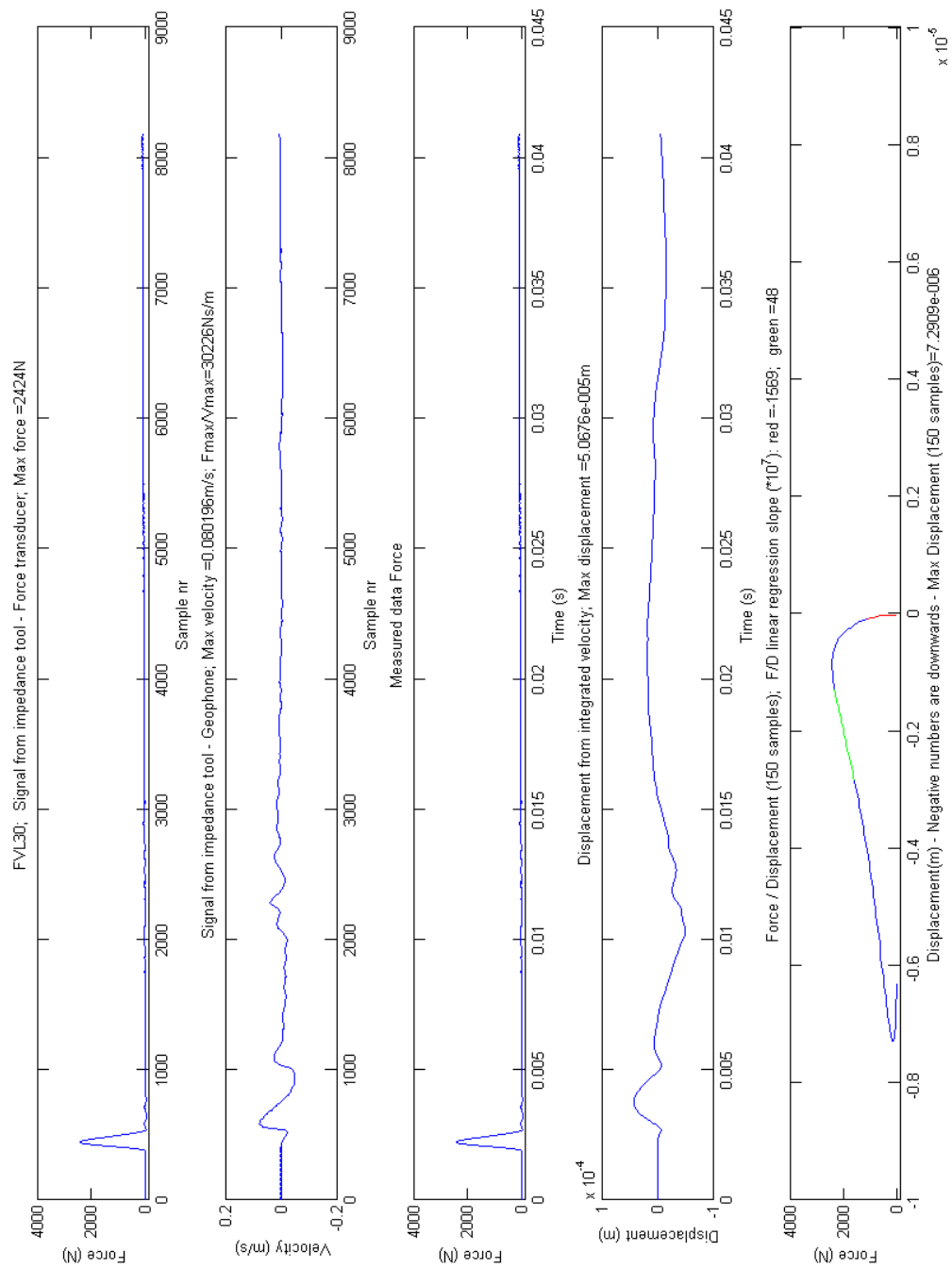


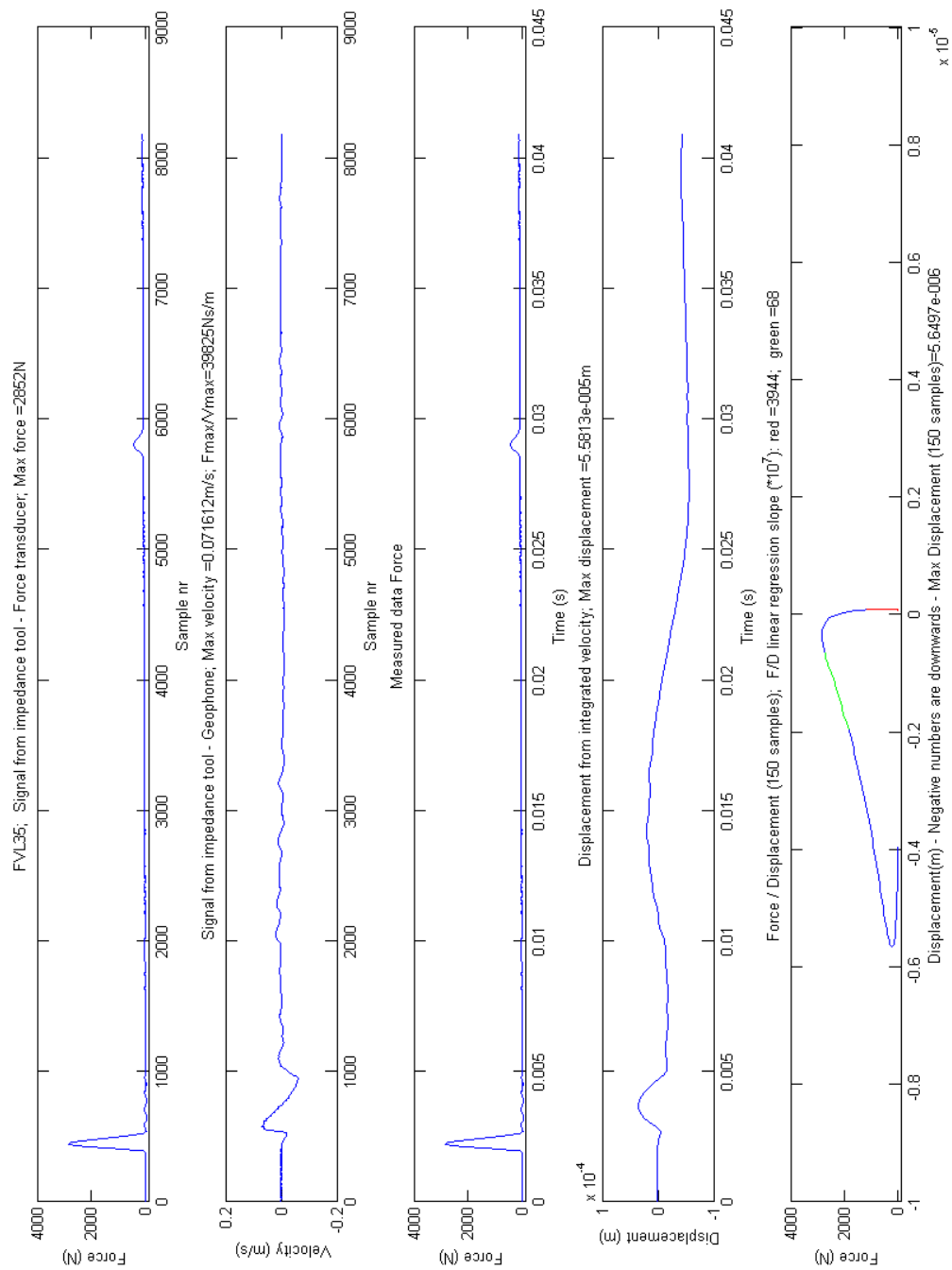


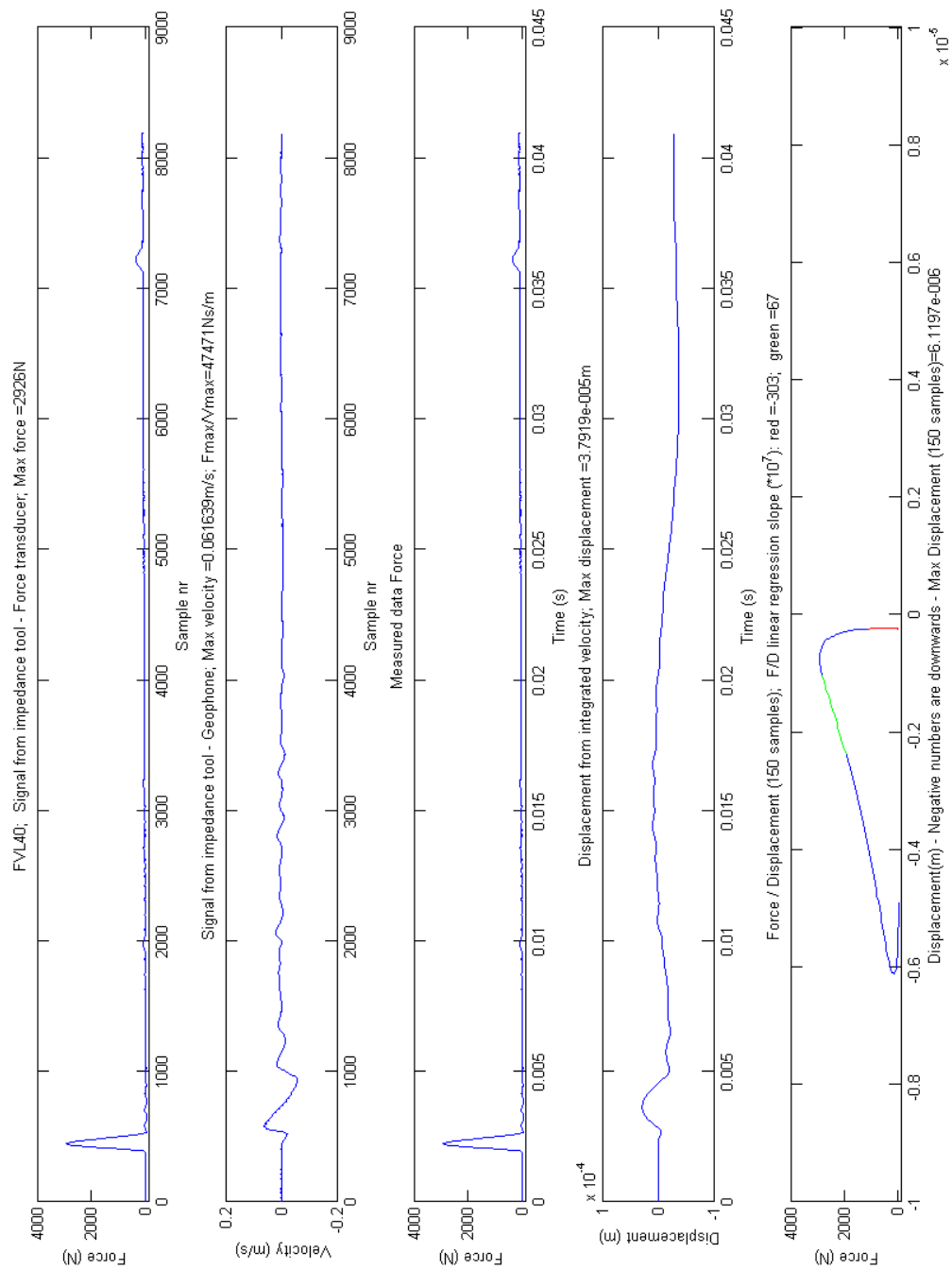


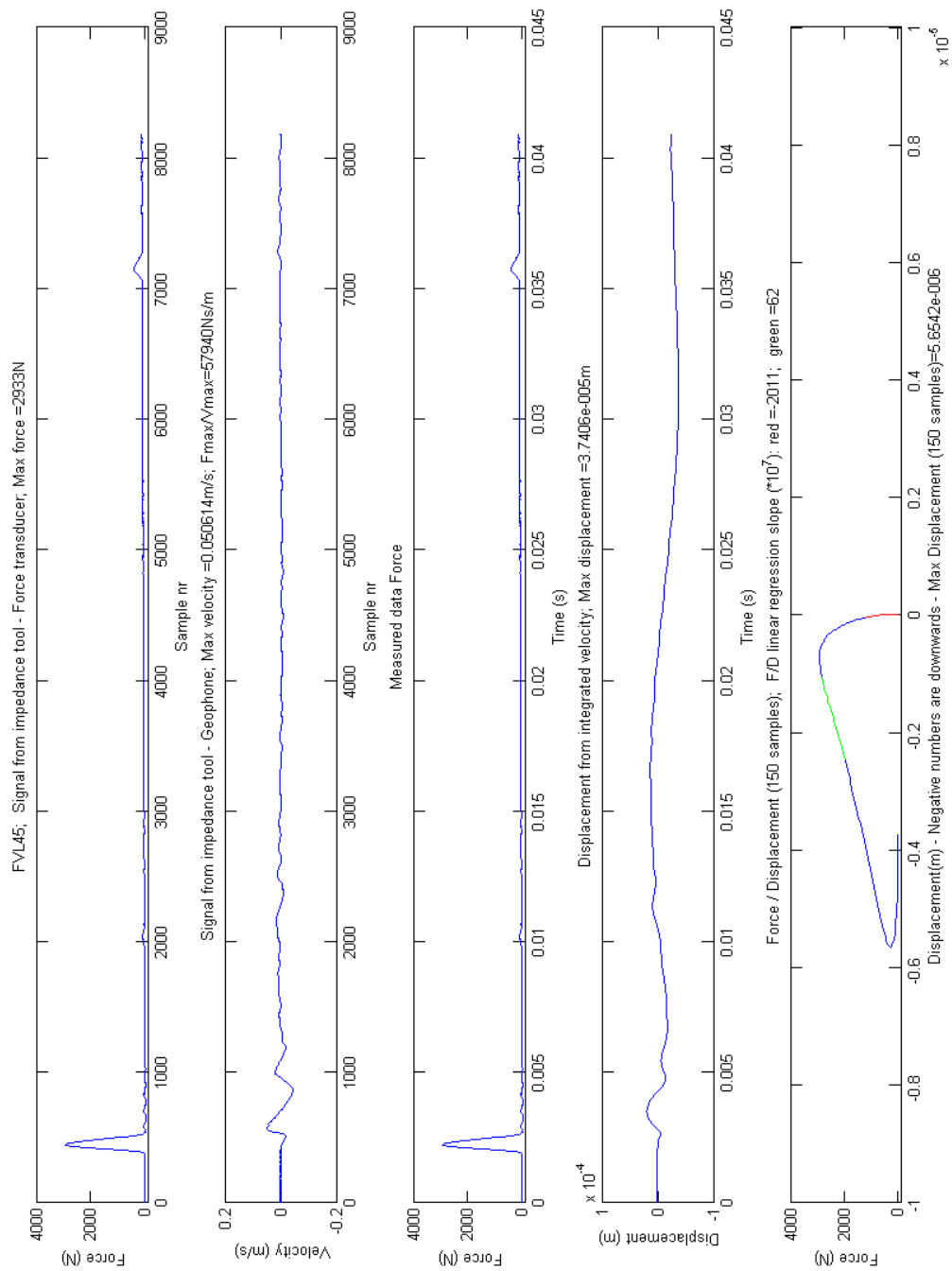


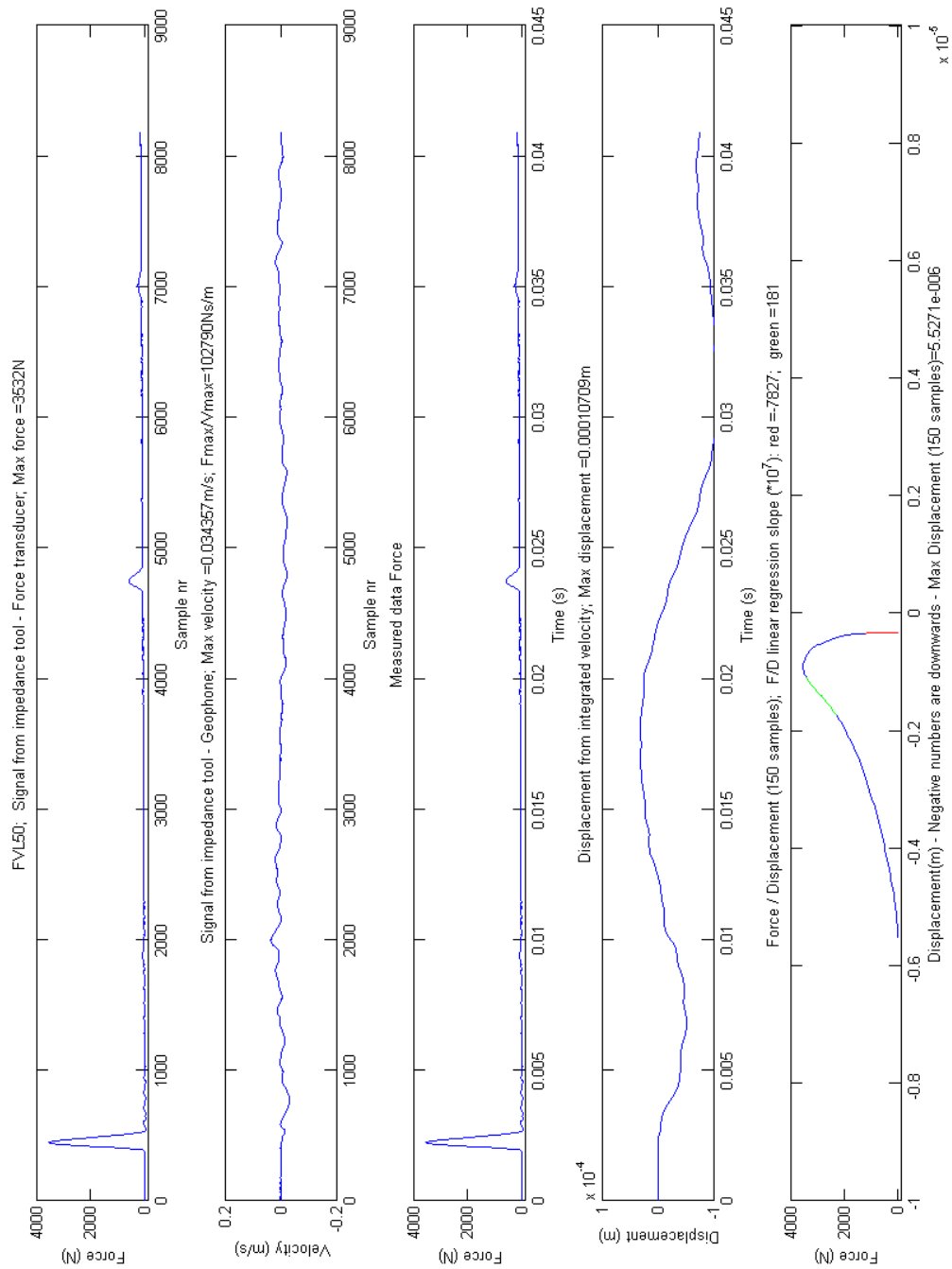












Test med impedanshuvud (F/a): -Inverkan av delamineringsdjup



Impedanshuvud av egen konstruktion. Överst en kraftgivare och därunder en accelerometer. Impedanshuvudet pressas manuellt mot betongytan och därefter slår man ett slag mot kraftgivaren med en hammare.

Kraftgivare: PCB typ 200C20 med känsligheten 0.0574 mV/N
Kraftgivarens förstärkare: PCB-förstärkare typ 480E09 inställd på Gain=10

Accelerometer: PCB typ 635A01 ICP känslighet 9.8 mV/m/s²
Accelerometerns förstärkare: PCB typ 480E09 inställd på Gain=1
Accelerometerns dämpsats: Inställd på Gain=0.15

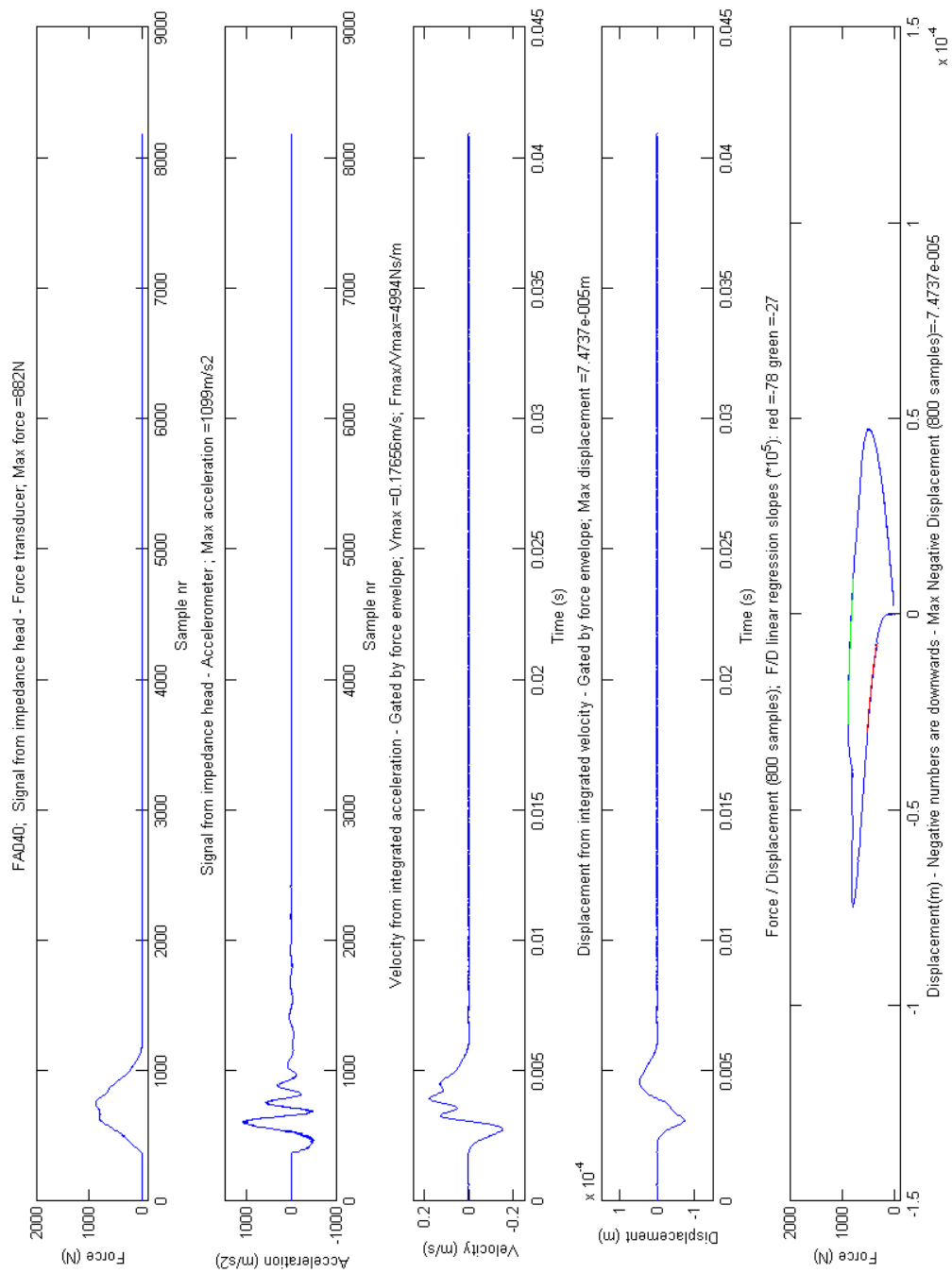
Hammare: PCB "Modally tuned hammer" typ 086C41 Vikt 1.5 kg, röd slagdyna. Hammarens kraftgivare ej använd.

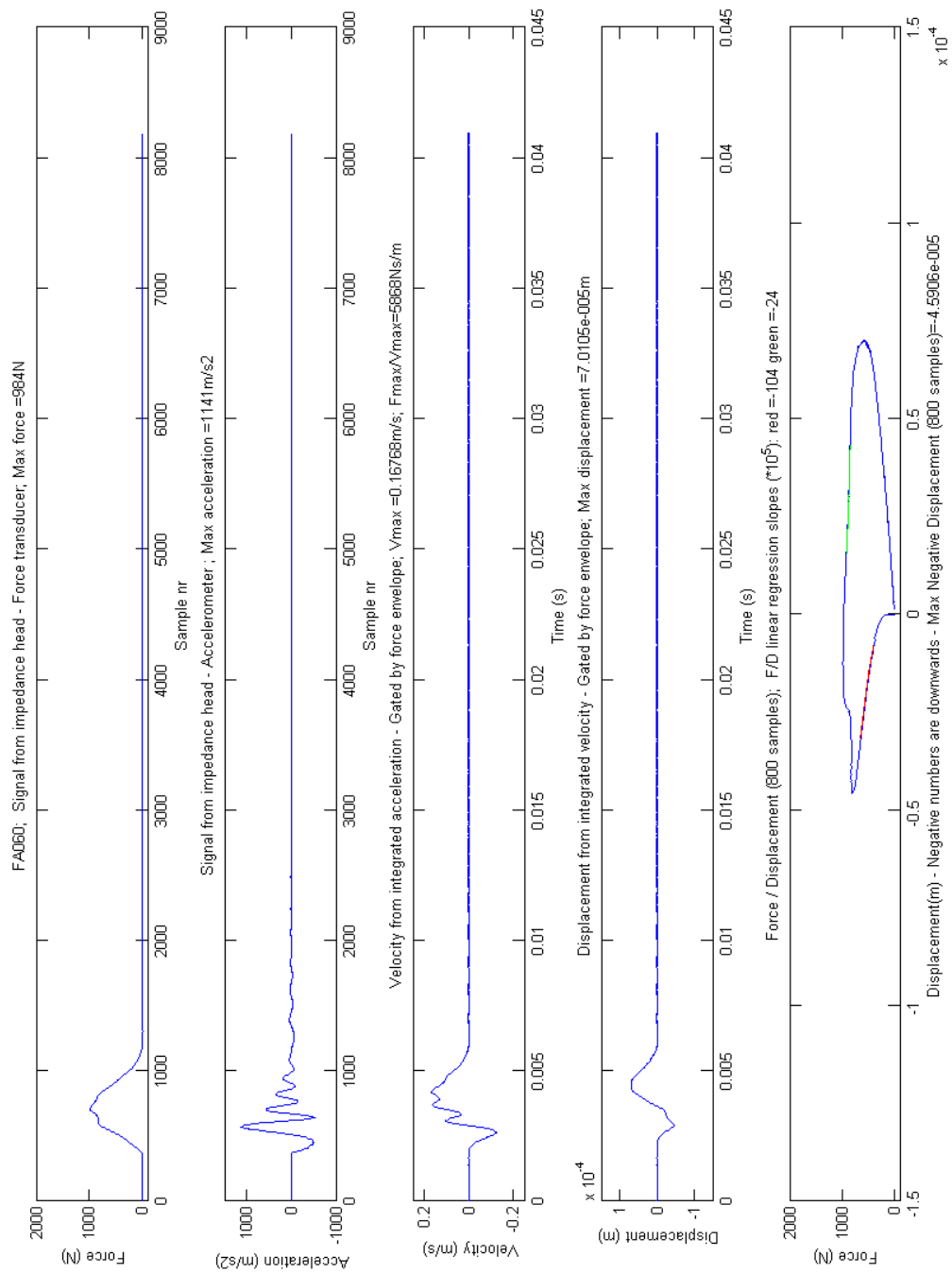
Presenterade figurer:

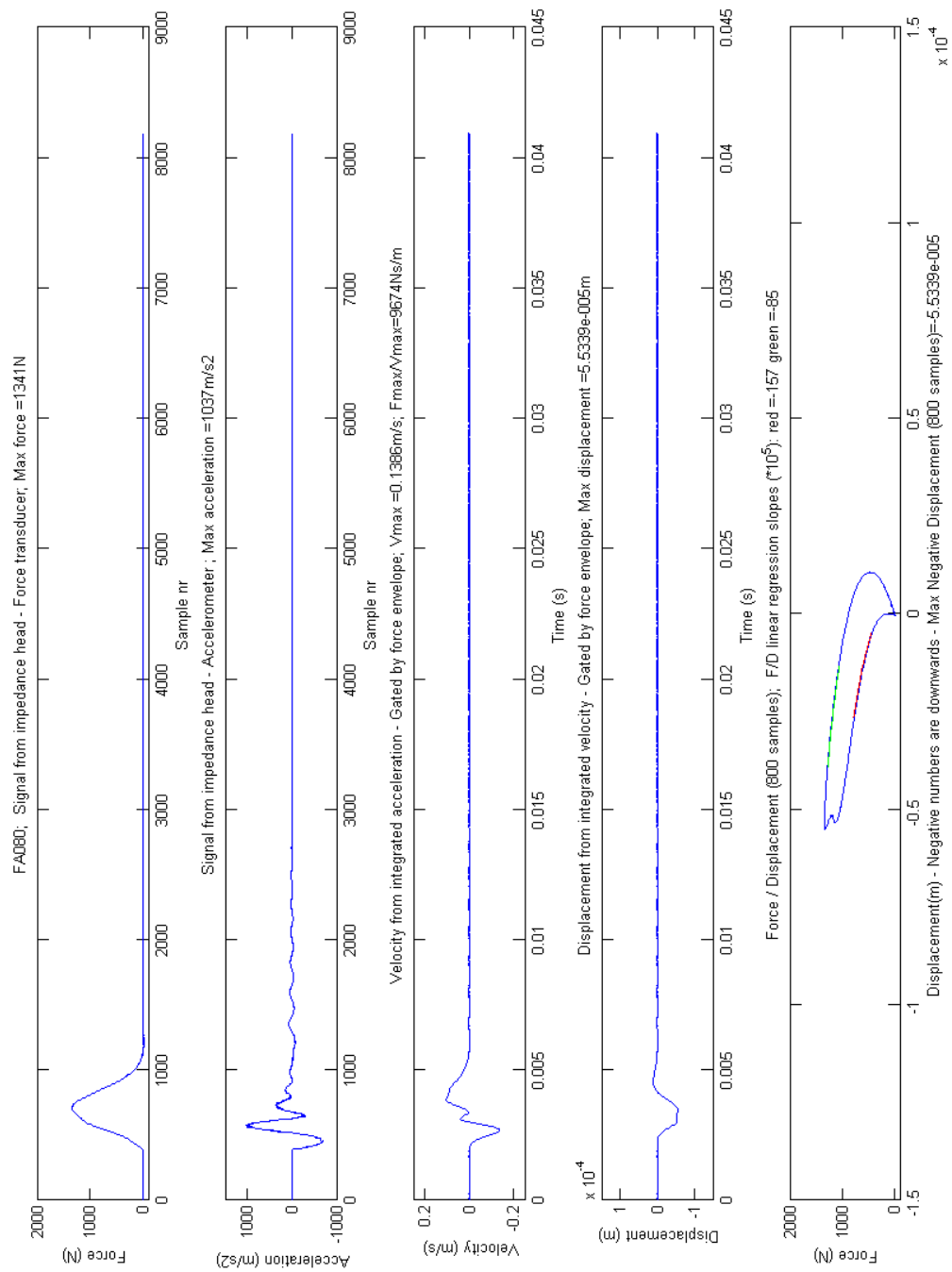
FA040	40 mm djup delaminering
FA060	60 mm djup delaminering
FA080	80 mm djup delaminering
FA100	100 mm djup delaminering
FA120	120 mm djup delaminering
FA140	140 mm djup delaminering
FA160	160 mm djup delaminering
FA180	180 mm djup delaminering

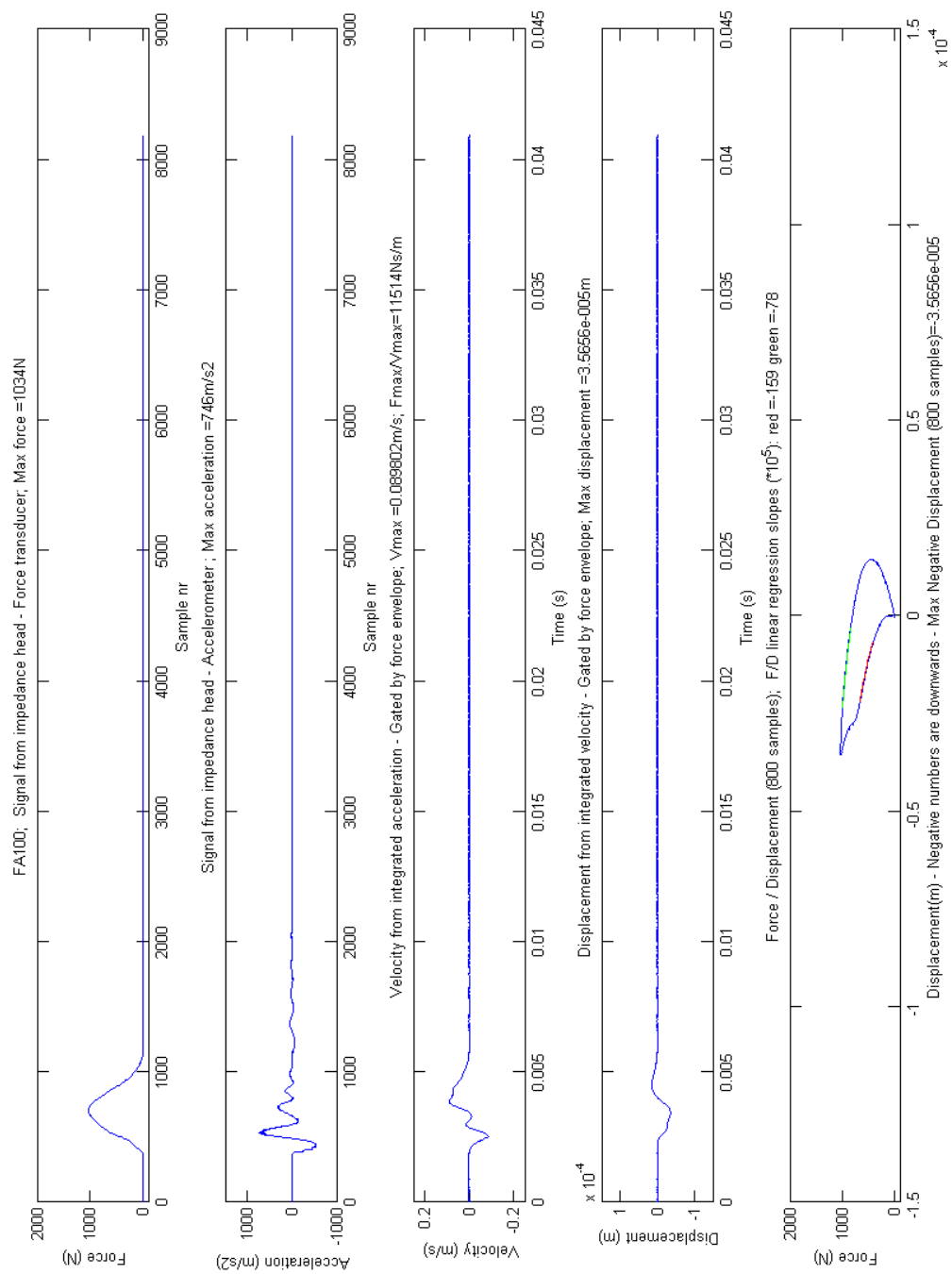
Figurernas innehåll:

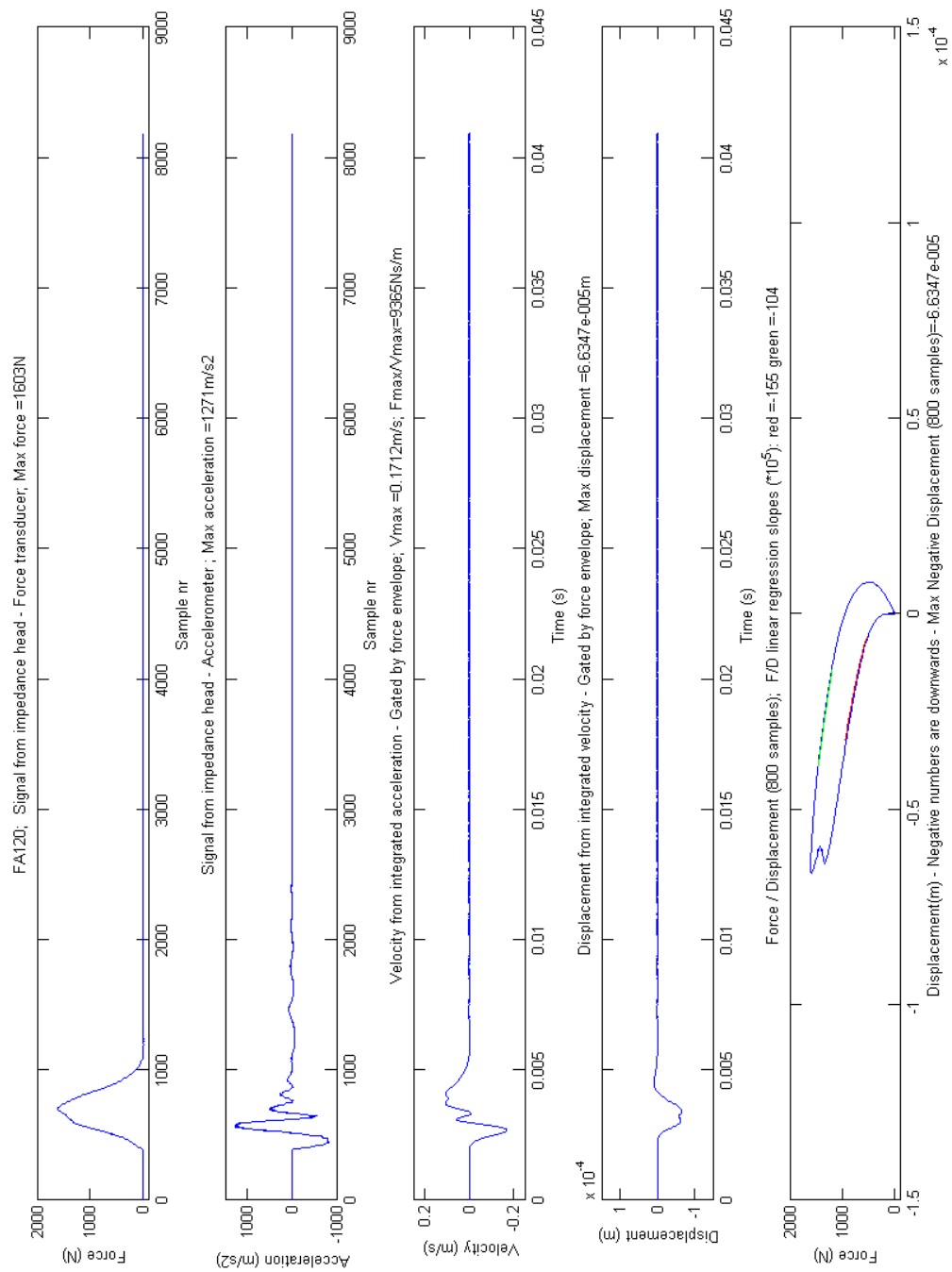
- Diagram 1: Kraften som funktion av 8192 samples @ 200 kSa/s, 14 bitar, F_{max}
Diagram 2: Accelerationen som funktion av 8192 samples @ 200 kSa/s, 14 bitar
Diagram 3: Framintegrerad hastighet som funktion av tid
Diagram 4: Framintegrerad rörelse som funktion av tid, D_{max}
Diagram 5: Kraft som funktion av rörelse med olika gradienter , Röd, Grön)

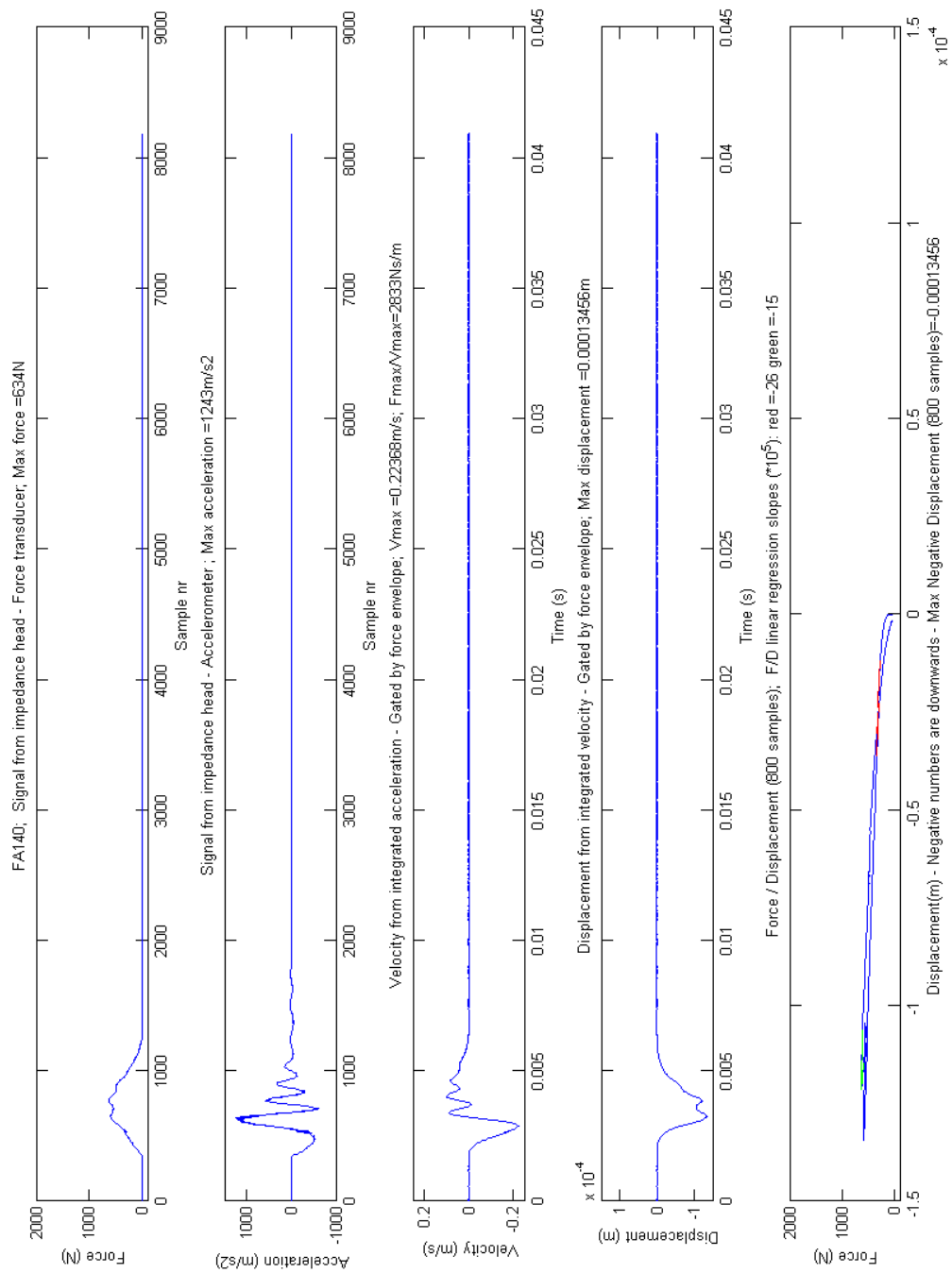


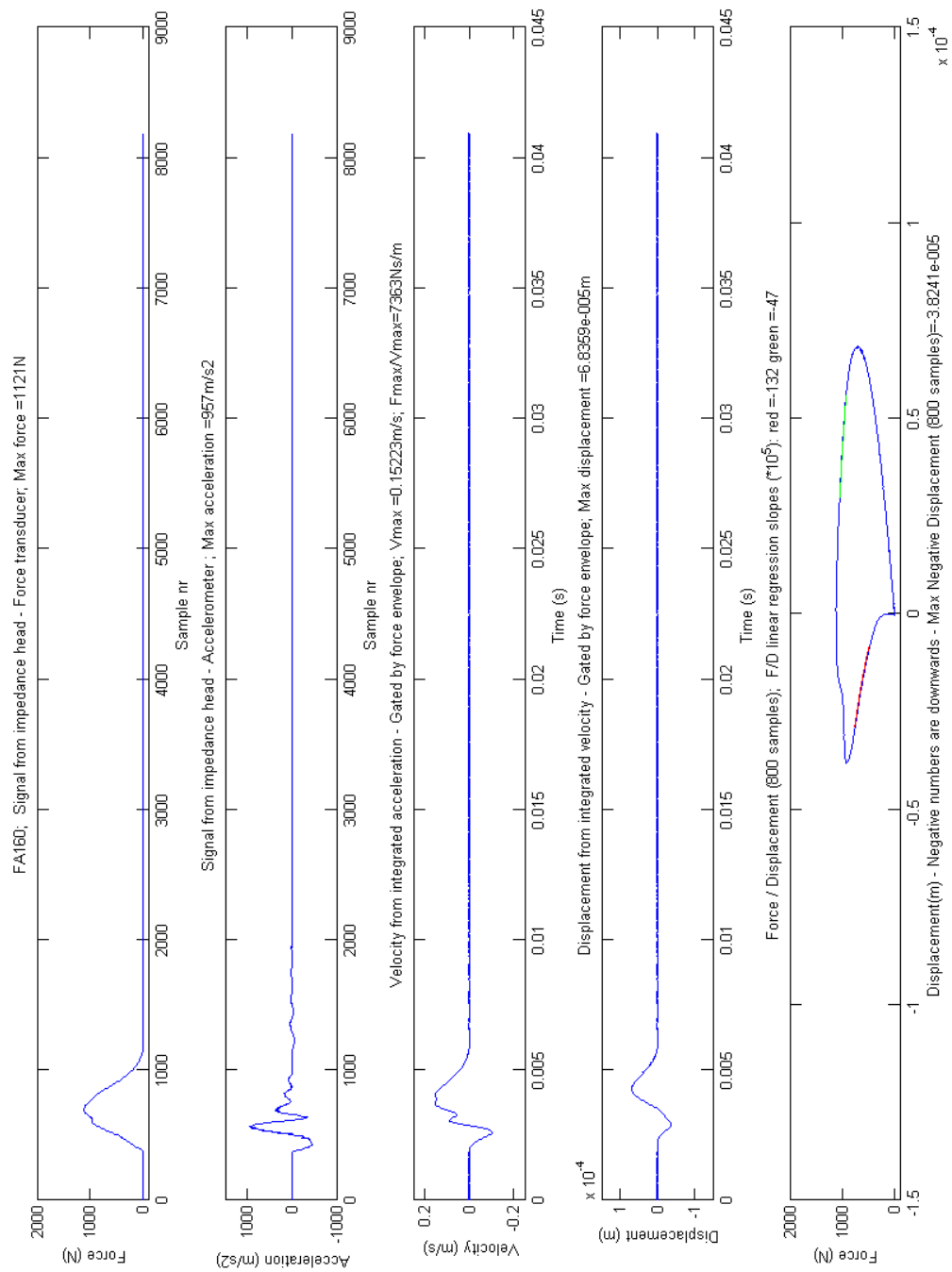


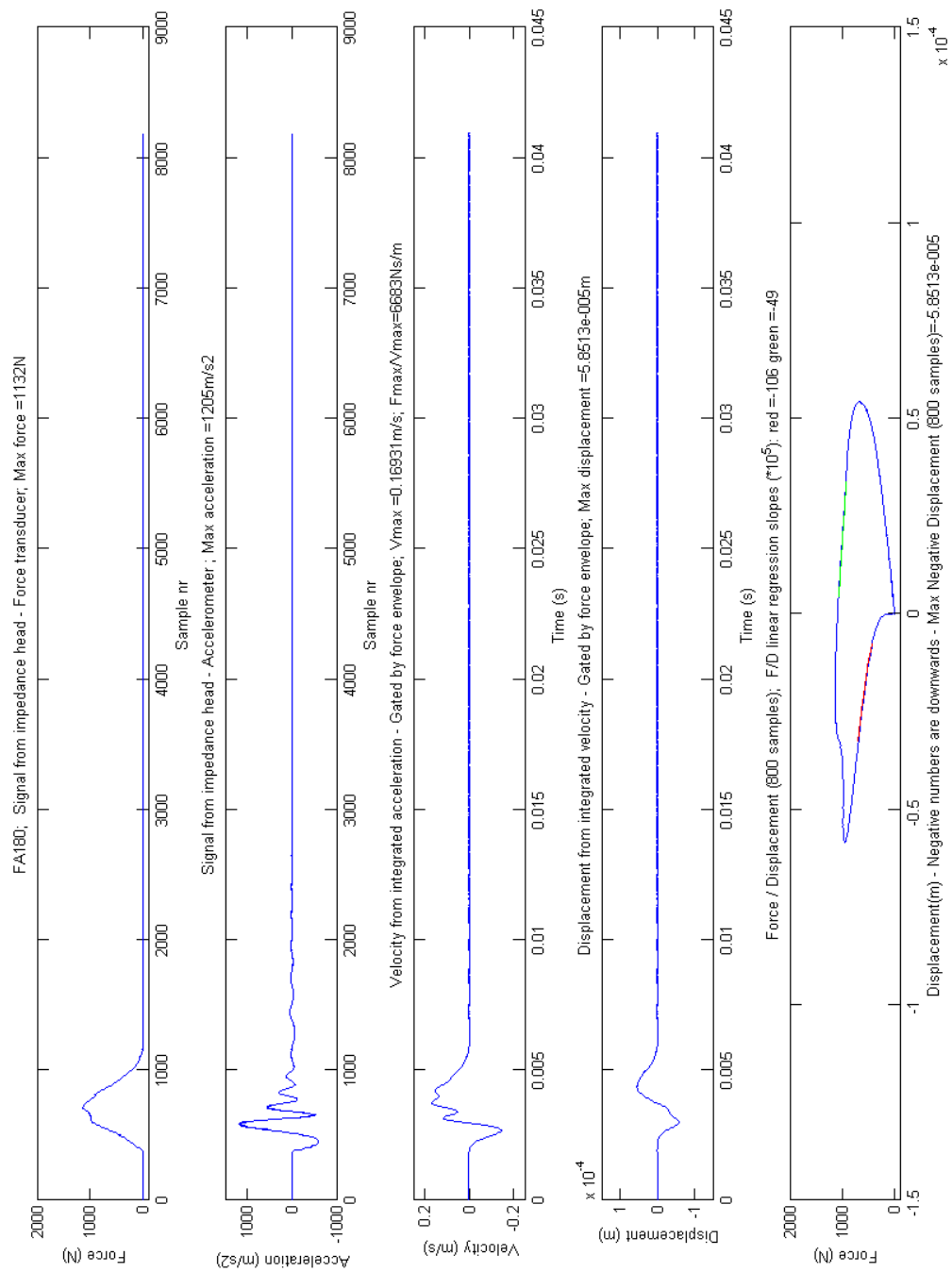






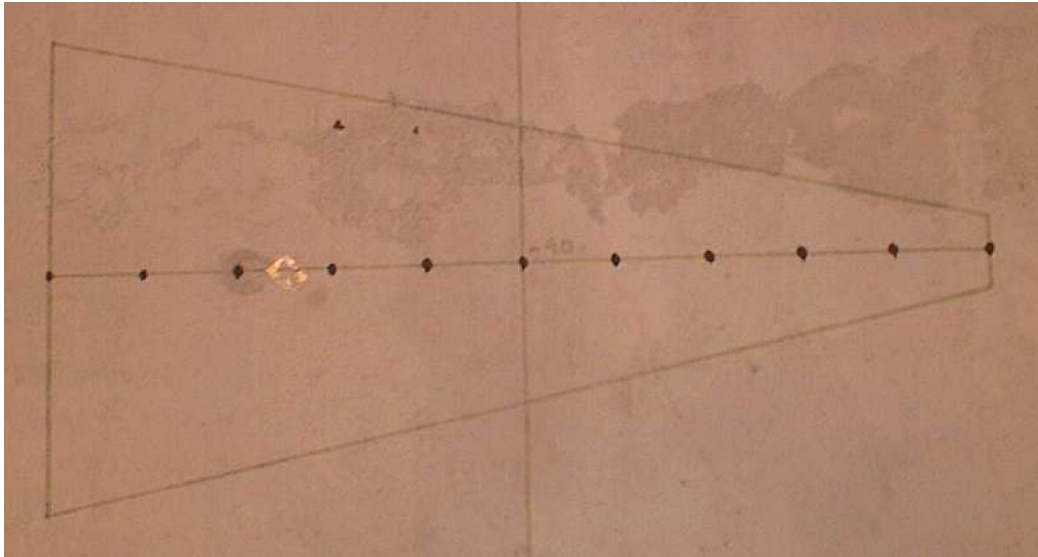






Test med impedanshuvud (F/a):

-Inverkan av spännvidd



Mätlinjen går längs delamineringens centerlinje med position 00 till vänster och position 50 cm till höger i delamineringens kanter. Det är 5 cm mellan varje mätning. Alla mätningar är utförda på den delaminering som ligger på 40 mm djup och syftet med mätserien är att utvärdera inverkan av delamineringens spännvidd.

Kraftgivare: PCB typ 200C20 med känsligheten 0.0574 mV/N
Kraftgivarens förstärkare: PCB typ 480E09 inställd på Gain=10

Accelerometer: PCB typ 635A01 ICP känslighet 9.8 mV/m/s²
Accelerometerens förstärkare: PCB typ 480E09 inställd på Gain=1
Accelerometerens dämpsats: Inställd på Gain=0.15

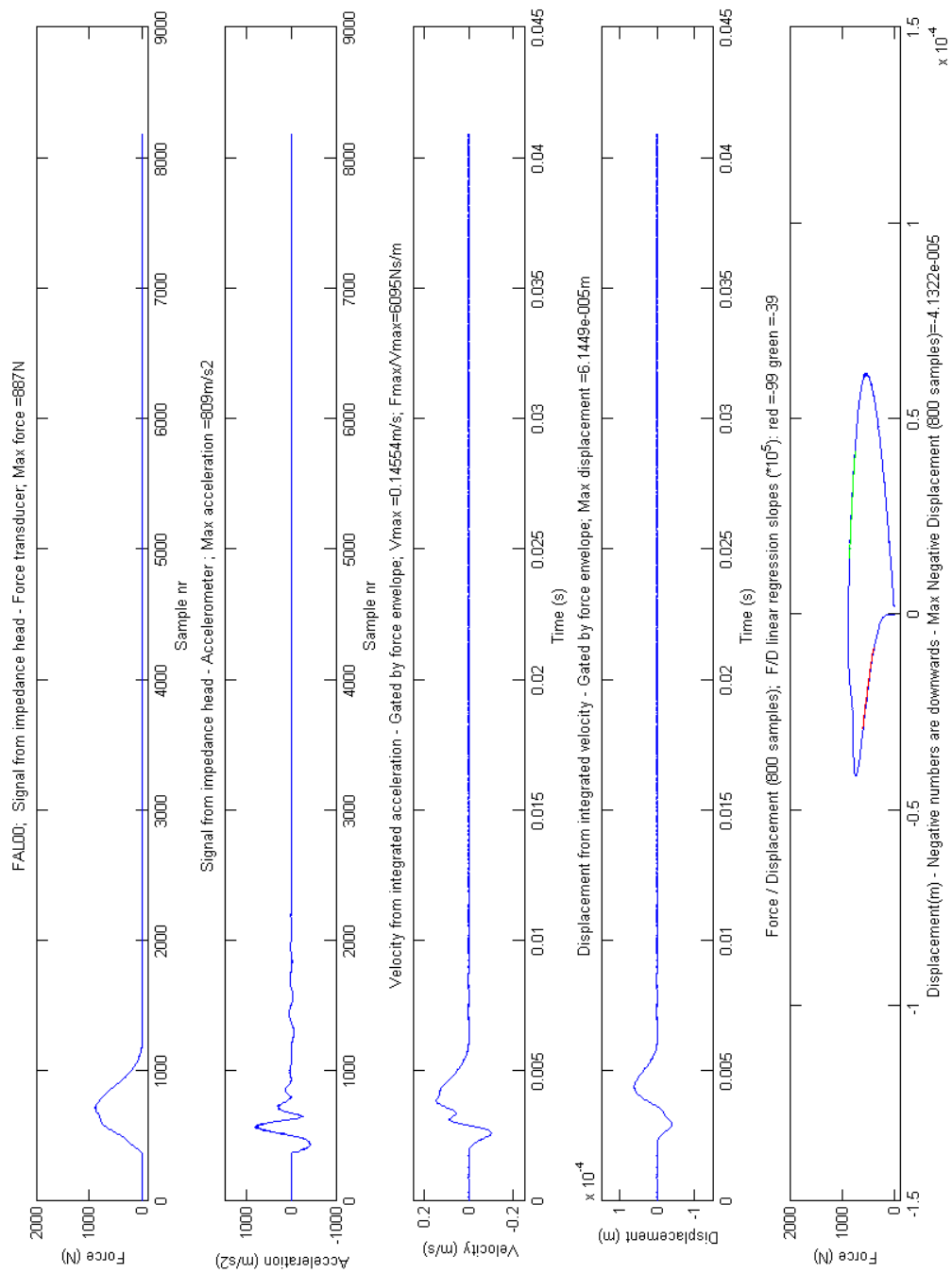
Hammare: PCB "Modally tuned hammer" typ 086C41 Vikt 1.5 kg, röd slagdyna. Hammarens kraftgivare ej använd.

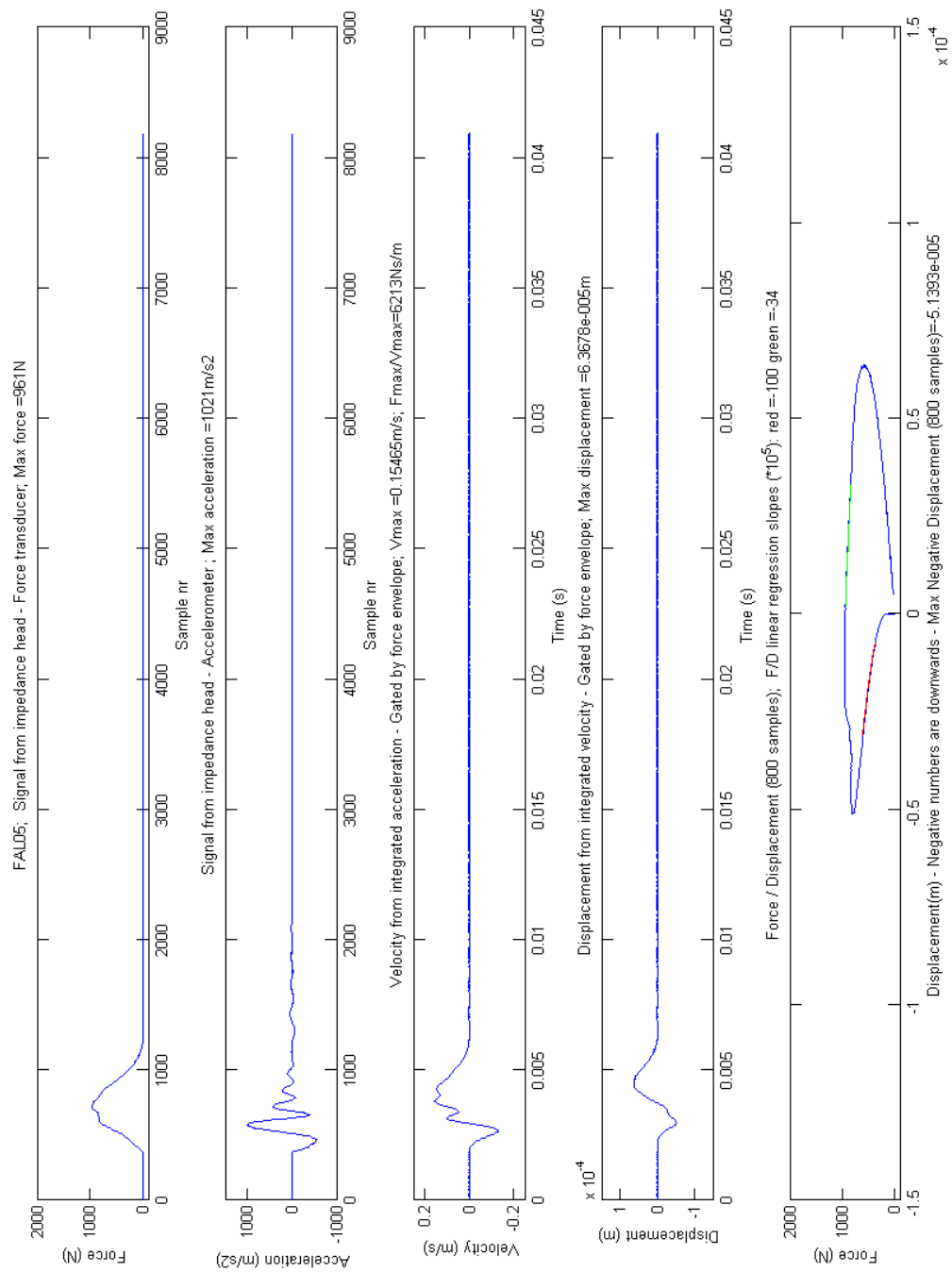
Presenterade figurer:

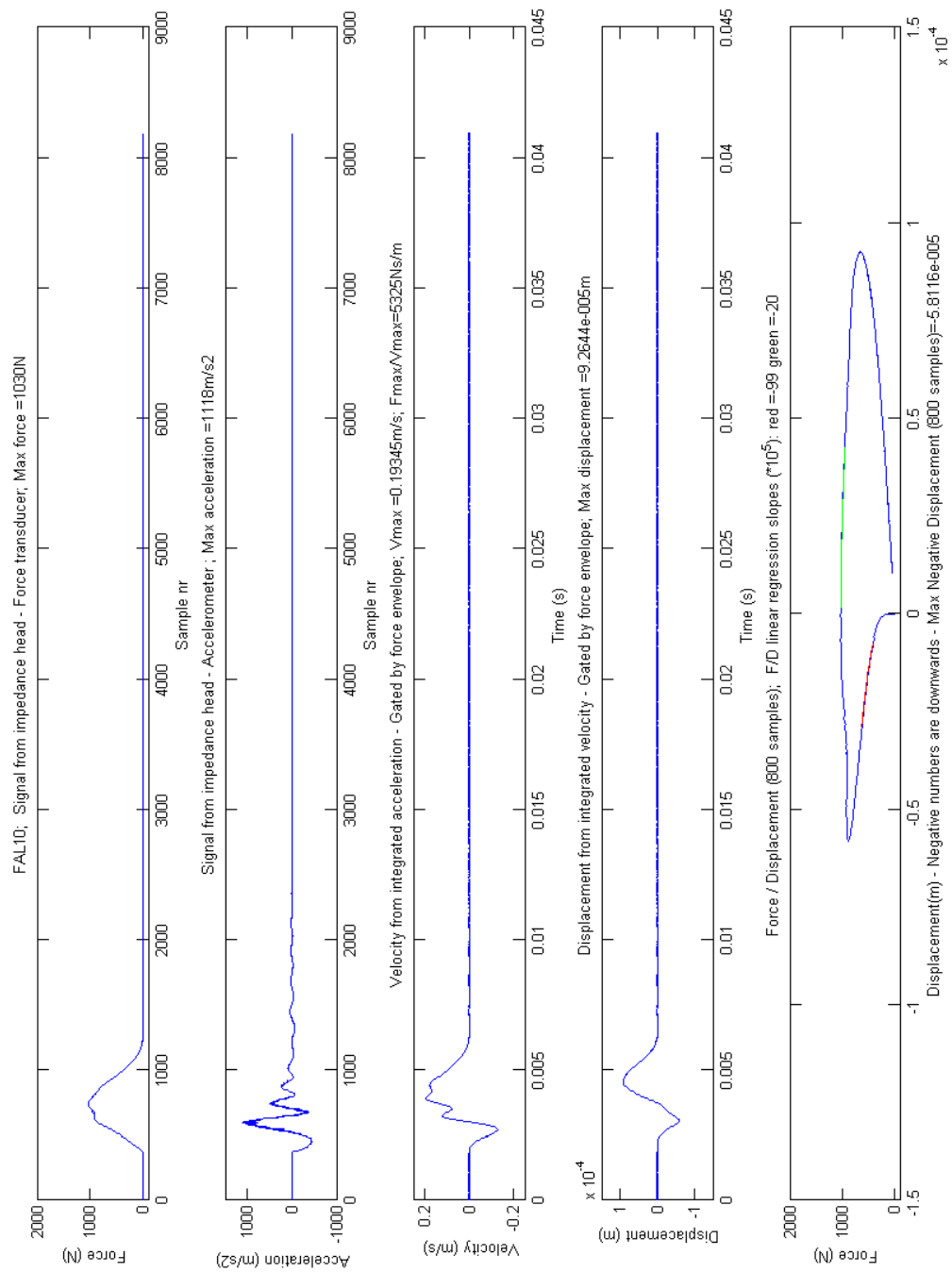
FAL00	Mätning i position 0 cm, över delamineringens kant
FAL05	Mätning i position 5 cm längs mittlinjen
FAL10	Mätning i position 10 cm längs mittlinjen
FAL15	Mätning i position 15 cm längs mittlinjen
FAL20	Mätning i position 20 cm längs mittlinjen
FAL25	Mätning i position 25 cm längs mittlinjen
FAL30	Mätning i position 30 cm längs mittlinjen
FAL35	Mätning i position 35 cm längs mittlinjen
FAL40	Mätning i position 40 cm längs mittlinjen
FAL45	Mätning i position 45 cm längs mittlinjen
FA L50	Mätning i position 50 cm, över delamineringens kant

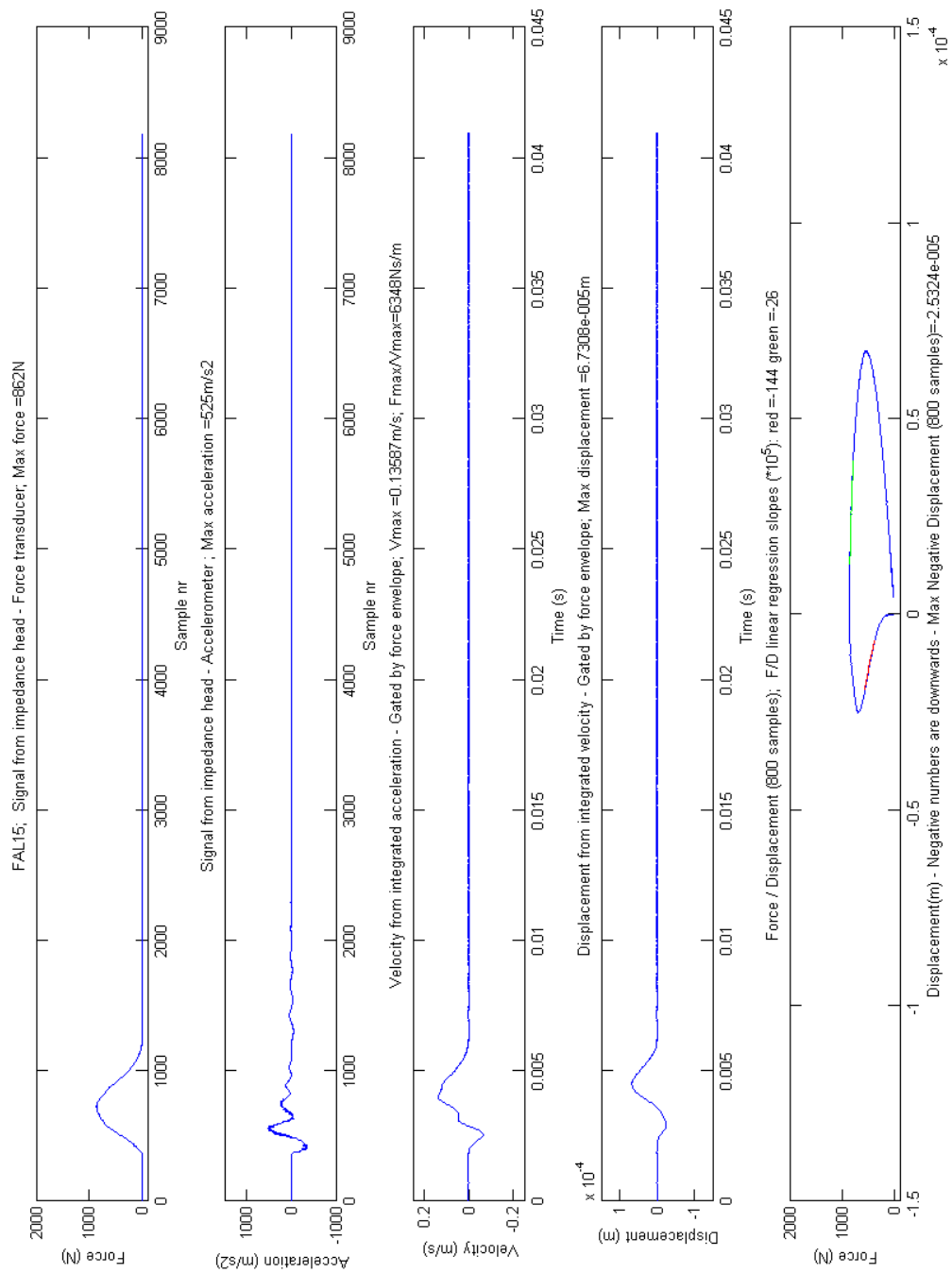
Figurernas innehåll:

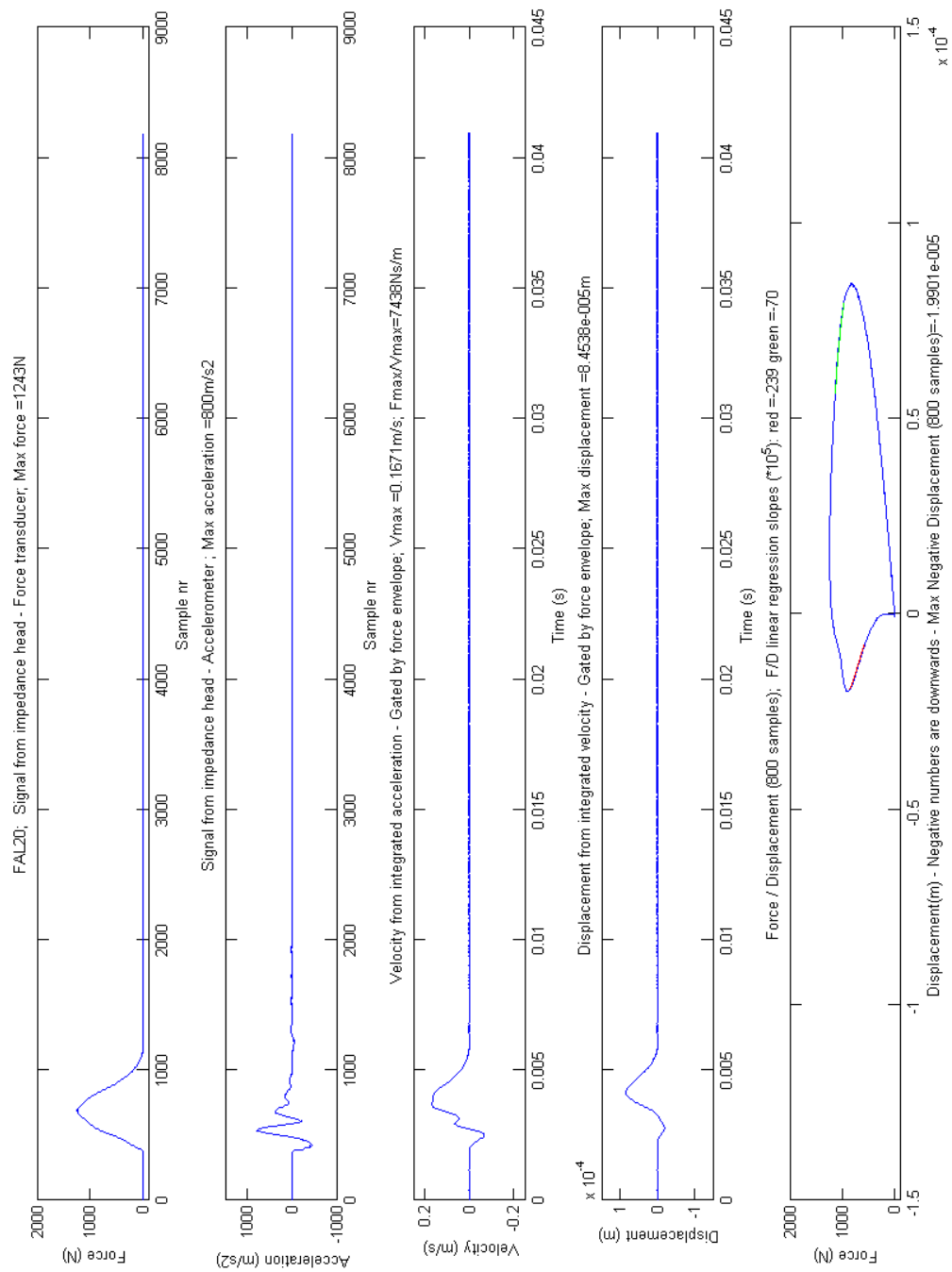
Diagram 1: Kraften som funktion av 8192 samples @ 200 kSa/s, 14 bitar, F_{max}
Diagram 2: Accelerationen som funktion av 8192 samples @ 200 kSa/s, 14 bitar
Diagram 3: Framintegrerad hastighet som funktion av tid
Diagram 4: Framintegrerad rörelse som funktion av tid, D_{max}
Diagram 5: Kraft som funktion av rörelse med olika gradienter , Röd, Grön)

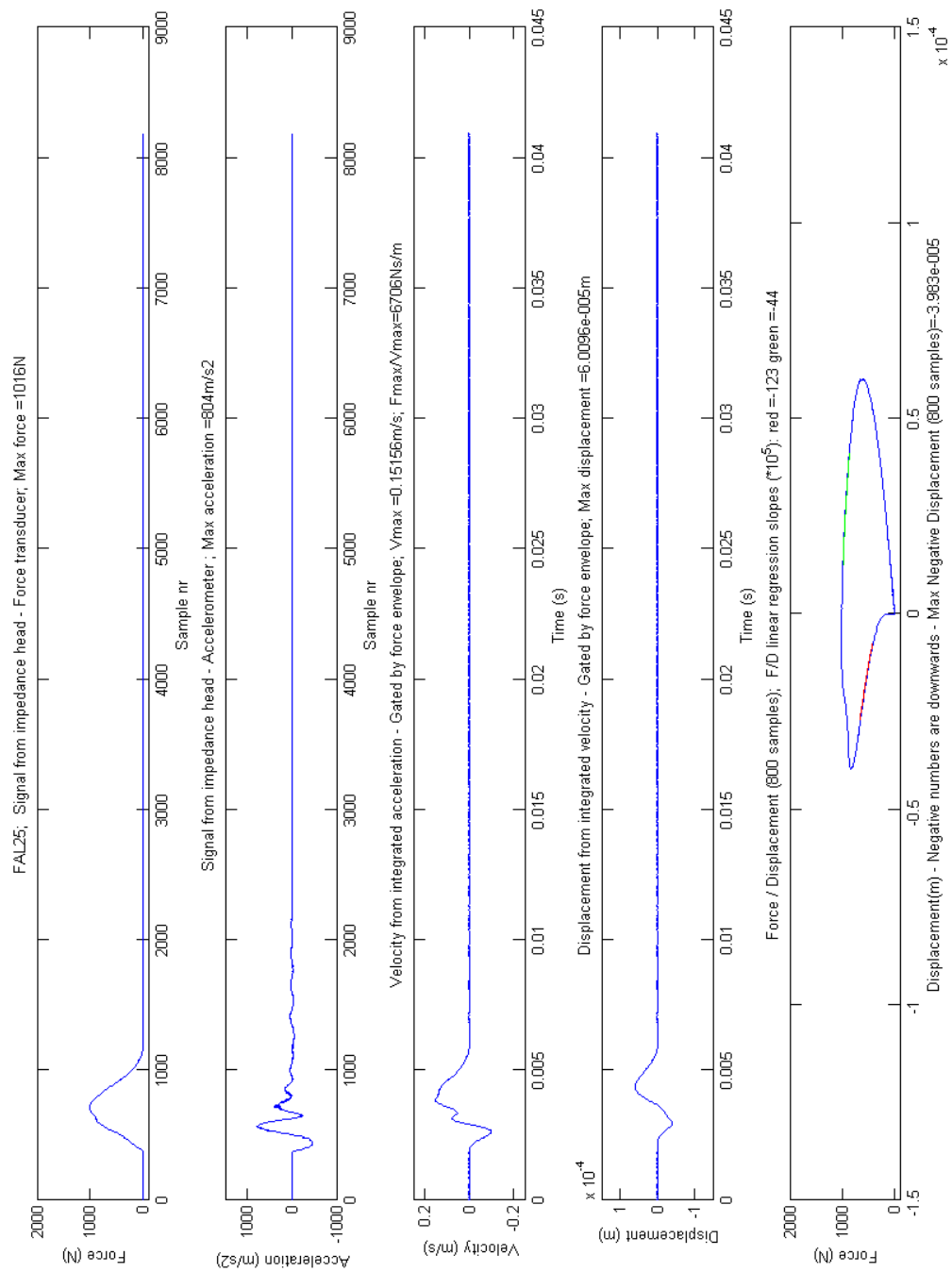


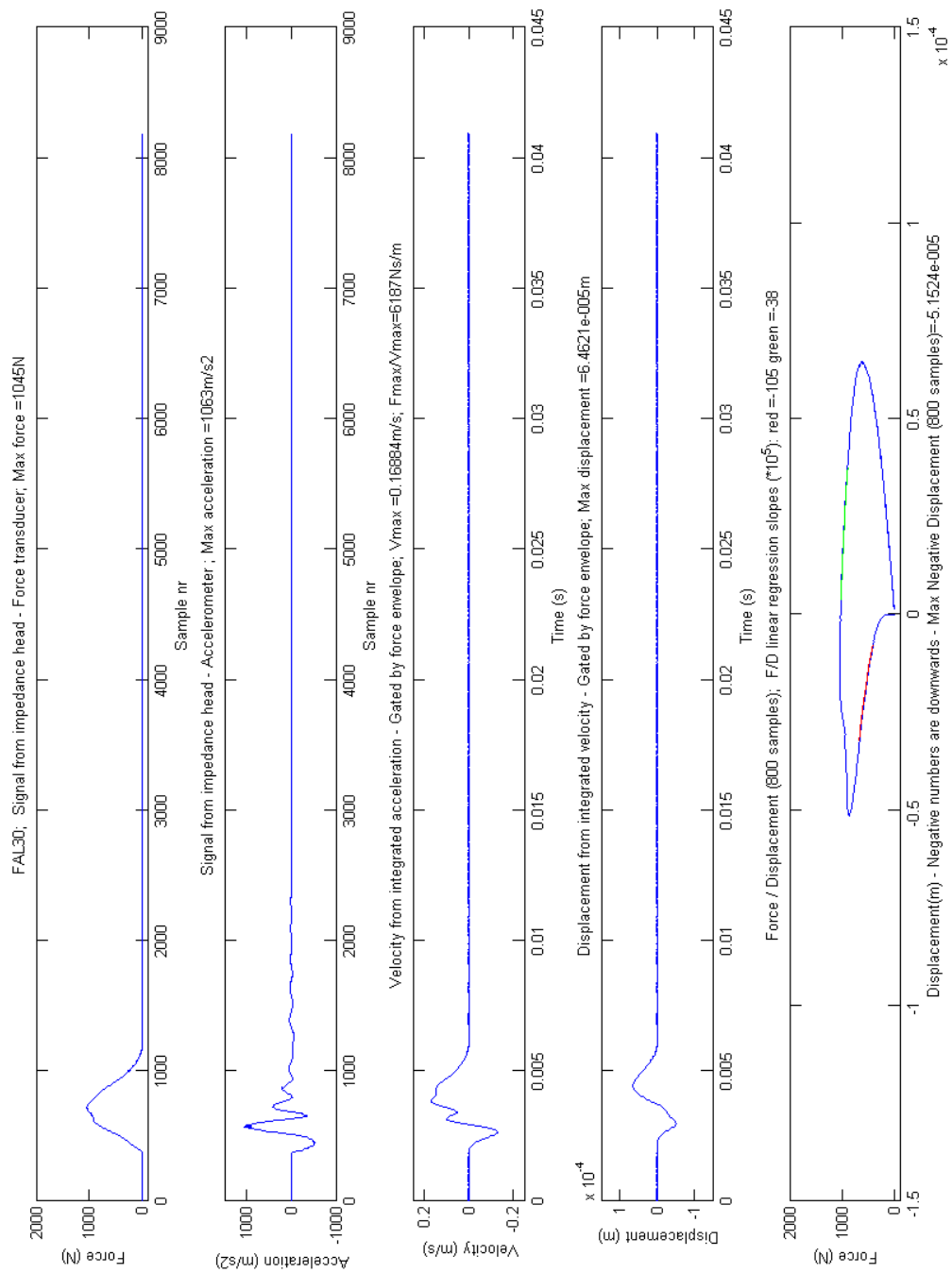


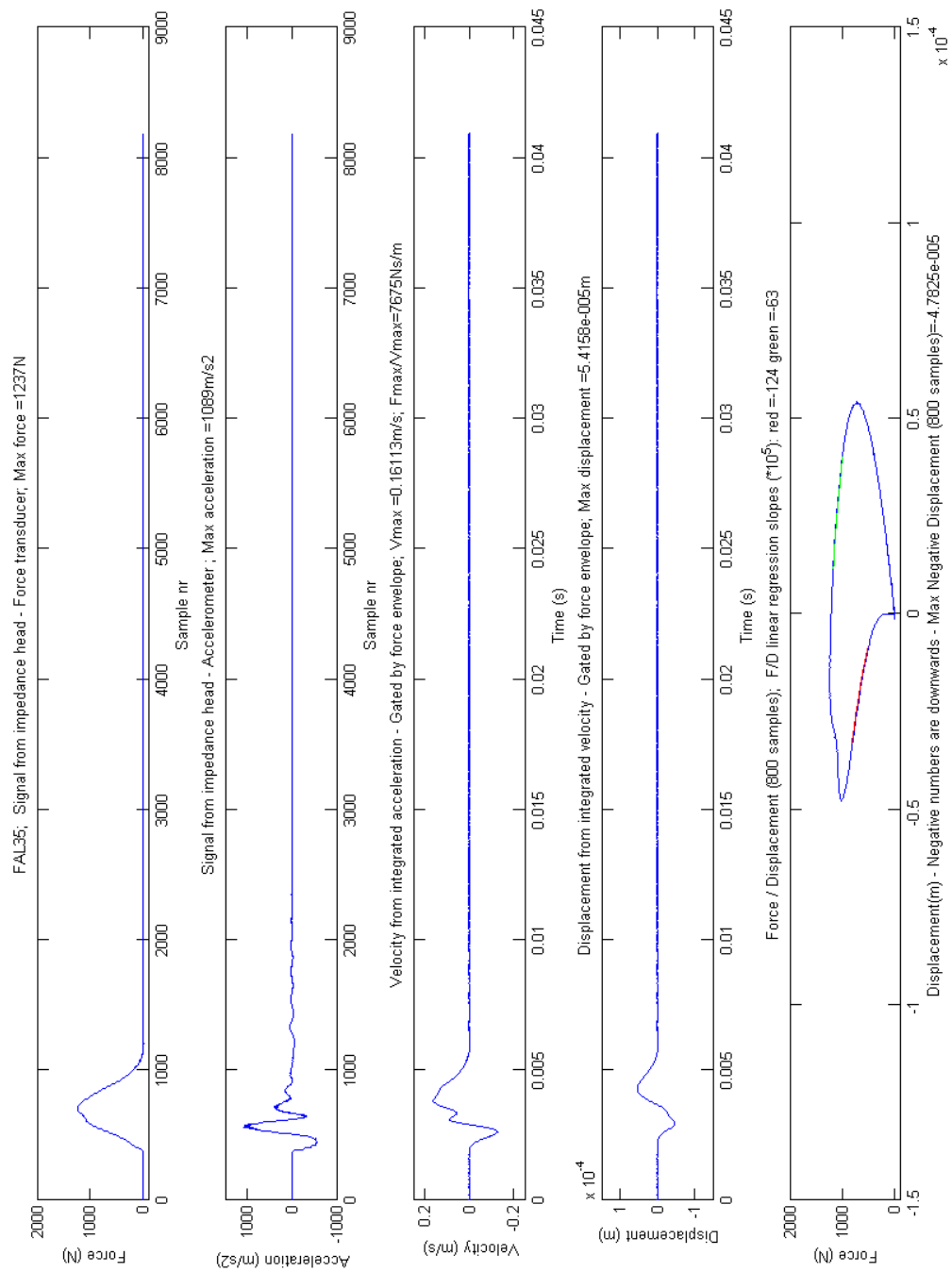


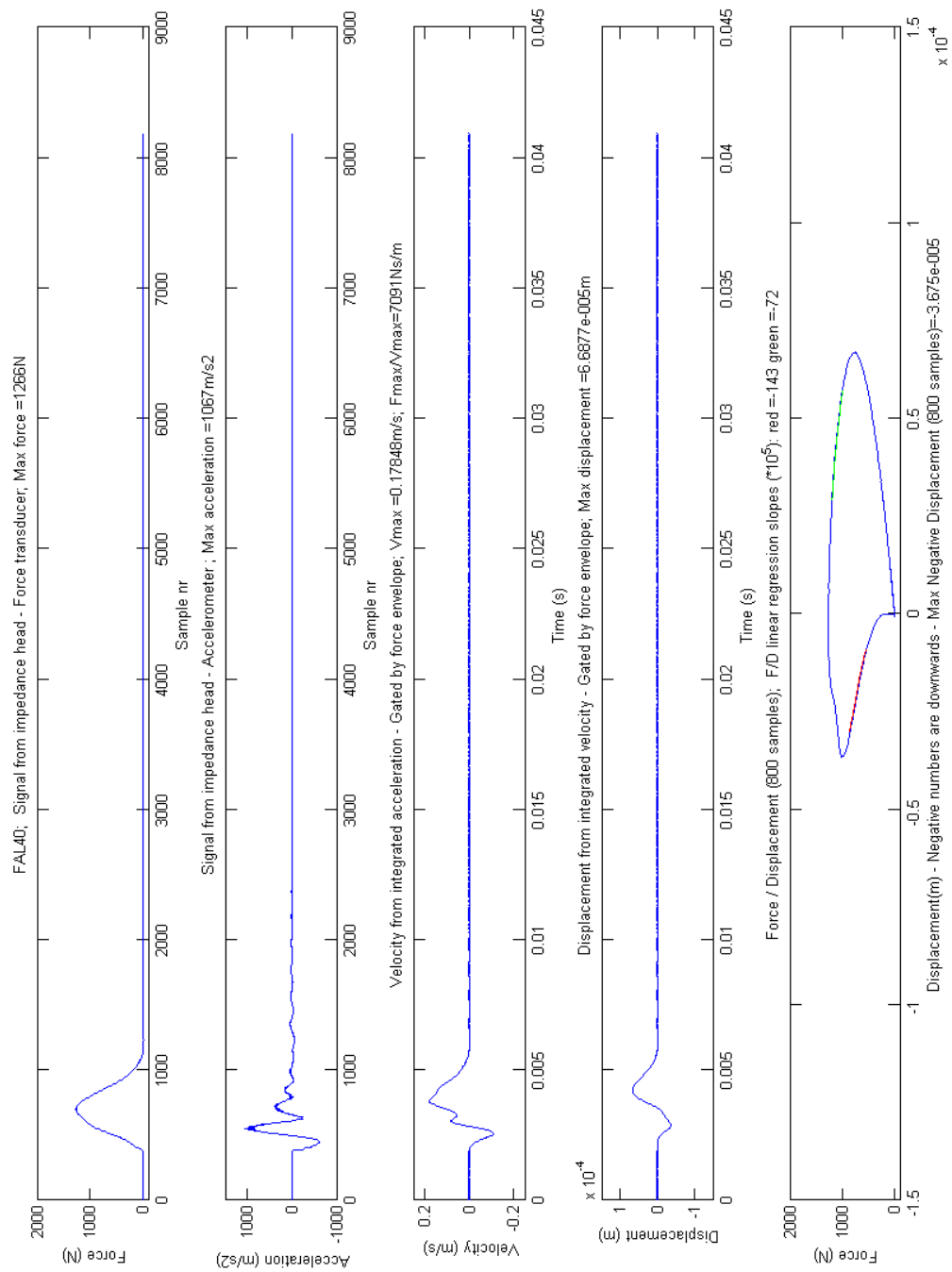


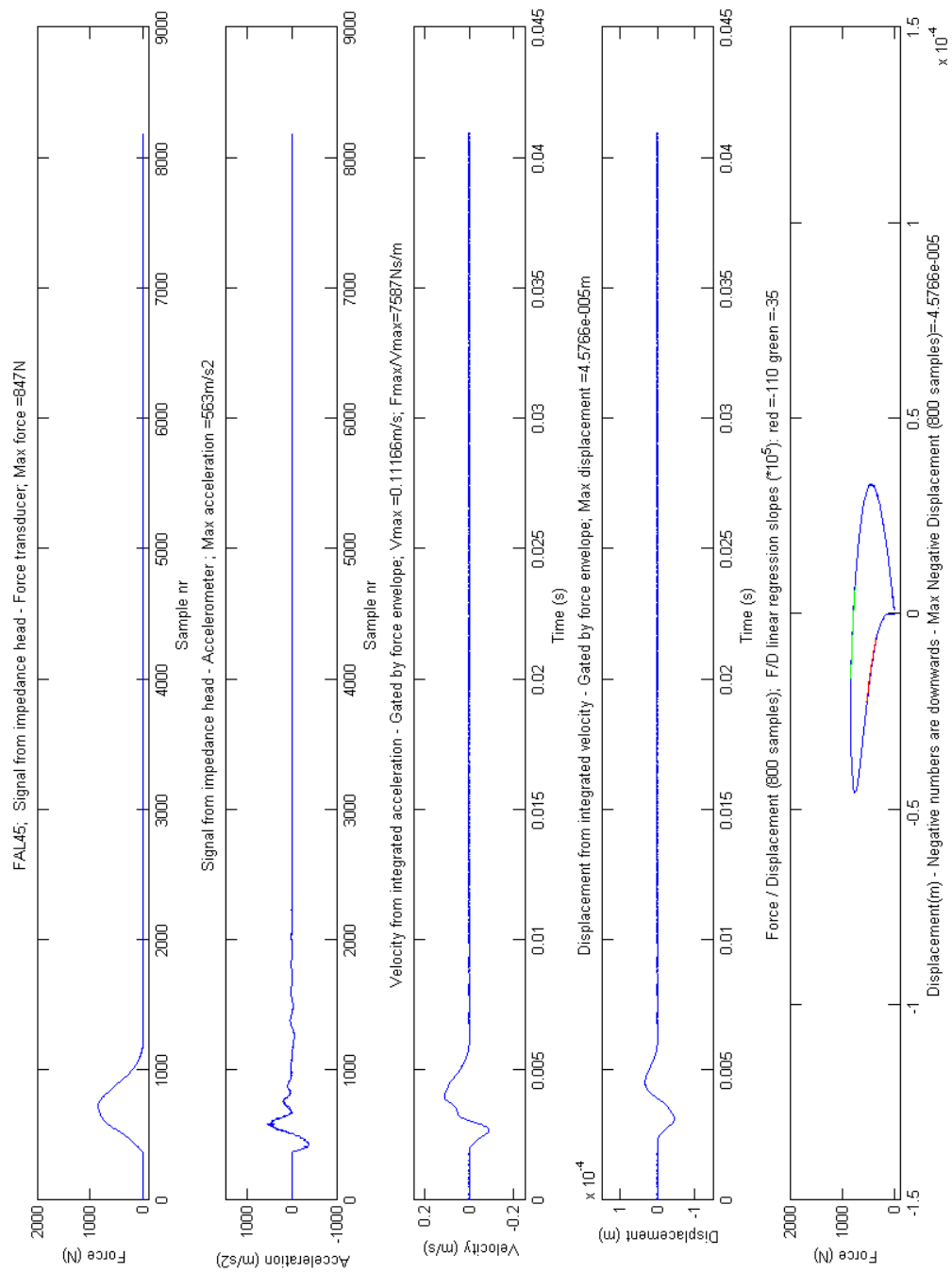


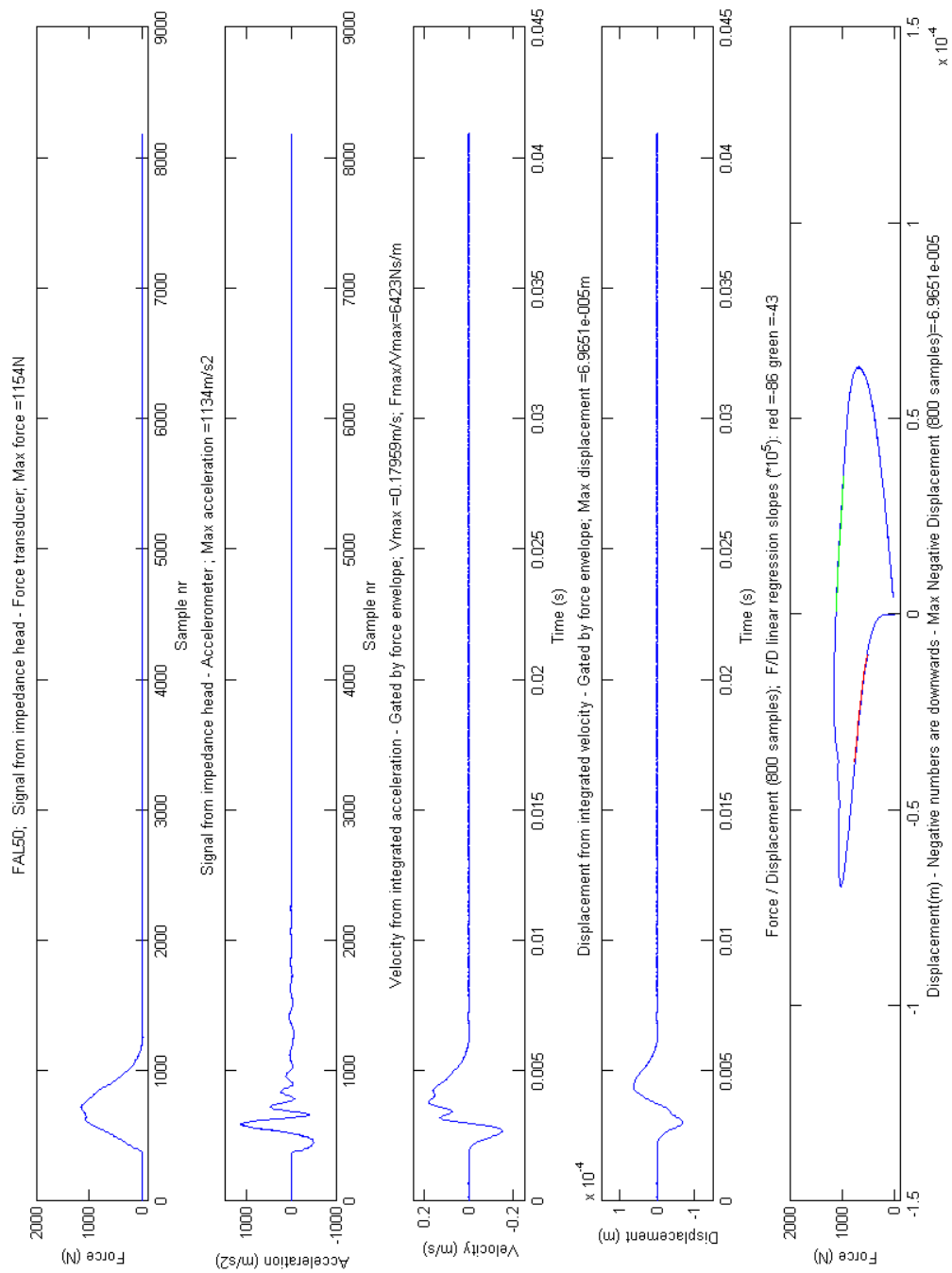












Test med impedanshuvud (F/v):

- Hammare med olika hårdhet och vikt



Den i försöken använda hammaren. Överst en extra vikt av mässing. Underst de fyra olika slagdynorna som använts, i hårdhetsordning: Svart, röd, brun och grå (mjukast). Hammaren har en inbyggd kraftgivare, men den har inte använts i dessa försök. I stället har impedanshuvudet nedan, med inbyggd kraft- och hastighetsgivare, använts.



Kraftgivare: PCB typ 200C20 med känsligheten 0.0574 mV/N
Kraftgivarens förstärkare: PCB typ 480E09 inställd på Gain=10

Geofon: Geospace GS-20DM (28Hz) känsligheten 0.151 V/cm/s
Geofonen kopplad direkt till AD-omvandlaren.
Geofonens plastkåpa klistrad (Fix) mot betongytan för att säkerställa att det är betongens rörelse som mäts.

Hammare: PCB "Modally tuned hammer" typ 086C41 vikt 1.5 kg. Hammarens kraftgivare ej använd.

Fyra olika slagdynor har testats: Svart (Bl), röd(Rd), brun (Br) och grå (Gr).
Varje typ av slagdyna har dessutom testats med och utan en extra mässingsvikt (M) monterad på hammaren. Mässingsvikten väger 534 gram.

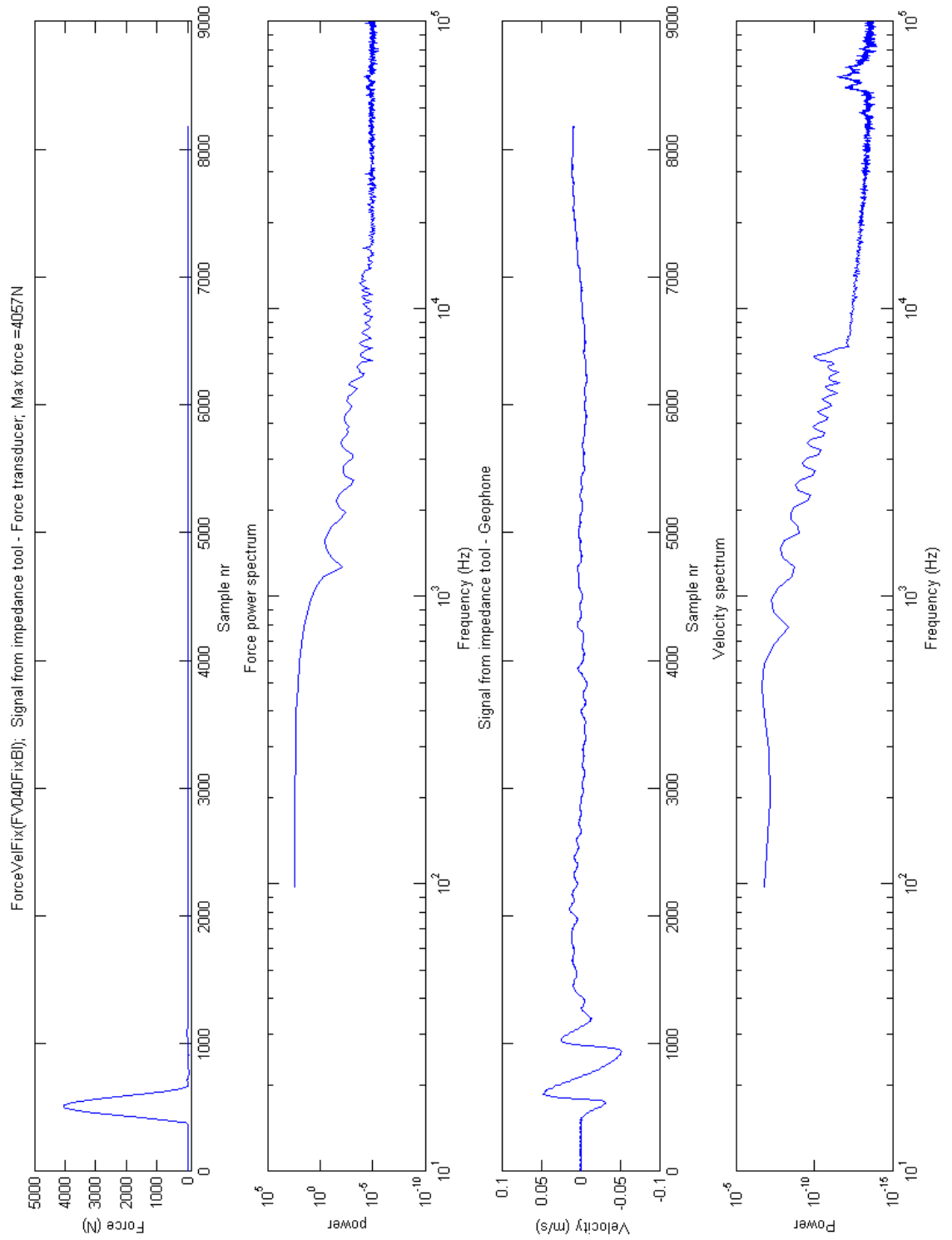
Presenterade figurer:

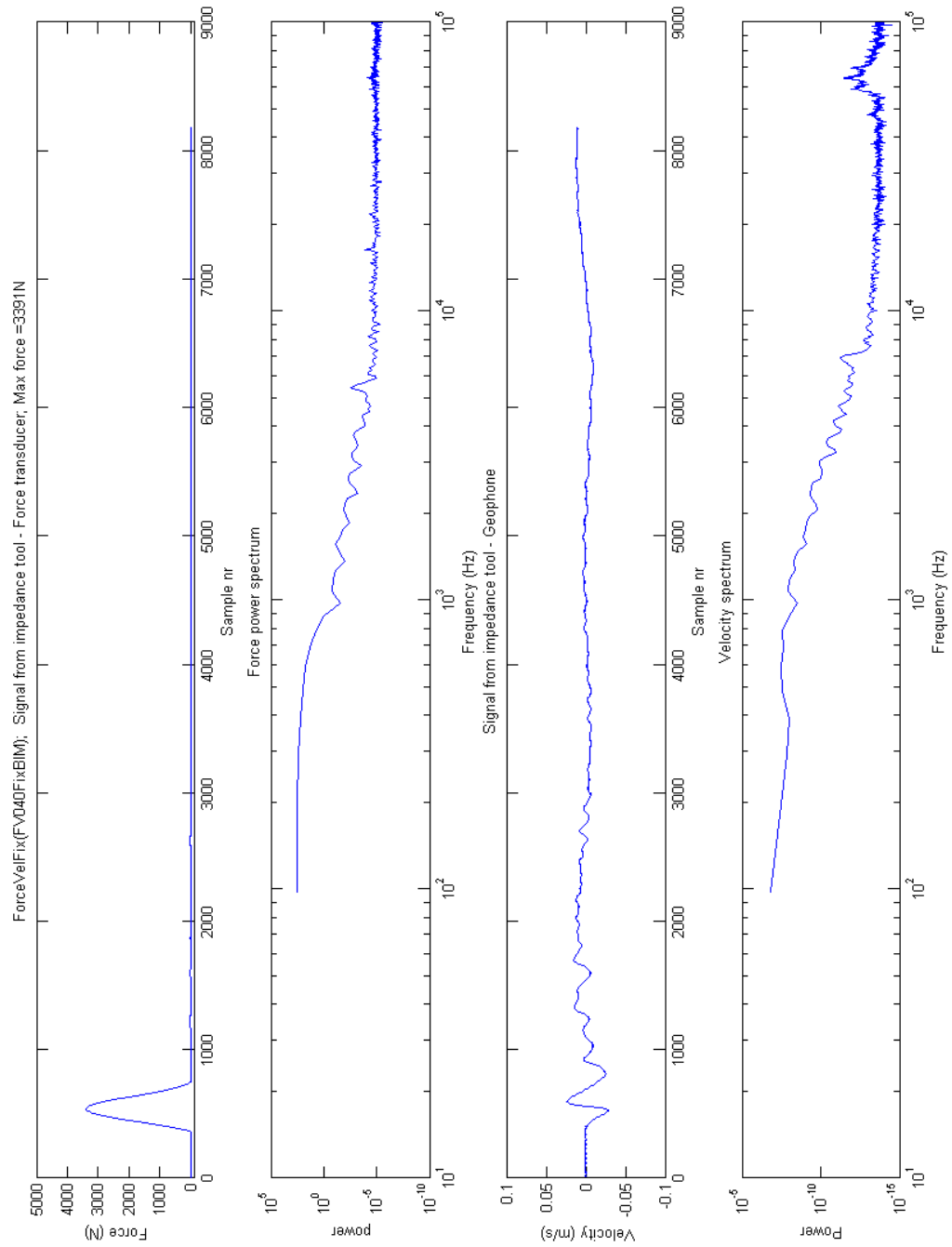
FV040FixSpBl:	Svart slagdyna, den hårdaste
FV040FixSpBlM:	Svart slagdyna med mässingsvikt
FV040FixSpRd:	Röd slagdyna, den näst hårdaste
FV040FixSpRdM:	Röd slagdyna med mässingsvikt
FV040FixSpBr:	Brun slagdyna, den näst mjukaste
FV040FixSpBrM:	Brun slagdyna med mässingsvikt
FV040FixSpGr:	Grå slagdyna, den mjukaste
FV040FixSpGrM:	Grå slagdyna med mässingsvikt

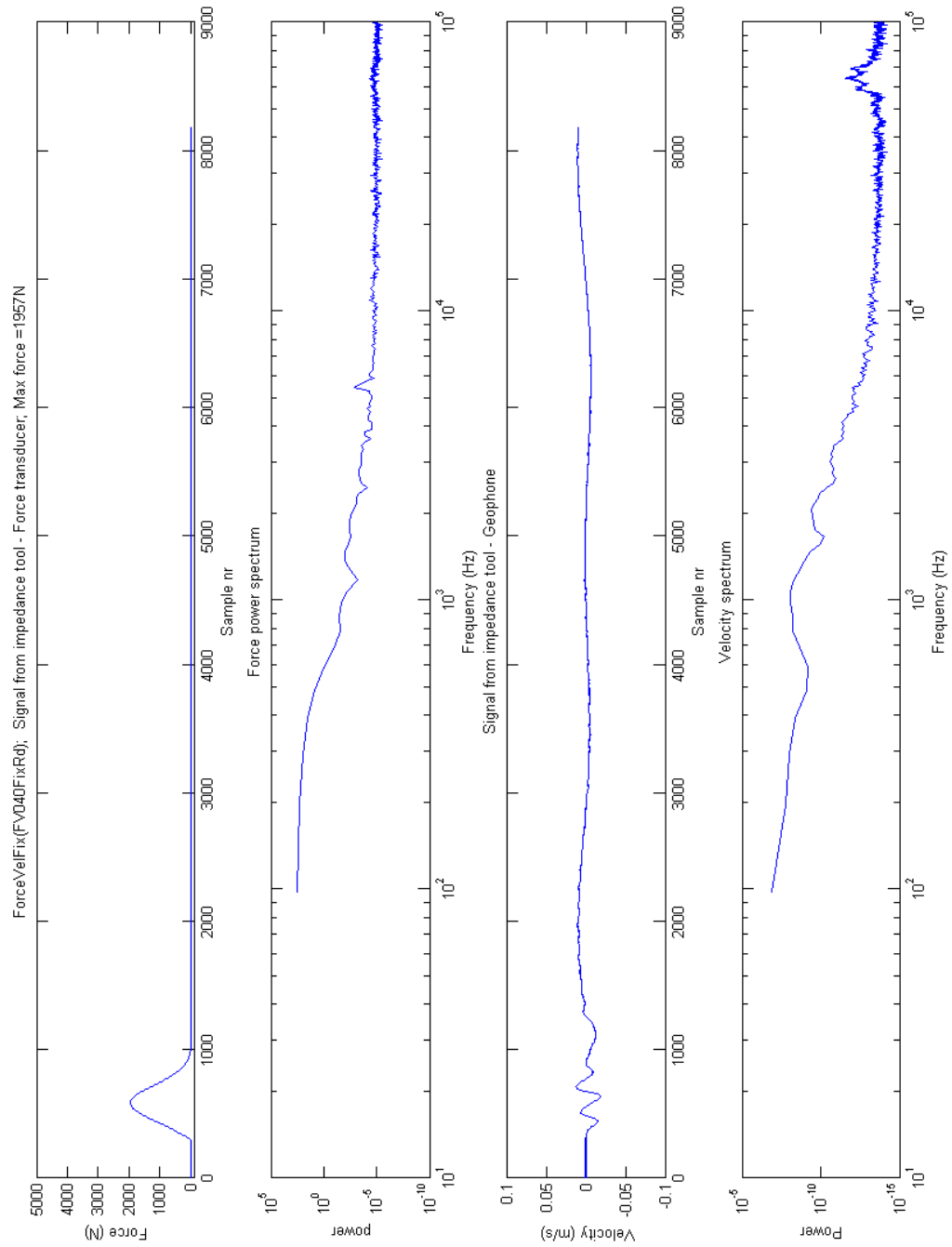
ForceVelFix är namnet på den MATLAB-rutin som använts för redovisningen.

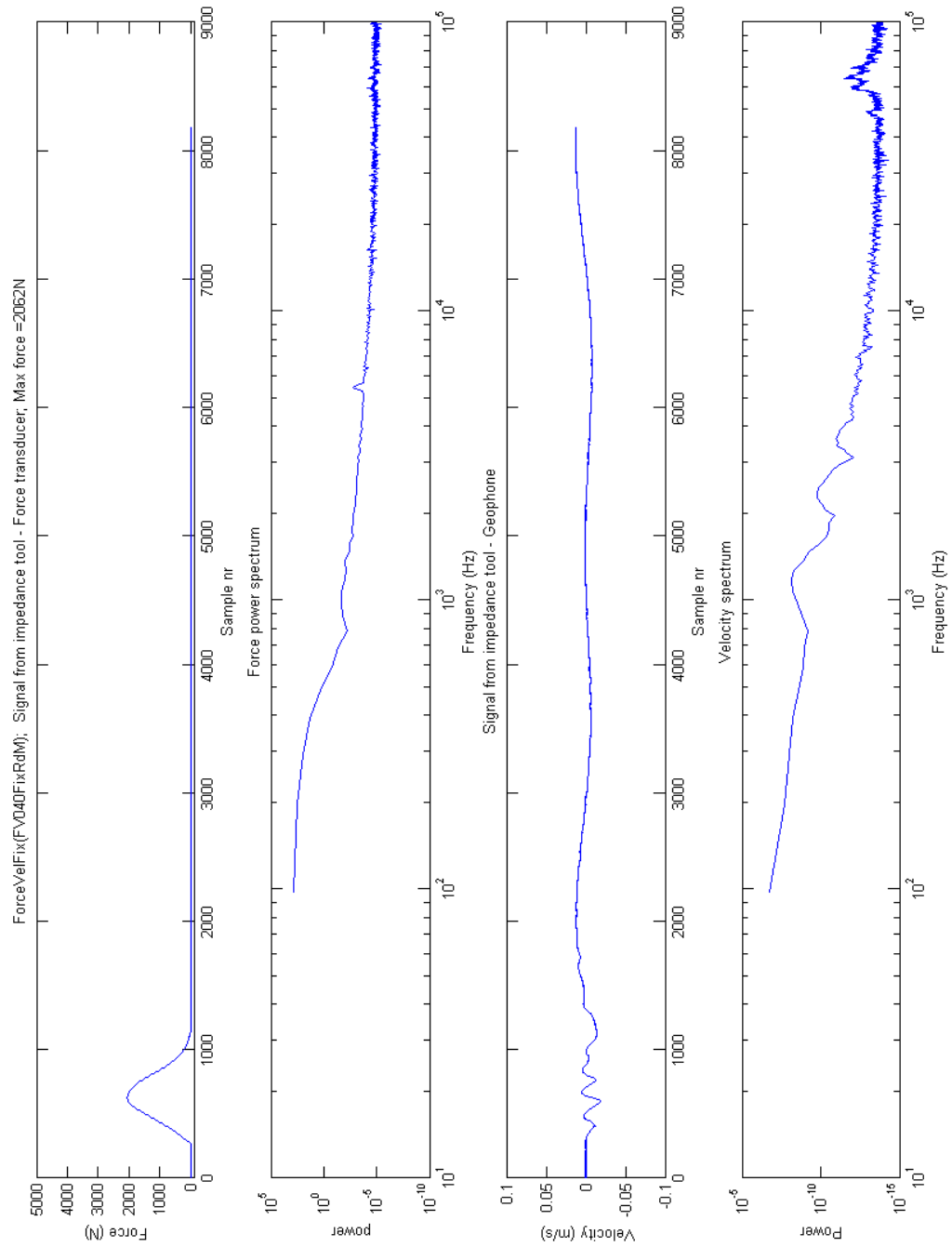
Figurernas innehåll:

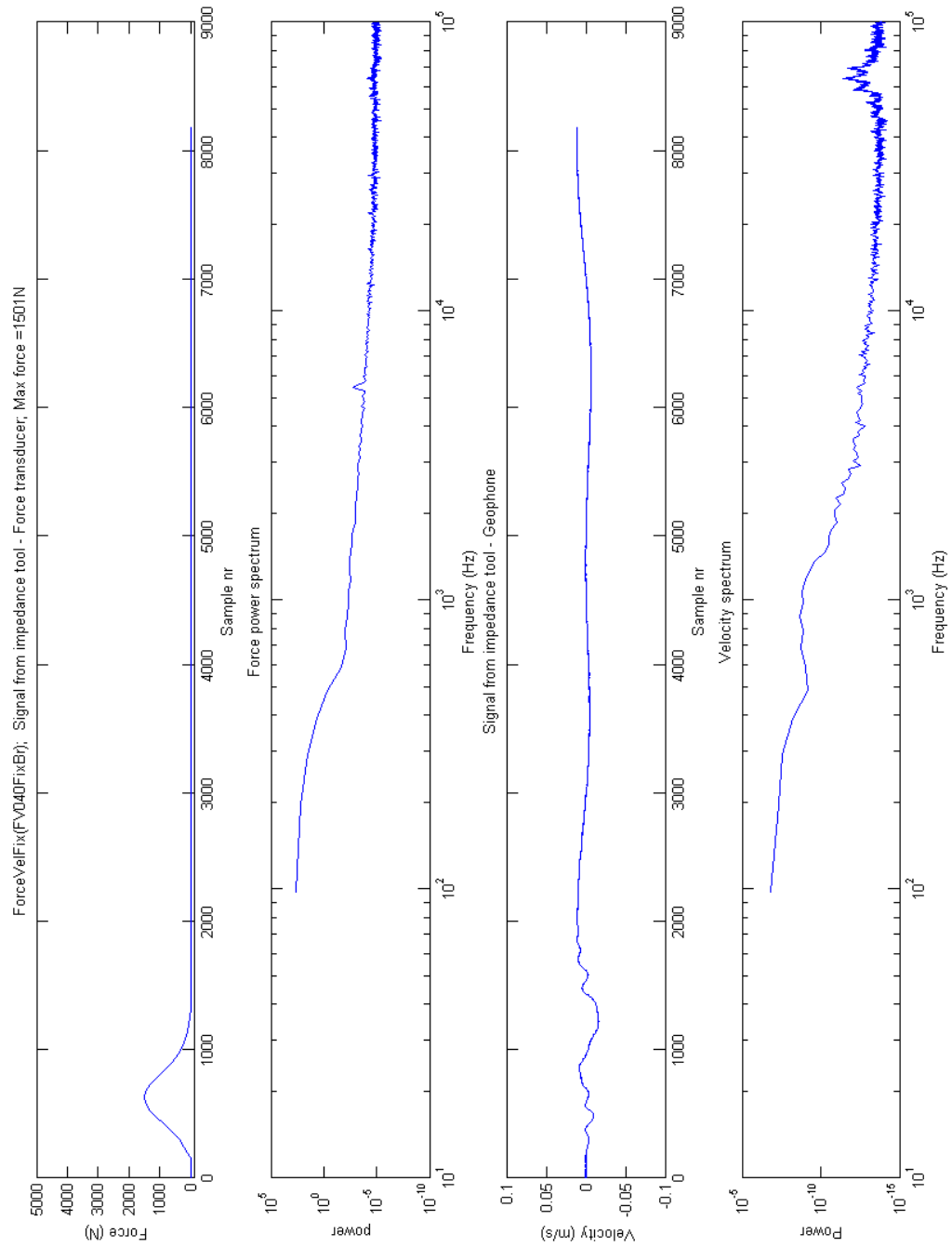
Diagram 1: Kraften som funktion av 8192 samples @ 200 kSa/s, 14 bits, F_{max}
Diagram 2: Kraftspektrum
Diagram 3: Hastigheten som funktion av 8192 samples @ 200 kSa/s, 14 bits
Diagram 4: Hastighetsspektrum

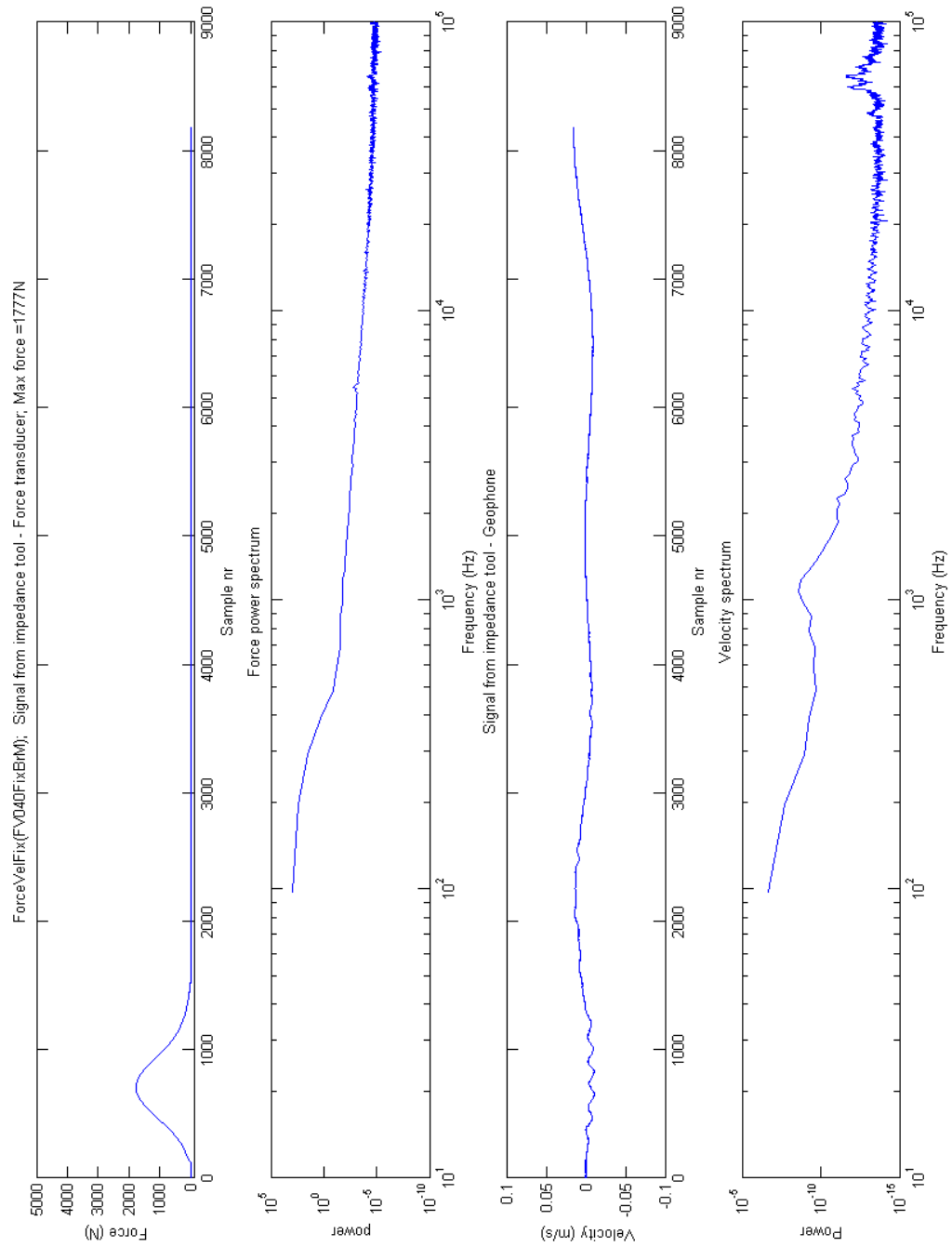


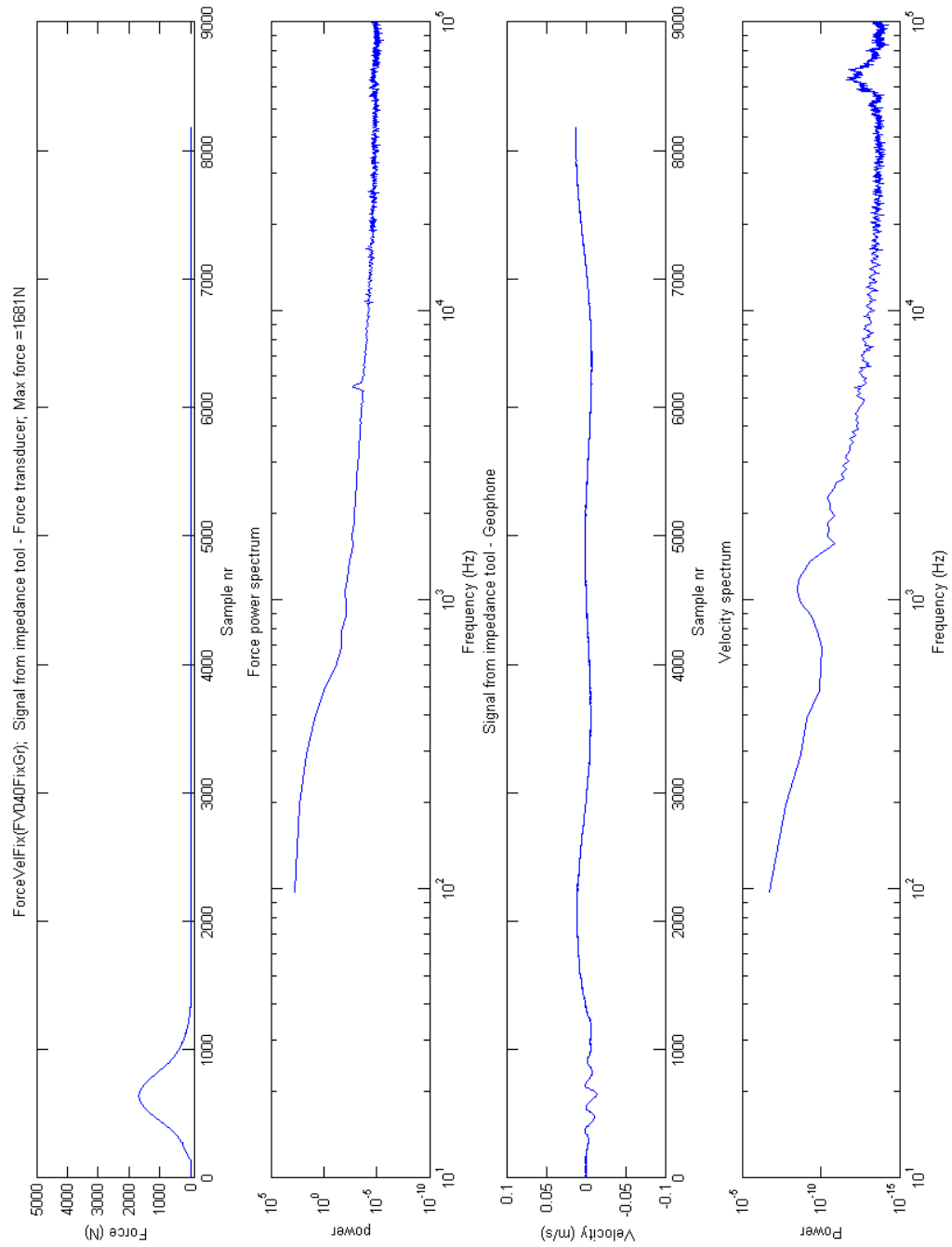


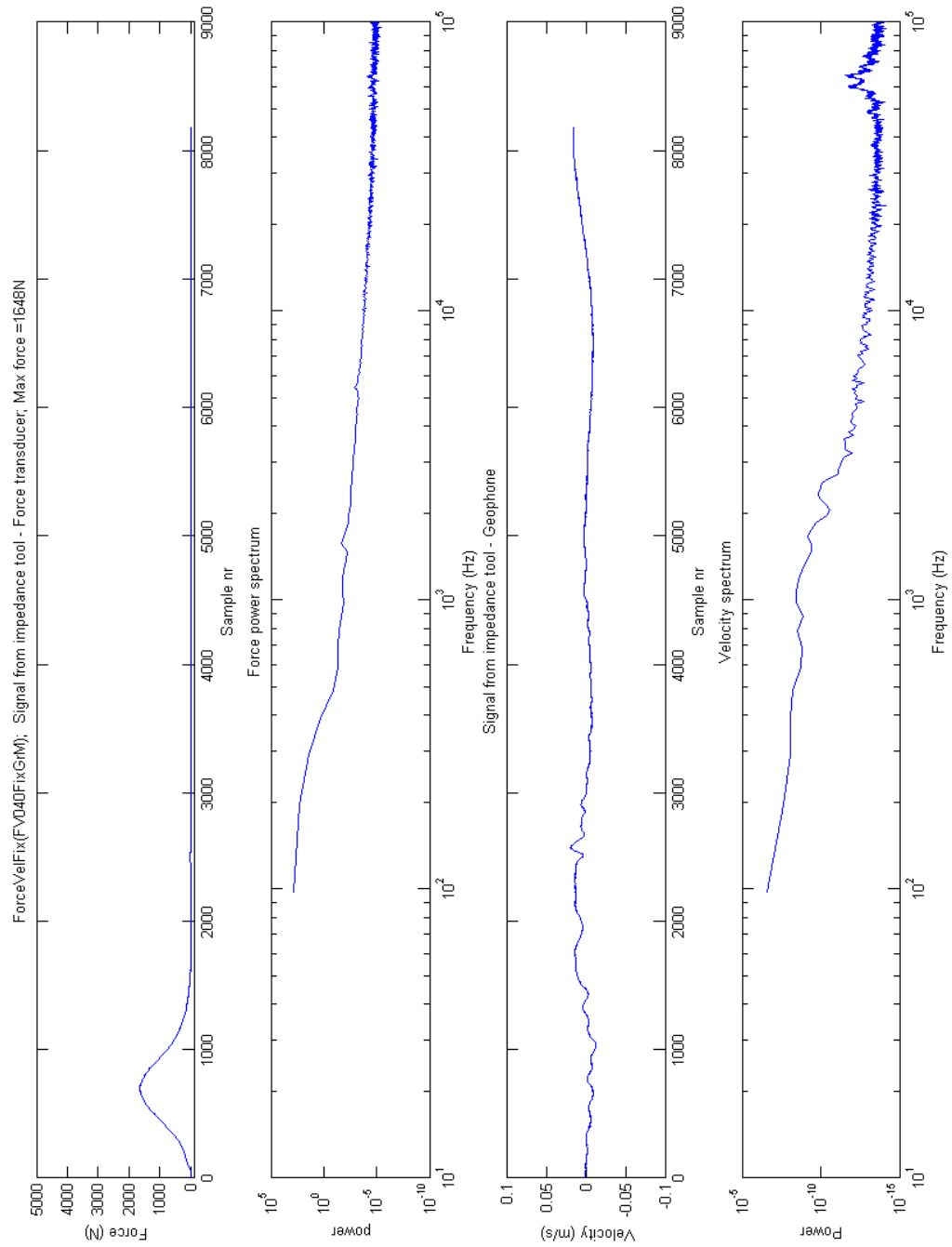












ELFORSK

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