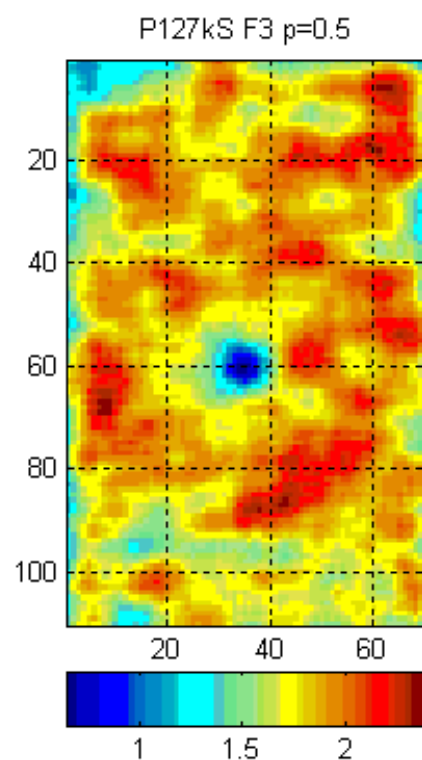
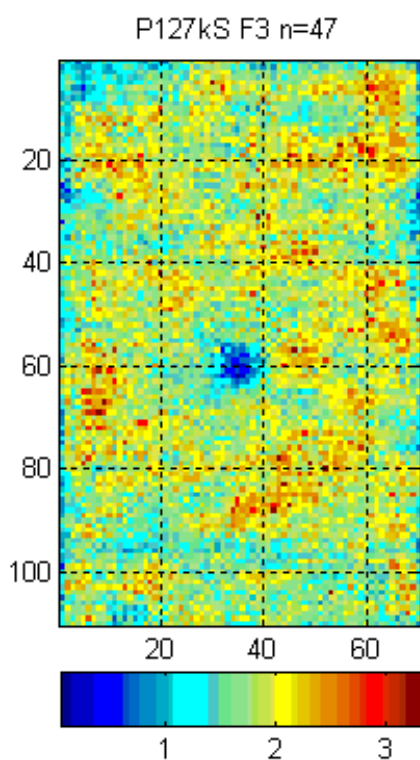


ULTRAJLUDSMETOD FÖR ATT DETEKTERA KORROSION I TÄTPLÅT I REAKTORINNESLUTNINGAR

RAPPORT 2016:246



BETONGTEKNISKT PROGRAM
KÄRNKRAFT



ULTRAJLUDSMETOD FÖR ATT DETEKTERA KORROSION I TÄTPLÅT I REAKTORINNESLUTNINGAR

Etapp 1

PETER ULRIKSEN, LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA

ISBN 978-91-7673-246-5 | © 2016 ENERGIFORSK

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

De svenska kärnkraftsreaktorerna samt finska TVO:s reaktorer har inneslutningar som är konstruerade med en tätplåt som är ingjuten med betong på båda sidor. Därmed är det svårt att hitta oförstörande provningsmetoder som kan verifiera att tätplåten är intakt, och att det exempelvis inte finns korrosionsangrepp.

I detta projekt har inledande tester av en ny ultraljudsmetod genomförts. Metoden har i tidigare studier visat sig fungera väl för konstruktioner där endast den ena sidan av tätplåten är ingjuten, och testerna har kunnat göras från tätplåtssidan. I detta projekt undersöks om metoden även är tillämpbar när signalen först måste passera en tjock betongkonstruktion. Metoden utvecklades ursprungligen för medicinska applikationer, och kallas "harmonic imaging".

Detta projekt ingår i Energiforsks betongtekniska program Kärnkraft, som driver forskning kring betongkonstruktioner inom kärnkraftverk. Det övergripande målet med det betongtekniska programmet är att säkerställa avsedd livslängd och hög tillgänglighet för svenska kärnkraftverk med bibehållen säkerhet och för att kunna driva en effektiv förvaltning. Intressenterna bakom Betongtekniskt program kärnkraft är Vattenfall, Uniper, Fortum, Teollisuuden Voima Oy (TVO) i Finland, Skellefteå Kraft, Karlstads Energi samt Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM).

Sammanfattning

Föreliggande rapport utgör Etapp 1 i ett projekt som avser söka en metod att lokalisera rost i tätplåt i svenska reaktorinneslutningar. I franska och amerikanska reaktorer ligger tätplåten på insidan av betonginneslutningen och dess baksida kan därför studeras med ultraljud i megahertz-området. I de svenska inneslutningarna är tätplåten däremot ingjuten i betongen och ligger mellan två tjocka betongskikt, 0.5 respektive 1.0 m tjocka.

Ingen metod att undersöka korrosion i ingjuten tätplåt är etablerad.

Etapp 1 omfattar försök med en provkropp som tillverkats tidigare för att studera skador på baksidan av ytmonterad tätplåt. Då denna är försedd med ett 0.25 m tjockt autentiskt betongskikt, dock ingen armering utöver s.k. "studs", vilka är avsedda att hålla fast tätplåten mot betongen. Denna mock-up användes nu för att undersöka tätplåten från betongsidan.

Metoden som används är lågfrekvent ultraljud 50-100 kHz, som tidigare visat sig kunna penetrera 0.4 m betong. Hypotesen är att utöver impedanskillnader korrosionsprodukterna också skall alstra olinjära effekter i form av övertoner till grundfrekvensen. Detta är en teknik som används inom medicinskt ultraljud under namnet *harmonic imaging* och fördelen uppstår om olinjäriteten uppstår i det objekt man vill undersöka. I detta fall alltså korrosionsprodukterna.

Genom att filtrera bort den fundamentala frekvensen, den som sänds ut, kan man separera ovidkommande reflexer i materialet och bara få tillbaka de som alstrats genom olinjäritet.

För att alstra bilder av tätplåten används ett scannersystem och torrkopplade ultraljudsensorer. Scannern för systematiskt sensorn i ett #1 cm rutnät och en pneumatisk cylinder anbringar sensorn mot betongytan i varje mätpunkt.

I först aetappen har vi visat att detta system fungerar för att registrera övertoner upp mot 1 MHz och att de torrkopplade sensorerna fungerar bra.

Utöver detta har vi studerat hur man skall framställa korrosionsprodukter i en ingjuten plåt. Rekommendationen är att leda en elektrisk ström genom stålplåten i närvaro av en elektrolyt, t ex saltlösning.

I en fortsatt etapp avser vi förfinas dataanalysen med brantare filter, olika våg- och signaltyper, samt bygga en större provkropp med realistiskt innehåll. Dessutom planeras mätningar i den avställda reaktorn Barsebäcksverket.

Summary

The present report is part 1 of a project searching for a method to locate corrosion products in the liner in Swedish nuclear power plants. In French and American reactor containments the liner is located on the inside of the concrete shell and thus it is possible to study it's backside from the front using megahertz ultrasonics. In the Swedish containments this is not possible, because the liner is located inside the concrete, behind layers typically 0.5 and 1.0 m thick.

No method is established for investigation of corrosion in covered liners.

Part 1 contains experiments with a liner-mockup which was previously made in order to investigate simulated damage on the backside of a surface-mounted liner. This mock-up has a 0.25 m thick concrete layer backing the liner to form a realistic environment for the tests. There is no reinforcement except for studs, used to hold the liner securely against the concrete. This mock-up is now used for examining the liner backside from the concrete side.

The method used is low-frequency ultrasound 50-100 kHz, which has previously demonstrated that it can penetrate 0.4 m concrete. The hypothesis is that apart from impedance contrast there could also be nonlinear effects in corrosion products. These would manifest as e.g. harmonics to the fundamental frequency transmitted. This is a technique introduced in medical ultrasound under the name of *harmonic imaging*. If the harmonics are generated by the object of interest, in this case the corrosion products, it will be possible to discriminate disturbing reflections of the fundamental frequency.

The received signal, the echo, is passed through a high-pass filter which removes the fundamental frequency and lets the harmonics pass. The resulting image may then be due to corrosion products.

In order to generate images of the liner, a scanner system with dry-coupled transducers is used. The scanner is systematically moving the transducer over the mock-up in a #1 cm grid and in each grid-point a pneumatic cylinder forces the transducer in contact with the concrete surface and a signal is transmitted and echo received.

In the first part of the project we have shown that the system works for detecting harmonics up to 1 MHz and that the dry-coupled transducers work as intended. We have learned that the best way of generating corrosion products in a liner inside concrete is to force an electric current through the steel in presence of an electrolyte, e.g. saltwater.

In future work we intend to improve the data analysis with sharper filters and different wave- and signal types. We also plan constructing a more realistic test specimen and finally to make measurements in the reactor containment of the decommissioned Barsebäck nuclear power plant.

Innehåll

1	Bakgrund	9
2	Problemställning	10
3	Mål	11
4	Projektbeskrivning	12
5	Projektets genomförande	17
6	Resultat	20
7	Slutsatser	49
8	Referenser	50

1 Bakgrund

Reaktorinneslutningen har den dubbla funktionen att skydda reaktorn från angrepp utifrån och att skydda omgivningen i händelse av en olyckshändelse inuti inneslutningen. I det senare fallet är det också väsentligt att inga radioaktiva partiklar tränger ut ur inneslutningen. För detta syfte finns det en tätplåt.

2 Problemställning

Beroende på reaktortyp kan denna plåt vara ingjuten i betong, som i svenska reaktorinneslutningar, eller sitta på insidan av betongen, som i t ex franska eller amerikanska reaktorinneslutningar. I det senare fallet kan korrosionsangrepp på den ingjutna sidan av plåten lokaliseras med hjälp av högfrekvent ultraljud [1], 5 MHz, men för ingjuten tätplåt är den metoden inte möjlig att använda då så höga frekvenser snabbt dämpas i betong. Det finns enligt [2] idag ingen metod att lokalisera korrosionsangrepp i ingjuten tätplåt.

3 Mål

Påvisa en metod att lokalisera simulerade korrosionsangrepp på tätplåt i befintlig provkropp, tillverkad inom ACCEPPT-projektet. OBSERVERA ATT DENNA PROVKROPP INTE INNEHÅLLER VERKLIG ROST ANNAT ÄN DEN YTROST SOM FRAMGÅR AV FOTONA I FIGUR 1-4.

4 Projektbeskrivning

För att undersöka korrosionsangrepp på ingjuten stålplåt görs försök med lågfrekvent ultraljud 50/100 kHz med utnyttjande av eventuell olinjäritet i korrosionsprodukterna. I tidigare ELFORSK-projekt [3] har det visat sig möjligt att penetrera flera decimeter betong med dessa frekvenser.

För att påvisa olinjäritet i materialet kan man utnyttja en teknik, sedan länge använd i medicinskt ultraljud [4], som går under beteckningen "harmonic imaging". Det går ut på att man kan skapa en klarare bild av sitt mätobjekt om man kan få det att omvandla grundfrekvensen till en överton (harmonic). Detta sker inom medicinen genom att man injicerar små luftbubblor i blodflödet. Övertoner skapas i material som uppvisar olinjäritet, dvs att sambandet mellan spänning och deformation inte är linjärt. Om det visar sig att korrosionsprodukter uppvisar större olinjäritet än annat material i betongen, skulle uppkomsten av övertoner vara en indikator på korrosionsangrepp.

Om man sänder in en 50 kHz ultraljudsignal i betong mot tätplåten, kommer denna 50 kHz komponent att reflekteras mot större diskontinuiteter i betongen, inklusive tätplåten. Den kommer att reflekteras av tätplåten olika starkt om plåten har ett korrosionsangrepp eller om den är intakt. Detta är en första indikator. Men sådana amplitudvariationer kan maskeras av de reflektioner som uppstår från objekt mellan sändaren/mottagaren och tätplåten. Om det visar sig vara på det viset att korrosionsprodukterna uppvisar en hög grad av olinjäritet jämfört med andra objekt i betongen kommer det att uppstå övertoner, den första vid 100 kHz. Genom att filtrera bort 50 kHz komponenten kommer man endast att få kvar reflexer från olinjära korrosionsprodukter. Detta är en andra indikator. Därmed föreligger två indikatorer på korrosionsangrepp.

Är det då sannolikt att korrosionsprodukter uppvisar olinjäritet, dvs har en deformationskurva som inte är linjär? Stålplåt framställs genom valsning. Det innebär att det finns strukturer i plåten som är parallella med plåtens plan. Man får anta att korrosionen anpassas efter dessa strukturer och att dess natur är laminär, ungefär som skiffer. Om dessa lagringsplan pressas mot varandra är det sannolikt att det utrymme som finns mellan planen sluts och att deformationssambandet därvid ändras, dvs att materialet uppträder olinjärt. Frågan är om den mellan två tjocka betongskikt ingjutna tätplåten tillåter korrosionsprodukter att skapa en sådan laminerad struktur. Om man tror att korrosion alls kan uppstå i en sådan plåt får man nog anta att korrosionsprodukterna får den normala strukturen.

Inom NUGENIA Acceppt har LTH tillverkat en mock-up av en "fransk" reaktorinneslutning. Denna består av en 6 mm stålplåt med sk "studs", mot vilken betong av sådan kvalitet som används i reaktorinneslutningar (AREVA) har gjutits. Stålplåten är på den sida som är vänd mot betongen försedd med flera imperfektioner inkluderande hopklistrad sand, vilken simulerar korrosionsangrepp. Det finns också konstgjord delaminering i form av tunna plastfilmer som klistrats mot stålplåten före pågjutningen. Dessa hindrar betongen att fästa i stålplåten. Denna provkropp har använts för att studera hur dessa imperfektioner kan detekteras från plåtytan.



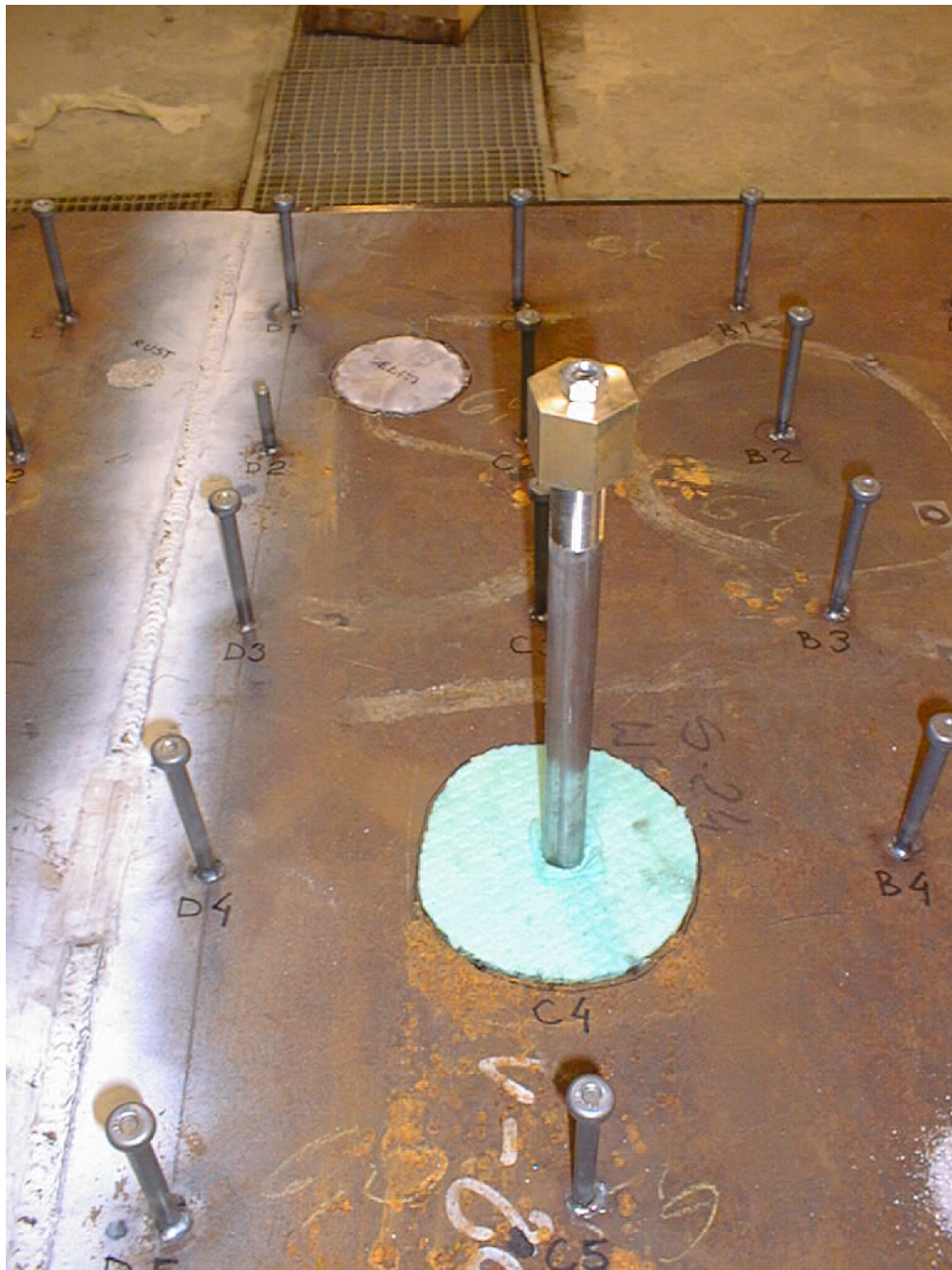
Figur 1. En rektangulär "delaminering" i fältet BC67. Plastfilmen är klistrad mot stålplåten längs plastens kant.



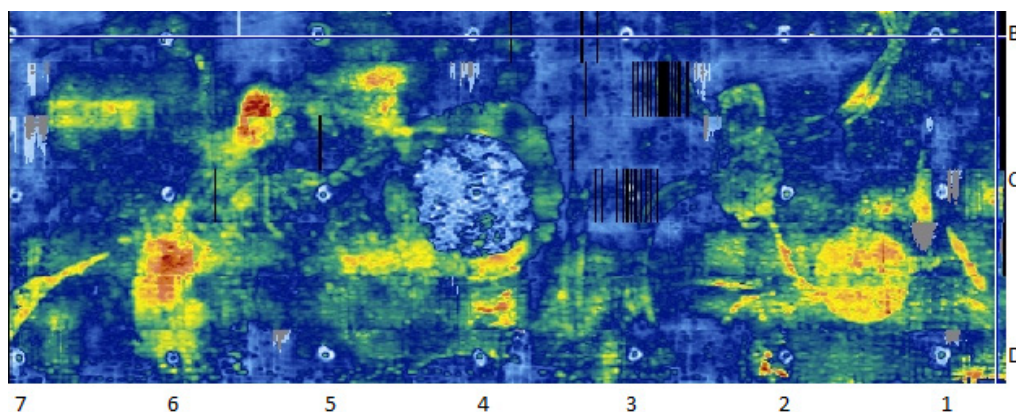
Figur 2. En cirkulär delaminering i fältet CD12. Notera målarfärgen målad i form av en 5:a. Stålpinnarna är sk "studs". Rosten simuleras med hoplimmad sand – "RUST".



Figur 3 Simulerat rostangrepp vid infästningen av en "stud" mot stålplåten i punkt B5.



Figur 4. Anordning för att bukta ut plåten från betongen. Det gröna materialet är Wettex-duk.



Figur 5. Ultraljudmätningar 5 MHz från plåtens framsida visar tydligt de konstgjorda felen på plåtens ingjutna baksida samt påsvetsade "studs". Tunna svarta streck är missade datalinjer.

I detta projekt vänds provkroppen och undersökningarna sker från betongsidan mot stålplåtens "baksida". A-B-C-D-E blir då E-D-C-B-A.

Försöken i denna Etapp (1) kommer att utföras punktvis samt med den befintliga A1220 ultraljudinstrumentet och den scanner som LTH tidigare har utvecklat för försök i betongprovkroppar [4]. Även annan ultraljudutrustning, särskilt lämplig för detektion av övertoner, kommer att användas.

I Etapp 1 eftersöks också en metod att framkalla rostangrepp med accelererad tidsskala. Detta sker genom konsultationer med Swerea Kimab och antas inte medföra något omfattande arbete.

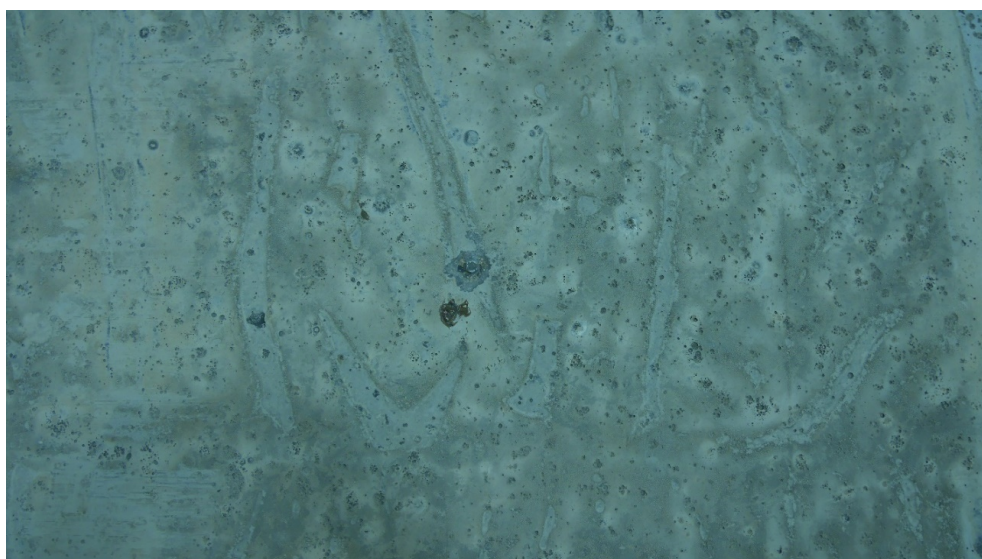
Förväntat resultat

Etapp 1

1. Vilken typ av sensor skall användas
2. Kan man få reflexer från simulerade rostangrepp i stålplåt bakom 250 mm betong
3. Hur kan rostangrepp i tätplåt bäst simuleras eller skapas.

5 Projektets genomförande

Den befintliga provkroppen tillverkades med syftet att mäta mot plåten, därför togs ingen hänsyn till den fria betongytans kvalitet. När betongen var färdiggjuten täcktes den med plast med reultatet att en stor mängd luftporer och veck bildades i betongytan. Dessa måste slipas bort för att betongen skall få en naturlig yta i detta experiment. Detta visade sig vara problematiskt då ytan var så liten. Lösningen blev att specialtillverka en stödvagn till en HILTI slipmaskin så att denna hela tiden kunde hålla diamantskivan horisontell mot betongytan.



Figur 6. Betongytan på provkroppens baksida. Luftporer och märken av plastfilmen måste tas bort.



FIGUR 7. Denna lätt modifierade (notera stödhjulen) diamantslipmaskin användes för att slipa ner ytan.



Figur 8. Resultatet av nedslipningen är en jämn betongyta nästan utan porer och ojämnheter.

Därefter måste artefakternas exakta läge överföras från plåtsidan till betongsidan. Innan gjutningen påbörjades slogs körnslag in i kanten av stålplåten för att identifiera det exakta läget av de studs och artefakter som gjutits in i betongen. För att frilägga dessa körnslag måste en del av den gjutna betongen mejslas bort, så att stålkanterna blev tillgängliga. Körnslagen identifierades och rutnätet, som definieras av påsvetsade studs, överfördes till den motstående betongytan.

Eftersom varje körning tar flera timmar i anspråk kan apparaturen inte övervakas. För att möjliggöra oönskad körning av skannern gjordes ett hål genom väggen bakom skannern. På andra sidan väggen ligger teknisk geologisk fältförråd, där instrumenten kan stå uppställda utan problem.

Apparaturen har inte varit i bruk sedan 2009 och vissa nyanskaffningar har gjorts för att modernisera systemet. Det finns flera subsystem som alla testades igenom var för sig, med delvis modifierad programvara. När detta var gjort testades systemet med alla funktionaliteter tillsammans. Efter detta kunde de första proven starta.

Körning i skannern ger relativt lättförståeliga resultat jämfört med punktmätningar. Därför är det den gynnsammaste metoden att börja med. Skannern kräver att man har en sensor som är torrkopplad till betongen.

Det är endast sensorerna från ACSYS som klarar detta. De som finns tillgängliga är en kompressionsvågssensor för nominellt 100 kHz och en skjuvvågssensor för nominellt 50 kHz. I realiteten visar det sig att kompressionsvågssensorns resonansfrekvens är 127 kHz och skjuvvågssensorns 47 kHz. De inledande försöken har gjorts med kompressionsvågssensorn med olika varianter av signal vid 50, 55 och 127 kHz. Det är nödvändigt att sända vid resonans om man skall uppnå olinjära effekter, eftersom dessa kräver starka signaler, man brukar tala om att deformationen skall vara i storleksordningen 10^{-6} .



Figur 9. ACSYS A1220 sensor med 12 TX och 12 RX stift avsedd för torrkoppling mot betong.

Andra sensorer som kan komma ifråga för undersökning av olinjäritet kräver att man har ett kontaktmedel mellan sensorn och betongen. Dessa sensorer är därför olämpliga att använda med scannern.

Det använda systemet består av följande komponenter

1. Styrdator Panasonic Toughbook Programmeringsspråk HTBasic / MATLAB
2. UNIDEX 400 Servomotorkontroll med två servomotorer inkopplade
3. SKF Linjärenhet 2.5 m
4. ICS Relästyrning via HPIB-gränssnitt
5. Egentillverkad pneumatikkontroll upp/ner med lägesindikering
6. Pneumatisk cylinder med elektriska ventiler
7. ACSYS A1220 Ultraljudssensorer för kompressions och skjuvvågor
8. HP 33120 Vågformsgenerator
9. RITEC GA-2500 Effektförstärkare
10. Signal Recovery 5113 Differentiell förförstärkare med filter
11. Krohn-Hite programmerbart filter med två kanaler 24 dB/oktav/filter
12. Measurement Computing 2 Msa/s 2 samtida kanaler AD-omvandlare
13. INES 300 kSa/s 2 samtida kanaler AD-omvandlare

6 Resultat

De första försöken utfördes med den tidigare använda AD-omvandlaren med 300 kSa/s samplingshastighet. Orsaken till det var att det fanns färdigutvecklad programvara och att den nya AD-omvandlaren med 2 Msa/s samplingshastighet inte var kompatibel med det språk – HTBasic - rutinerna var skrivna i. Det innebär att den högsta mätbara frekvensen är strax under 150 kHz.

Eftersom sändning med kompressionsvågsändaren optimalt sker vid resonansfrekvensen 127 kHz, innebär det att övertoner inte kan registreras med den äldre AD-omvandlaren. Då är valet att sänka sändfrekvensen eller att utnyttja en annan form av olinjäritet. Försök vid frekvenserna 50 och 55 kHz har därför gjorts. Dessa frekvenser har också framgångsrikt använts i tidigare försök att detektera delaminering i betong.

En annan metod att studera olinjäritet är att sända par av signaler som är varandras invers. Ett linjärt material har då en sådan respons att om man adderar de mottagna signalerna blir summan noll. Förekommer olinjäritet blir summan skild från noll. Eftersom denna typ av olinjäritet inte kräver analys av övertoner kan AD-omvandlaren med den låga samplingshastigheten användas.

Försöken F1-F8 är gjorda med dessa tekniker. Beroende på signalens utseende kommer de första reflexerna från plåtskivan att anlända vid något olika tidpunkter. Man kan förutsätta att ljudhastigheten i betongen ligger mellan 4000 och 5000 m/s. Eftersom betonglagret är 0.25 m tjockt måste reflexen från plåtskivan tillryggalägga 0.50 m innan den kan detekteras. Därför tar det mellan 100 och 125 us för signalen att passera genom betongen. Eftersom samplingshastigheten i de flesta försöken är 300 kSa/s är avståndet i tid mellan mätvärdena $1/300.000 \text{ s} = 3.3 \text{ us}$. I syfte att få med början av signalen har en pretrigg om 10 samples använts. Därför kan man förvänta sig att den första delen av reflexerna från plåten anländer efter $10 + 30\text{--}38$ samples. Beroende av hur energin är fördelad inom sändpulsen kan ankomsten eventuellt komma senare. Utöver detta kan det finnas reflekterande horisonter inne i betongen som gör att det ankommer reflexer tidigare än denna prognos.

Huvudsakligen har pulser med ren sinus av varierande antal våglängder och sk Haversine-funktioner utnyttjats. Dessa har karaktären av en Gausspuls, men kan alstras genom en kombination av fasstart och offset som gör dem enkla att framställa i en vågformsgenerator. Om man tex programmerar en cykel sinus med start vid fasen 270 grader kommer signalen att börja i sinuskurvans horisontella negativa punkt och sluta i samma punkt en period senare. Läger man till detta en offset uppgående till den programmerade amplituden får man en mjukt tilltagande signal som inte skapar några transienter vid början och slut. Skulle den sinusformade signalen starta i fasläget noll skulle den gå tvärt uppåt och skapa transientsvar, dvs ringning vid systemets resonansfrekvens.

Följande nio försök har utförts:

F1. Vågformsgeneratorns signal 1Vpp Haversine 1 cykel vid 55 kHz med 0.5 V offset. Förförstärkaren 5113 inställd på 10 kHz highpass med 12 dB/oktav för att undertrycka lågfrekventa signalkomponenter. Förstärkningen sattes till 5000. Krohn-Hite-filtret var inte inkopplat. Uppmätt utsignalsnivå efter RITEC-förstärkaren 200 V toppvärde.

F2. Vågformsgeneratorns signal 1Vpp sinus 5 cykler vid 50 kHz. Förförstärkaren 5113 inställd på 10 kHz highpass med 12 dB/oktav för att undertrycka lågfrekventa signalkomponenter. Förstärkningen sattes till 8000. Krohn-Hite-filtret 500 kHz low-pass 48dB/oktav, ingen förstärkning. Uppmätt utsignalnivå efter RITEC-förstärkaren 200 V toppvärde, 400 Vpp. RITEC Power level control 5.50.

F3. Vågformsgeneratorns signal 1Vpp sinus 20 cykler vid 127 kHz. Förförstärkaren 5113 inställd på 30 kHz highpass med 12 dB/oktav för att undertrycka lågfrekventa signalkomponenter. Förstärkningen sattes till 2500. Krohn-Hite-filtret 300 kHz low-pass 48dB/oktav, ingen förstärkning. Uppmätt utsignalnivå efter RITEC-förstärkaren 400 V toppvärde, 800 Vpp. RITEC Power level control 6.20.

F4. Vågformsgeneratorns signal 1Vpp 1 cykel Haversine vid 127 kHz med 0.5 V offset. Förförstärkaren 5113 inställd på 100 kHz highpass med 12 dB/oktav för att undertrycka lågfrekventa signalkomponenter. Förstärkningen sattes till 5000. Krohn-Hite-filtret 140 kHz low-pass 48dB/oktav med 20dB förstärkning. Uppmätt utsignalnivå efter RITEC-förstärkaren 600 V toppvärde. RITEC Power level control 6.20. Väntetiden efter sensornedsättning ökades från 3 till 4 s, vilken medgav förförstärkaren 5113 att återgå till normalläge från "overload".

F5. Samma inställningar som i F4 men med negativ Haversine, vilket uppnås med startfasen 90 grader och DC-offset = -0.5 V. Om F4 och F5 adderas skall de linjära komponenterna ta ut varandra. Dock finns en brist i att dessa två mätningar inte kan garanteras ha ägt rum i exakt samma punkter och samma anläggningsförhållanden eftersom det rör sig om två realiseringar.

F6. Av skäl som anförts ovan modifierades programvaran så att det utfördes mätningar med två Haversines med motsatt polaritet under det att sensorn var nedsänkt och inte förflyttades. I övrigt samma inställningar som i F4 och F5.

F7. Som F6 men med 5 cykler sinus i motfas. Krohn-Hite 0 dB, 5113 med Gain 7000.

F8. Som F7 men med 10 cykler sinus i motfas.

Följande försök F9 utfördes med den nya 2 Msa/s AD-omvandlaren från Measurement Computing USB-1602. Då denna inte är kompatibel med HTBasic delades programvaran upp, så att den gamla HTBasic programvaran skötte allt som tidigare utom själva datainsamlingen. Denna sköttes av ett program skrivet i MATLAB. Det krävdes ingen kommunikation mellan programvarorna, då utfärdade sändkommandon till vågformsgeneratören från HTBasic skapade en synkroniseringssignal från vågformsgeneratören, vilken triggade AD-omvandlingen i MATLAB. När AD-omvandlaren med 300 kSa/s användes togs 256 samples av signalerna. Med den nya AD-omvandlaren med 2 Msa/s tas i stället 2048 samples av signalerna i syfte att observera ungefär samma tidsrymd.

På natten mot lillejulaften inträffade ett avbrott i tryckluftförsörjningen i V-huset, vilket gjorde att datatagningen upphörde efter 4427 mätpunkter av de $70 \times 110 = 7700$ som vanligtvis samlas in. En härav orsakad timeout i MATLAB-programmet antas ha orsakat att datorn också stannade. När tryckluften återvände 27 december uppdagades ytterligare ett fel, nämligen att RITEC-förstärkaren upphört att fungera. Orsak okänd. Denna kräver reparation i USA. Därmed avslutades försöksmätningarna med lite mer än halva provkroppen undersökt.

F9. Positiv 1 cykel Haversine vid 127 kHz. I försöket sparas två signaler. Dels den signal som kommer direkt från förförstärkaren 5113 inställd på Gain = 10000 och 100

kHz high-pass 12 dB/oktav, dels en högpasfilterad signal från Krohn_Hite filtret inställt på passband mellan 1 MHz (antivikningsfrekvensen för sampling vid 2 Msa/s) och 190 kHz, som ligger mitt emellan grundtonen och första övertonen. Syftet var alltså att i kanal 2 undertrycka grundtonen och framhäva övertonerna. AD-omvandlaren sattes till mätområdet +/- 10 V.

Presenterat bildmaterial:

Scannern producerar ett tredimensionellt bildmaterial. På betongblockets yta mäts 70 punkter i tvärsiktning och 110 punkter i längsiktning, sammanlagt 7700 punkter med c/c 1 cm. I varje punkt samplas signalen med anntingen 256 (300 kSa7s) eller 2048 (2 Msa/s) mätvärden. Om man tar ut ett av dessa mätvärden på samma plats i alla 7700 mätpunkterna och sätter ihop det till en bild, erhålles en sk timeslice. Man kan se det som att man hyvlar av datakuben med en osthyvel. Origo är uppe till vänster på betongblocket och i data. Notera att det rutnät som presenteras på de stora bilderna är relaterat till 70 x 110 systemet, det är inte kopplat till det rutnät (A-E, 1-7) som definieras av "studsens" på baksidan av stålplåten. Sambandet mellan rutnäten ges av följande koordinater:

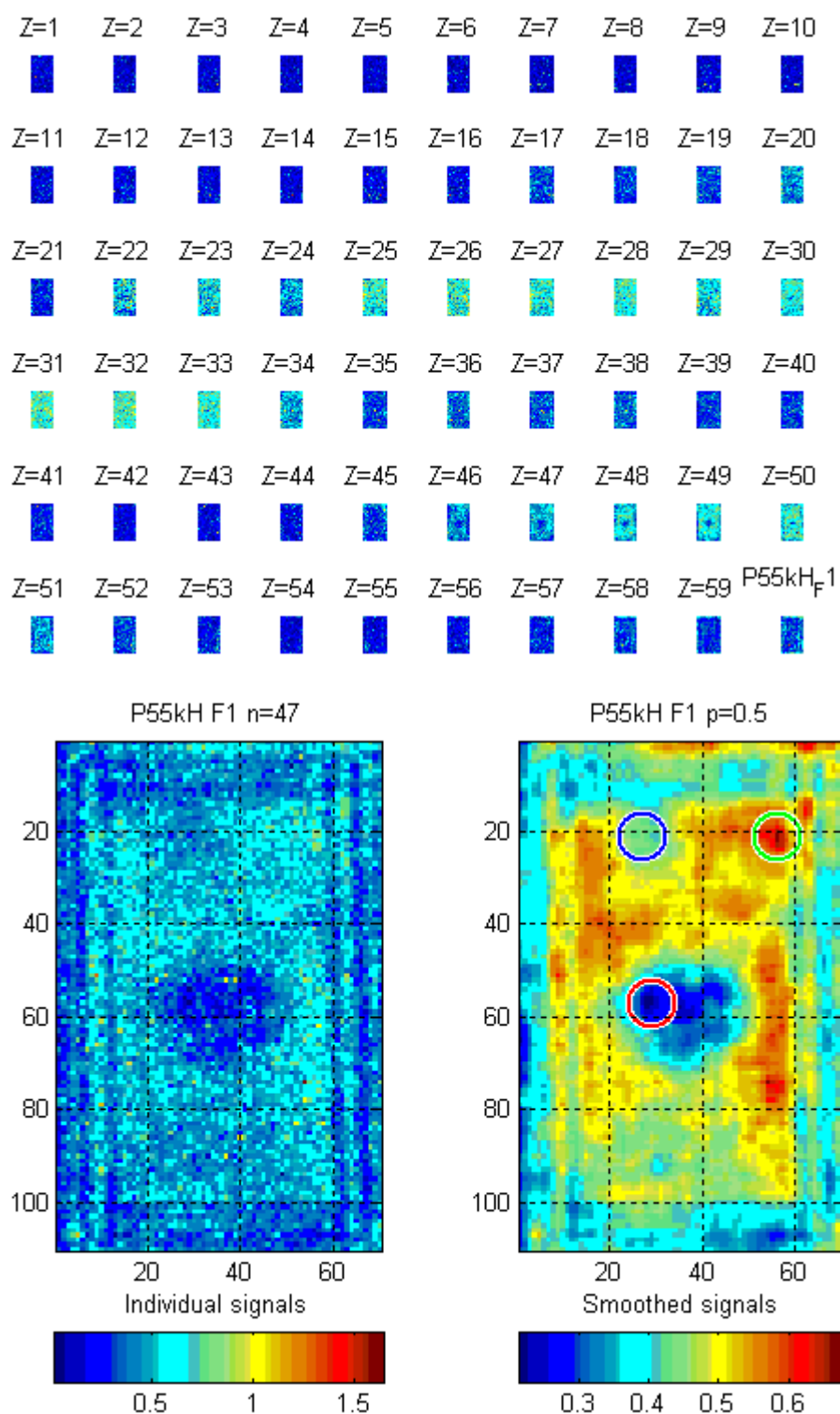
Hörnpunkterna i provkroppens 60x90 cm rutnät med #15 cm: E1 finns i mätpunkt (3,13); A1 i mätpunkt (63,13); E7 i mätpunkt (3,103) och A7 i mätpunkt (63,103).

Den cirkulära delamineringen befinner sig i fältet CD12, vars mittpunkt ligger i mätpunkt (26,21). Wettex-duken C4 befinner sig i bildens mitt mätpunkt (33,58). Den rektangulära delamineringen i fältet BC67 i mätpunkt (41,96). Simulerad rost i fältet DE12 i mätpunkt (11,21) samt i fältet DE67 i mätpunkt (11,96).

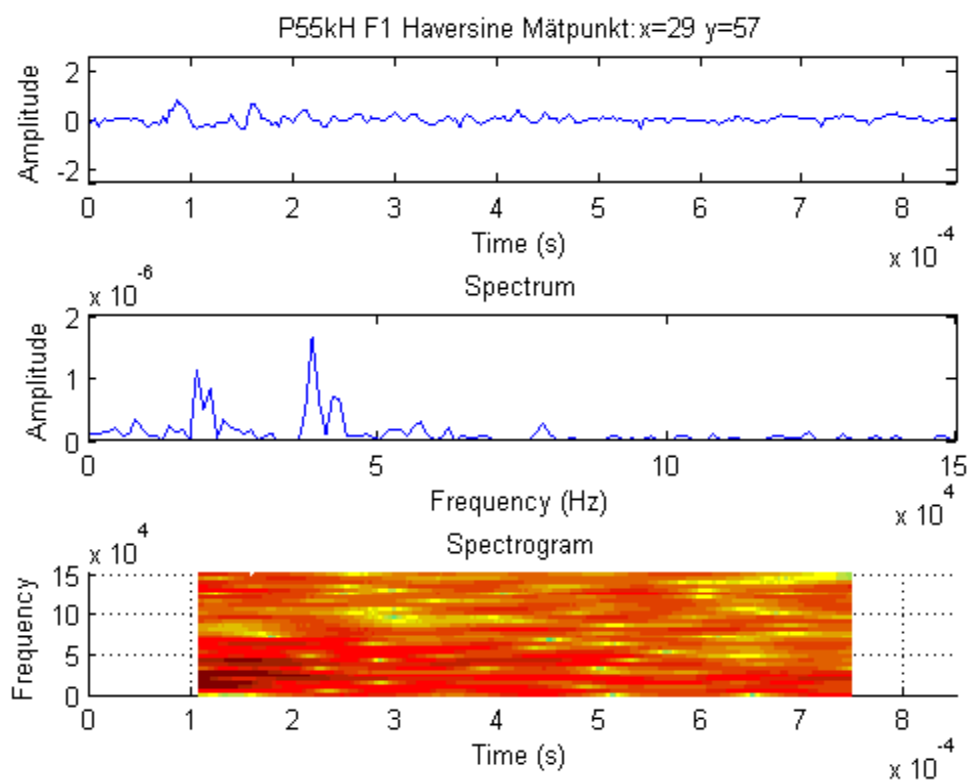
För varje försök F1-F8 presenteras följande bilder:

1. Mosaik med de time-slices som förväntas innehålla reflexen från tätplåten (överst)
2. Förstoring av vald time-slice och en lågpasfilterad version av denna (underst). Färgskalan i de två bilderna är olika eftersom lågpas- filteringen av bilden jämnar ut extremvärdena.
3. För försök F1 och F2 finns också en detaljerad analys av hur signalerna i utvalda punkter ser ut i tids- och frekvensdomän, samt i spektrogramform, dvs samtidig tids- och frekvensvisning, frekvensen som funktion av tiden, med spektrum längs den vertikala axeln i diagrammet.

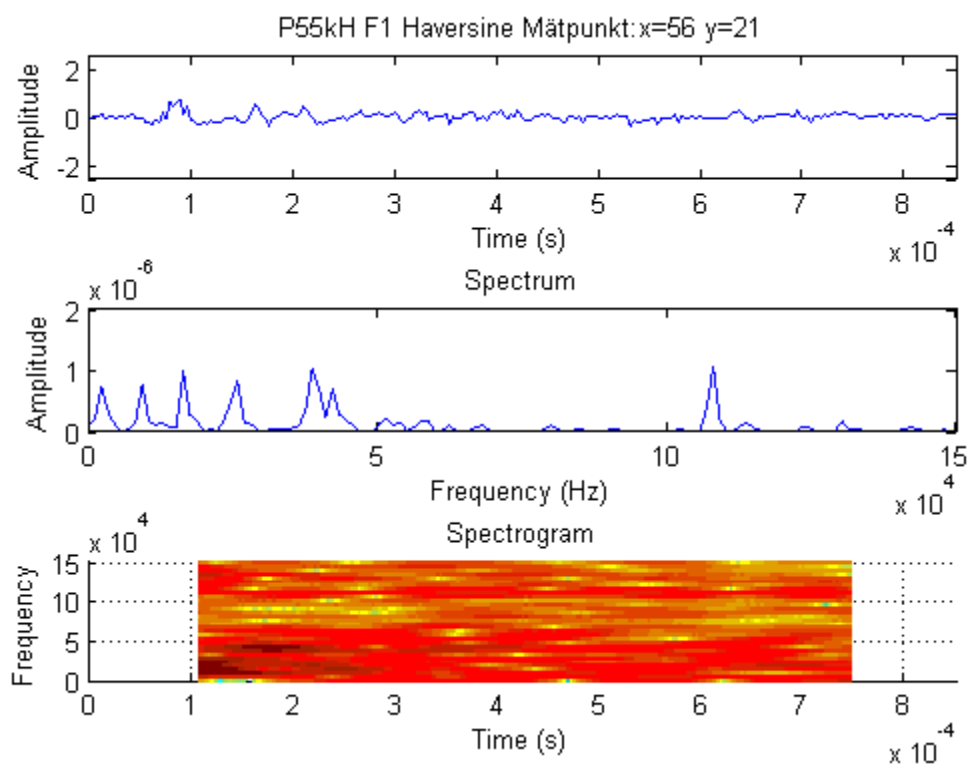
Försök F9 redovisas i särskild ordning.



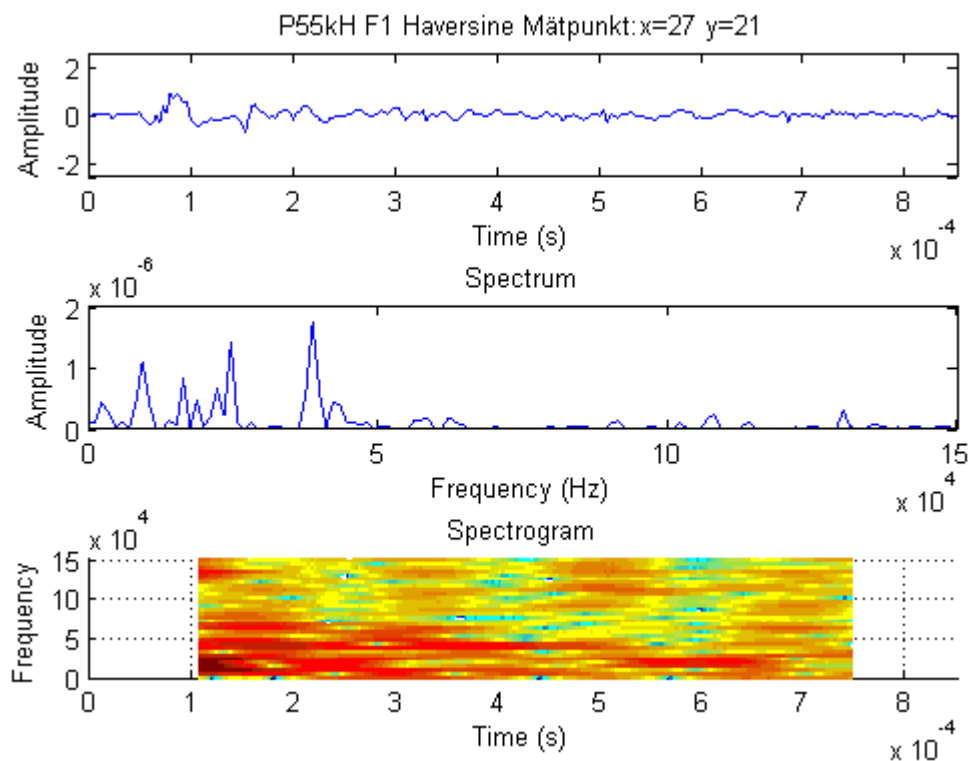
Figur 10. Försök F1 med en sk Haversine-funktion med inställd frekvens 55 kHz. (Timesliceplan $z=47$, $t=240$ us).
Cirkelar indikerar exempel i Figur 11-13.



Figur 11. Försök F1. Signal i centrum, mätpunkt (29,57) - röd cirkel i Fig 10. Frekvenstoppar vid 18.7 resp 38.7 kHz

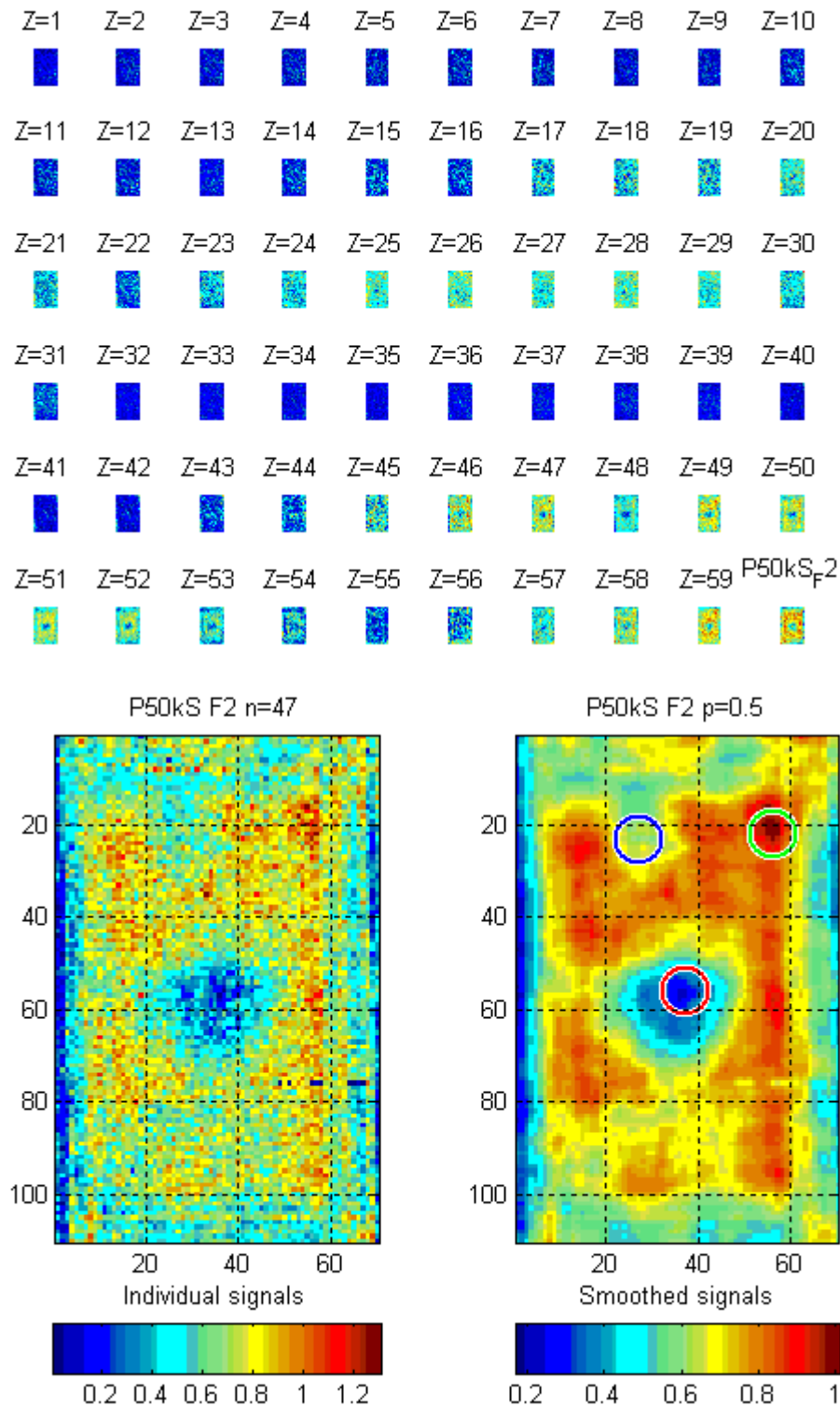


Figur 12. Försök F1. Stark signal i mätpunkt (56,21) - grön cirkel i Fig 10. Flera lägre frekvenser men 38.7 kHz dominerar.

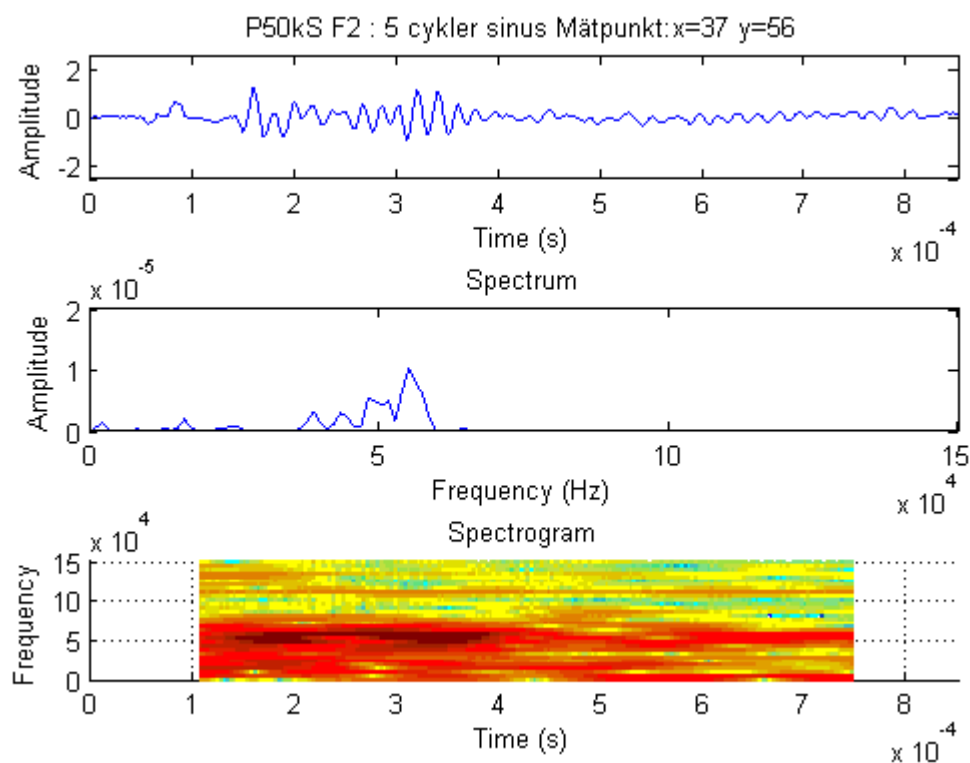


Figur 13. Försök F1. Ljusgröna området i mätpunkt (27,21) - blå cirkel i Fig 10. Excitering vid 55 kHz med 1 cykel Haversine. Frekvenstopp vid 38,7 kHz.

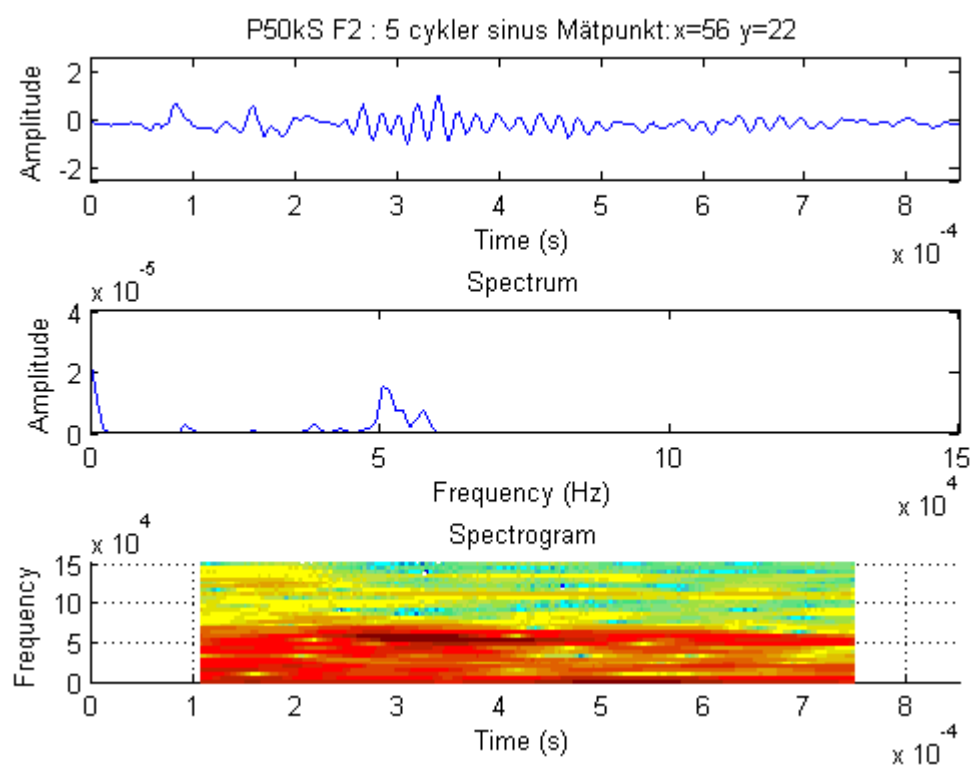
För Haversine-excitering är det tydligt att man inte mottar signaler med samma frekvensinnehåll som vågformsgeneratoren är inställd på. Det beror på att en Haversine-funktion med en cykel blir en bredbandig puls och då kommer transducern att sända i vid mest näraliggande resonansfrekvens.



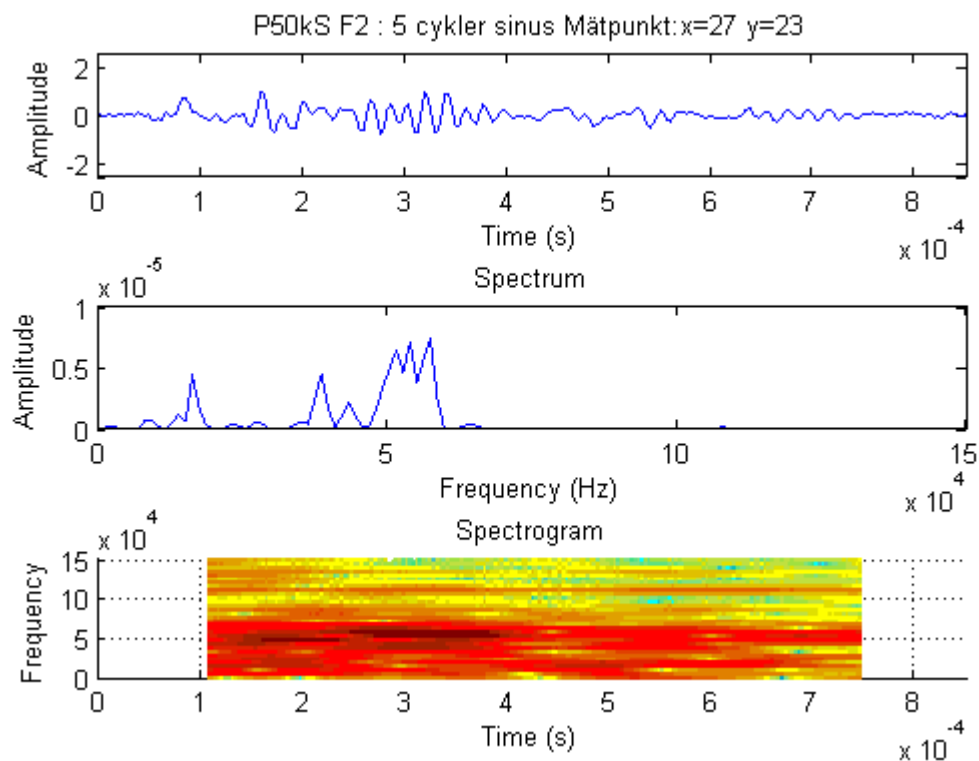
Figur 14. Försök F2 med 5 cykler 50 kHz sinuspuls. (Z=47). Cirklar indikerar exempel i Figur 15-17.



Figur 15. Signal i centrum, mätpunkt (37,56) - röd cirkel i Fig 14. Frekvenstopp vid 55.1 kHz.

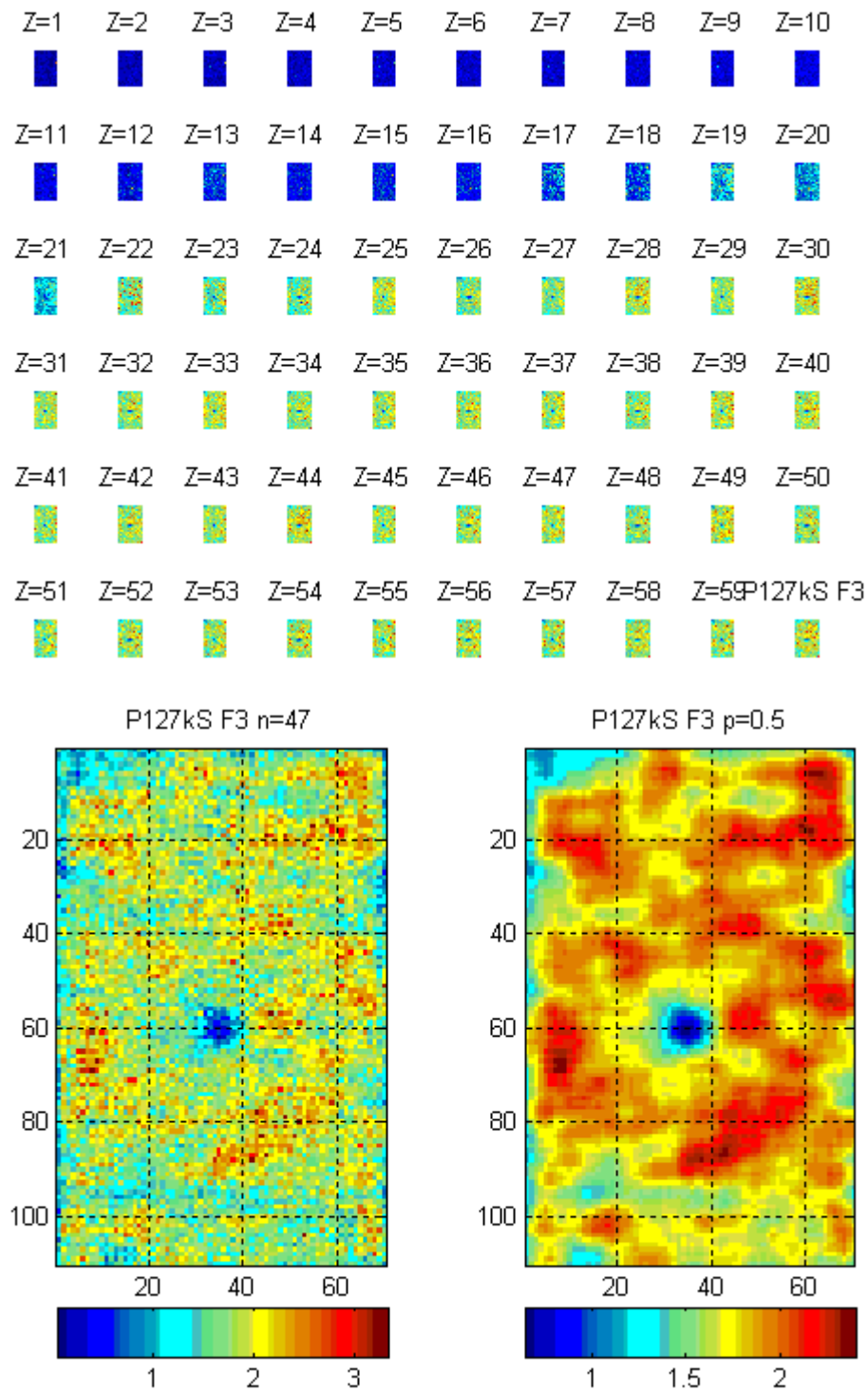


Figur 16. Försök F2. Stark signal i mätpunkt (56,22) - grön cirkel i Fig 14. Frekvenstopp vid 50,0 kHz.

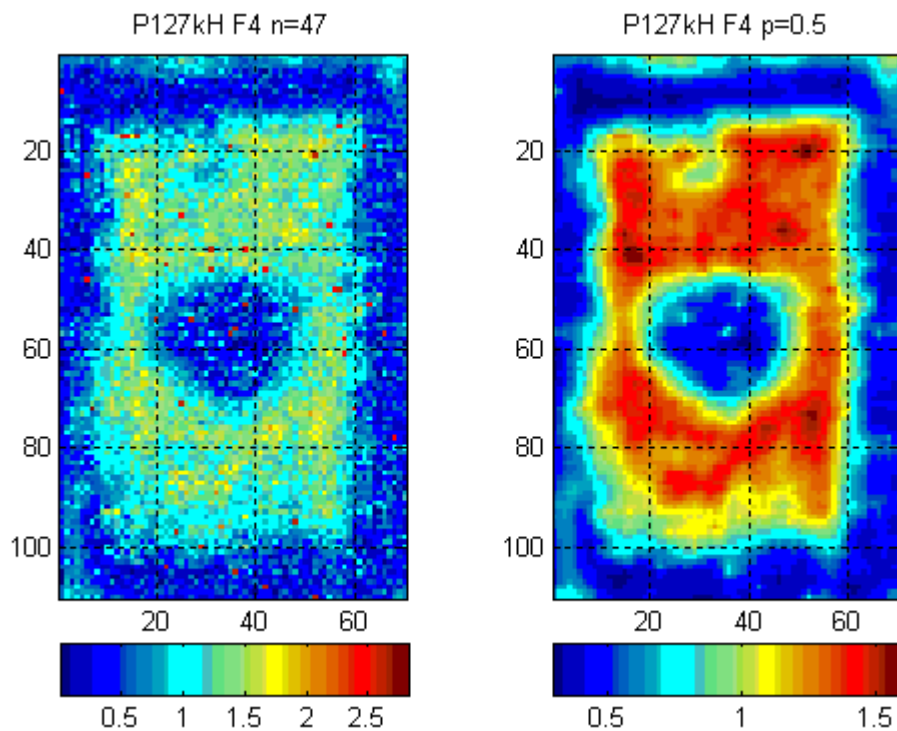


Figur 17. Försök F2. Ljusgröna området i mätpunkt (27,23) - blå cirkel i Fig 14. Frekvenstoppar vid 16.4, 38.7 och en sammansatt frekvenstopp i området 51-57 kHz.

För sinusexcitering är det uppenbart att utsänd och mottagen signal är mer lika. Det är ju naturligt eftersom en längre signal med sinusvåg är smalbandigare än en kort Haversine-funktion.



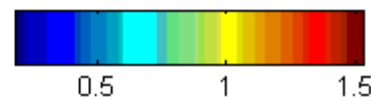
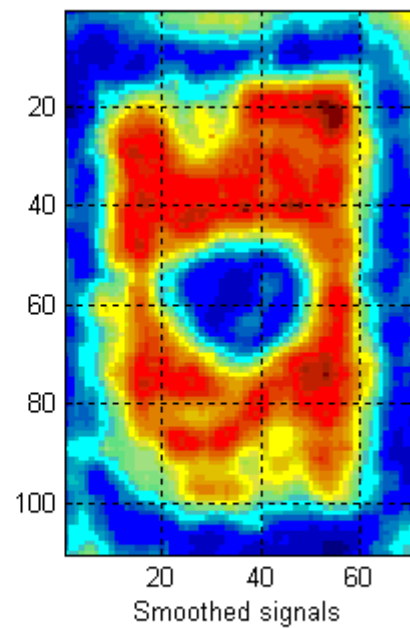
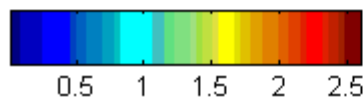
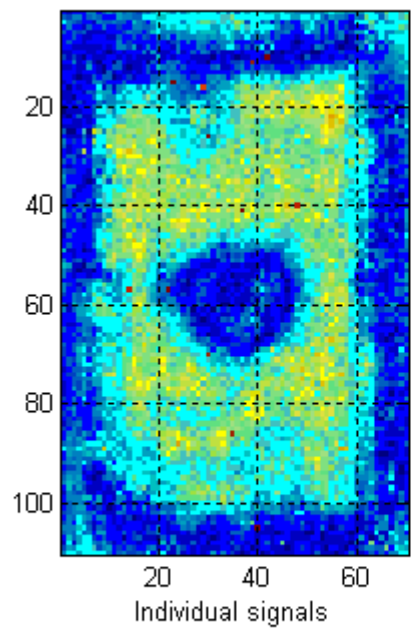
Figur 18. Försök F3 med 20 cykler 127 kHz sinuspuls (Z=47).

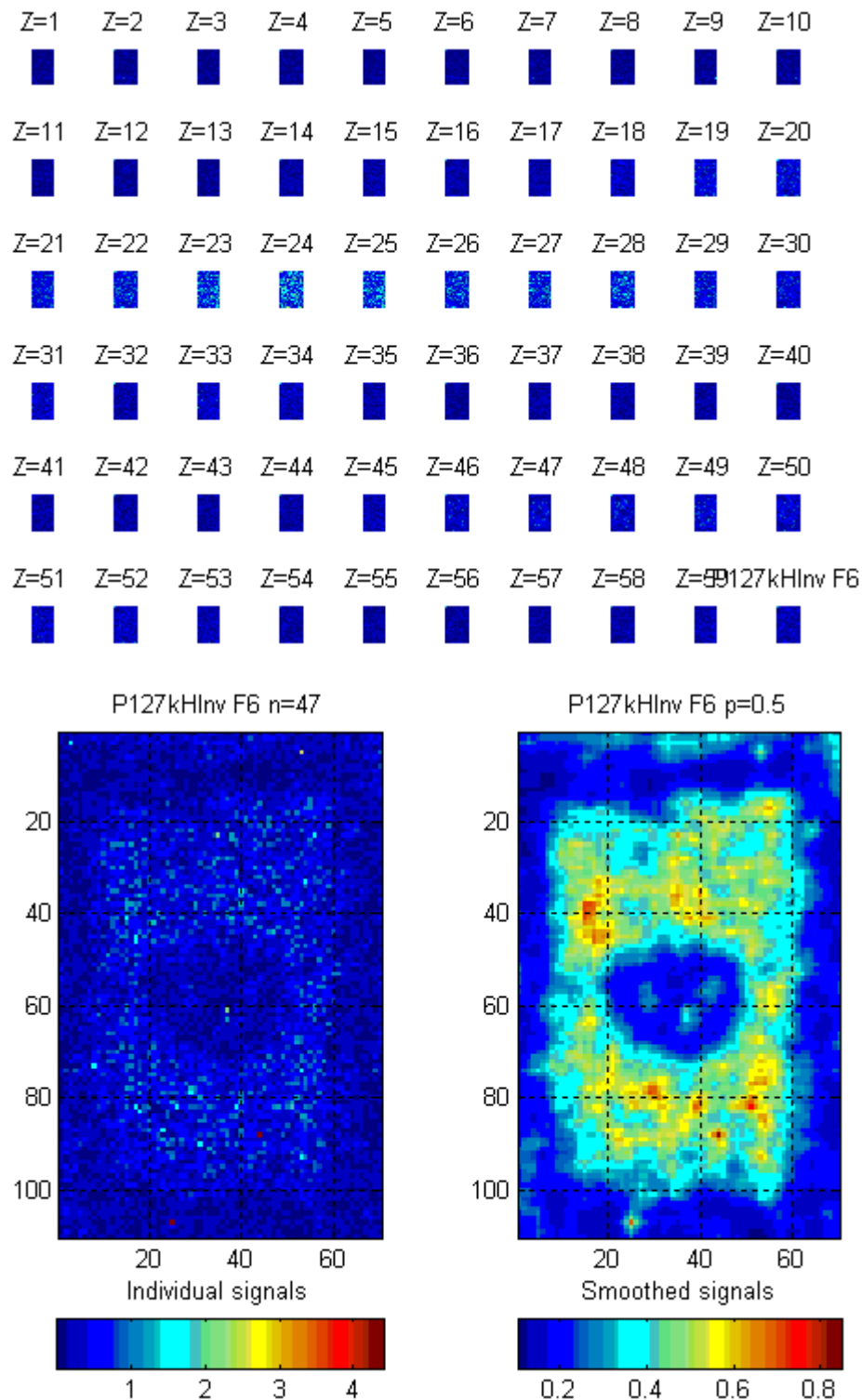


Figur 19. Försök F4 med 127 kHz negativ Haversine-funktion. (Z=47).

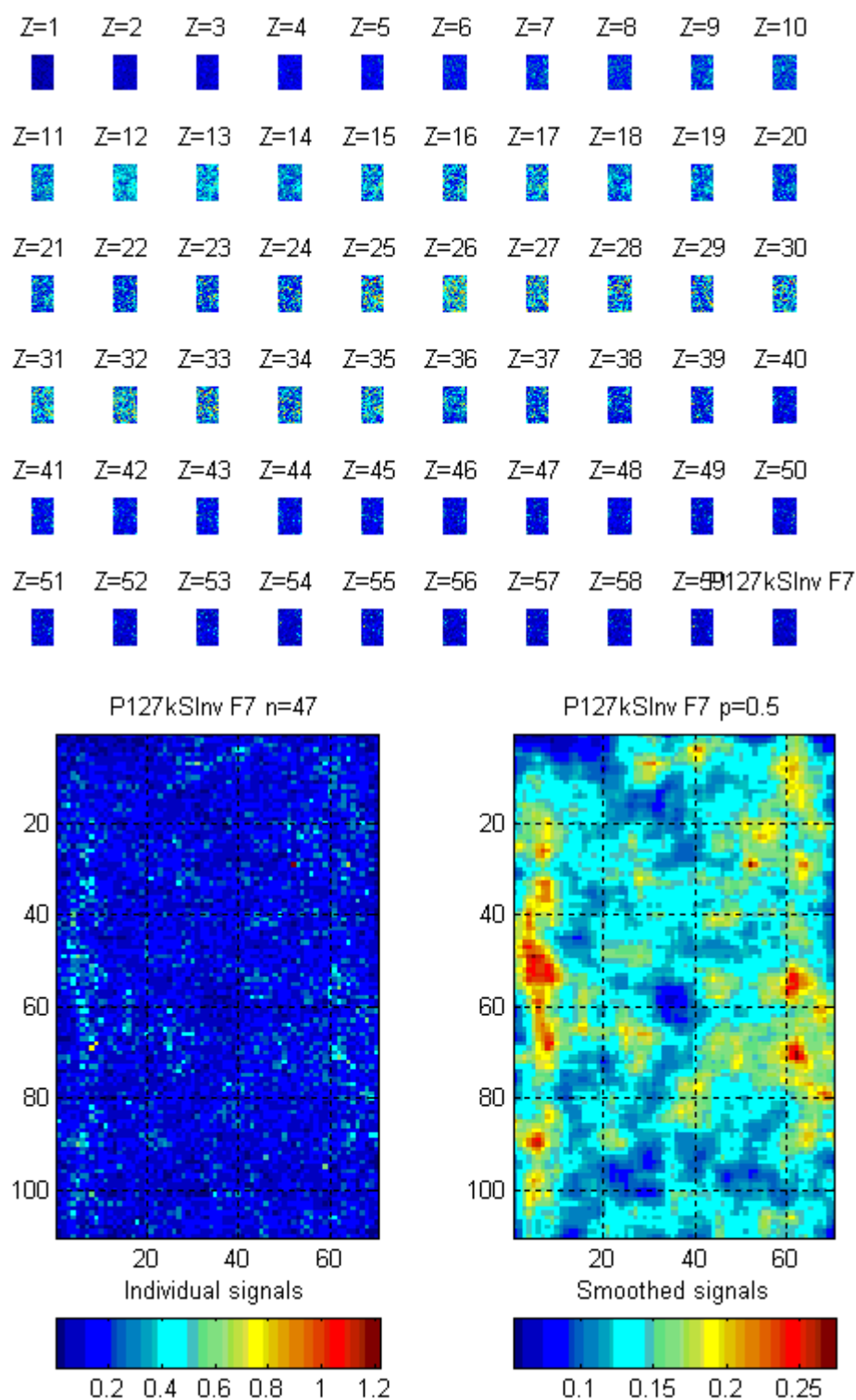
P127kHPos_{F4} n=47

P127kHPos F4 p=0.5

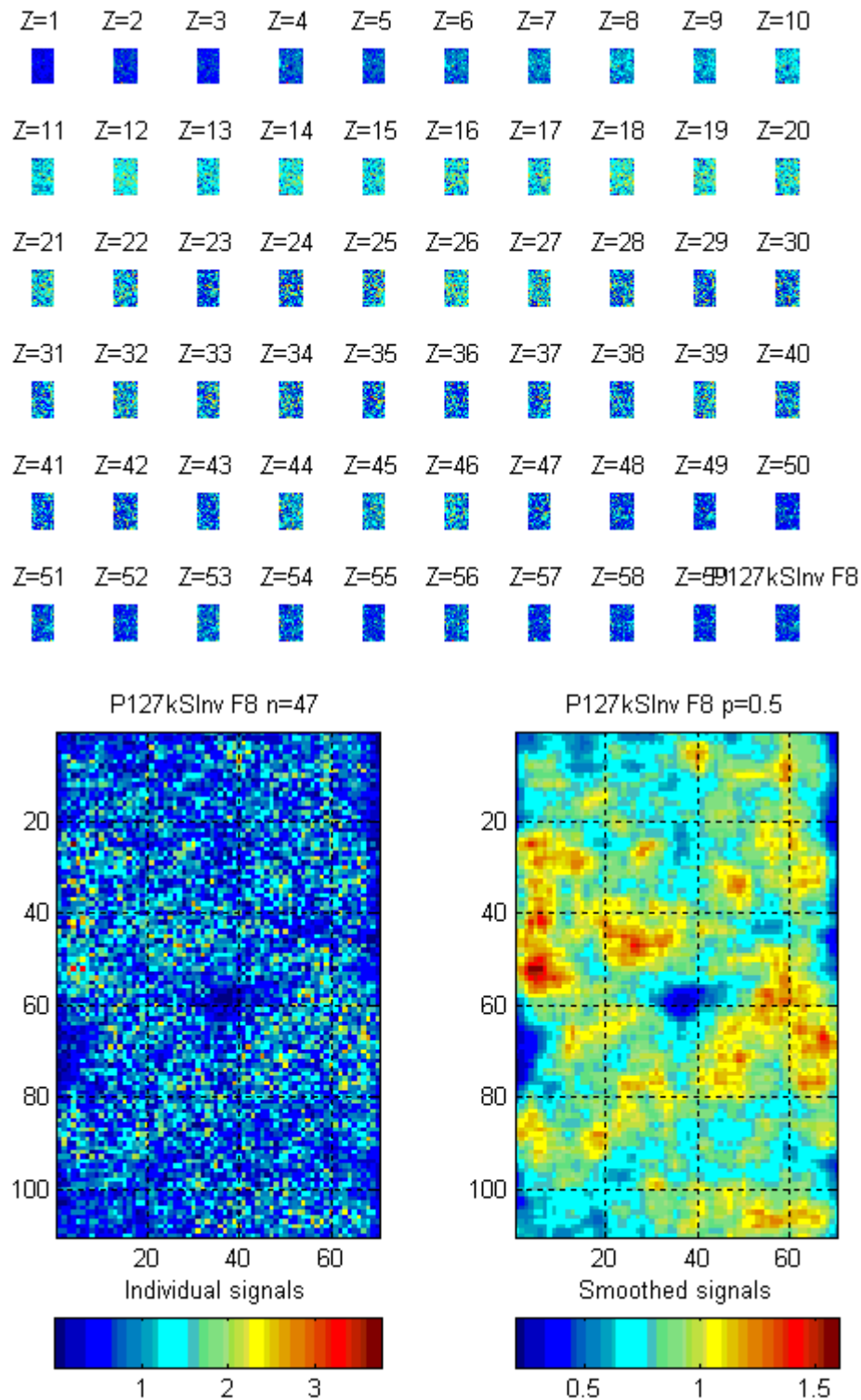
Figur 20. Försök F4 med 127 kHz positiv Haversine-funktion. (Z=47).



Figur 21. Försök F6 med direkt addition av 127 kHz Haversine-funktioner i motfas ($Z=47$).



Figur 22. Försök F7 med två 127 kHz 5 cykler sinusfunktioner i motfas (Z=47).



Figur 23. Försök F8 med två 10 perioders 127 kHz sinusfunktioner i motfas (Z=47).

Kommentar till försök F1-8.

Försök F1 och F2 är gjorda med frekvenser som tidigare använts vid betongundersökningar i scannern. De är gjorda för att visa att vi kan upprepa tidigare resultat, dvs att scannersystemet fungerar som tidigare. De kan också användas för att studera uppkomst av första övertonen, den andra ligger vid 150 kHz eller däröver och kan inte analyseras med 300 kSa/s AD-omvandlaren. Eftersom ingen lågpasfiltrering av dessa signaler gjordes kan vikning förekomma.

Det är emellertid intressant att se att trots att inställd frekvens är 50 kHz i sändpuls i försök F1 så dominerar frekvensen 38.7 kHz. Detta kan bero på att Haversine-funktionen inte är frekvensriktig, dvs dess frekvensinnehåll, det är ju en kort och därmed bredbandig signal, inte motsvarar den inställda frekvensen. I försöket F2 med 5 cykler sinus blir däremot utsänd och mottagen signal mer lika.

Försök F3 med 20 cykler 127 kHz sinus gjordes för att studera vad det har för betydelse att signalen görs smalbandigare. Som framgår av Figur 12 blir riktverkan bättre, då Wettex-duken avbildas mer koncentrerat. Det bör också innebära att möjligheten att detektera övertoner förbättras. Men det kan vi inte studera med dessa data eftersom den första övertonen till 127 kHz nämligen 254 kHz ligger högre än vad 300 kSa/s AD-omvandlaren kan detektera utan vikningseffekt, dvs att en högre frekvens uppträder som en lägre.

Försöken med negativ -F4- och positiv -F4pos(F5)- Haversine-funktion är gjorda för att man skall se att dessa båda signaltyper fungerar så att addering blir meningsfull. I försök F6 adderas de ju i datorn och endast skillnaden lagras. Detta är den andra typen av olinjäritetsstudie vi kan göra med 127 kHz och AD-omvandlaren med 300 kSa/s samplingsfrekvens.

Försök F7 med 5 cykler 127 kHz sinus och försök F8 med 10 perioder är en studie av motförsändning med sinusvågor. Tanken är samma som i försöken F4-F6.

Den klaraste effekten i Försök F1-F8 är den svaga reflexen från området i centrum av provkroppen där en cirkulär skiva Wettex-duk är fastlimmad mot stålplåten. Denna duk ger upphov till en kraftigt försvagad signal jämfört med omgivningen. *Om detta är signifikant för rostangripen stålplåt är dämpning, alltså lägre impedansskillnad mellan betong och stålplåt, också ett tänkbart mått på korrosion.*

Försök F9

Nedanstående data utgörs av dels den direkt från förförstärkaren kommande signalen (övre raden), dels den genom Krohn-Hite filtret högpasfiltrerade signalen (undre raden) vars syfte är att framhäva övertoner – harmonics.

Observera att de nu tillgängliga filtren inte förmår undertrycka grundtonen fullständigt, då brantheten är -24 dB/oktav i högpasfiltret. Högpasfilter med brantheten 96 dB/oktav är beställda.

I detta syfte väljs signaler ut från de punkter som motsvarar en position rakt över respektive simulerad skadas centrum. Se Figurerna 1-5 för information om skadornas natur. Av varje signal visas 200 us svarande mot 400 samples då sampleavståndet är 0.5 us. Reflexen från stålplåten antas ankomma ungefär mitt på tidsaxeln.

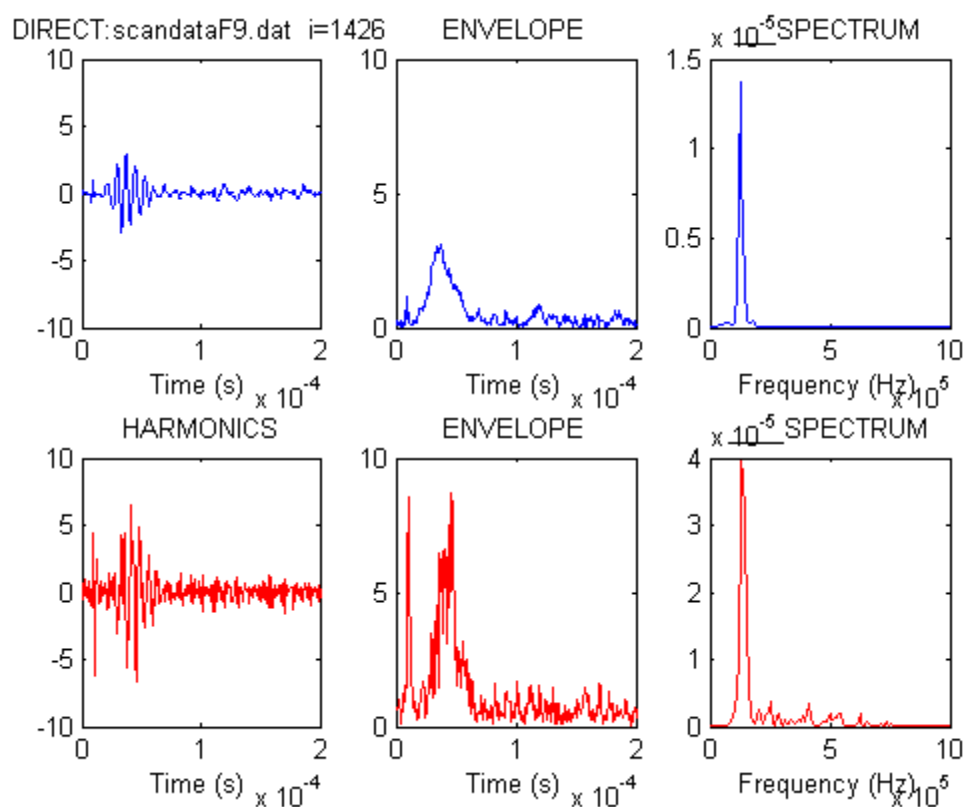
Cirkulär delaminering (26,21) svarar mot signal $26+20 \cdot 70 = 1426$.

Wettex-duken C4 befinner sig i bildens mitt svarande mot signal $7700/2 = 3850$

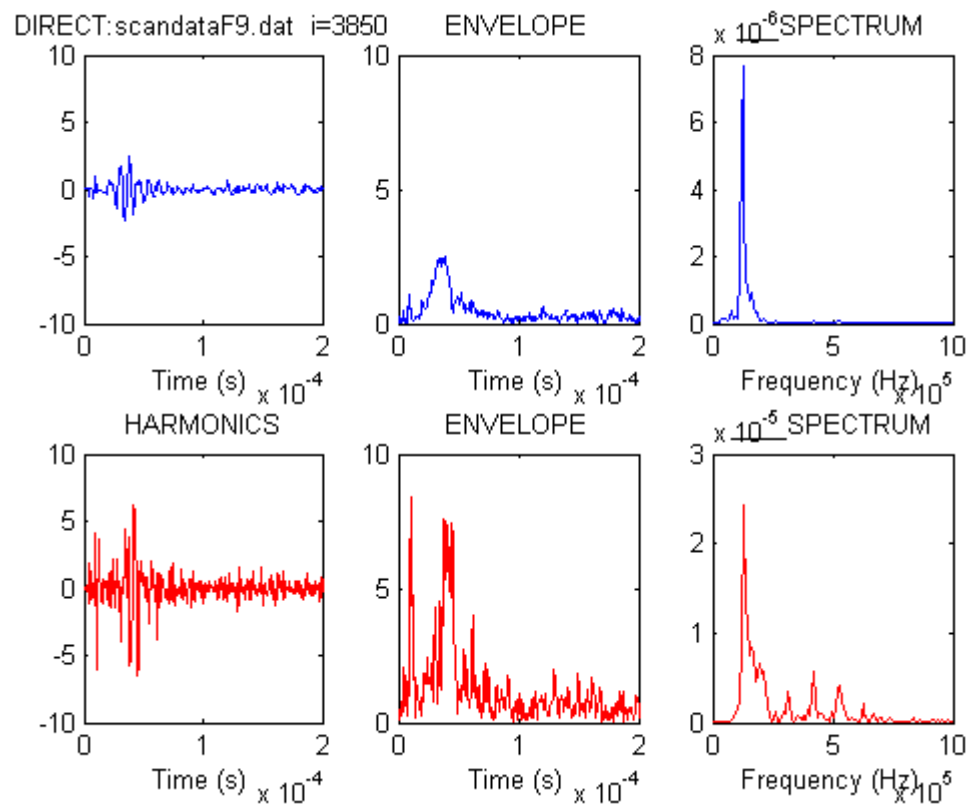
Simulerad rost i fältet DE12 i mätpunkt (11,21) svarar mot signal $11+20*70 = 1411$.

Ett område utan strukturer återfinns i BC2 i mätpunkt (41,28) som svarar mot signal 1931.

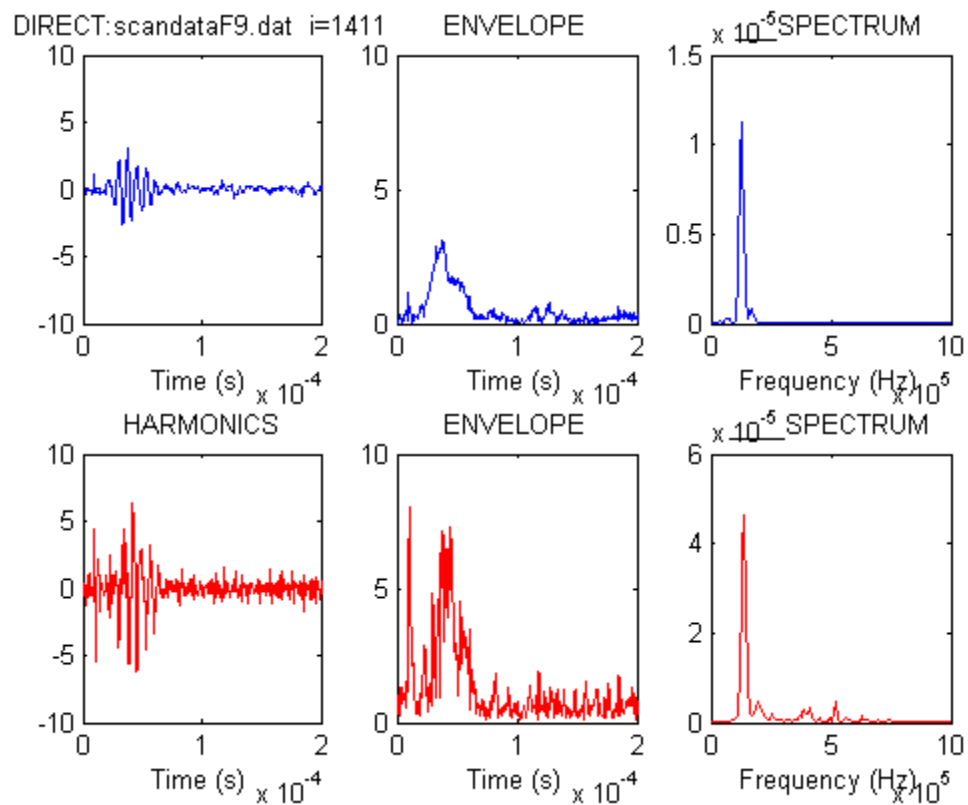
Den rektangulära delamineringen i mätpunkt (41,96) samt det simulerade rostangreppet i mätpunkt (11,96) ligger utanför det avsökt området. Avsökningen stannade i mätpunkt 4427, alltså på linje 63.



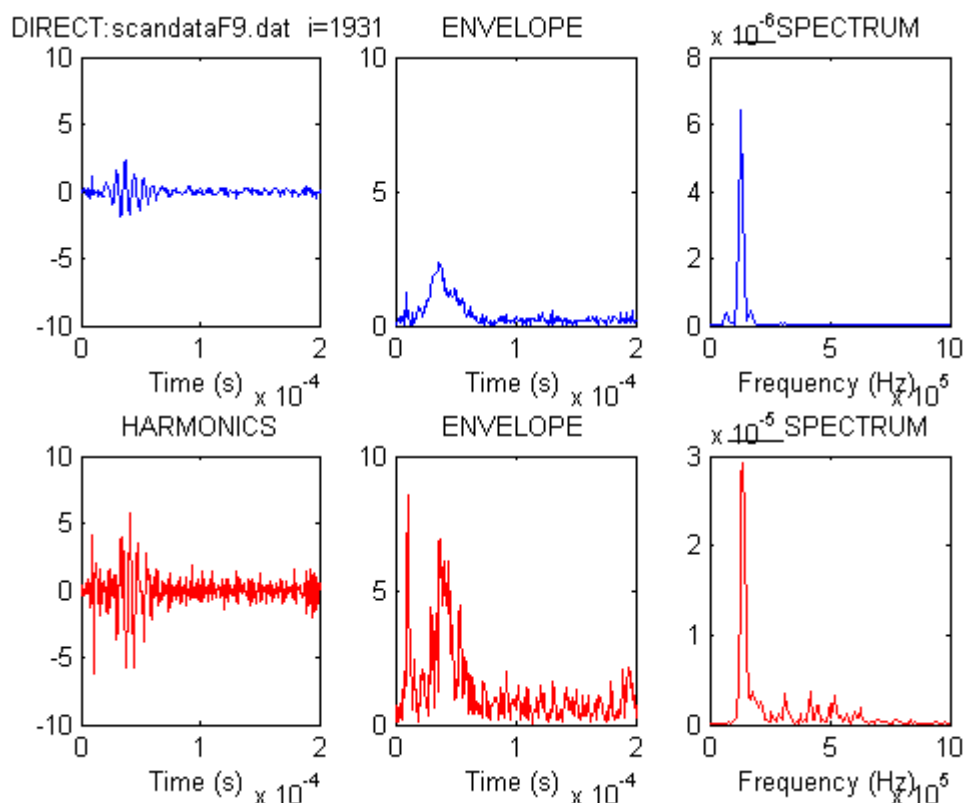
Figur 24. Cirkulär delaminering i signal 1426 (26,21).



Figur 19. Wettex-duk i provkroppens centrum i signal 3850. Notera övertonerna.



Figur 20. Simulerad rost i fältet DE12 svarande mot signal 1411 (11,21).

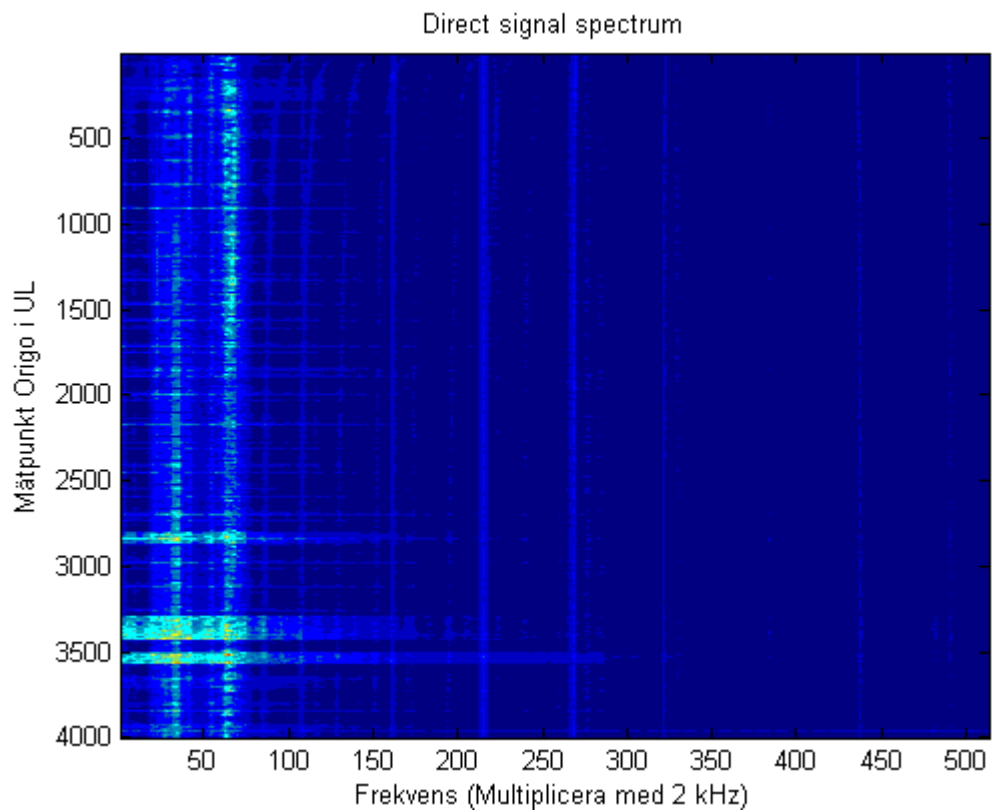


Figur 21. Homogen plåt, inga avvikelser. Signal 1931 som kommer från ett område på plåten där inga strukturer förekommer i 5 MHz ultraljudsbilden i Figur 5.

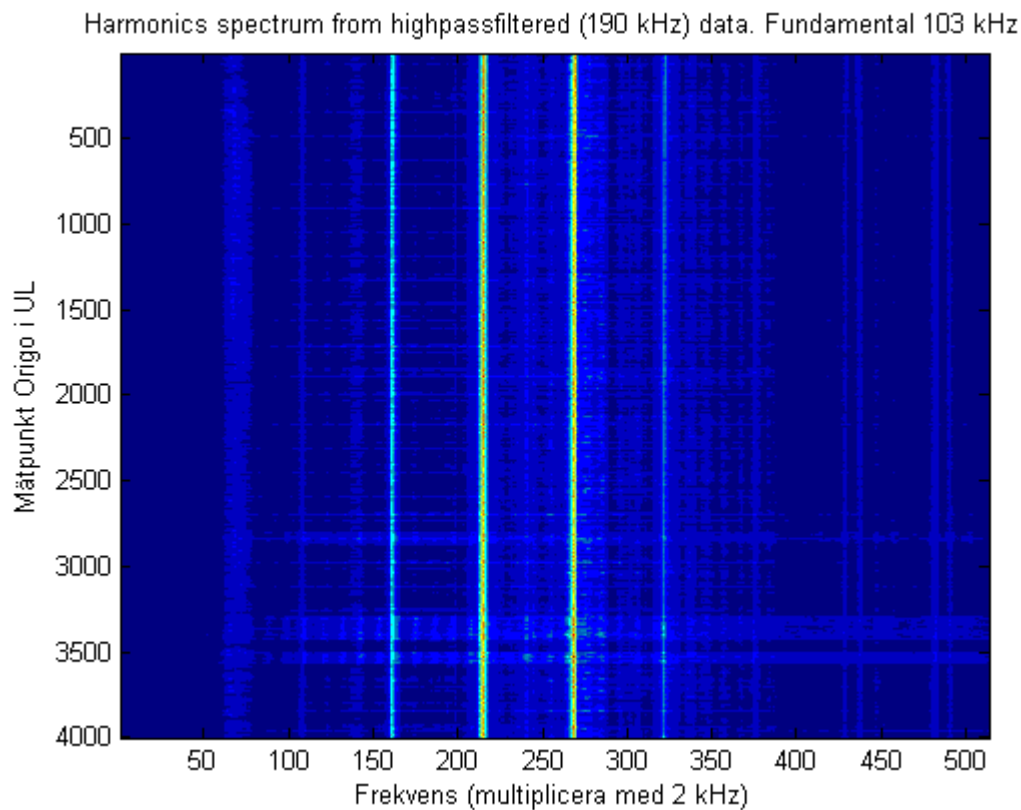
De olika signalplottarna Figur 18-21 visar att metoden att undertrycka den fundamentala frekvensen kan förbättras, men tvivelsutan förmår den redan nu framhäva övertonerna. *Wettexduken verkar vara det mål som uppvisar förekomst av flest övertoner av de valda målen.*

Nedan visas spektrogram för 4000 av de insamlade signalerna. Spektrogrammen är uppbyggda så att frekvensen visas längs x-axeln, siffrvärdena skall multipliceras med två för att få frekvensen. Längs y-axeln, med start i figurens ovandel, visas de insamlade signalerna. Dessa visas i två versioner, en för den direkta signalen Figur 22 och en för den högpasfilterade som avses framhäva övertonerna Figur 23.

Man kan konstatera att det finns en rik palett av övertoner. Vissa av dessa kan alstras i mätsystemet. De som uppstår i effektförstärkaren (RITEC) kan filtreras bort med ett högeffektfilter med brytfrekvensen t ex 100 kHz. Om man studerar den andra bilden framträder fyra spektrallinjer genom hela figuren och de ligger vid frekvenserna 316, 419, 523 och 626 kHz, alltså med en delning av 103 kHz som därmed skulle vara den frekvens som är fundamental för dessa övertoner.



Figur 22. Spektrogram för 4000 insamlade signaler direkt från förförstärkaren.



Figur 23. Samma data som figur 22, men högpasfilterade för att framhäva övertonerna.

Om man framställer timeslice-bilder ur detta material uppstår ånyo frågan om vid vilken timeslice de första reflexerna från stålplåten uppträder. En direkt uppskalning med faktorn $2 \text{ MHz}/300 \text{ kHz}$ ger faktorn 6.7, vilket innebär att man bör hamna ungefär vid $\text{sample } 37 \times 6.7 = 248$, eftersom man skall räkna bort de 10 sampelna pre-trigg som användes med 300 kSa/s AD-omvandlaren. Någon pre-trigg sattes inte för 2 Msa/s AD-omvandlaren. Plottar för intervallet 210-269, vilka bör omsluta ankomsten, visas nedan. Enligt tidigare beräkning tar det 100-125 μs för ljudet att passera betongen, vilket svarar mot sampleintervallet 200-250 då 2 Msa/s -sampelna tas med 0.5 μs intervall.

Man kan också titta på de enskilda signalerna och försöka räkna ut när den första delen av reflexen från stålplåten anländer. Den första starka signalen inträffar vid c:a sample 91, men det är inte sannolikt att det rör sig om en reflex från stålplåten utan att den kommer inifrån betongen.

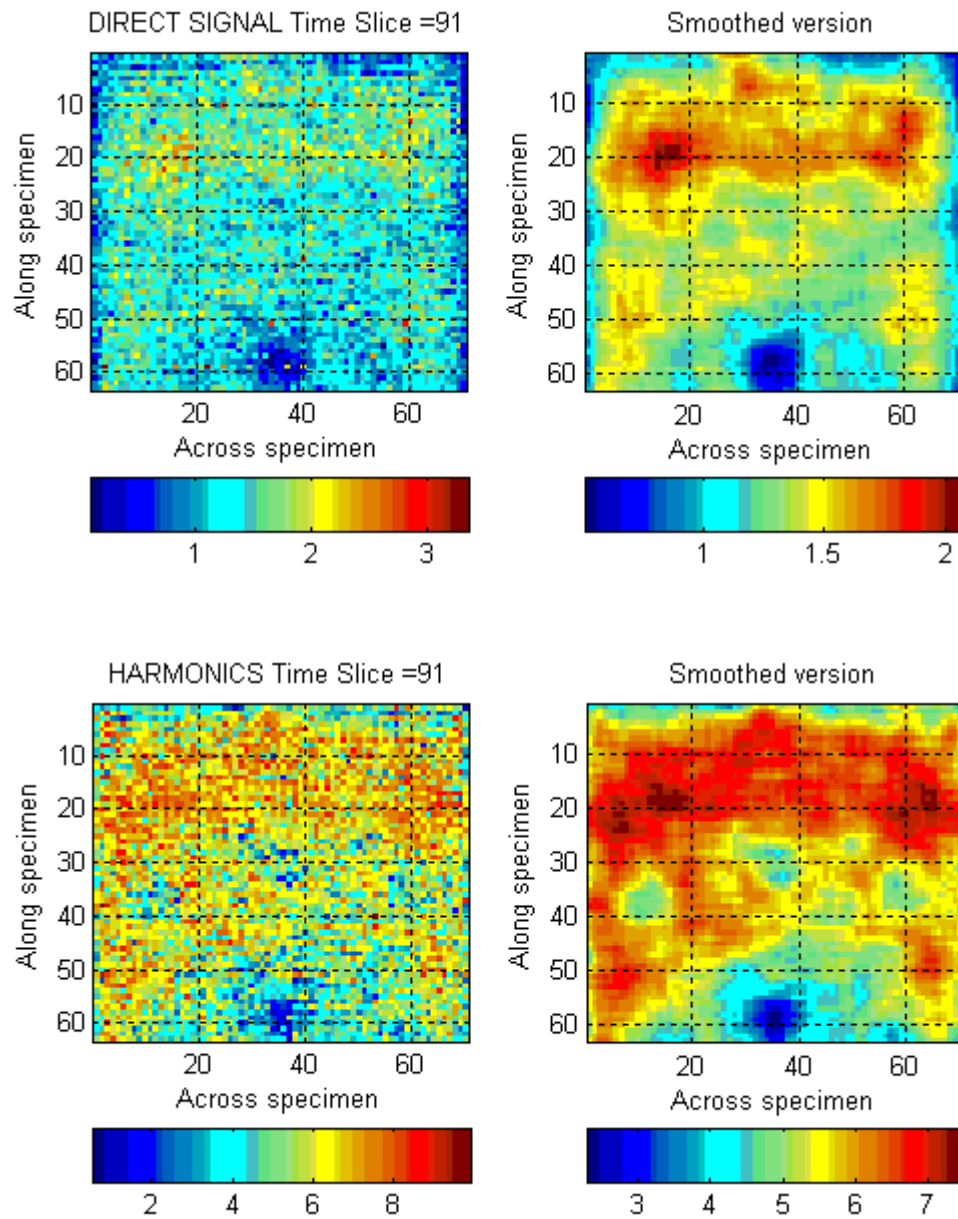
Som tidigare nämnts befinner sig den cirkulära delamineringen i fältet CD12, vars mittpunkt ligger i mät punkt (26,21). Wettex-duken C4 befinner sig i bildens mitt (33,58). Simulerad rost i fältet DE12 i mät punkt (11,21).

Nedanstående timeslice-bilder i Figur 24 omfattar endast drygt hälften av provkroppens yta, då tryckluftavbrottet uppstod vid signal 4427 av 7700 tänkta mätpunkter. 63 kompletta linjer om 70 mätpunkter presenteras = 4410 signaler.

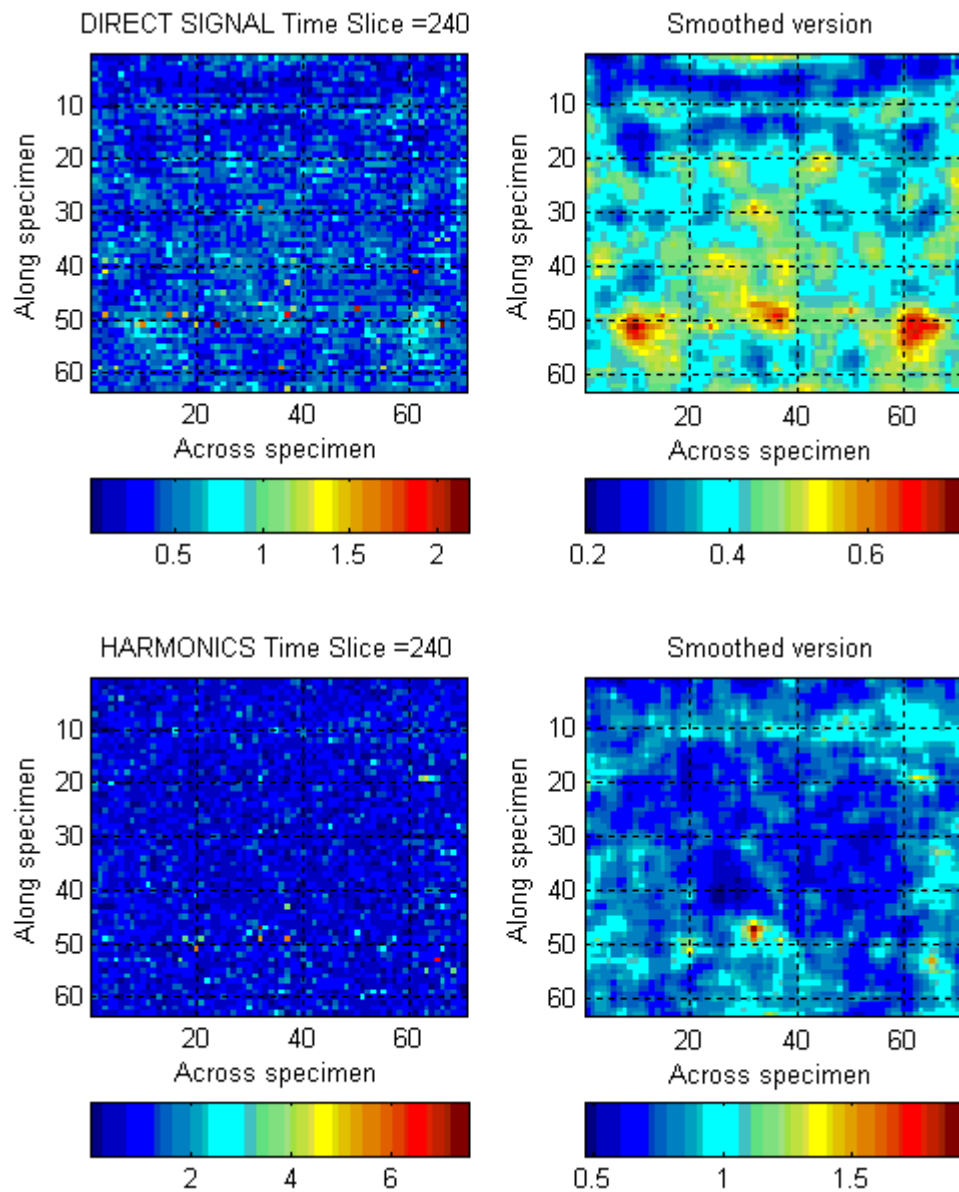
Därefter visas i Figurena 25-27 förstorade timeslice-bilder för valda nivåer 91, 240, 260 samt i Figurena 28-29 summerade timeslicebilder för nivåerna 230-260 respektive 228-234.



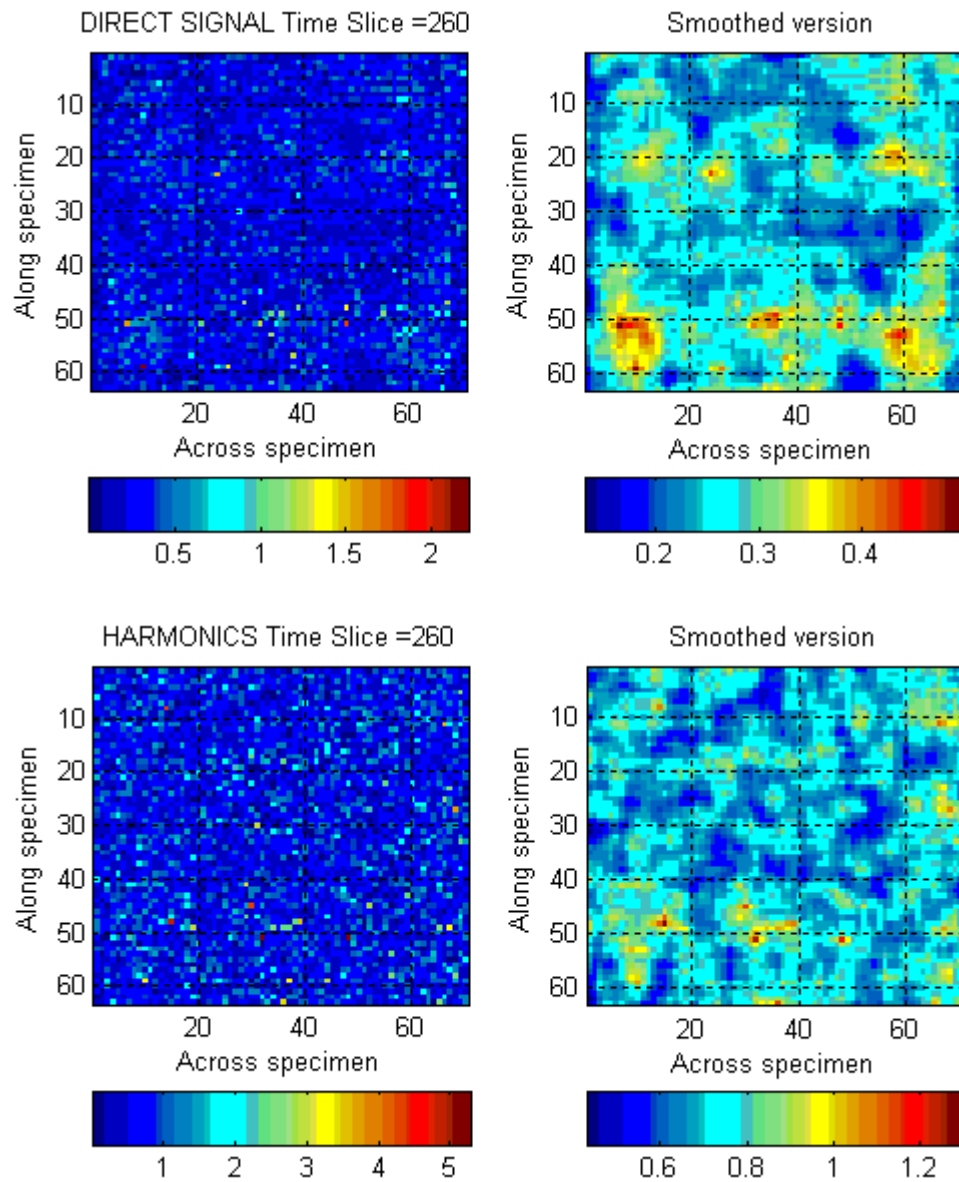
Figur 24. Försök F9. Överst: Direkt signal från förförstärkaren. Underst: Högpasfilterad signal med förstärkt "Harmonic imaging". Timeslice 210-269. Notera att endast drygt halva provkroppen avbildas eftersom mätningen ofrivilligt avbröts.



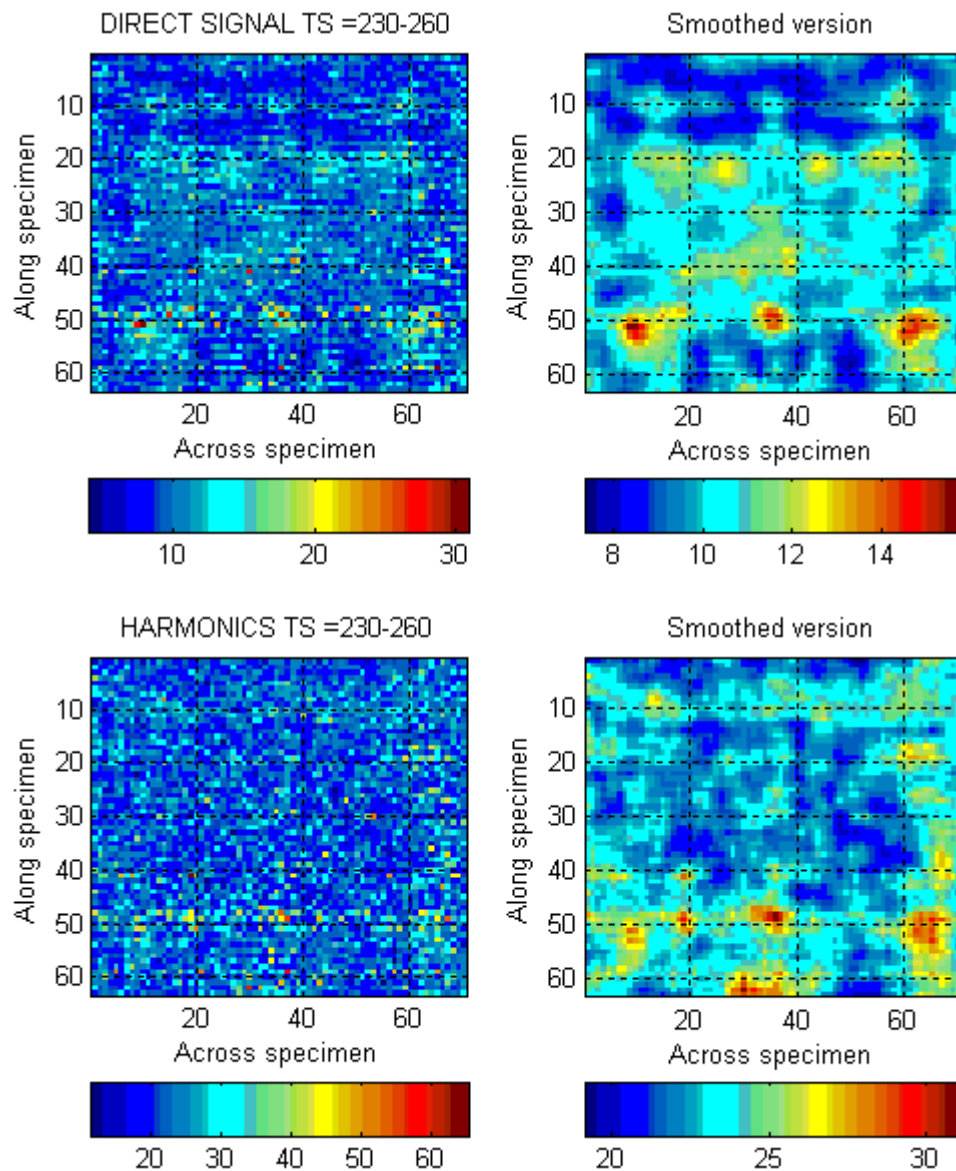
Figur 25. Försök F9. Timeslice 91 från det dominerande området i signalerna.



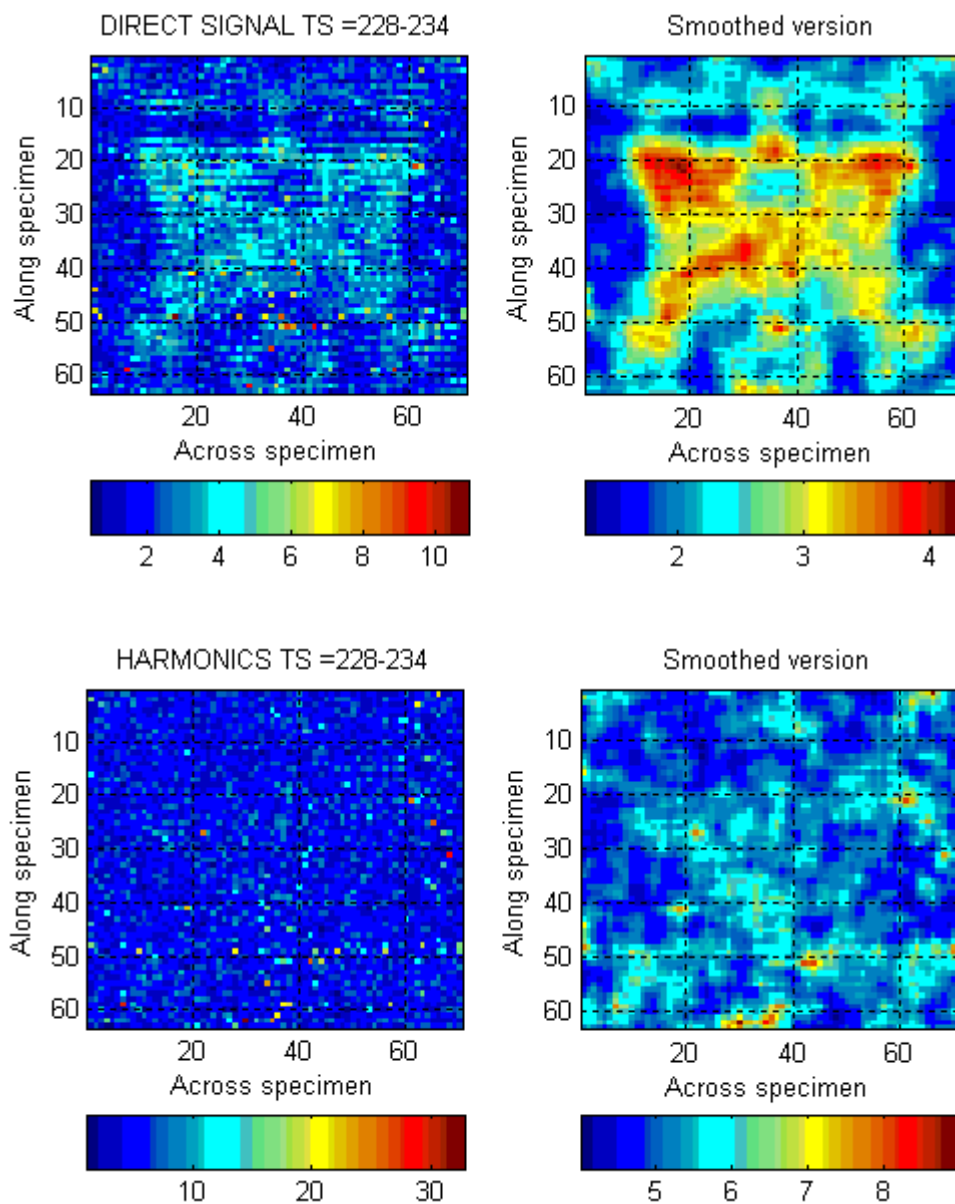
Figur 26. Försök F9. Timeslice 240 som förmodas innehålla reflexer från stålplåten.



Figur 27. Försök F9. Timeslice 260 som förmodas innehålla reflexer från stålplåten.



Figur 28. Försök F9. Addition av timeslice 230-260 som antas innehålla reflexen från stålplåten.



Figur 29. Försök F9. Addition av timeslice 228-234 som antas innehålla den centrala delen av reflexen från stålplåten.

Kommentar till försök F9

Även om bildmaterialet ser lika ut jämfört med bilderna från försök F1-8 är det framställt med helt ny programvara anpassad för datatagning med den nya 2 Msa/s AD-omvandlaren och rutiner i MATLAB. Dessa har ännu inte kunnat verifieras avseende geometrisk korrekthet i avbildningen. Det sker med mätning i assymetriska testblock med klara anomalier. Driftavbrottet medför att bilderna bara omfattar lite drygt halva provytan.

I Figur 19 visas att reflexerna från området med Wettex-duk också skapar flera övertoner. I de tidigare försöken visades ju tydligt att området också gav större dämpning.

En intressant observation i Figur 22 är att det finns frekvenslinjer som sjunker i frekvens med tiden för försöket. Detta kan vara en indikation på det förestående haveriet i effektförstärkaren.

I Figur 23 framträder fyra tydliga spektrallinjer som är övertoner till frekvensen 103 kHz.

I Figur 25 framträder området med Wettex-duken redan i timeslice 90, vilket måste bero på att den lilla imperfektionen som finns i betongytan ovanför den pålimmade Wettex-duken påverkar signalerna under hela tiden sensorn befinner sig över den.

Figur 26-29 är olika angreppssätt för att beskriva hur reflexerna från stålplåten ser ut. I Figur 28-29 har flera timeslice summerats för att få en mer integrerad bild av reflexens utseende.

Med tanke på skillnaden i inställd och mottagen frekvens när Haversine-excitering användes, bör försök med några cykler ren sinus utföras så snart effektförstärkaren är reparerad.

7 Slutsatser

Provkroppen från ACCEPPT-projektet har anpassats för mätningar från den fria betongytan mot stålplåtens baksida.

Scannersystemet har moderniserats och ställts i ordning för mätningar av olinjäritet. Tex har en ny AD-omvandlare med kapacitet att detektera ett stort antal övertoner upp till 1 MHz implementerats.

Vi har redovisat timeslice-bilder för de undersökta signaltyperna.

Vi har visat att det går att mäta mot stålplåt genom betong med de torrkopplade ACSYS A1220 sensorerna. Vi har också visat att det finns övertoner i svaret från betongen, vilket antyder att *harmonic imaging* är möjligt.

Vi vet inte om de simulerade rostangreppen som finns på stålplåtens baksida uppvisar samma egenskaper som verklig korrosion. Wettex-duken i provkroppens mitt producerar flest övertoner.

Den ger också upphov till betydande dämpning av de reflekterade signalerna, i överensstämmelse med vad som nämns inledningsvis i denna rapport.

Vi har förstått att det bästa sättet att framkalla korrosion i stålplåt är att utsätta plåten för ett elektriskt fält i närvaro av en saltlösning (elektrolyt). För att underlätta korrosionsangreppets utveckling kan hål borraras genom plåten så att alla valsplan i plåten kan angripas genom dessa.

Vad vi inte har gjort är att selektera ut vissa frekvenstoppar bland övertonerna och presentera frequencyslice-bilder för dessa frekvenser. Det är emellertid en uppgift som är mer omfattande att genomföra än vad som ryms inom detta projekt, vilket omfattade c:a 1 månads arbetstid.

8 Referenser

- 1 Ulriksen, P., "ACCEPPT WP1/G2: Non Destructive Examination » , Rapport inom det Europeiska NUGENIA-projektet, (2015)
- 2 Wiggensauser H, Helmerich R, Krause M, Mielentz F, Niederleithinger E, Taffe A and Wilsch G, "Non-destructive Testing of Nuclear Power Plant Concrete Structures State of the Art Report", Prepared for Oak Ridge National Laboratory (2013)
- 3 Ulriksen, P., "Litteraturstudier och test av oförstörande provningsmetoder (OFP) med möjliga tillämpningar på kärnkraftens betongkonstruktioner", ELFORSK rapport 10:85 (2010)
- 4 Nico de Jong, Ayache Bouakaz, Folkert J. Ten Cate, "Contrast Harmonic Imaging", Ultrasonics 40 (2002) pp.567-573

ULTRAJLUDSMETOD FÖR ATT DETEKTERA KORROSION I TÄTPLÅT I REAKTORINNESLUTNINGAR

Denna rapport omfattar Etapp 1 i ett försök att lokalisera korrosion i ingjuten tätplåt i reaktorinneslutningar. Arbetet skall ses som en pilotstudie och återetablering av den scannerteknik, som utvecklades på LTH under 90- och 2000-talet, vars syfte är att framställa bilder av egenskaper i betong. Särskilt har mätmetodik för bestämning av övertoner och andra olinjära fenomen studerats. Hypotesen är att korrosionsprodukter påverkar impedansen i stålplåten och att det också förekommer olinjäriteter i dessa.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se



Energiforsk