

DETEKTION AV KORROSION I INGJUTEN TÄTPLÅT I REAKTORINNESLUTNING MED HJÄLP AV ÖVERTONER

RAPPORT 2019:595



BETONGTEKNIK
KÄRNKRAFT

BETONGTEKNISKT PROGRAM
KÄRNKRAFT



Energiforsk

Detektion av korrosion i ingjuten tätplåt i reaktorinneslutning med hjälp av övertoner

PETER ULRIKSEN

ISBN 978-91-7673-595-4 | © ENERGIFORSK augusti 2019

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

Förord

I merparten av de nordiska reaktorinneslutningarna är tätplåten ingjuten, med tjocka armerade betongskikt på båda sidor om plåten. Detta gör det svårt att inspektera plåten, för att säkerställa att inte korrosion uppstått.

Peter Ulriksen, professor emeritus vid teknisk geologi, Lunds universitet, har genomfört inledande försök med en ny metod för att hitta korrosionsproblem i ingjuten tätplåt. Metoden baserar sig på studier av övertoner, och har potential att utvecklas till en oförstörande provningsmetod för ingjuten tätplåt.

Projektet ingår i Betongtekniskt program kärnkraft, med intressenterna Vattenfall, Uniper/Sydkraft Nuclear, Fortum, Teollisuuden Voima Oy, TVO i Finland, Skellefteå Kraft, Karlstads Energi samt Strålsäkerhetsmyndigheten, SSM.

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet och publiceringen innebär inte att Energiforsk har tagit ställning till innehållet.

Sammanfattning

Detta projekt skall ses mot bakgrunden att det, när projektet initierades, inte fanns någon framgångsrik metod att detektera korrosion i ingjuten tätplåt. Det fanns således ingen lämplig litteratur att stödja arbetet på. Projektet vilar på hypotesen att korrosionsprodukter har olika elastiska egenskaper i kompression och töjning. Detta är definitionen av olinjäritet. Det är också så att befintliga sensorer och kommersiellt tillgängliga sensorer rimligen är de första man provar i ett dylikt projekt. Det innebär att försöken skett med sensorer i frekvensområdet 50-100 kHz, som vi vet fungerar bra i betong för andra ändamål.

De tre viktigaste resultaten hittills i projektet är att ultraljud vid dessa frekvenser utan problem tränger igenom 1,2 m betong, dock oarmerad, att kontinuerligt ultraljud skapar övertoner samt att en 8 mm stålplåt med skalrostangrepp inte ger upphov till några tydliga reflexer för transienta (kortvariga) signaler.

Eftersom ett skikt skalrost med tjockleken 2-3 mm ger upphov till kraftiga reflexer när man sänder en puls 50 kHz ultraljud mot det genom luft, dras slutsatsen att våglängden i betong för denna frekvens är för lång, närmare bestämt i storleksordningen 10 gånger längre i betong än i luft. Orsaken till det är att ljudhastigheten i betong är tio gånger högre än vad den är i luft.

Vid mätningar med kontinuerligt ultraljud detekteras övertoner, men metoden medger inte att man lokaliserar källan till denna olinjäritet. Således finns anledning att gå vidare med den antagna hypotesen om olinjäritet i korrosionsprodukterna men vid högre frekvenser. Samtidigt som frekvensen ökar, ökar också dämpningen och stålplåtens reflektivitet och dessa båda effekter motverkar varandra, varför man kan därför förvänta sig en optimal frekvens för transienta mätningar. Alternativt kan frekvenssvep med efterföljande pulskompression ge den erforderliga upplösningen. Man skall naturligtvis modellera dessa situationer matematiskt innan man utvecklar en ny typ av sensor.

När man väl etablerar reflexer från stålplåten kommer det att finnas vissa våglängder som interfererar i skikten och därmed kan skapa reflektionsminima och maxima.

Summary

This project should be seen in the context that when it was initiated there was no method available to detect corrosion in an internal liner plate, i.e. one located between very thick layers of concrete. The work rests on the hypothesis that corrosion products have different properties in compression and dilatation. This is the definition of nonlinearity. It is also so that available and commercially available sensors are the first to be tested in this kind of project. This means that the experiments have been performed with sensors in the 50-100 kHz range that we know from before works well in other measurements in concrete.

The three most important results so far in the project are that ultrasound in the 50-100 kHz regime penetrate 1.2 m unreinforced concrete without any problems caused by damping, that continuous insonification generates harmonics and that an 8 mm corroded steel plate does not produce any significant reflexions for transient signals at those frequencies.

Since a 2-3 mm layer of corrosion products generate strong reflexions when insonified in air we draw the conclusion that the wavelengths have been too long to cause reflexions. Insonification in air generates a wavelength ten times shorter than in concrete for the same frequency. The reason for this is that the speed of sound in concrete is at least ten times faster than that in air, 340 m/s. When continuous tones of ultrasound are emitted it is, in principle, easy to detect overtones, the sign of nonlinearity, but the method does not allow location of the source within the insonified body.

Thus, there is reason to continue with the hypotheses that corrosion products generate harmonics due to nonlinear elastic properties, but at higher frequencies. As the frequency is increased both the probability of detection of the steel plate and the damping increases, which means that there should be an optimum frequency for detection with transient signals. As an alternative frequency sweeps may be used together with pulse compression. Before manufacturing a possible new sensor types these possibilities should be modelled mathematically.

As echoes from the steel plate are established it will be seen that there are frequencies producing interference from a front-side and a back-side echo. This will produce a variation in echo power with frequency.

Innehåll

1	Inledning	8
1.1	Bakgrund	8
1.2	Problemställning	8
1.3	Mål	8
1.4	Resultat från Etapp 1	8
1.5	Angrepssätt i Etapp 2	10
2	Aktiva korrosionsförsök	12
2.1	Försök med elektrolytisk korrosion	12
2.1.1	Försök i elektrolytbad	12
2.1.2	Försök med strömmande elektrolyt under tryck	13
3	Tillverkade Provkroppar	16
3.1	Provkropp 1	17
3.2	Provkropp 2	21
3.3	Provkropp 3	23
3.4	Provkropp 4	24
4	Försök med kontinuerligt ultraljud	26
4.1	Bakgrund	26
4.2	Frekvenskaraktäristik för olika sensorer och komponenter	27
4.2.1	ACSYS S1802(S 50 kHz) och S1803 (P 100 kHz) sensorer med ett element 170508	27
4.2.2	Karaktäristik ACSYS M2502 S och P med 12 sändar- och 12 mottagarelement i vardera. 170508	30
4.2.3	Olika filters karaktäristik 170508	32
4.2.4	Panametrics 50 kHz sensorer 171130	35
4.2.5	Sensorer tillverkade vid LTH – PFTXRX (PF=Patrik Fröjd)	41
4.2.6	Försök med geofoner som sensor	45
4.2.7	Försök med ACSYS M2502P 100 kHz kompressionsvågor	51
5	Försök med transient ultraljud	55
5.1	Försök daterade 2018-01-22 TEK00071-00080	55
5.2	Försök daterade 180507 Reflexid med M2502P sensorn TEK00130-00131	59
5.3	Försök utförda 180516 Pulskaraktärisering TEK00132-215	61
5.3.1	Halvperiod metod	62
5.3.2	FFT metod	63
5.4	Tester med "Gaussdiff" 180517 TEK00136-00138	64
5.5	Mätning rakt igenom provkroppen 180518 TEK00139-	66
5.6	Omtagning med Panametrics 100 kHz som mottagare	82
5.7	Optimal inställning av förstärkning för RITEC förstärkaren 180705 TEK00191-00193	90

5.8	Reflektionsmätningar 180605 TEK00194-00213	92
5.9	Kontrollmätningar om störningar uppstår i fästplattan 180705 TEK00215-00215	102
5.10	Optimal inställning av utmatningsfrekvens för vågformsgeneratoren med M2502 S TEK00216-00223	104
5.11	Tester med M2502 P och S inför att fästplattan demonteras TEK00224-00228	109
5.12	Tester i provkroppen med aluminiumfästplattan borttagen 180704 TEK00229-00266	113
5.13	M2502 P Rakt igenom provkroppen mot sammankopplade Panametric 50+100 kHz samt reflektion TEK00248-00252	123
	5.13.1 Transmission	124
	5.13.2 Reflektion	124
5.14	Inverterade signaler 180704 TEK00253-00254	126
5.15	M2502 S Rakt igenom provkroppen mot sammankopplade Panametrics 50+100 kHz samt reflektion 180704 TEK00255-00266	127
5.16	LTH egentillverkade sensorer 180706 TEK00267-00277	127
5.17	Panametrics 50+100 kHz som sändare 180706 TEK00279-00289	134
5.18	SpecialHammar 180709 TEK00293-00295	141
5.19	Nya vågformer	143
	5.19.1 Spike 180710 TEK00306-00324	144
	5.19.2 Förskjuten fyrkantvåg 180710-11 TEK 00325-00357	153
5.20	Ricker P 180711 TEK00358-00376	171
5.21	Vanlig snickarHammar 180710	181
6	Försök med impulsradar	182
7	Mätningar i luft	185
7.1	Mätning mot glasskiva	185
7.2	Mätning mot skalrost	188
8	Diskussion av resultat	190
9	Fortsatt arbete	197
10	Slutsatser	200
11	Referenser	202

1 Inledning

1.1 BAKGRUND

I Etapp 1 av projektet har en litteraturstudie och enklare experiment med befintlig provkropp från det tidigare NUGENIA/ACCEPPT-projektet utförts. I denna Etapp 2 görs mer omfattande försök med olika sensorer och konstrueras provkroppar med ingjuten stålplåt med rostangrepp. Den grundläggande hypotesen är att korrosionsprodukterna uppvisar olinjäritet resulterande i olika detekterbara fenomen.

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, denna måste vara gastät. För detta syfte finns det en tätplåt.

1.2 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 och 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 idag ingen metod att lokalisera korrosionsangrepp i ingjuten tätplåt [2]. Då man idag vill förlänga drifttiden för befintliga reaktorer synes intensifierad kontroll med oförstörande metoder vara ett sätt att göra ett sådant förfarande trovärdigt. I vissa fall kan det vara säkerhetsmässigt effektivt att installera system för kontinuerlig övervakning. Detta är en disciplin som betecknas Structural Health Monitoring – SHM och den är i starkt växande internationellt.

1.3 MÅL

Finna en metod att lokalisera korrosionsangrepp på tätplåt som är ingjuten i tjock, armerad betong.

1.4 RESULTAT FRÅN ETAPP 1

Försöken i Etapp 1 utfördes med den befintliga M2502 ultraljudsensorn och den scanner som LTH tidigare har utvecklat för försök i betongprovkroppar [3]. Scannersystemet har i etappen återsatts i funktion och uppgraderats.

Inom det avslutade FoU-projektet NUGENIA Acceppt har LTH tillverkat en liten mock-up av en "fransk" reaktorinneslutning med dimensionerna 800x1200x250mm. Denna består av en 6 mm stålplåt med s.k. "studs", mot vilken betong av sådan kvalitet som används i reaktorinneslutningar (betongrecept från AREVA) har gjutits. Stålplåten är på den sida som är vänd mot betongen försedd med flera imperfektioner inkluderande hopklistrad sand, plastfilm och Wettexduk vilka

simulerar korrosionsangrepp. Denna provkropp har tidigare använts för att studera hur dessa imperfektioner kan detekteras från plåtytan. Nu vändes den med betongsidan upp.

Följande två frågor besvarades i Etapp 1:

Vilken typ av sensor skall användas

Försöken gav vid handen att de tidigare använda ACSYS M2502 sensorerna kan användas. Dessas frekvenskaraktäristik har undersökts med avsikt att finna lämpliga frekvenser för övertonsstudier. Två typer av sökare har studerats. Den ena är gjord för att sända kompressionsvågor och den har en lägsta frekvenstopp vid 127 kHz. Den andra är gjord för att sända och mottaga skjuvvågor och den har en lägsta frekvenstopp vid 47 kHz. De första övertonerna har därmed frekvenserna 94 resp. 254 kHz för respektive sökare. Detta är också de cutoff-frekvenser de högpasfilter man använder för att bortskilja grundtonen måste ha. Tanken är att genom att filtrera bort 47 resp. 127 kHz återstår endast de svagare övertonerna och dessa kan förstärkas efter filtreringen när inte grundtonerna konkurrerar om signaldynamiken. Denna metodik är lånad från medicinskt ultraljud, där den går under beteckningen *Harmonic Imaging*. Sökarna från ACSYS är också de som våra kollegor på BAM [4] i Tyskland funnit lämpligast att använda i betong.



Figur 1. Sökare M2502 från ACSYS för instrumentet A1220 Monolith. 12 element fungerar som sändare och 12 som mottagare. Respektive grupp är parallellkopplad. Det ger riktverkan rakt fram. Alla element är fjädrande, vilket gör att elementen anpassar sig efter ojämnheter i betongen. Sökaren finns dels för 50 kHz skjuvvågor och dels för 100 kHz kompressionsvågor.

Kan man få reflexer från simulerade rostangrepp i stålplåt bakom 250 mm betong

En svårighet är naturligtvis att veta vad som är en god simulering av rostangrepp. De skador som finns i den i Etapp 1 använda provkroppen är alla konstgjorda. Resultaten pekar på att inlagd Wettex-duk är det som ger tydligast respons i

mätningarna. Wettex-duken ger upphov till dämpning av reflexen från stålplåten. Att så sker är naturligtvis också svar på frågan om man kan få reflexer från stålplåten. Det kan man, annars skulle reflexerna inte kunna dämpas.

Anmärkning. Man skall observera att den provkropp som använts i Etapp 1, vilken är tillverkad för NUGENIA/ACCEPPT-projektet, har stålplåten ytmonterad. Dessa tester utfördes från betongsidan med stålplåten underst. Det betyder att det föreligger en avsevärd impedanskontrast mellan stålplåten och den under provkroppen belägna luften. Ett frågetecken måste därför sättas om reflexen skapas av stålplåten eller provkroppens undersida. Är det stål/betong eller stål/luft som ger upphov till reflexerna? I den nya provkroppen är det 0.6 m betong på ömse sidor om stålplåten, så denna problematik kvarstår inte.

1.5 ANGREPSSÄTT I ETAPP 2

Emellertid måste verklig korroderad stålplåt användas om fortsatta försöksresultat skall vara trovärdiga. I denna etapp, Etapp 2, studeras verklig korrosion i grov stålplåt. Dock är det inte fråga om sådan korrosion som har uppstått på en ingjuten stålplåt. För att undersöka korrosionsangrepp på ingjuten stålplåt utfördes försök med lågfrekvent ultraljud 50/100 kHz. Vi utnyttjar bl. a. en teknik, sedan länge använd i medicinskt ultraljud [5], 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 kärnmedicinen genom att man injicerar mycket 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 ultraljudssignal 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 reflexer från korrosionsprodukter. Detta är en andra indikator. Därmed föreligger två oberoende 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. Nedan visas ett autentiskt korrosionsangrepp på en frilagd linerplåt, Figur 1a. Såväl betong som korrosionsprodukter har avlägsnats.



Figur 1a. Autentiskt rostangrepp på ingjuten linerplåt som har frilagts, varför korrosionsprodukterna är borta. Men i övre, vänstra kanten på den angripna ytan antyds den flakighet som skulle kunna medföra att korrosionsprodukterna uppträder olinjärt. Beaver Valley Unit 1 [6]

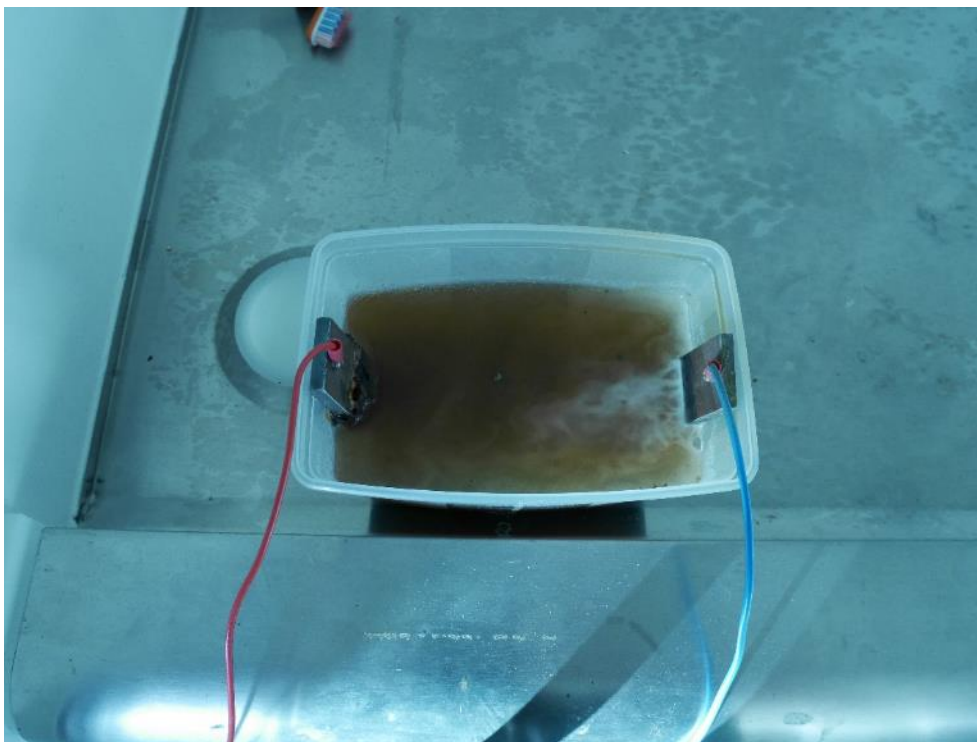
2 Aktiva korrosionsförsök

2.1 FÖRSÖK MED ELEKTROLYTISK KORROSION

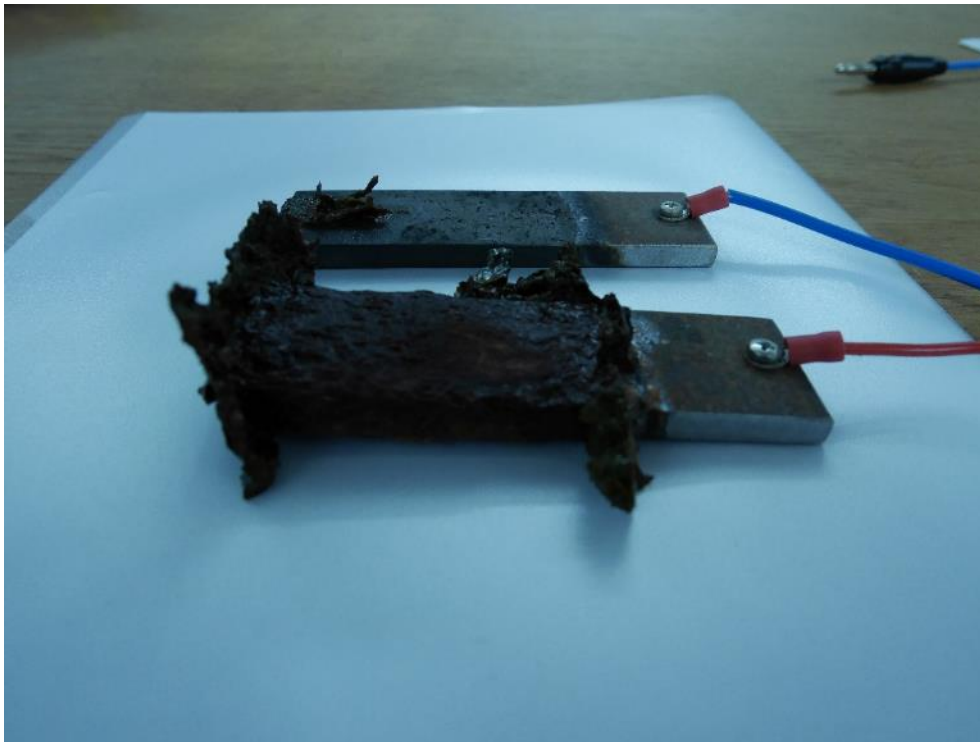
I korthet innebär elektrolytisk korrosion att stålbitar nedsänkes i en elektrolyt, vanligen vatten med tillsats av något salt som alstrar joner och gör vätskan elektriskt ledande. På nätet finns många recept på hur man i estetiskt syfte kan åstadkomma en rostig yta på stålplåt. I detta projekt vill vi emellertid inte bara ha en tunn hinna korrosionsprodukter utan angrepp av det man i dagligt tal kallar gravrost, särskilt är intresset riktat mot skalrost som har en struktur som påminner om wienerbröd i uppbyggnaden och uppstår när en valsad plåt har ett glödskal kvar. Det kan räcka med att de horisontella strukturer som bildas i en valsad plåt finns för att ett korrosionslager med laminär struktur skall uppstå. Denna uppbyggnad av korrosionsprodukterna kan tänkas ha olika elastiska egenskaper i kompression och dilatation, vilket är en definition av ett materials olinjäritet.

2.1.1 Försök i elektrolytbad

Försöken utfördes i dragskåp och med ett laboratorieaggregat som strömkälla. Det var ingen svårighet att få igång en reaktion med kraftig gasutveckling, se Figur 2. Saltkoncentrationerna varierades mellan 2 och 10%, strömstyrkan från 0.3 – 3 A och spänningen från 6 till 20 V.



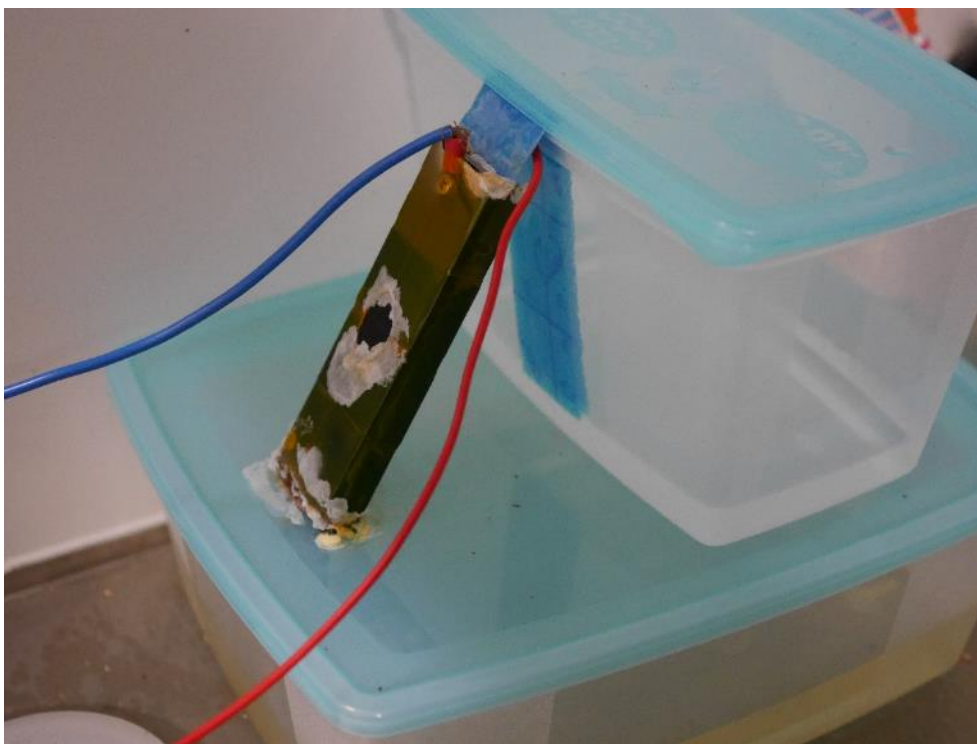
Figur 2. Elektrolytisk korrosion i vätskebad. Notera gasutvecklingen vid den blå kabeln med negativ polaritet.



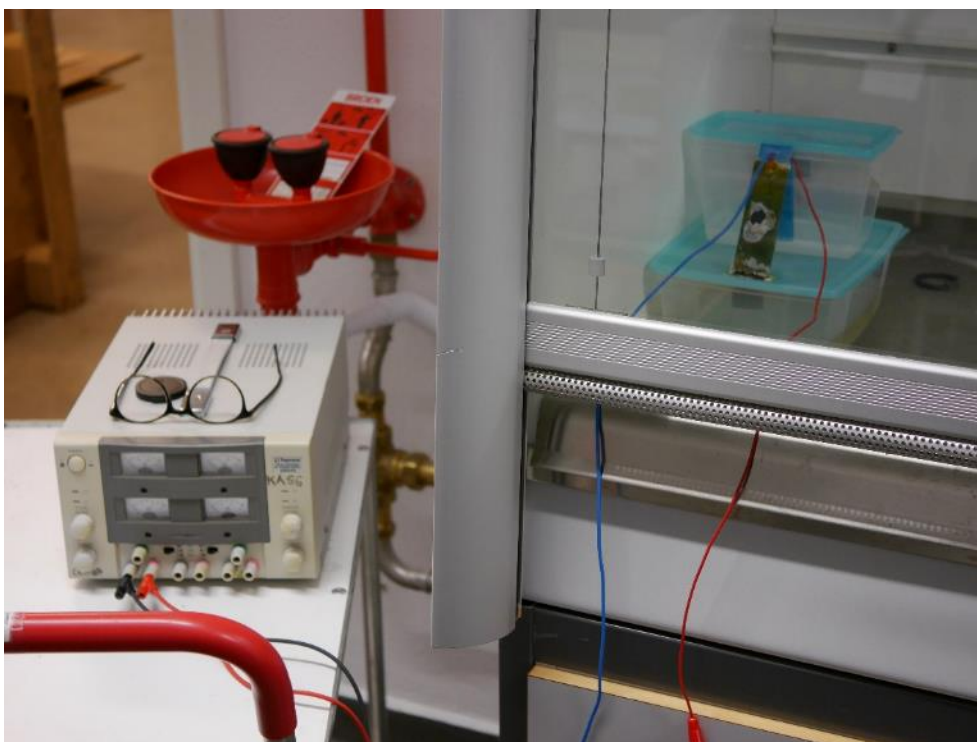
Figur 3. Resultatet efter flera timmars elektrolytisk process.

2.1.2 Försök med strömmande elektrolyt under tryck

I syfte att hålla samman korrosionsprodukterna och samtidigt ge elektrolyten tillgång till stålplåten utvecklades en metod baserad på hävertprincipen, en kapillär hävert närmare bestämt. Två elektroder av stålplåt placerade mot varandra med en tunn wettex-duk emellan. I ändarna isolerades stålplåtarna med dokumenttejp för att undvika att korrosionsprodukter skulle uppstå utanför stålplåtarna. De båda stålplåtarna pressades därefter samman med krympslang. Wettex-duken var en lång remsa och elektrolyten lyftes kapillärt upp från den övre reservoaren till stålplåtarnas överkant. Därefter leddes elektrolyten genom wettexduken mellan de två spänningsbelagda stålplåtarna och överskottselektrolyten samlades upp i ett nedre kärl, se Figur 4-6.



Figur 4. Anordning för att åstadkomma elektrolytisk korrosion med kapillär hävertprincip.



Figur 5. P.g.a. gasutveckling skedde försöken i dragskåp.



Figur 6. Korrosionsresultat, det uppkom ingen skalrost, inget egentligt rostlager. Däremot små rostgropar, men det fanns ingen rost kvar på plåtarna och alltså ingen grund för olinjärt beteende.

Syftet med den elektrokemiska framställningen av rost var att åstadkomma ett rostlager med en laminär struktur. Detta är ansatsen i projektet och en förutsättning för att det korroderade lagret skall uppträda olinjärt. Eftersom inget sådant lager kunde åstadkommas övergavs försöket. Kvar på stålplåtarna fanns små rostgropar men det finns ingen anledning att tro att dessa skall uppträda olinjärt.

3 Tillverkade Provkroppar

Efter att försöken med galvaniskt accelererad korrosion misslyckats företogs besök på en skrotplats utanför Lund. Efter någon timmes letande påträffades en stor stålplåt med omfattande skalrostangrepp, se Figur 7. Ur denna togs mindre prover med skärbrännare och dessa skars sedan ner till de dimensioner försöken kräver med hjälp av sand/vattenskärning, se Figur 8.



Figur 7. Stålplåt med 8 mm tjocklek och omfattande skalrostangrepp påträffad på företaget Metallteknik utanför Lund. Mindre bitar skars ut med skärbrännare efter de markerade rutorna.

I projektets Etapp 2 har tre specifika provkroppar tillverkats med angivna betongvolym (l x b x h).

- Provkropp 1: 1200 x 800 x 600 mm med skalrostplåt monterad vertikalt i centrum
- Provkropp 2: 1200 x 800 x 450 mm med plåt med olika grad av korrosionsangrepp
- Provkropp 3: 800 x 600 x 400 mm med träföremål ingjutna
- Provkropp 4: 800 x 600 x 400 mm med en arbetshandske ingjuten

Endast provkropp 1 innehåller någon armering och denna är endast till för att hålla stålplåten i fast position under gjutningen och att hålla ihop betongen på stålplåtens två sidor under efterföljande transporter av provkroppen.

Provkropparna 2-4 är avsedda för mätningar med scanner och bildframställning, därför är de lägre.

All betong till provkropp 1 har levererats av Betongindustri i Staffanstorp 2017-09-22 och har följande specifikation enligt ordersedeln: **C35/45 16 SF2 VCT 0.50** Nr 13670. Betongen fylldes i formen med hjälp av hydraulränna och manuell fördelning. Betongen vibrerades i formen.

De andra provkropparna göts 2018-04-05.



Figur 8. Tvärsnitt genom den skalkorroderade stålplåten framställt med hjälp av sand/vattenskärning. T.v. framträder den skiktning i rostlagret som kan misstänkas ge upphov till olinjäritet i korrosionsprodukternas akustiska egenskaper vid reflektion.

3.1 PROVKROPP 1

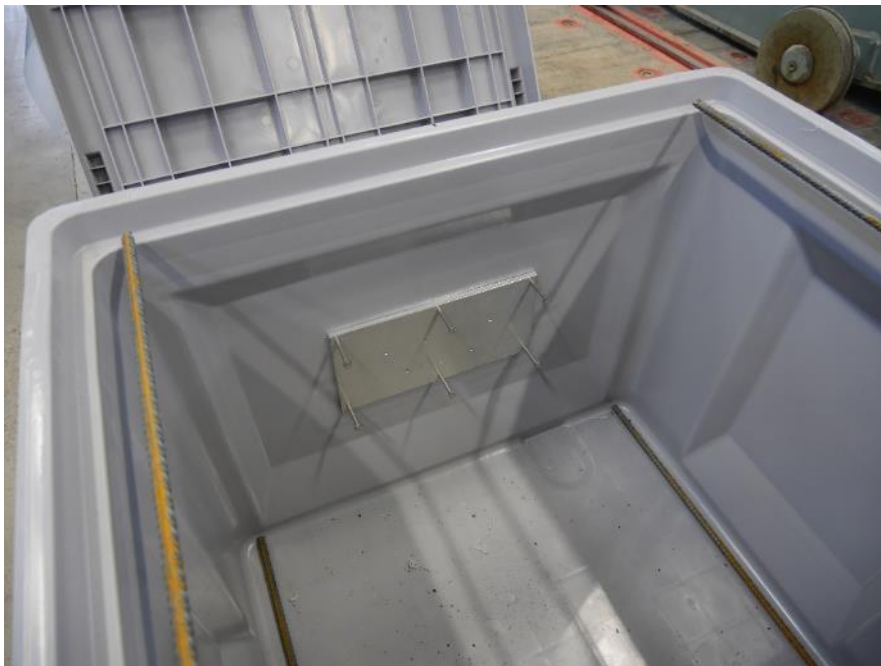
Provkropp 1 är avsedd för fundamentala försök med olinjärt ultraljud med fast monterade sensorer. Det innebär att mätdata alltid blir i form av s.k. A-scans, det man vanligtvis ser på en oscilloskopskärm eller ett mätvärde av fas och amplitud i fallet med kontinuerlig sändning. Motivet är att det är olinjära fenomen som skall studeras och att det då inte krävs att sensorerna flyttas, hela tvärsnittet är täckt av den aktuella korrosionstypen.

Eftersom sensorerna skulle sitta fast monterade gjöts aluminiumplattor med fästpunkter för sensorerna in i betongen. Detta skulle senare visa sig vara ett misstag.

I syfte att underlätta gjutningen byggdes ingen form utan ett stort plastkar användes som en färdig form. Avsikten var att denna form skulle sitta kvar efter gjutningen och att lämpliga hål skulle tas upp i provkroppens gavlar, där sensorerna skulle fästas mot de innanför plasten fästa aluminiumplattorna, se Figur 9-14.



Figur 9. Det plastkar som användes att gjuta betongen i. På saxliftvagnen ligger den tillskurna stålplåten med påsvetsade armeringsjärn vars syfte är att hålla plåten på plats under gjutningen och förhindra att betongen släpper från plåten vid transport av provkroppen.



Figur 10. Ingjuten aluminiumplatta avsedd att fästa sensorer på. När betongen härdat håller de instickande skruvarna plattan mot betongen (studs). Platen skärs bort och plattan blir tillgänglig från utsidan. Det sitter en platta på varje sida av plastkaret.



Figur 11. Den korroderade plåten på plats med all armering som kommer att gutas in. Den är avsedd att hålla plåten mitt i provkroppen och vertikalt, samt för att hålla ihop betongen och plåten under transporter. Stålplåten är centrerad.



Figur 12. När betongen härdat skars plasten bort på provkroppens kortsidor, varvid de ingjutna aluminiumplattorna blev åtkomliga att fästa sensorer på.



Figur 13. Ett sätt att fästa konventionella ultraljudssensorer på provkropp 1 aluminiumplatta. Den akustiska kontakten mellan sensor och aluminiumplatta underlättas av konsistensfett.



Figur 14. Fastsättning av ACSYS M2502 sensor mot provkropp 2 aluminiumplatta. Denna sensortyp är torrkopplad. 24 avfjädrade stift pressas mot plattan.

3.2 PROVKROPP 2

Provkropp 2 är avsedd för mätningar med scanner och är därför horisontellt orienterad. Av samma skäl är den lägre för att få plats under scannern. Tre stålplattor, alla framställda av samma korroderade stålplåt ligger mot formens botten, se Figur 15-18. De har följande egenskaper:

- Plåt 1 har den korroderade stålplåtens baksida uppåt, den har normal lätt ytrost
- Plåt 2 har den skalkorroderade ytrosten uppåt (i mitten)
- Plåt 3 är som plåt 1 men rostskiktet är bortslipat och en stor del av metallen ren



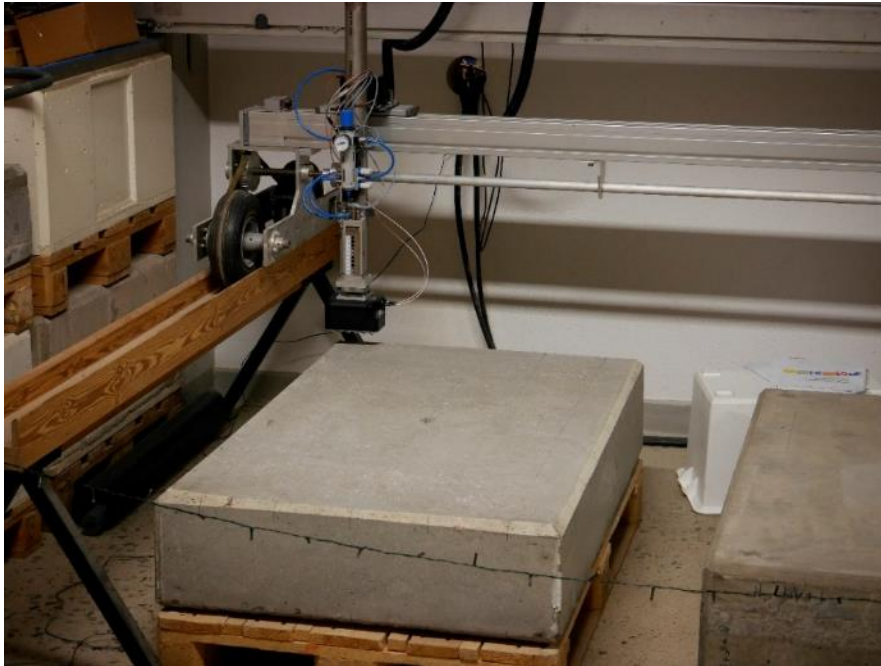
Figur 15. Plastkar med plåtbitar med olika korrosionsnivå i botten. Plåtarna är fastlimmade mot plasten med en omgivande sträng silikon dels för att hålla dem på plats, dels för att hindra att betongen flyter in under dem.



Figur 16. De tre fastlimmade stålplåtarna med olika nivå på rostangrepp. Skalarost i mitten. Plåtarna är tillskurna med sand/vattenskärning.



Figur 17. Betongen fylls i plastkaret från en betongbil. Limfogarna håller plåtskivorna på plats under gjutningen. All betong har vibrerats när formarna fyllts och ytan jämnats till på konventionellt sätt. Därefter har den slipats med diamantskiva.



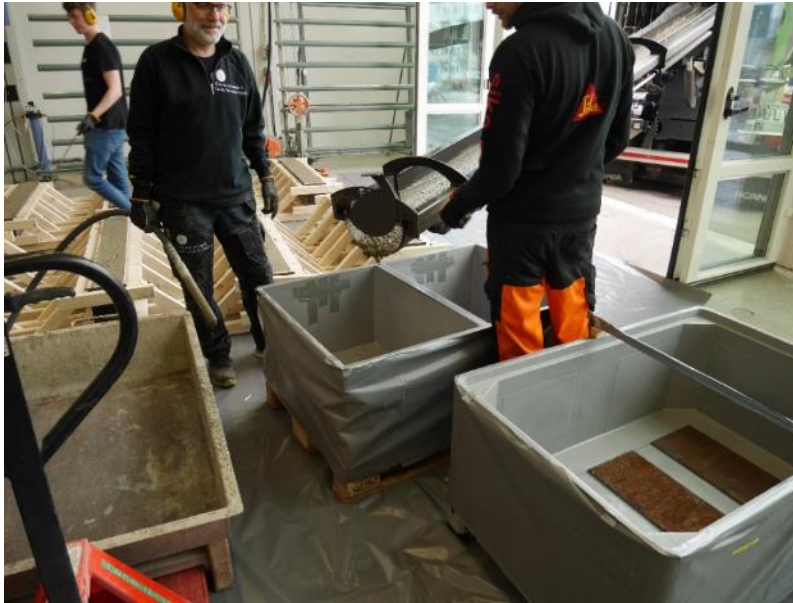
Figur 18. Den scanner som provkropparna 2-4 är avsedda att avbildas i. Monterad på scannern är en sensor av typen ACSYS A1220. Den pressas mot betongytan med hjälp av en liten tryckluftcylinder. Monterad provkropp är från ACCEPPT-studien.

3.3 PROVKROPP 3

Provkropp 3 innehåller ett antal träbitar. Syftet med denna provkropp är att undersöka hur sådana objekt framträder i scannade ultraljudsbilder. Det händer att träbitar faller in i formarna under formbyggnadsarbetet eller glöms kvar (DARREL). Se Figur 19-20. Provkroppen används i senare etapper.



Figur 19. Denna provkropp (3) innehåller träföremål enligt bild.



Figur 20. Interiör från gjuteriverkstaden. Betongbil med ränna Provkropp 2-4

3.4 PROVKROPP 4

Denna provkropp innehåller en arbetshandske, ett i betonggjutningssammanhang tänkbart borttappat föremål. Se Figur 21-22. Används senare.



Figur 21. Denna provkropp (4) innehåller en arbetshandske



Figur 22. Avslutat gjutningsarbete provkropparna 2-4. Skruvtvingarnas uppgift är att hålla ihop plastkarets sidor tills betongen har härdat.

4 Försök med kontinuerligt ultraljud

4.1 BAKGRUND

Excitering med kontinuerligt smalbandigt ultraljud medför att övertoner lättare kan detekteras. Men man kan inte veta var i provkroppen övertonerna uppstår. Alternativet är sändning av korta pulser som då blir bredbandiga, vilket försvårar detektion av övertoner. Däremot kan man då, via den tid en puls tar för att komma tillbaka till sändarens position, räkna ut hur långt bort reflexen har alstrats.

Detta kapitel omfattar mätningar med kontinuerligt ultraljud. Som instrument användes en så kallad lock-in förstärkare, se Figur 23. Det är en apparat som genererar en frekvens i taget och bestämmer den korresponderande mottagna signalens I och Q-värden (In-phase och Quadrature). Dessa är i princip den mottagna signalens överensstämmelse med en cosinus (I)- respektive sinusvågform (Q) som svarar mot den utsända frekvensen. Med hjälp av dessa värden kan den mottagna signalens amplitud A och fas θ relativt en referenssignal beräknas genom enkla samband.

$$A = \sqrt{I^2 + Q^2}$$

$$\theta = \arctg\left(\frac{Q}{I}\right)$$

Apparaten bestämmer alltså I och Q-värden för en frekvens i taget inom ett specificerat frekvensområde. Den gör det med speciell teknik som resulterar i att mätvärdena kan återfinnas mot en störningsbakgrund som är 100 dB starkare än signalen. 100 dB är en störning som är 100.000 gånger starkare än signalen. Man kan också säga att denna förstärkartyp är ett extremt smalbandigt filter. Den undertrycker alla frekvenser utom den som just sänds ut. En störning vid den utsända frekvensen kan därför inte undertryckas. Den aktuella apparaten Signal Recovery 7230 kan också samtidigt bestämma första (2f) eller andra (3f) övertonen till den utsända signalens frekvens f . Att sådana övertoner uppstår är en av indikationerna på att materialet beter sig olinjärt, dvs det har olika egenskaper beroende på töjningens nivå och tecken. Skälrosten misstänks uppvisa olinjäritet. Denna skulle kunna tänkas uppstå om rostsiktet har olika egenskaper i kompression och dilatation.



Figur 23. Signal Recovery Lock-in förstärkare, max frekvens 250 kHz.

Utsignalen från lock-in förstärkaren leds via en extern effektförstärkare till sensorn. Insignalen behöver ibland förstärkas och då sker det i förförstärkaren Signal Recovery 5113, se Figur 24.

En lång serie försök med olika sensorer har utförts. De redovisas i kronologisk ordning även om det inte vore den begreppsmässigt tydligaste principen. Kronologin följer däremot hur förståelsen för problemet djupnat. I denna serie finns också prov med sensorer som verkar i det akustiska området, dvs under 20 kHz.



Figur 24. Signal Recovery 5113 förförstärkare

4.2 FREKVENSKARAKTÄRISTIK FÖR OLIKA SENSORER OCH KOMPONENTER

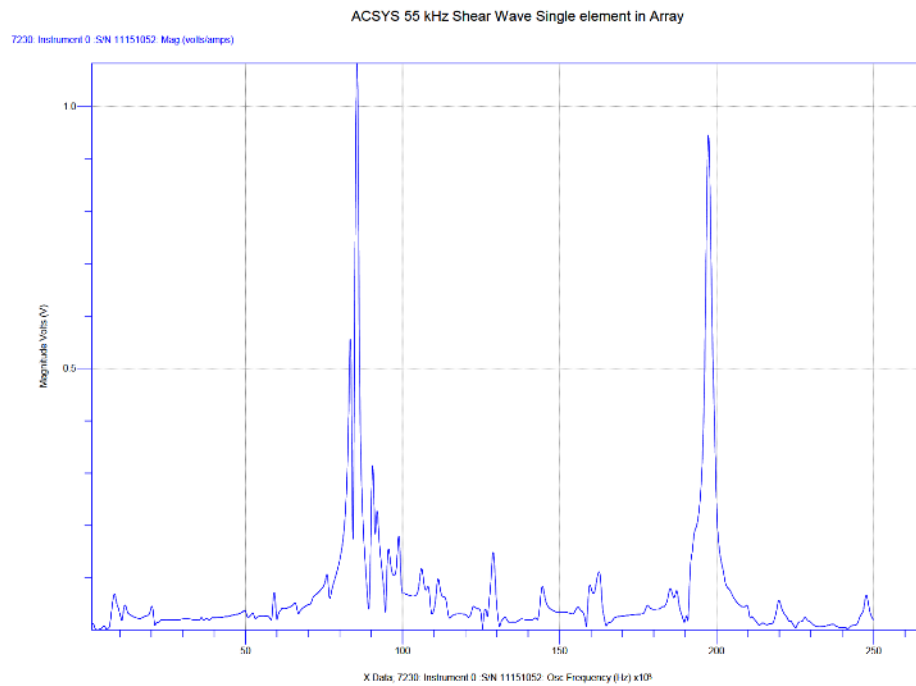
I de fall det finns två lika sensorer av varje typ har dessa satts mot varandra och ett frekvenssvep har utförts för att få en uppfattning om vid vilka frekvenser sensorerna har starka resonanser. Sändare och mottagare har då också bytts i syfte att kontrollera reciprocitet, dvs att båda sensorerna är likvärdiga som sändare.

4.2.1 ACSYS S1802(S 50 kHz) och S1803 (P 100 kHz) sensorer med ett element 170508

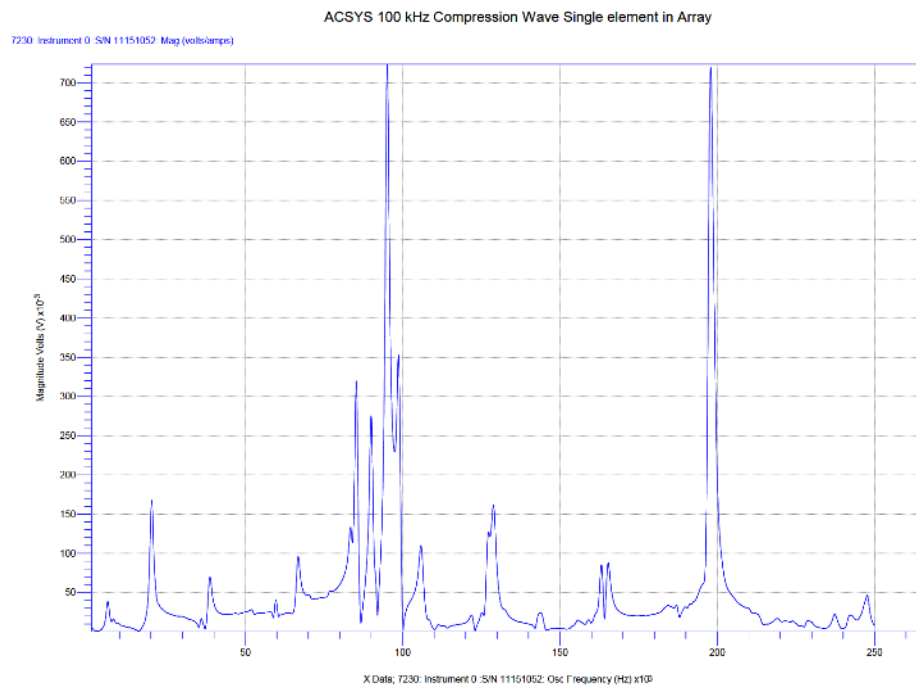
Det finns fyra sensorer av denna typ, två är för skjuvvågor (S) vid 50 kHz och två är för kompressionsvågor (P) vid 100 kHz. Alla har samma utseende, se Figur 25. Spektra presenteras i Figur 26-27.



Figur 25. S1802/1803 sensor med ett element av samma typ som i M2502 sensorerna. Dessa sensorer är inte avfjädrade utan man pressar dem mot det objekt som skall undersökas. Den rosa detaljen nedtill är den punkt där vibrationen överförs till provkroppen.



Figur 26. Enkelsensorer ACSYS S1802 för skjuvvågor. Sändning sensor mot sensor. Nominell frekvens enligt märkning 50 kHz.



Figur 27. Enkelsensorer ACSYS S1803 för kompressionsvågor. Sändning sensor mot sensor. Nominell frekvens enligt märkning 100 kHz.

4.2.2 Karaktäristik ACSYS M2502 S och P med 12 sändar- och 12 mottagarelement i vardera. 170508

Denna typ av sensor benämns stundtals A1220 i denna rapport. På sensorn är dock identifikationen M2502. A1220 Monolith är beteckningen på ett system bestående av en handhållen ultraljudsändar/mottagare med minne och display och en M2502 enhet.

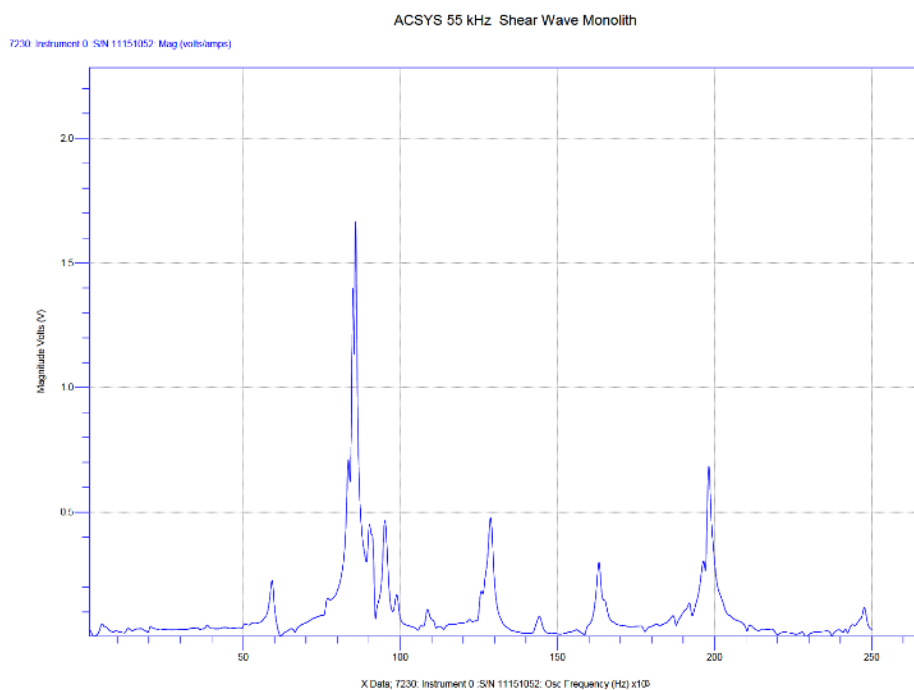
Den handhållna enheten används inte i denna rapport eftersom andra vågformer än den fyrkantvåg denna enhet alstrar används.



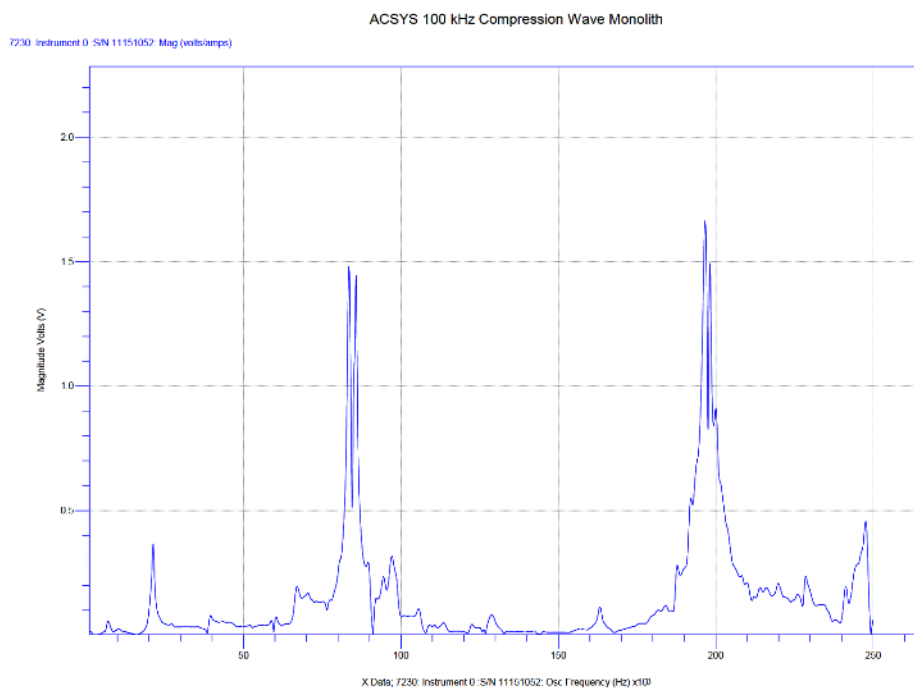
Figur 28. ACS (fd ACSYS) A1220 Monolith system.



Figur 29. M2502 P och M2502 S ser likadana ut. De består av 24 individuellt fjädrande sensorelement varav hälften är sändare och hälften mottagare. Elementen är kopplade parallellt och det finns en kontakt för sändargruppen och en kontakt för mottargruppen. De tolv elementen på bildens vänstra sida utgör en grupp och de tolv på den högra sidan utgör den andra gruppen.



Figur 30. Multisensor ACSYS M2502 för skjuvvågor. Sändning sensor till sensor på glasplatta. Nominell frekvens enligt märkning 50 kHz.



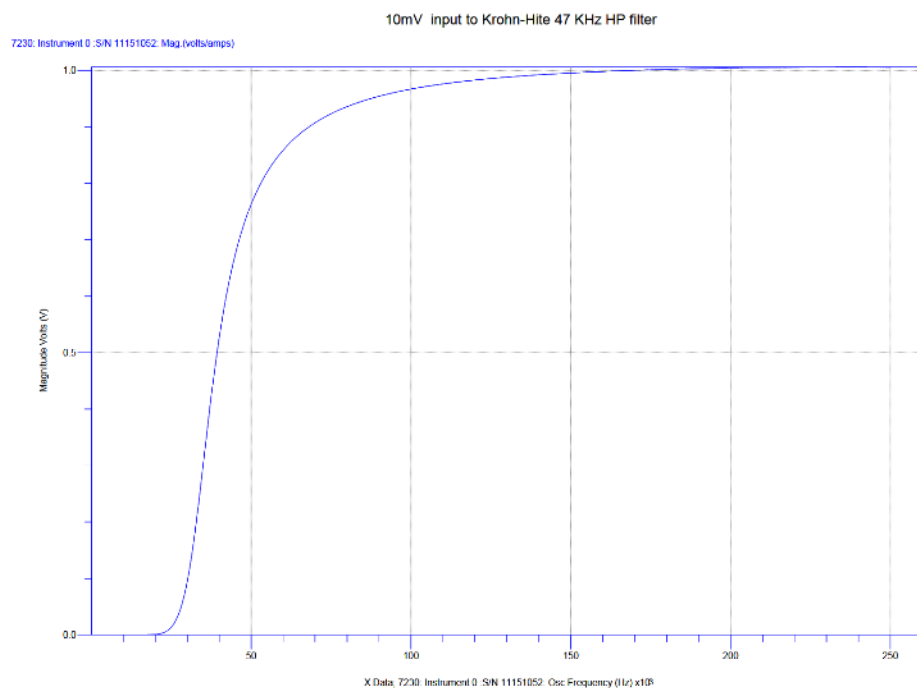
Figur 31. Multisensor ACSYS M2502 för kompressionsvågor. Sändning sensor till sensor på glasplatta. Nominell frekvens enligt märkning 100 kHz.

4.2.3 Olika filters karaktäristik 170508

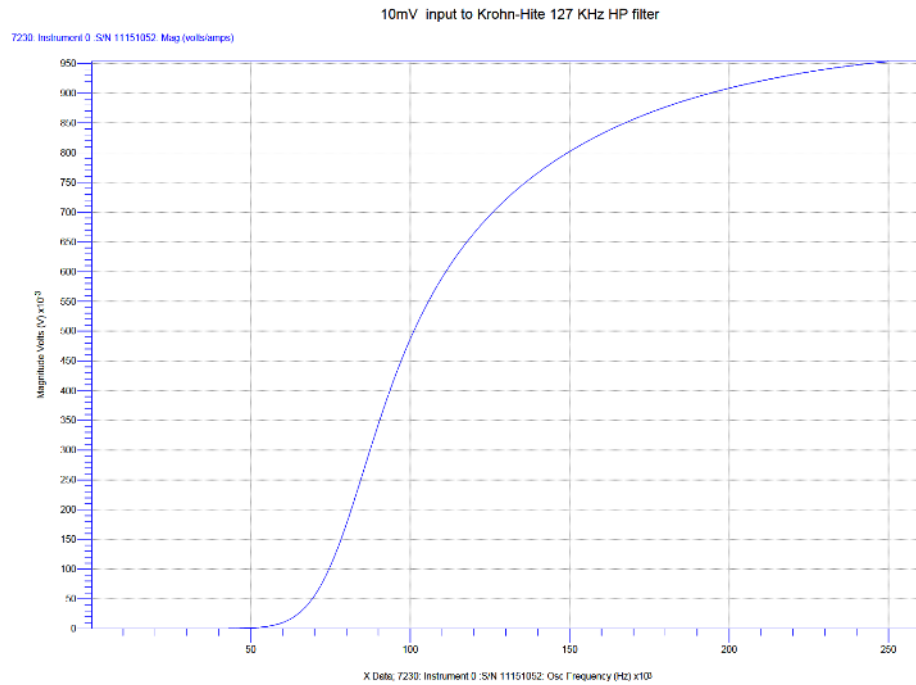
Filter har till uppgift att separera önskade frekvenser från oönskade. Särskilt är det effektivt att filtrera bort grundtonen om man vill detektera de ofta svagare övertonerna. Men filter kan också användas för att ta bort övertoner som uppstår i sändarkedjan och som inte skall förväxlas med sådana som uppstått i målet. Se Figur 32-35.



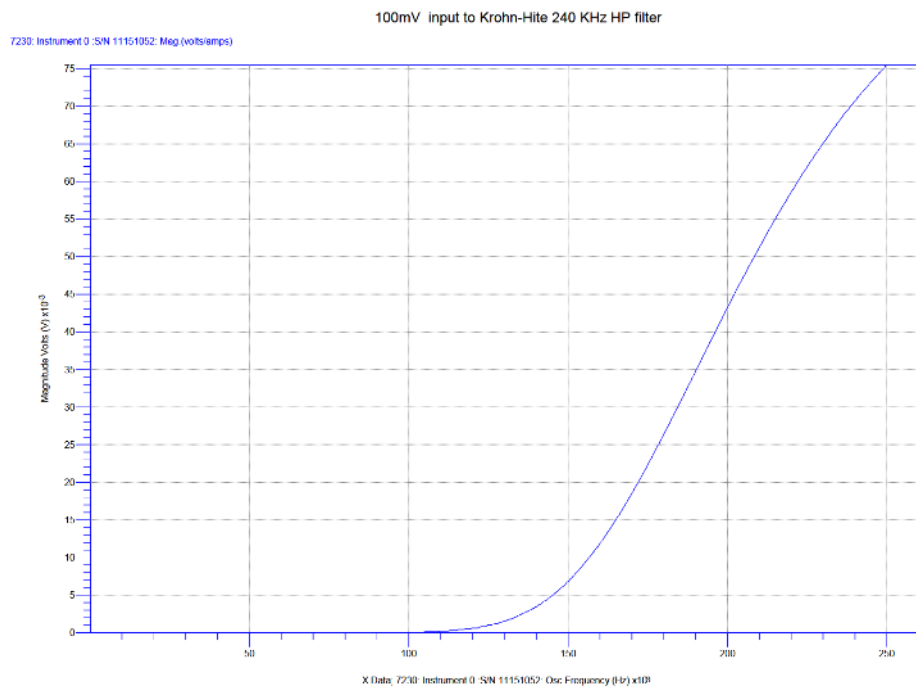
Figur 32. Tre olika fasta Krohn-Hite högpasfilter 47, 127 och 240 kHz brytpunkt.



Figur 33. Frekvensgång för Krohn-Hite 47 kHz fast högpasfilter



Figur 34. Frekvensgång för Krohn-Hite 127 kHz fast högpasfilter

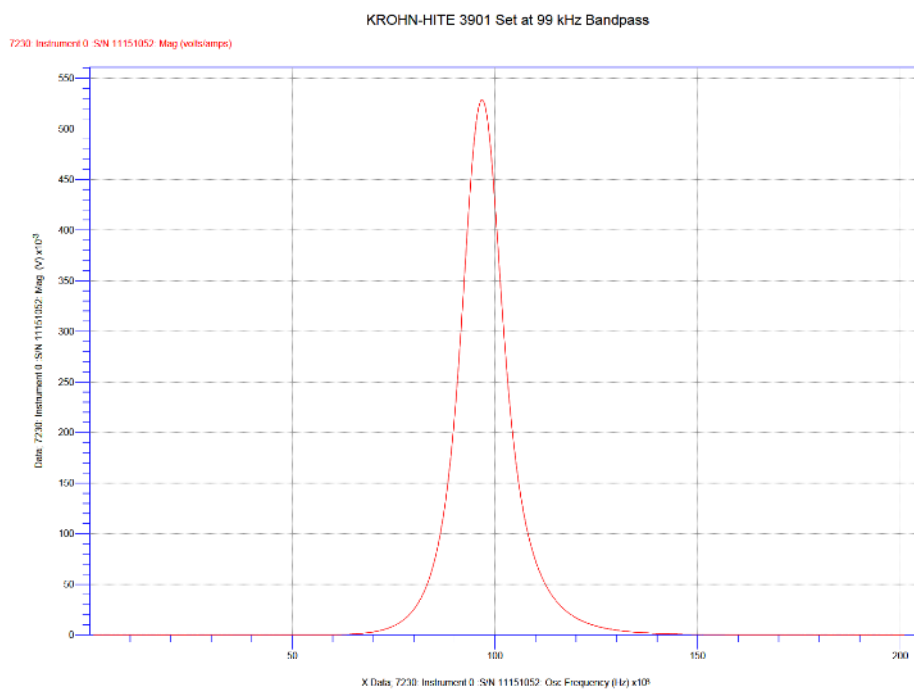


Figur 35. Frekvensgång för Krohn-Hite 240 kHz fast högpasfilter

Det finns också variabla filter med olika branthet. Dessa kan vara av intresse när man vill isolera en viss frekvenskomponent, till exempel den första övertonen $2f$ till exiteringsfrekvensen f , se Figur 36.

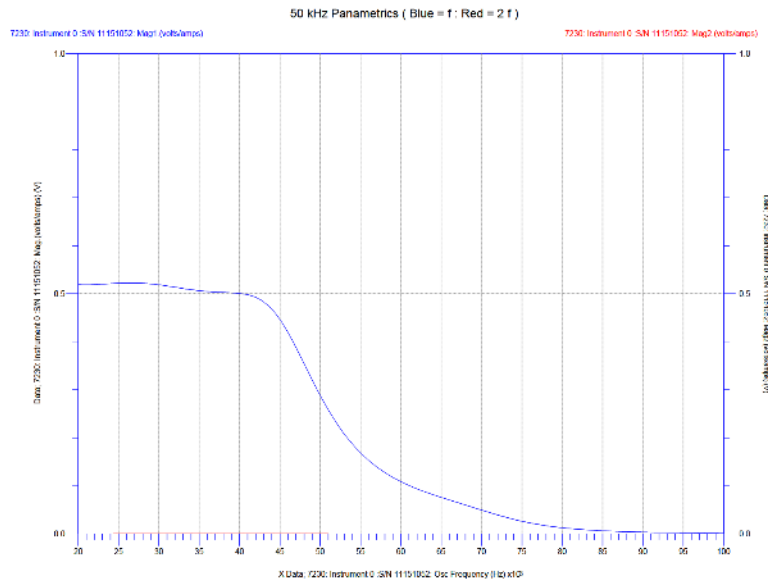


Figur 36. Krohn-Hite variabelt elliptiskt filter med mycket brant selektivitet. Det sker till priset av att utsignalen är fasdistorderad.



Figur 37. Frekvensgång för Krohn-Hite 3901 variabelt elliptiskt filter inställt för passband kring 99 kHz.

RITEC är en effektförstärkare på 2500 W för frekvenser från 50 kHz till 5 MHz. I syfte att övertoner som uppstår i denna inte skall fortplanta sig vidare i mätkedjan används ett högeffekt-lågpasfilter. Det tillåter inga frekvenser över 50 kHz att passera, Figur 38.

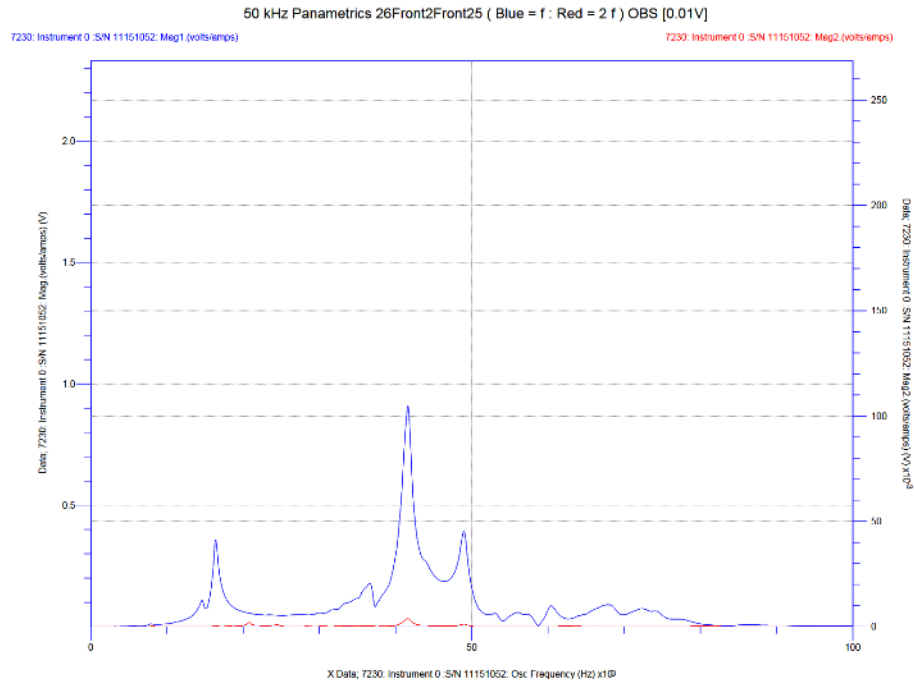


Figur 38. 171116 Ritec högeffekt lågpasfiltrets frekvenskaraktäristik. Lågpasfiltreringen sker för att utesluta övertoner som uppstått i förstärkaren. Eventuella övertoner alstrade i sensorn kan man inte göra något åt.

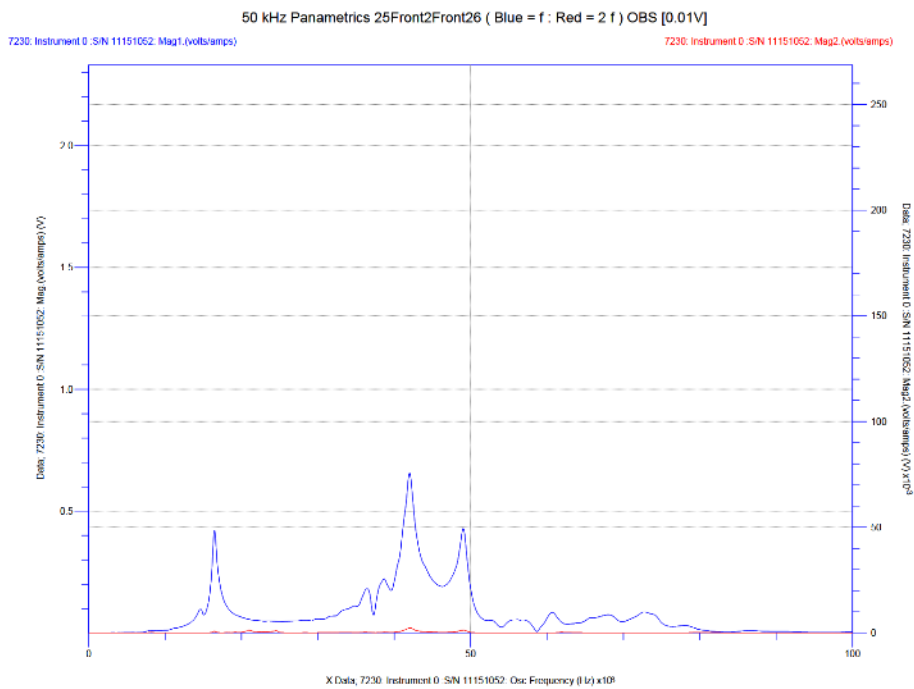
4.2.4 Panametrics 50 kHz sensorer 171130



Figur 39. Två Panametrics 50 kHz sensorer hoppressade för mätning av karaktäristik



Figur 40. Panametrics ultraljudsensor id26 som sändare direkt kopplad till sensorn med id25



Figur 41. Panametrics ultraljudsensor id25 som sändare direkt kopplad till sensorn med id26



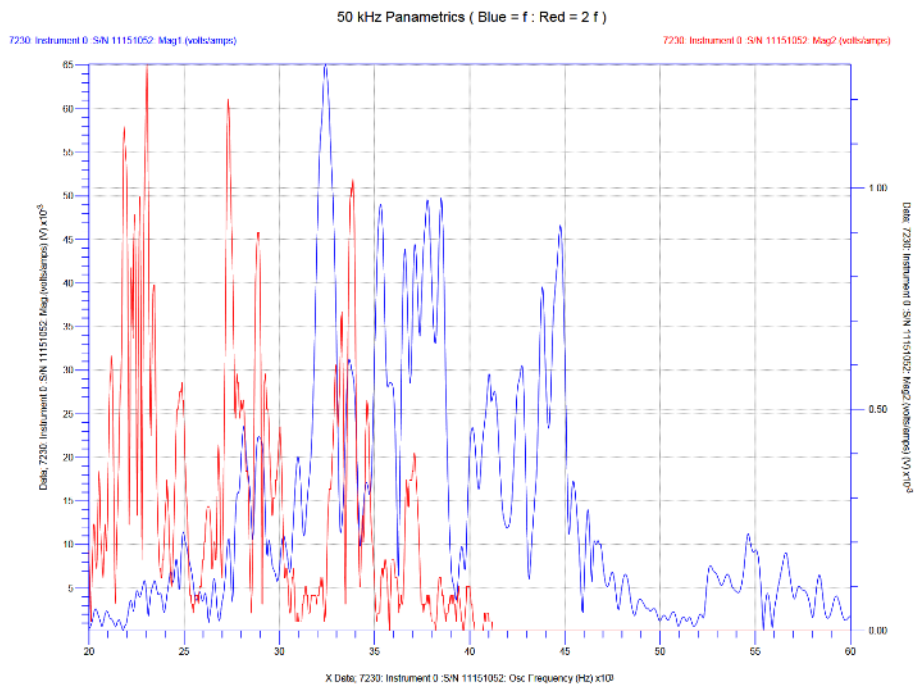
Figur 42. Uppställning för att bestämma frekvenskaraktäristik för sensorer och provkropp.



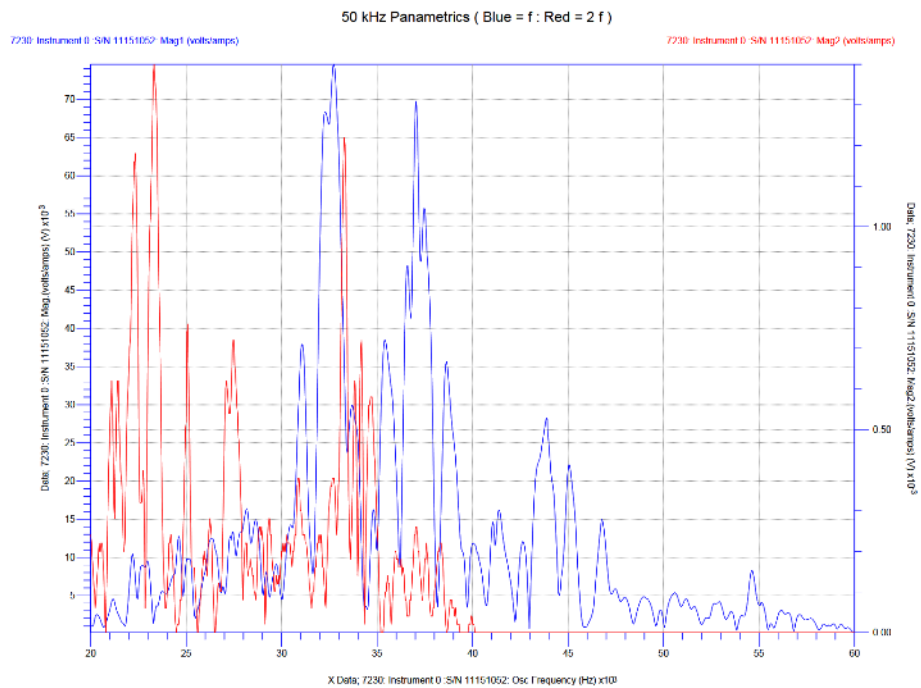
Figur 43. Sändarsensor Panametrics. Grova individuella kablar används för att minska den kapacitiva belastningen på förstärkaren. Den bruna substansen mellan sensorn och aluminiumplattan är konsistensfett. Det används för att få god akustisk koppling.



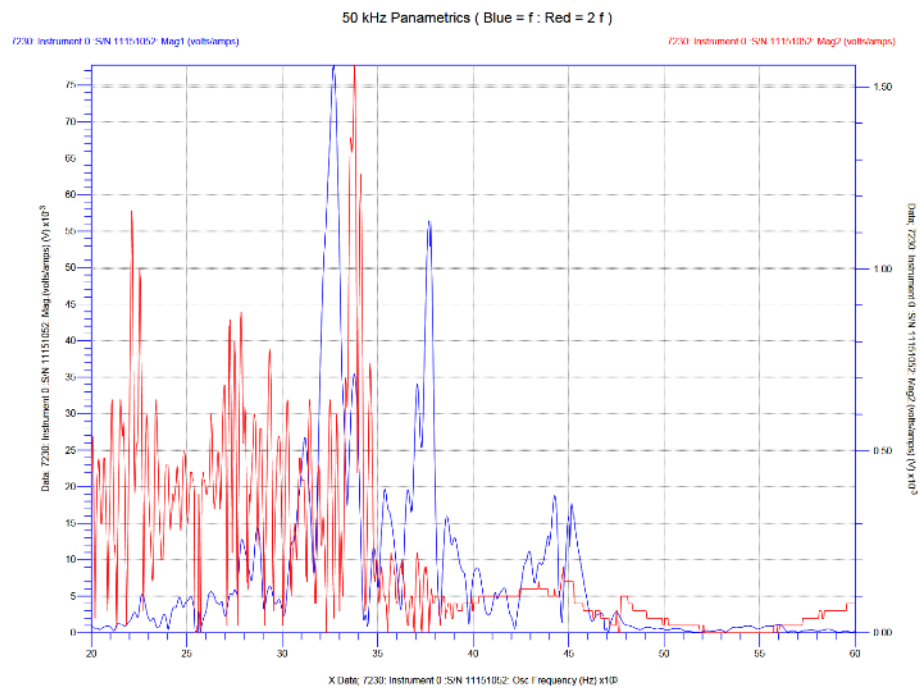
Figur 44. Mottagarsensor Panametrics. Här kan vanlig coax RG 58 användas eftersom det inte rör sig om nämnvärda elektriska strömmar. Mottagna signaler är helt oförstärkta.



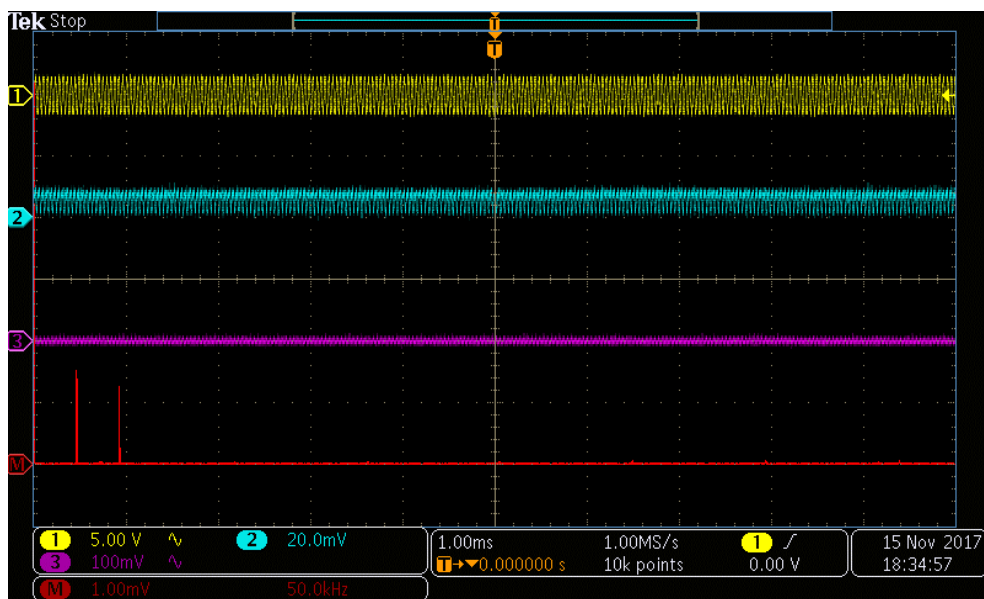
Figur 45. Panametrics transmission? 171116 Panametrics 50 kHz sensorer båda monterade mot respektive aluminiumplåt. Sändning genom provkroppen. Kurvorna visar magnitud i mV beräknad av lock-in förstärkaren. Kontinuerlig sändning vid 1024 frekvenser från 20 kHz – 60 KHz. Observera de olika skalorna för grundtonen (blå kurva, vänster skala) och första övertonen (röd kurva, höger skala).



Figur 46. 171116 Panametrics 50 kHz sensorer. Mottagaren isolerad med tunt plastskikt. Alltså ingen elektrisk överhörning genom provkroppen.



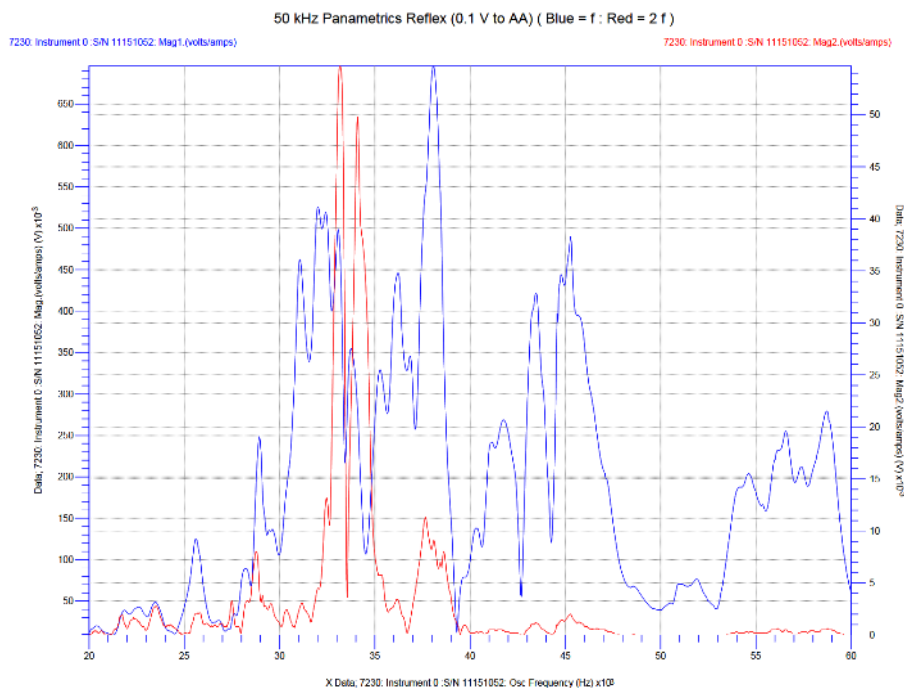
Figur 47. 171116 Panametrics 50 kHz sensorer. Sändarsignalen lågpasfilterad med Ritecs högeffektfilter.



Figur 48. Illustration av förekomsten av en överton $2f$ till grundtonen f i frekvensspektret. Röd kurva är oscilloskopets inbyggda FFT-analysators mätvärden. De två stolparna är grundton respektive en första överton.



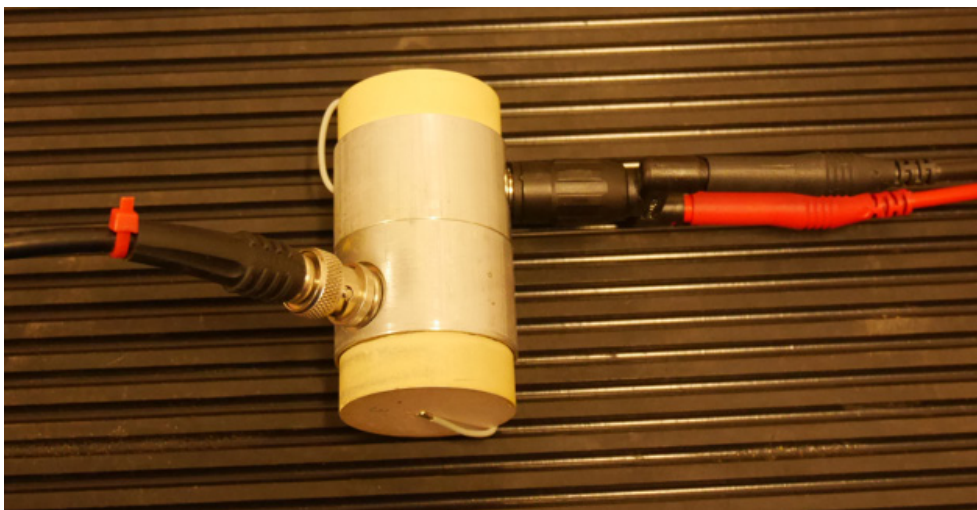
Figur 49. 50 kHz Panametrics sensorer monterade för reflektionsmätningar



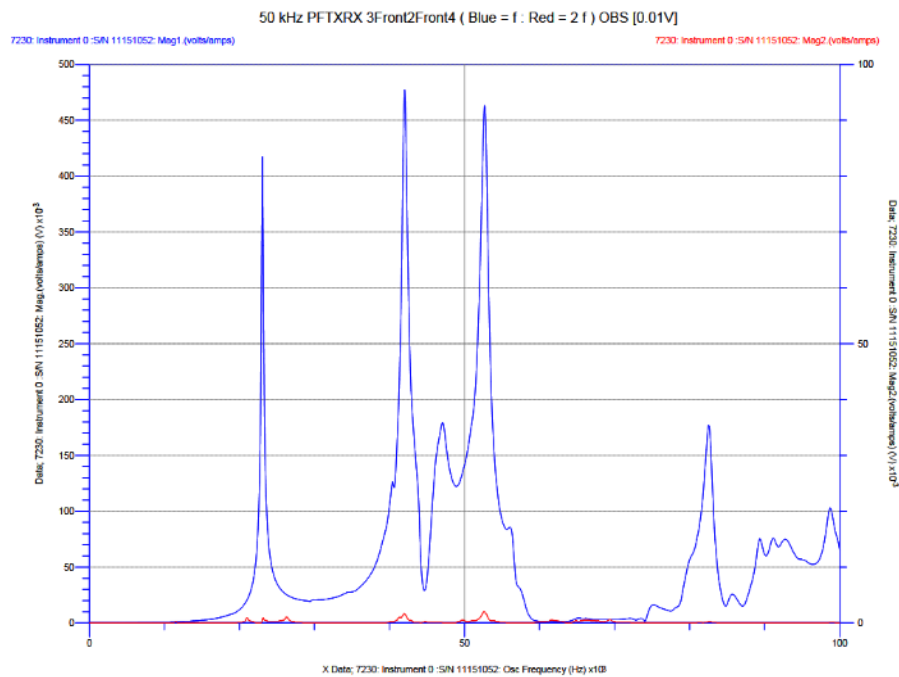
Figur 50. Sändare och mottagare monterade på den korroderade sidan. Spektrum vid kontinuerlig sändning med 50 kHz Panametrics sensorn. Direkt och reflekterad signal. Direkt är signalen som går direkt från sändare till mottagare. 171212

4.2.5 Sensorer tillverkade vid LTH – PFTXRX (PF=Patrik Fröjd)

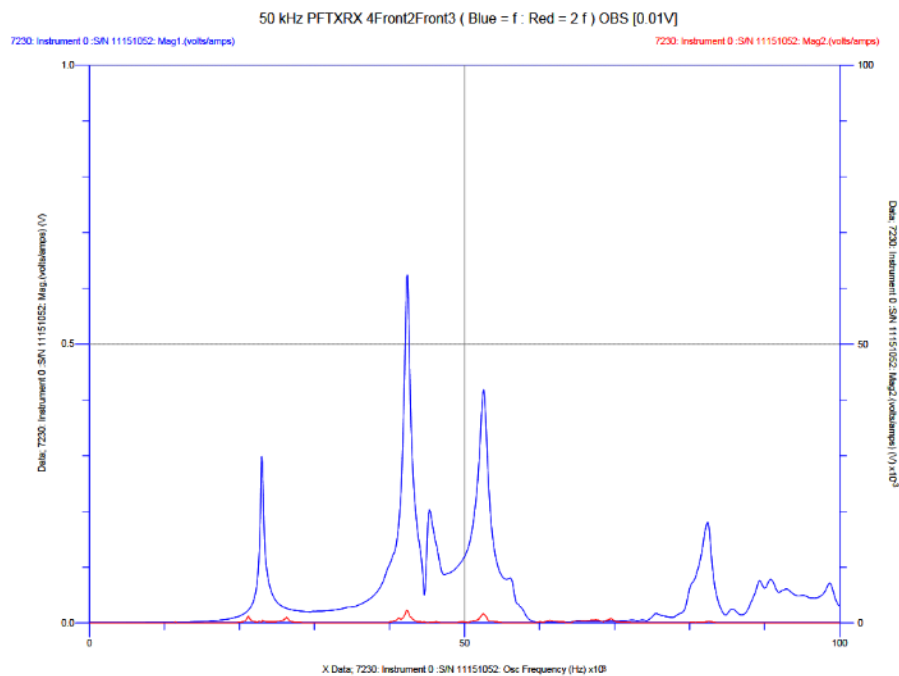
Dessa sensorer tillverkades eftersom det förelåg ett behov av 32 st sensorer som kunde användas både som sändare och mottagare. Det skulle bli för dyrt att köpa kommersiella sensorer. Dessutom behövdes en speciell infästningsteknik eftersom sensorerna skulle var stationära. Som framgår av bildmaterialet är sensorernas peizokeramiska element inte inkapslade.



Figur 51. Sensorer tillverkade vid LTH sammankopplade för bestämning av frekvensegenskaper.



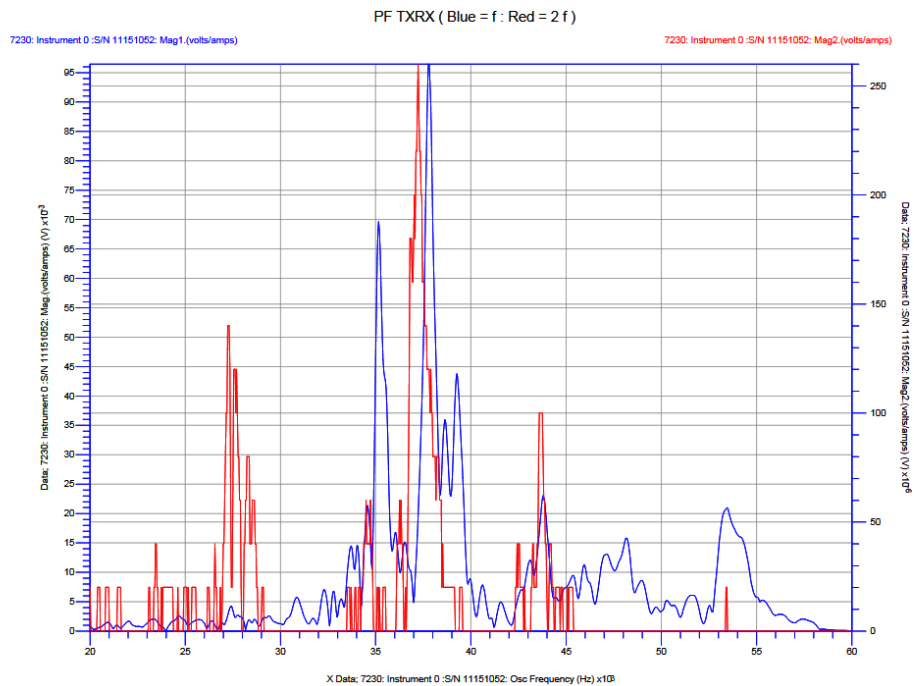
Figur 52. PFTXRX 3 som sändare direkt kopplad till PFTXRX 4 som mottagare



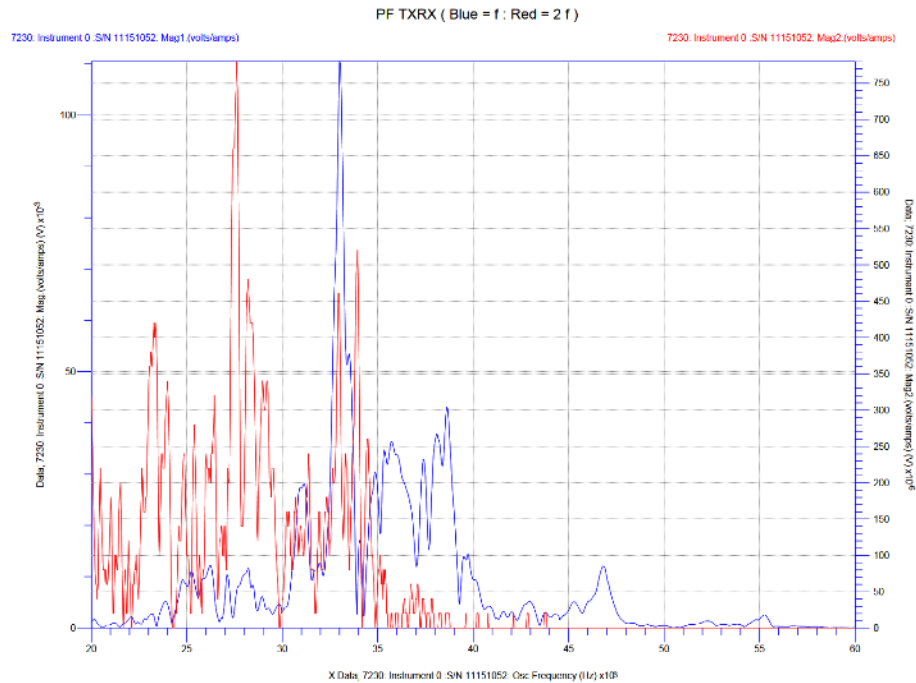
Figur 53. PFTXRX 4 som sändare direkt kopplad till PFTXRX 3 som mottagare. Någorlunda reciprocitet föreligger - känslighetskurvan ser nästan likadan ut oavsett vilken sensor som fungerar som sändare.



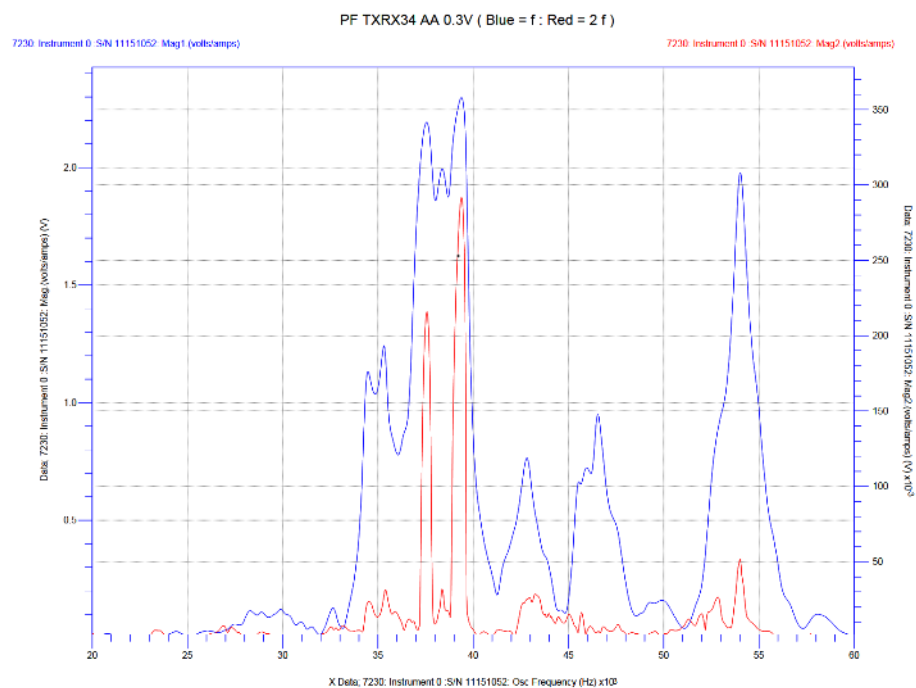
Figur 54. PFTX 3 monterad för mätning tvärs igenom provkroppen. Ett motsvarande montage finns på provkroppens andra sida.



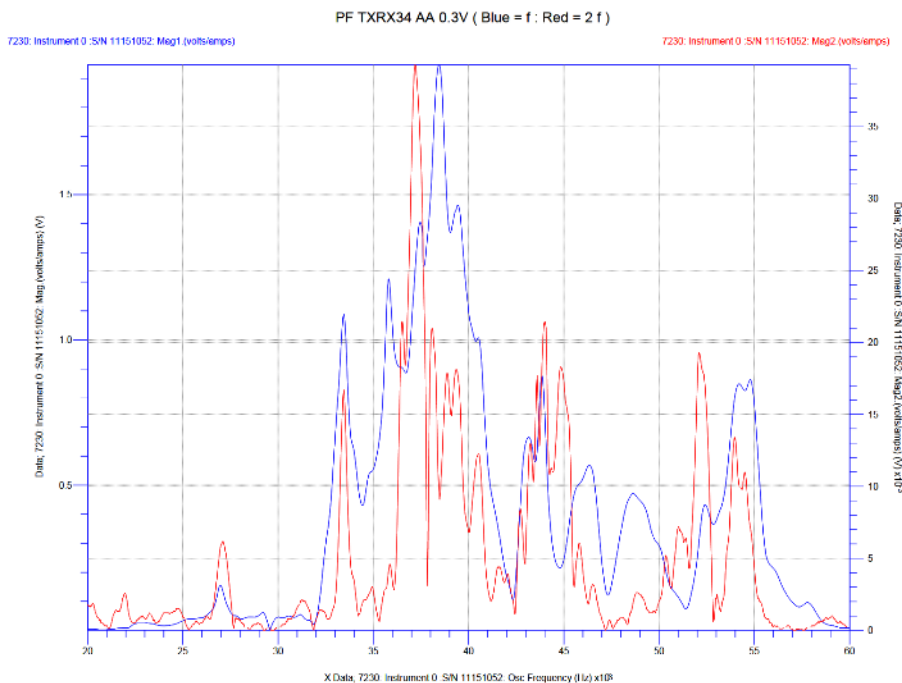
Figur 55. På LTH tillverkade 50 kHz transducers (PF TXRX) monterade mot aluminiumplåtarna. Signal rakt igenom provkroppen. Observera att övertonen 2f är så svag att den digitala kvantifieringen framträder. 2f har maxamplituden 260×10^{-6} V.



Figur 56. 171116 Patrik Fröjds på LTH tillverkade 50 kHz transducers (PF TXRX) monterade mot aluminiumplåten. Signal rakt igenom provkroppen. Sändarsignalen lågpasfilterad med Ritecs högeffektfilter, se Figur 38 ovan för filterkaraktäristik. Notera hur den starkaste toppen vid c:a 38 kHz dämpats av filtret. Starkaste toppen ligger nu vid 33 kHz.



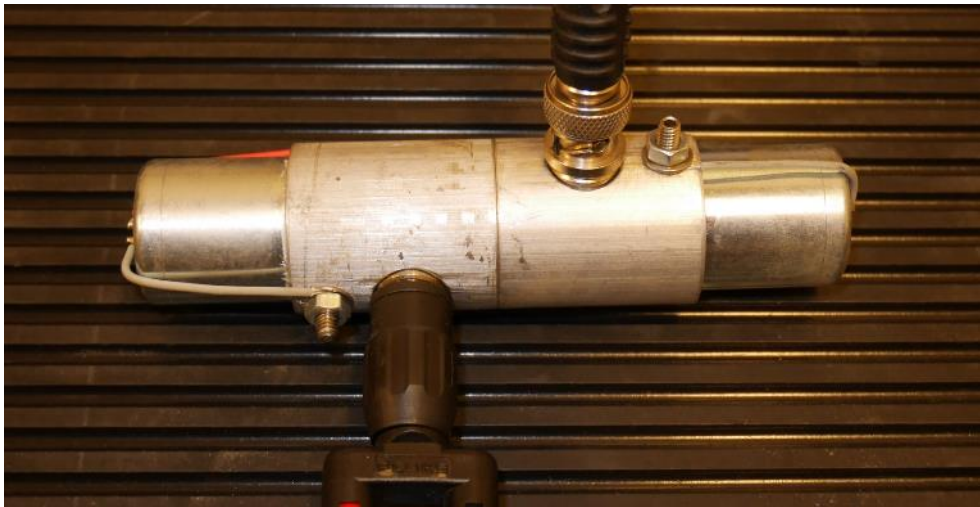
Figur 57. Reflektion skalkorroderad plåt Tx3-Rx4 1V/10-3V 171205 PFTXRX monterade för reflektionsmätning separat sändare och mottagare på samma montageplåt. Mätt från den kraftigt korroderade sidan



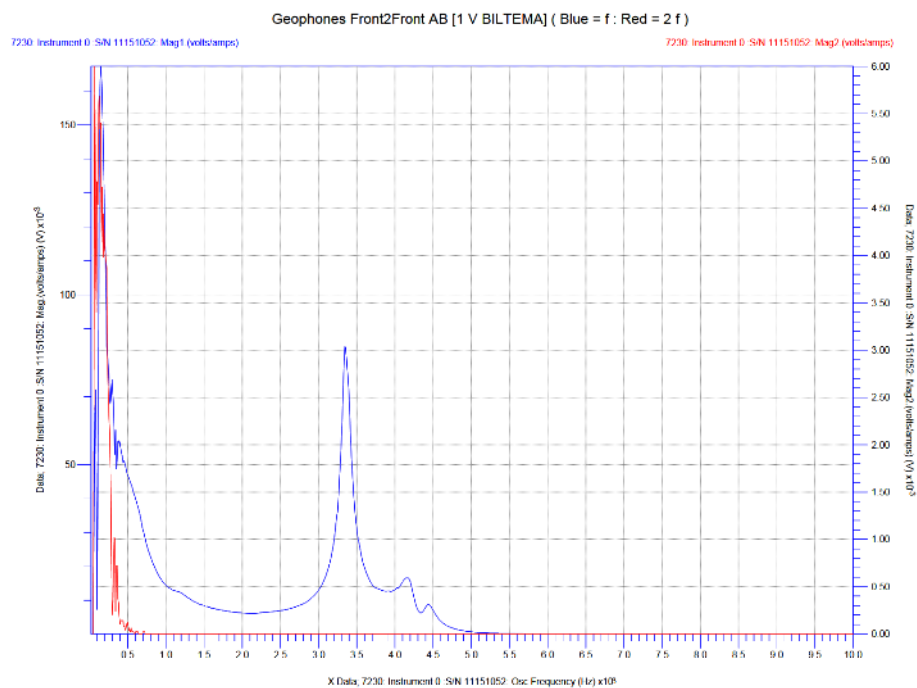
Figur 58. Reflektion normalkorroderad plåt 34 1V/10-3V 171205 PFTXRX monterade för reflektionsmätning separat sändare och mottagare på samma montageplåt. Mätt från den måttligt korroderade sidan

4.2.6 Försök med geofoner som sensor

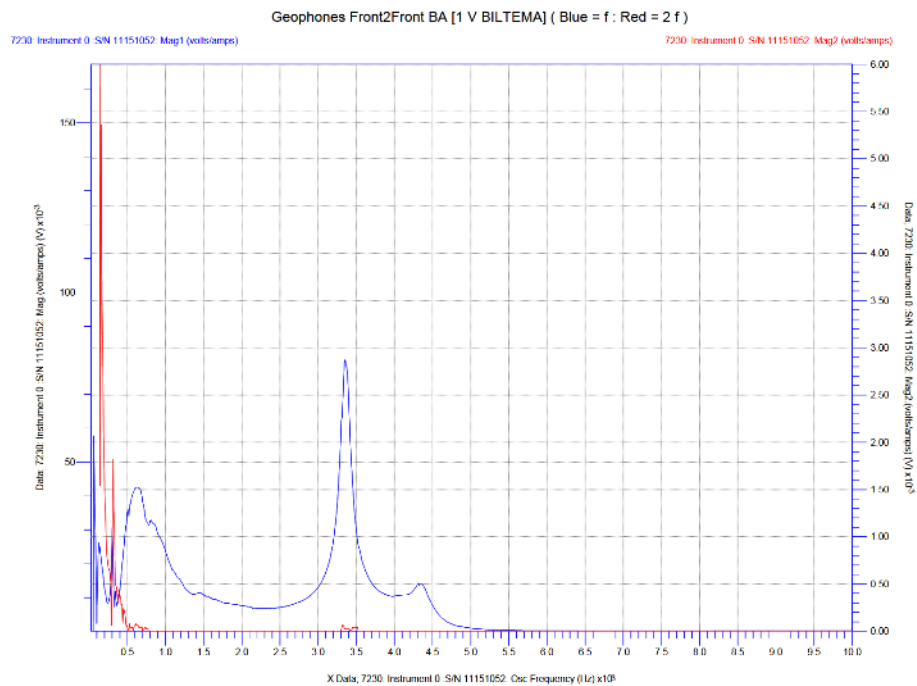
Geofoner används normalt i frekvensområde upp till 200 Hz och då som mottagare i seismiska system (reflektion, refraktion, etc.). Men vi har i ett tidigare projekt konstaterat att dessa geofoner också har en kraftig respons vid 3200 Hz. Även om detta frekvensområde alstrar våglängder som är för långa för att ge reflektion i rostkiktet eller stålplåten när den är ingjuten i betong, så kan man tänka sig att de kan vara användbara vid mätning med kontinuerlig signal [7]. De kan också vara användbara vid sådana mätningar där man använder en stark, lågfrekvent signal som pumpfrekvens och har en mer högfrekvent, men svagare signal som mätsignal.



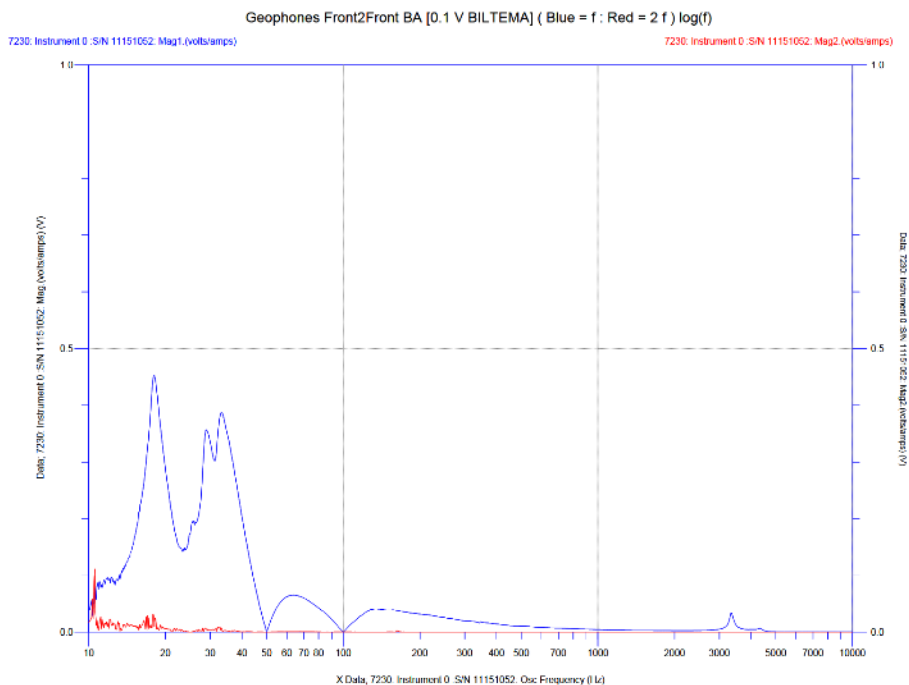
Figur 59. Geofoner av standardtyp monterade i anordningar tillverkade vid LTH för att medge montage via M5-skruvor. Geofonerna monterade för att mäta deras direkta överföringsfunktion. Egenskaperna vid sändning i båda riktningarna studeras.



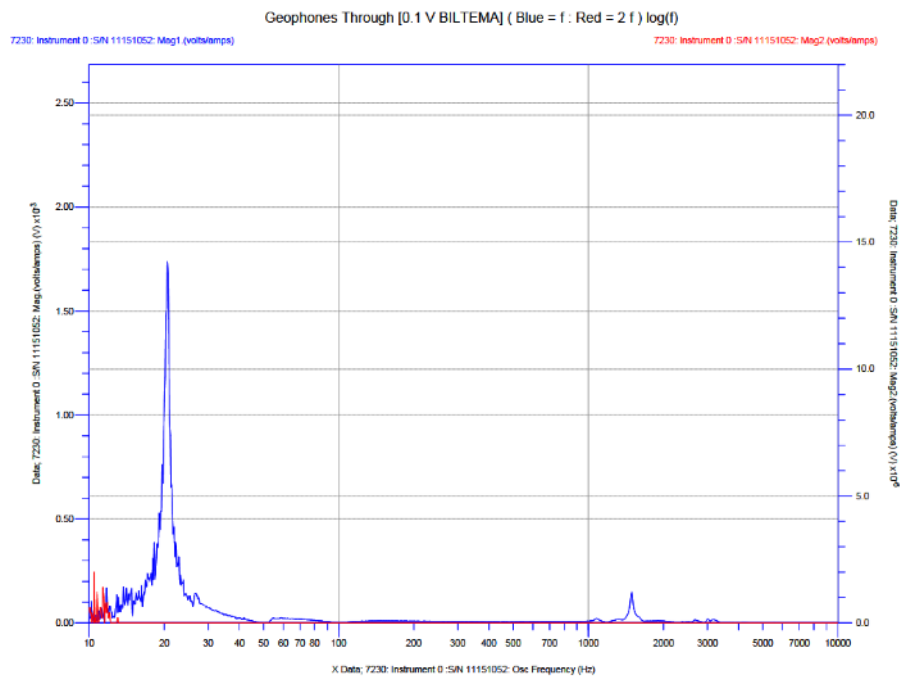
Figur 60. 171130 Geofon A som sändare direkt kopplad till geofon B som mottagare



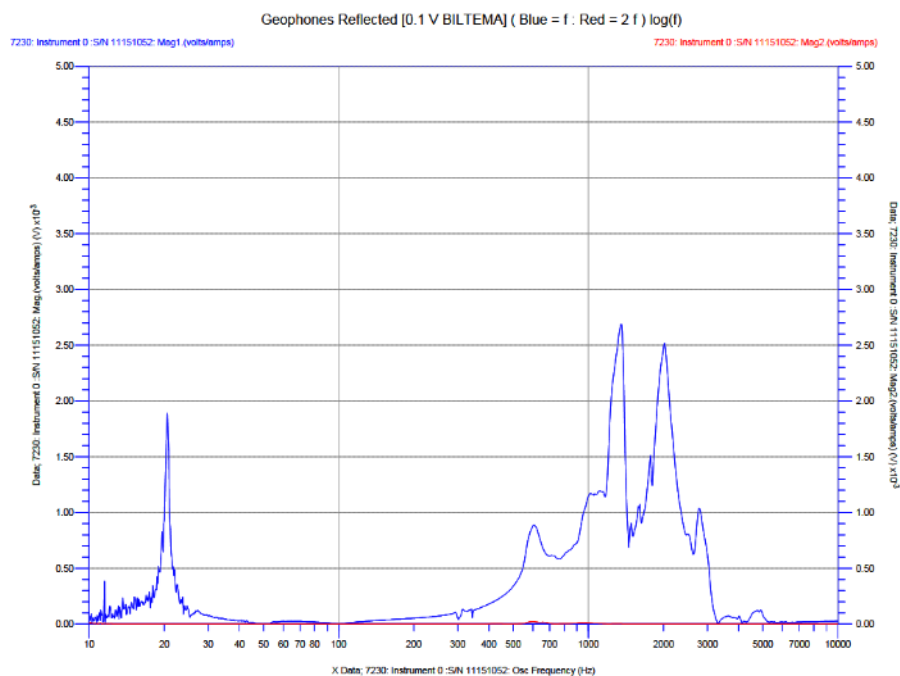
Figur 61. Geofon B som sändare direkt kopplad till geofon A som mottagare. Någorlunda reciprocitet råder.



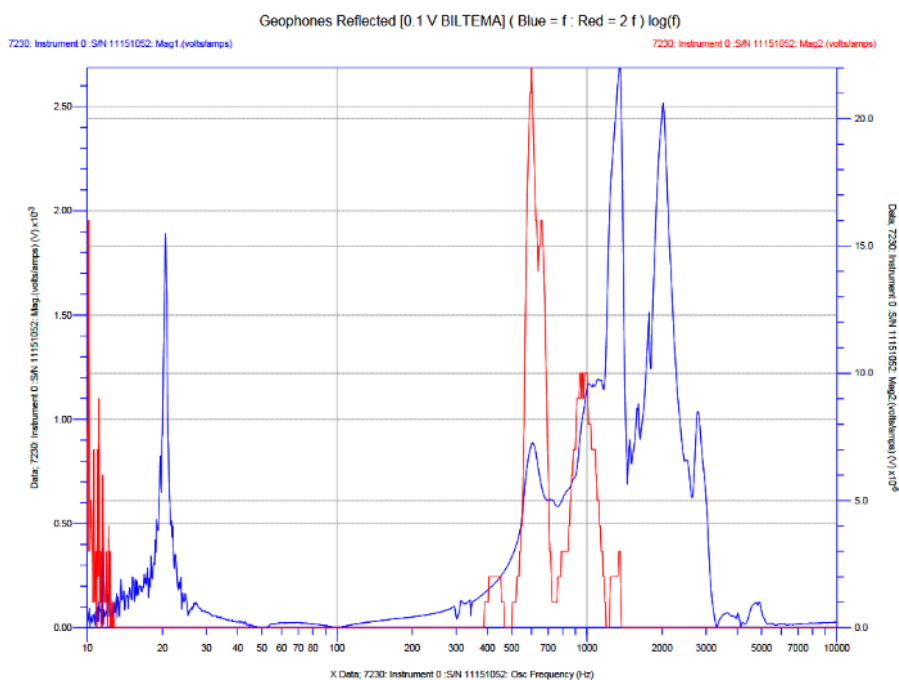
Figur 62. 171130 Geofon B som sändare direkt kopplad till geofon A som mottagare. Mätområdet är utökat till 10 Hz till 10 kHz. För att bättre se vad som händer vid låga frekvenser är x-axeln logaritmiskt återgiven. För att undvika knackning i geofonen vid låga frekvenser har förstärkningen minskats.



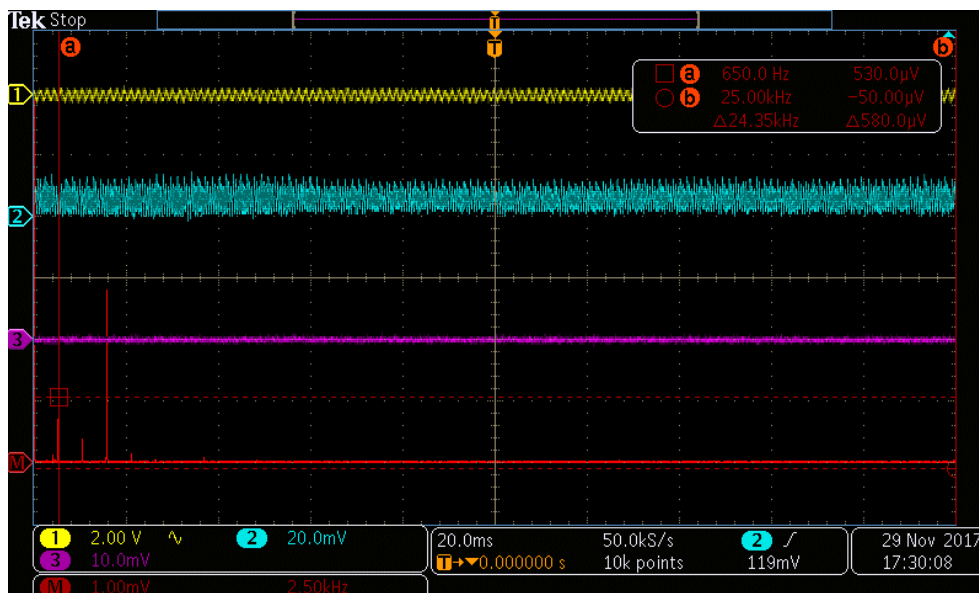
Figur 63. Sändning tvärs igenom provkroppen med geofoner



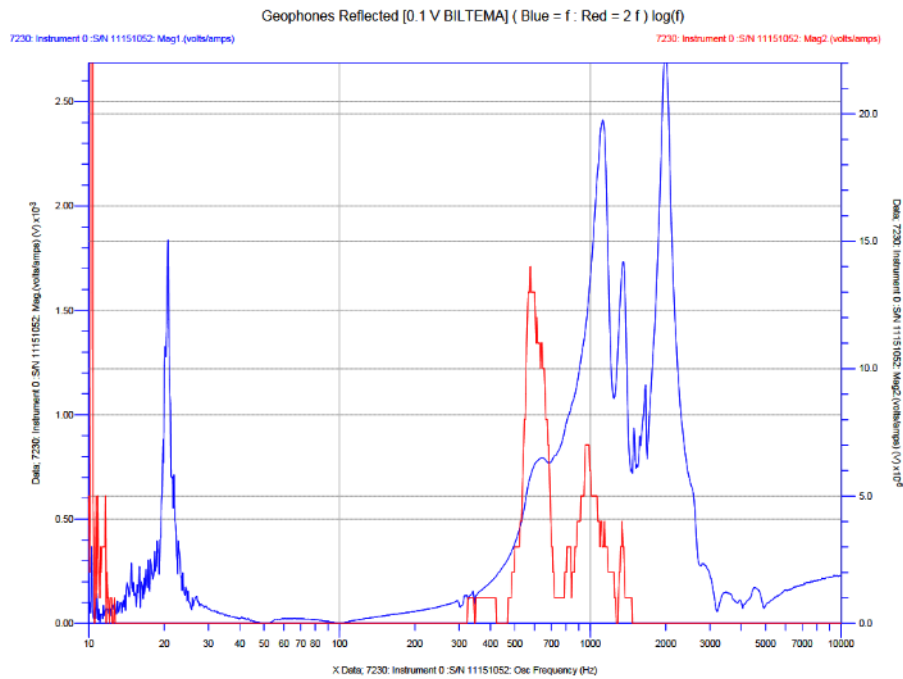
Figur 64. Geofoner, reflekterad signal



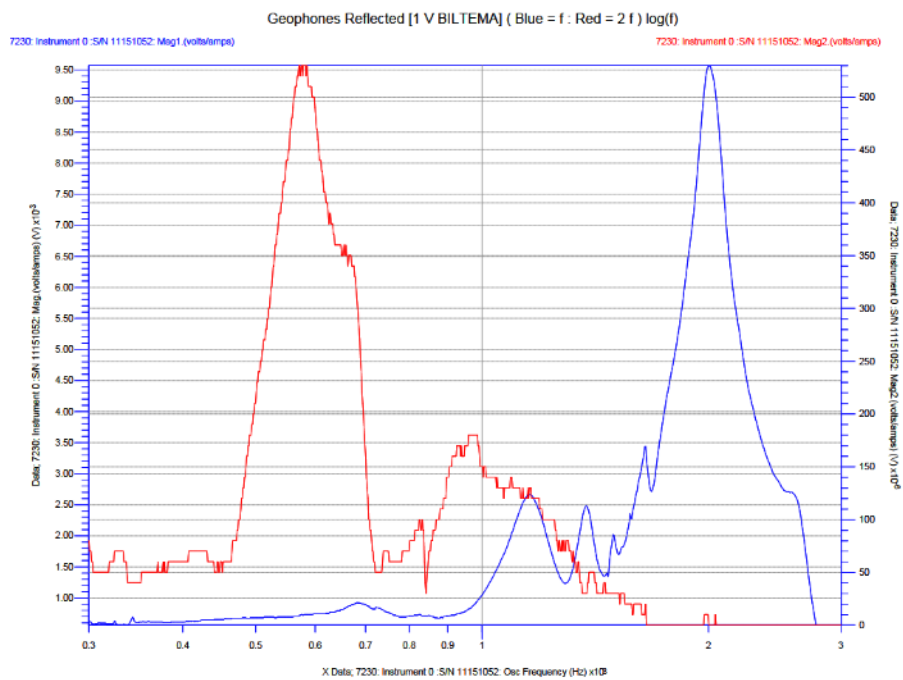
Figur 65. Reflektad signal med vertikalvärdena utsträckta till hela diagrammets höjd. Detta påverkar skalorna. Intressant är att frekvensen $2F$ växer till sig vid den sända frekvensen $F = 604$ Hz. Det skulle kunna vara den eftersökta olinjäriteten i rostskiktet som skapar denna effekt, men det krävs närmare studier för att visa att det är så.



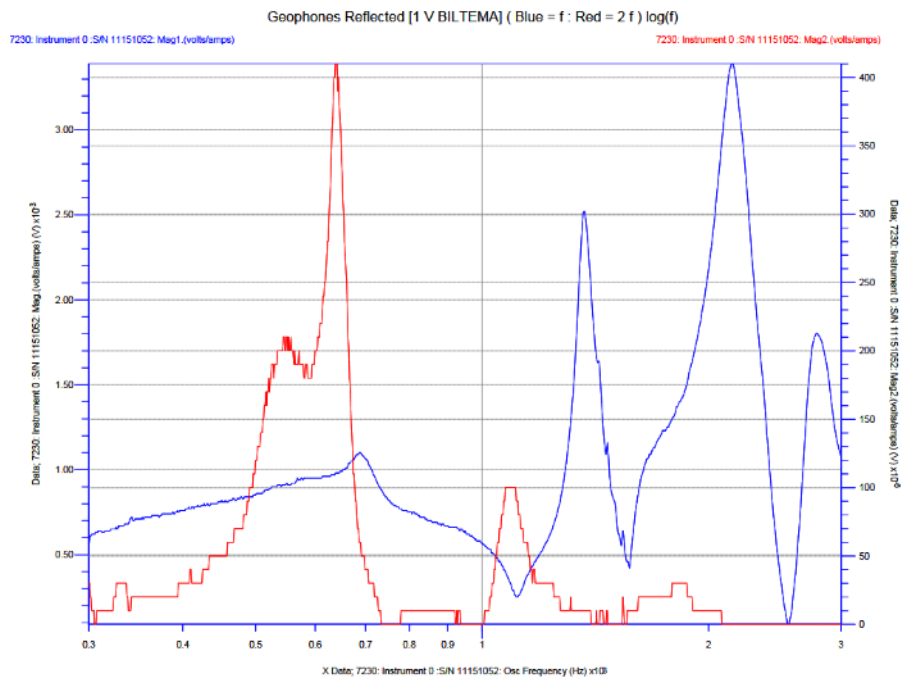
Figur 66. Den röda kurvan är ett spektrum mätt samtidigt med ovanstående diagram. Cursor a står vid frekvensen 650 Hz. Tre övertoner framträder varav den starkaste är 3F, betydligt kraftigare än den ovan visade 2F. Tyvärr kan lock-in förstärkaren inte beräkna högre övertoner, endast den första 2F och andra 3F och högst 250 kHz.



Figur 67. Geofoner vid reflektion på den kraftigt korroderade sidan. Låg signalnivå på grund av knackning i geofonen. Knackning innebär att geofonens spole slår i ändlägena.



Figur 68. Skälrostsidan Geofon A till Geofon B Reflektion



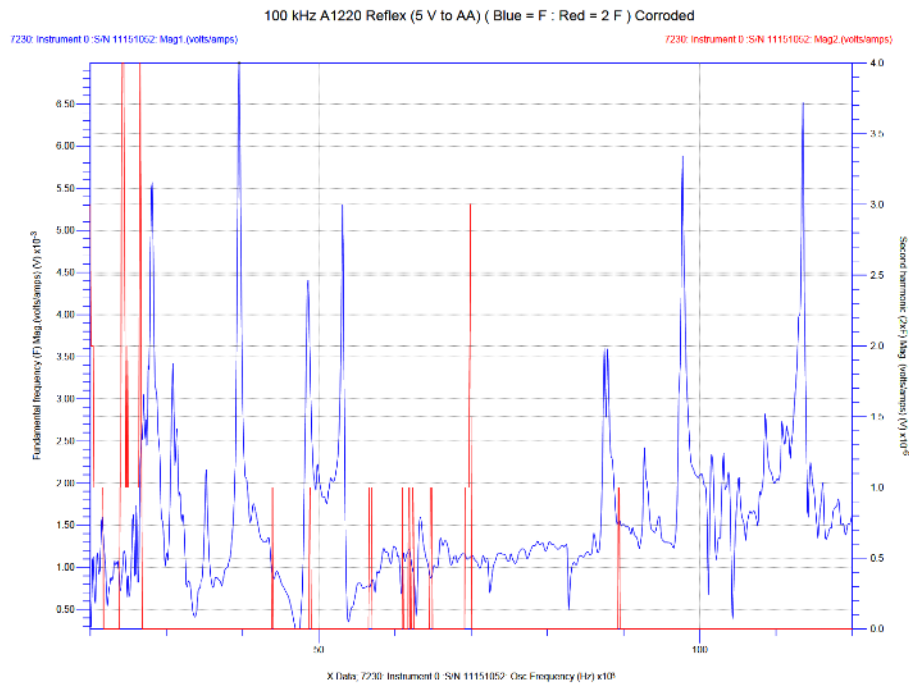
Figur 69. Normalrostsidan Geofon B till Geofon A Reflektion

4.2.7 Försök med ACSYS M2502P 100 kHz kompressionsvågor

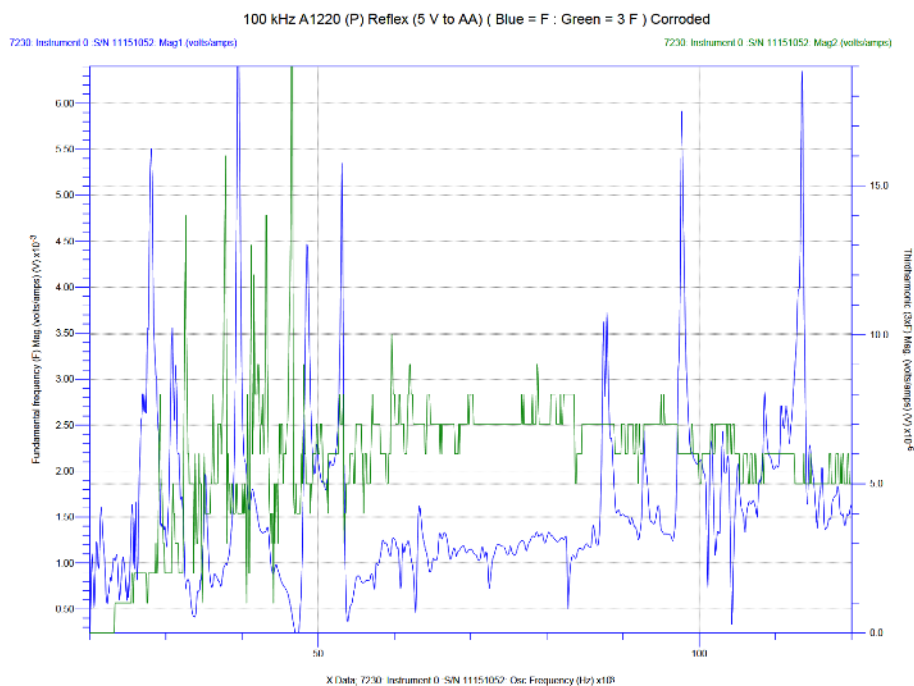


Figur 70. M2502 kompressionsvågsensor. Här endast använd som sändare på sidan med skalrost.

I nedanstående två figurer presenteras signaler utsända med ena halvan av en A1220 sensors 12 element och mottagna med de andra 12 elementen.



Figur 71. Presentation av grundton (F, blå) och första överton (2F, röd) för reflekterad signal

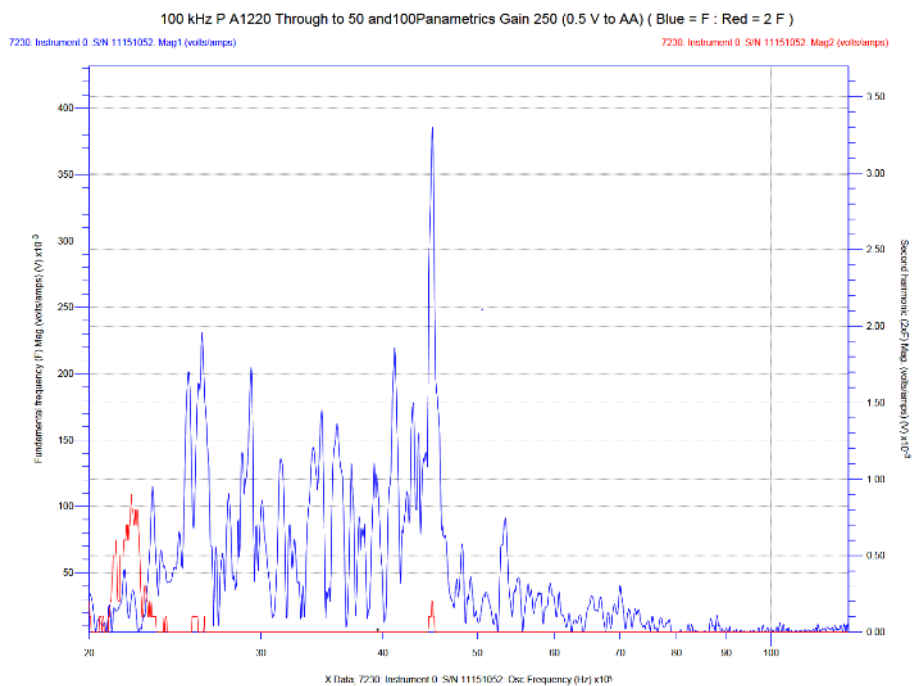


Figur 72. Presentation av grundton (F, blå) och andra överton (3F, grön) för reflekterad signal

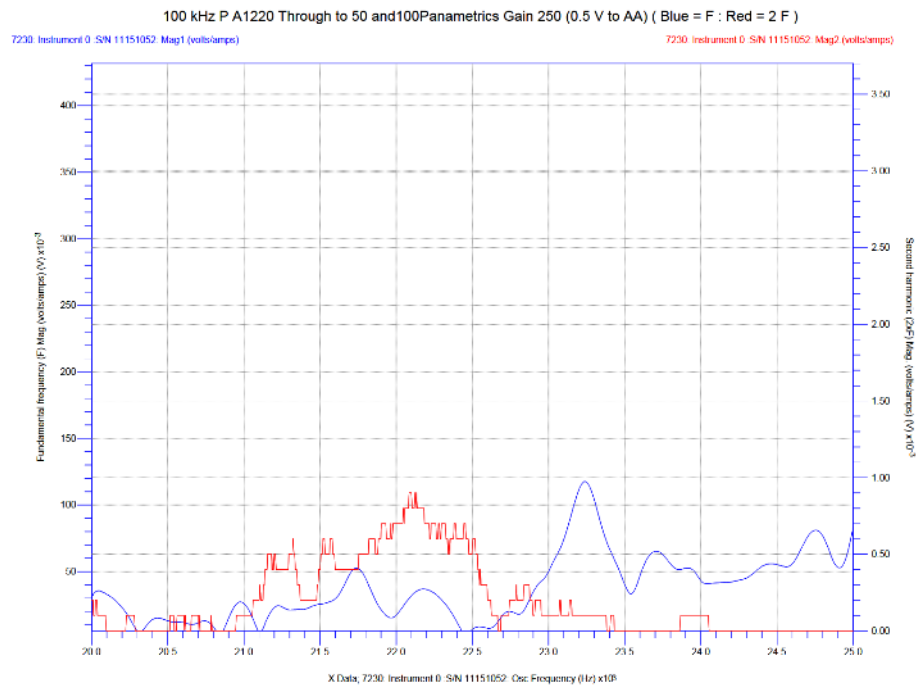
I de följande figurerna sker mätning rakt igenom provkroppen med M2502 som sändare och parallellkopplade Panametrics 50 och 100 kHz sensorer som mottagare. Detta arrangemang gjordes för att utöka frekvensområdet för mottagarsidan.



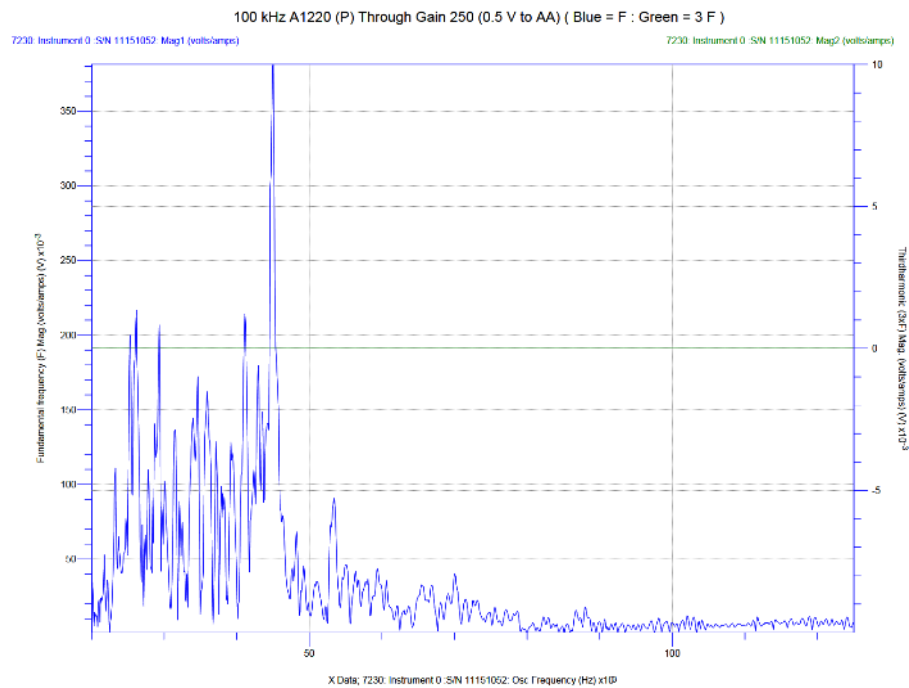
Figur 73. Parallellkopplade Panametrics 50 och 100 kHz sensorer som mottagare i syfte att få bredare frekvensrespons i mottagarledet.



Figur 74. Sändning rakt igenom provkroppen med A1220 sensorn och kombinerade Panametrics 50 och 100 kHz sensorer som mottagare.



Figur 75. Inzoomning i ovanstående data mellan 20 kHz och 25 kHz. Blå kurva är grundtonen F, röd kurva är första övertonen 2F.



Figur 76. Diagrammet visar grundtonen F och andra övertonen 3F (grön). Den senare förefaller vara obefintlig vid mätningen.

5 Försök med transient ultraljud

Alternativet till kontinuerlig sändning är sändning av korta pulser som då blir bredbandiga, vilket försvårar detektion av övertoner. Korta pulser kallas transienta. Däremot kan man via den tid en puls tar för att komma tillbaka till sändarens position räkna ut hur långt bort reflexen har alstrats och därmed avgöra om det är rimligt att det är t ex tätplåten som givit upphov till reflexen.

5.1 FÖRSÖK DATERADE 2018-01-22 TEK00071-00080

Därför utfördes 2018-01-22 en bestämning av den tid en 100 kHz puls tar för att gå rakt igenom provkroppens längd 1200 mm. Denna tid är densamma som det tar för en reflex från stålplåten att återkomma till sändarens position, eftersom plåten är placerad exakt mitt i provkroppen.

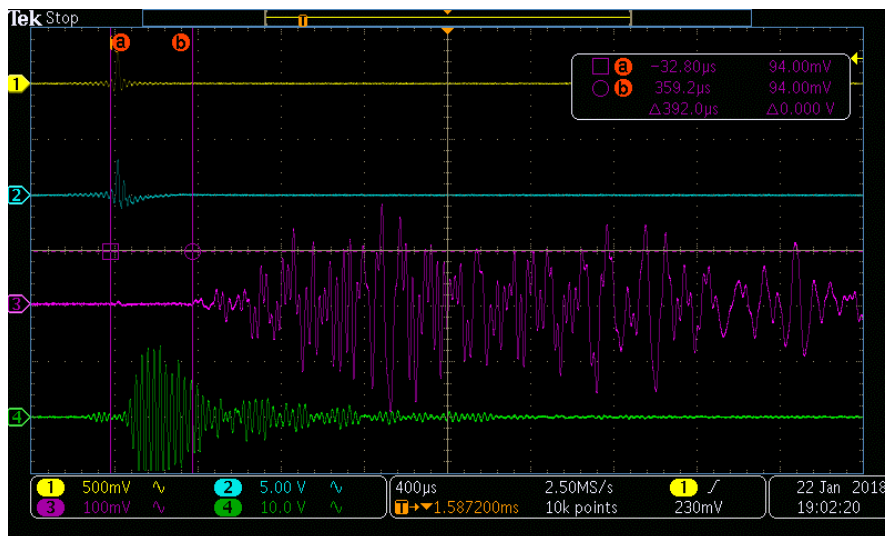
Försöket utfördes med en Panametrics P-vågsändare och en ACSYS M2502 som mottagare, båda med angiven frekvens 100 kHz och tillverkade för kompressionsvågor, se Figur 77. Som signal användes en nedladdad signal i vågformsgenerator 3 med namnet "GAUSSDIFF", en signaltyp som också kallas Rickervågform. Det är en två gånger deriverad normalfördelningskurva också kallad Gausskurva. Det fanns en mottagare på provkroppens andra sida och en på samma sida som sändaren. Resultatet visas i Figur X. Sensorn har emellertid en resonanstopp vid 127 kHz, varför gausspulsens matades ut med en sådan hastighet att dess frekvenstopp hamnade vid denna frekvens. Med gausspulsens lagrad i arbitrary-minnet betydde det att utmatningsfrekvensen blev 15 kHz.



Figur 77. M2502 sensor för kompressionsvågor monterad mot aluminiumplattan på provkroppen. Sensorn är nominellt centrerad kring 100 kHz men den har i verkligheten en resonanstopp vid 127 kHz.

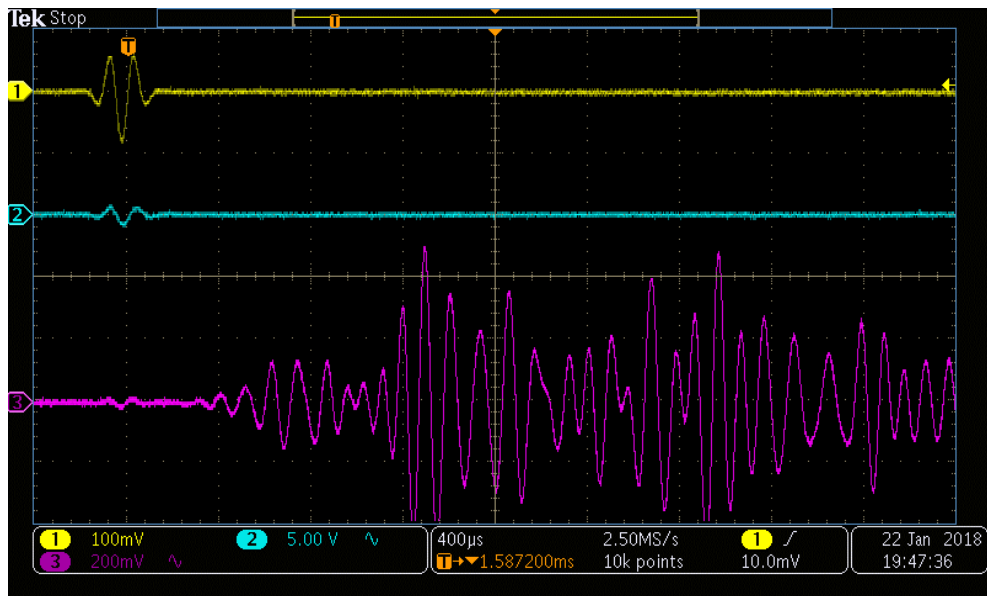


Figur 78. Sändande (två kablar) och mottagande Panametrics sensorer 100 kHz.

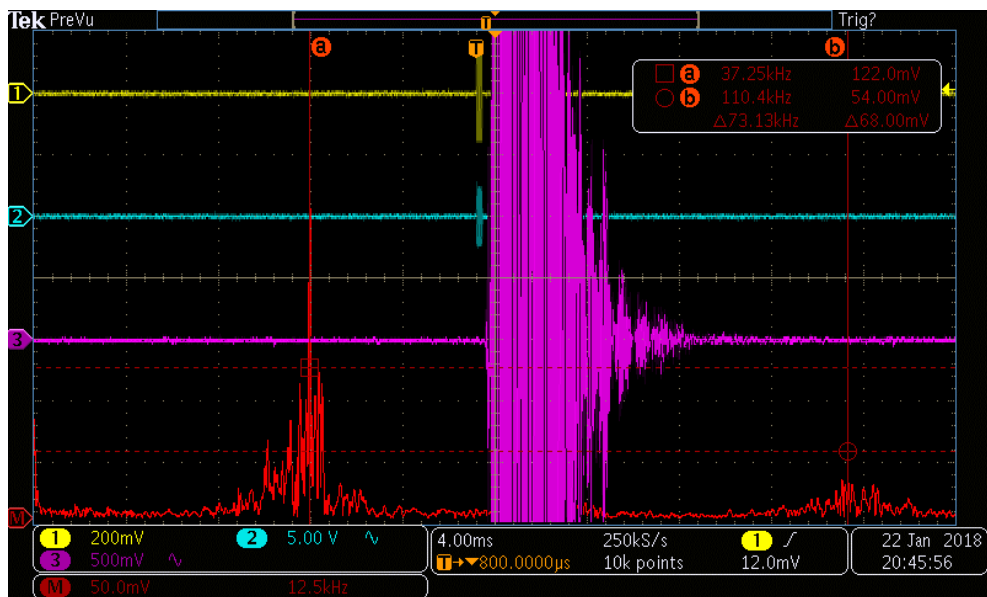


Figur 79. TEK000071/180125. Transmissions- och reflektionsmätning med 100 kHz puls av Rickertyp. Kanal 1 är utsignalen från vågformsgeneratoren, kanal 2 är utsignalen från effektförstärkaren, kanal 3 är mottagen signal på andra sidan provkroppen (ACSYS M2502) och kanal 4 är den signal som mottagits bredvid sändaren, båda Panametrics 100 kHz, se Figur 78 ovan. Som framgår är det inte en reflex, då den ankommer för tidigt – den skall komma samtidigt med den signal som gått rakt igenom provkroppen. *Misstanke uppstod att det är interna reflexer i aluminiumplattan.*

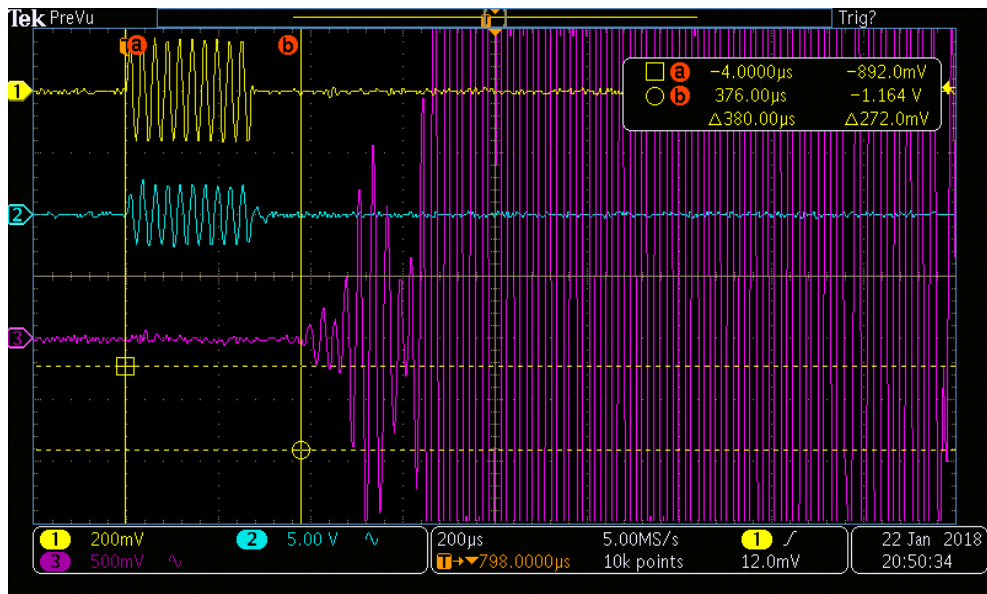
Försöket visade att det tar 392 us för ljudet att gå igenom hela provkroppen och det betyder att ljudhastigheten i provkroppen blir $1.2/0.000392 = 3061$ m/s.



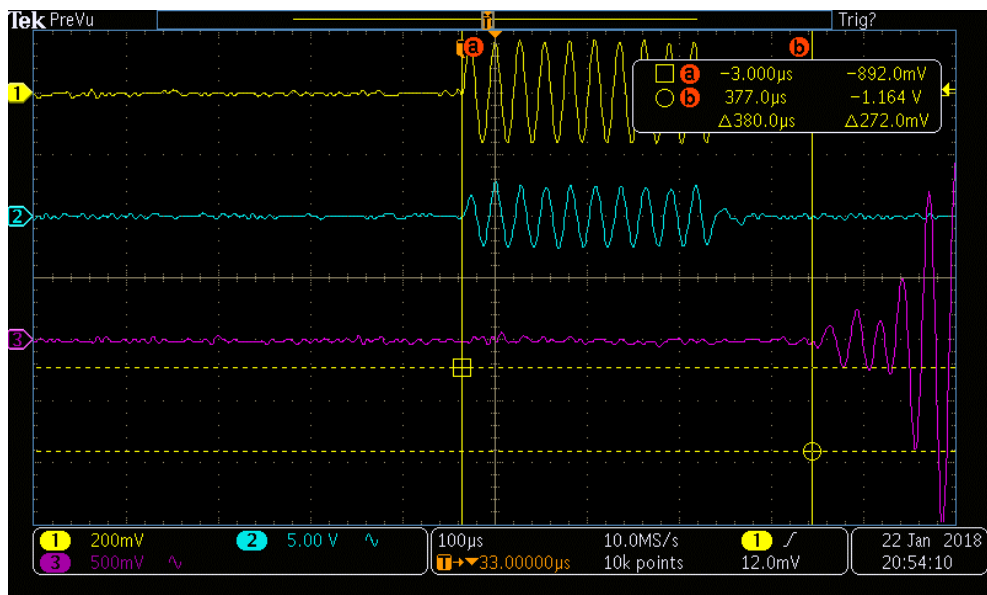
Figur 80. TEK000072/180125 Förtydligande av signalerna i ovanstående figur. Kanal 4 borttagen. Bandpassfiltrering 1k – 300kHz av signalen i kanal 3. Gaussdiff.



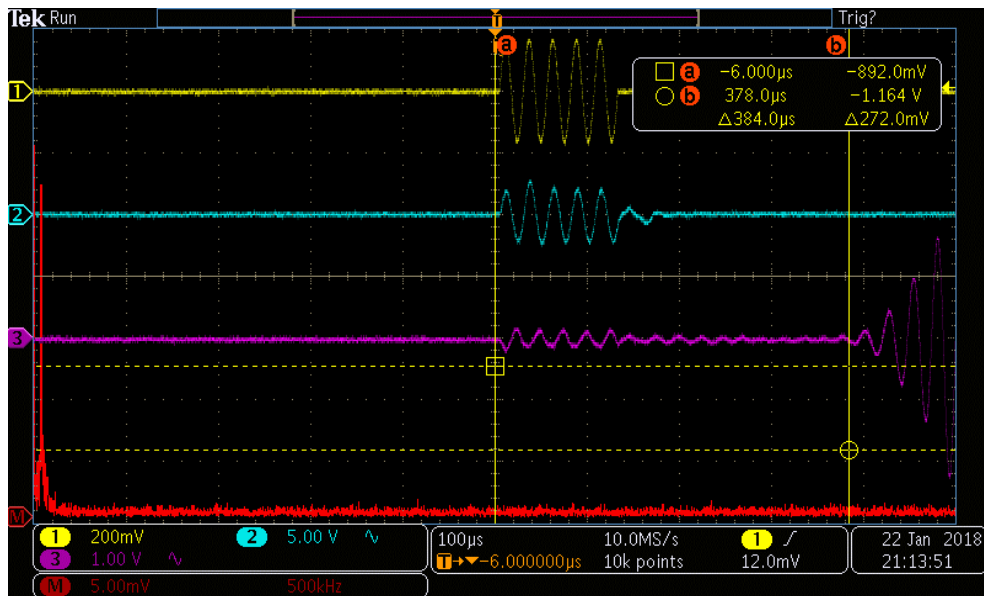
Figur 81. TEK000073/180125 Sändning av 10 cykler 37 kHz sändare och mottagare Panametrics 50 kHz. Kanal 3 mottagen signal, vilken alltså uppvisar kraftig utsträckning i tid jämfört med vad som sänts ut – kanal 1 och 2. Den röda kurvan är ett spektrum för den mottagna signalen. Markörerna står vid a 37 kHz och b 110 kHz. Den senare kan alltså vara i det andra övertonsområdet – 3F. Möjligen skymts det första övertonsområdet av kanal 3.



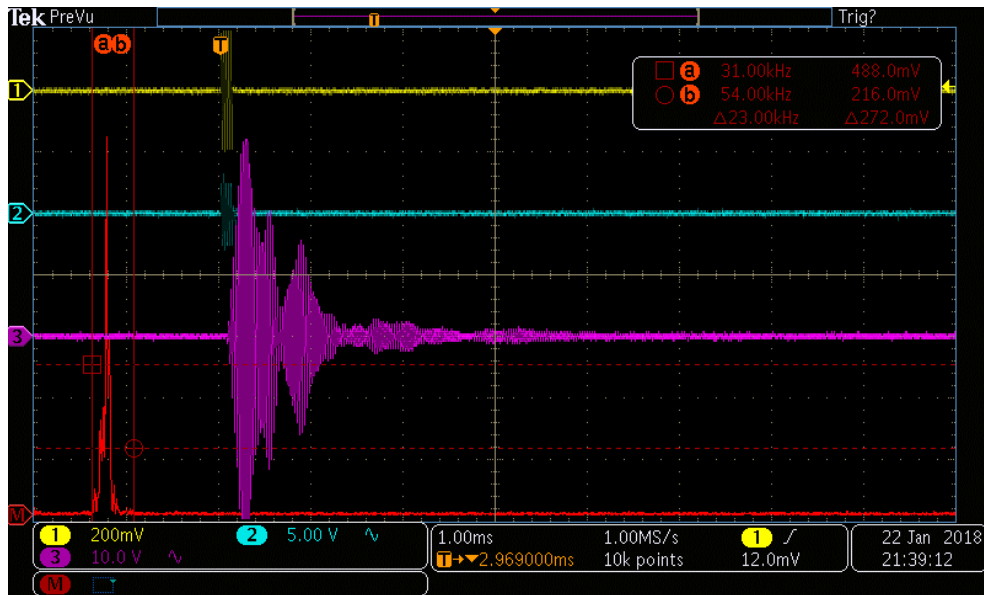
Figur 82. TEK000074/180125 Förstoring med syfte att ännu en gång bestämma ljudhastigheten i betongen. Det tog 380 us tvärs igenom och således blev ljudhastigheten 3157 m/s. Pulsen är 10 perioder sinus vid 127 kHz.



Figur 83. TEK00075/180125 Ytterligare förstoring av signalerna.



Figur 84. TEK00076/180125 Test med de egentillverkade sensorerna. Fem cykler vid 39 kHz, vilket är en resonanstopp för dessa sensorer. Mottagarförstärkning 5113 är 250 ggr. Bandpassfilter 1k-300k. En viss elektrisk överhörning syns i mottagarkanalen 3.

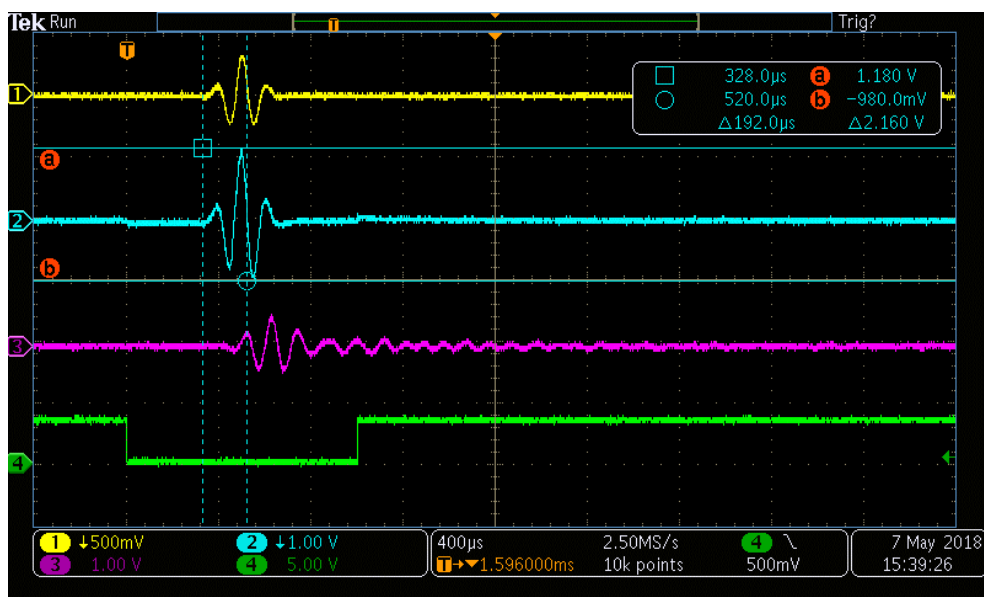


Figur 85. TEK00080/180125 Tre cykler 30 kHz för att undvika ringning i de egentillverkade sensorerna, vilka har en resonanstopp vid 39 kHz. Reflektionsmätning

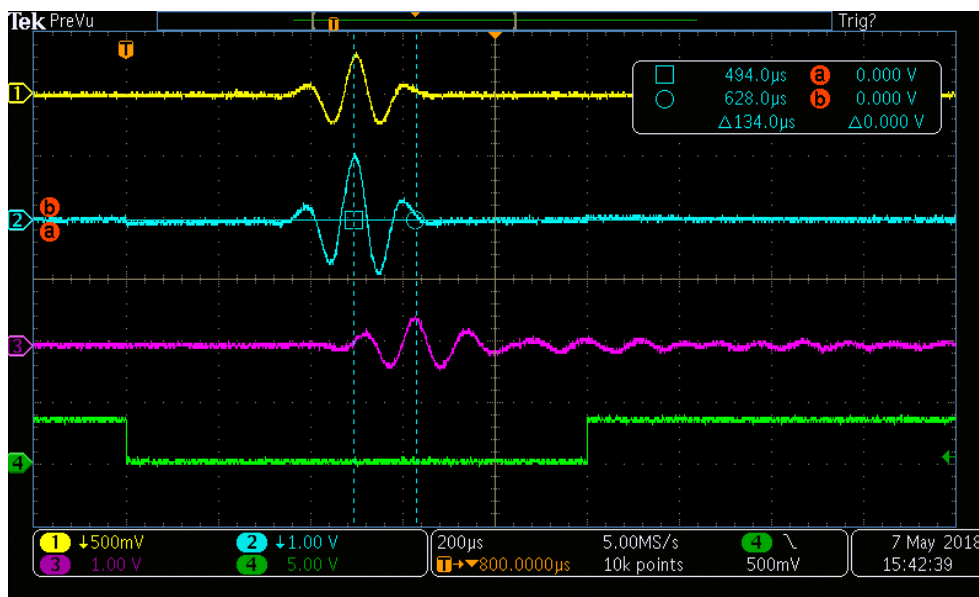
5.2 FÖRSÖK DATERADE 180507 REFLEXTID MED M2502P SENSORN TEK00130-00131

Detta försök har utförts med M2502 P-vågssensor. Utsignalen från vågformsgeneratoren var 0.7 Vpp (topp(+)-till-topp(-)). Effektförstärkaren RITEC har en variabel ingångsförstärkning som kan ställas in mellan värdena 0.0 och 10.0.

För att kontrollera att förstärkaren inte överstyrs finns det en utgång som visar en kopia av utsignalen dividerad med en faktor 100. Ritec gain var 7.0. För att effektförstärkaren skall möta den impedans som utgången är gjord för finns en 50 Ohm terminering mellan Ritec och A1220. Detta är det utgångsmotstånd RITEC alltid ser oberoende av de olika sensorernas faktiska impedans, vilken är mycket högre. 5113 förförstärkare mellan M2502P mottagarelement och oscilloskopet inställd på 140 ggr förstärkning. Mätningen sker med en M2502P sensor på den sida av provkroppen som den korroderade sidan av stålplåten är riktad mot. Det är alltså en reflektionsmätning i princip och frågeställningen är om det är reflexer som registreras. Tidsbestämning mellan transienta signaler är alltid ett problem, då man oftast saknar en precis flank att göra mätningen vid. Därför tillämpas två olika referenspunkter i de två bestämningarna nedan. I den ena ställs mätlinjerna där signalen börjar och i den andra ställs de där signalen har sitt maximum. Som framgår av de två bestämningarna, som resulterar i tiderna 192 respektive 134 us för korta för att kunna vara reflextider, då dessa skall vara i storleksordningen 380 us.



Figur 86. TEK00130/180507. Kanal 1 är utsignal från vågformsgeneratoren, kanal 2 är den från effektförstärkaren utgående signalen, kanal 3 är den mottagna signalen och kanal 4 är sändgrinden från vågformsgeneratoren, den signal som aktiverar effektförstärkaren. Tidsskillnaden mäts vid signalernas startflank och mäts upp till 192 us.



Figur 87. TEK00131/180507. Som ovanstående figur men tidsskillnaden mäts vid maxamplitud och blir 134 us.

5.3 FÖRSÖK UTFÖRDA 180516 PULSKARAKTÄRISERING TEK00132-215

Kalibrering av vågformsgeneratoren med den förprogrammerade vågformen "Gaussdif". Dessa beräkningar tjänar syftet att kunna sända ut det frekvensinnehåll med M2502 P som beräknas mest intressanta (de önskade frekvenserna) som resultat av de kontinuerliga mätningarnas resultat för F, 2F och 3F, grundton och övertoner.

Som referens användes den centrala halvperioden i den differentierade Gausspuls vid frekvensen på vågformsgeneratoren inställd på 1.000.000,000 kHz (1 kHz) som är 55.2 us, respektive den frekvens som har starkast komponent i FFT av den signal som registrerats av oscilloskopet under samma förhållande, nämligen 8.5 kHz. Detta har gjorts på två sätt.

Halvperiodmetoden innebär att man ser till att tidsavståndet mellan den centrala cykelns nollgenomgångar motsvarar halvperioden för den frekvens man vill åstadkomma.

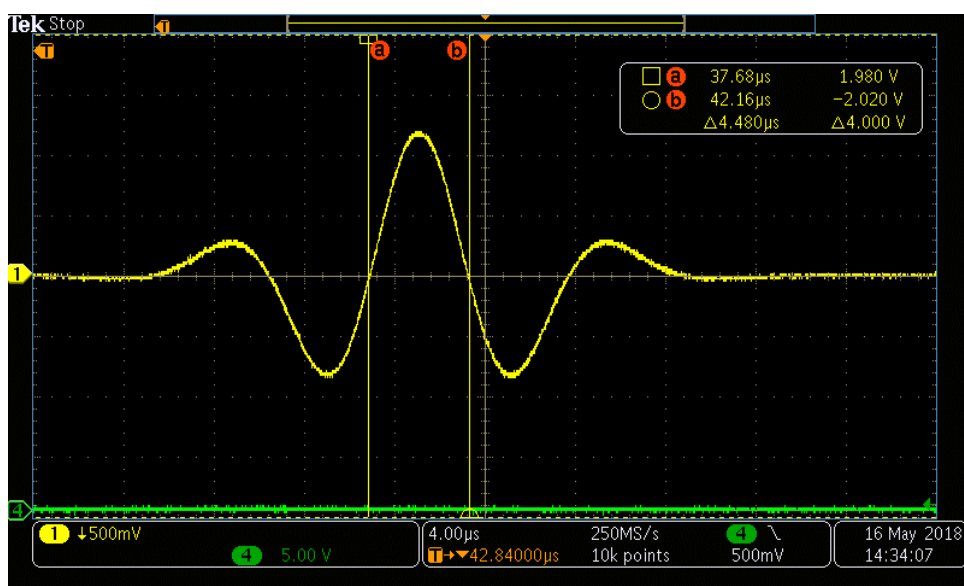
FFT-metoden innebär att man använder maxvärdet i oscilloskopets inbyggda spektrumberäkning (FFT) som är-värde.

Resultaten av de två kalibreringsmetoderna presenteras var för sig i tabellform nedan. Den frekvens som vågformsgeneratoren är inställd på är antalet utmatningar av den förprogrammerade signaltypen per sekund. Denna utgörs av upp till 16000 datapunkter och Gausspuls är centrerad i det minnesutrymmet, Se Figur 88 nedan.

5.3.1 Halvperiod metod

För frekvensen 10 807 Hz sker beräkningen då enligt $55,2/46,27 = 1,1930$

Önskad frekvens Hz	Önskad frekvens halvperiod us	AWG-frekvens kHz	Resulterande Halvperiod us
10 807	46,27	1,1930	46,03
12 569	41,00	1,3460	40,80
12 092	39,78	1,3876	39,60
13 300	38,00	1,4526	38,00
15 477	32,31	1,7084	32,40
35 000	14,00	3,9429	14,10
39 383	13,00	4,2462	12,80
53 034	9,42	5,8599	9,70
97 577	5,12	10,7813	5,16
113 656	4,40	12,5455	4,36

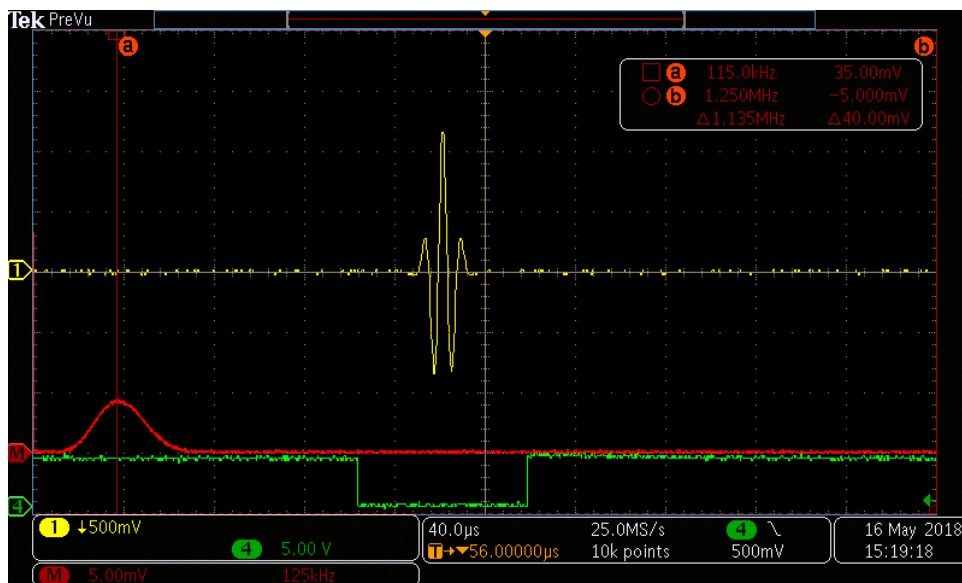


Figur 88. TEK00132/180516 Metod som användes för att bestämma erforderliga frekvensinställningar på funktionsgeneratoren. Den gula kurvan är vågformen "Gaussdif". Avståndet mellan nollgenomgångarna för den centrala halvperioden bestäms med hjälp av oscilloskopets cursor-funktion och kan avläsas i rutan uppe till höger.

5.3.2 FFT metod

För frekvensen 10 807 Hz sker beräkningen nu enligt $10807/8500 = 1.2714$

Önskad Frekvens Hz	AWG-Frekvens kHz	Resulterande frekvens Hz
10 807	1.2714	11 000
12 092	1.4226	12 000
12 569	1.4787	12 500
13 300	1.5647	14 000
15 477	1.8208	16 000
35 000	4.1176	36 000
39 833	4.6333	40 500
53 034	6.2393	54 500
97 577	11.4796	100 000
113 656	13.3713	115 000



Figur 89. TEK 00135/180516. Metod som användes för att bestämma erforderliga frekvensinställningar på funktionsgeneratoren. Den röda kurvan är oscilloskopets FFT-funktion. Med hjälp av cursor-funktionen bestäms toppen på frekvenskurvan. Den gröna kurvan är triggsignalen från funktionsgeneratoren. Dennes varaktighet motsvarar de 16000 datapunkter som finns i vågformen.

Slutsats

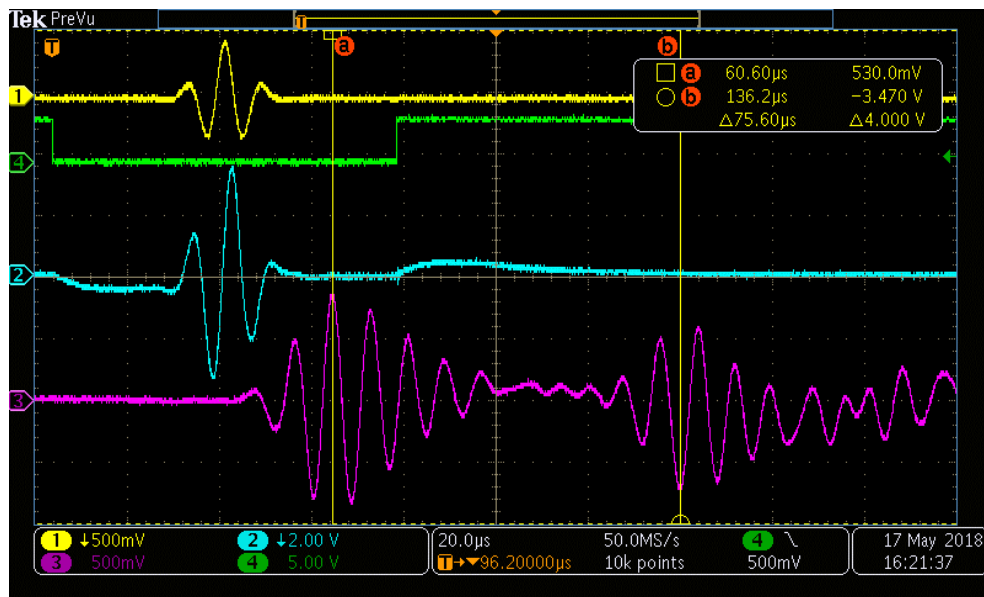
Halvperiodmetoden ger något för låga frekvensvärden beroende på att resten av signalen har något lägre frekvens än den centrala halvperioden

Med inställningen 13.3713 kHz för vågformsgeneratorns utmatning av den förprogrammerade vågformen åstadkommer man en maxfrekvens för

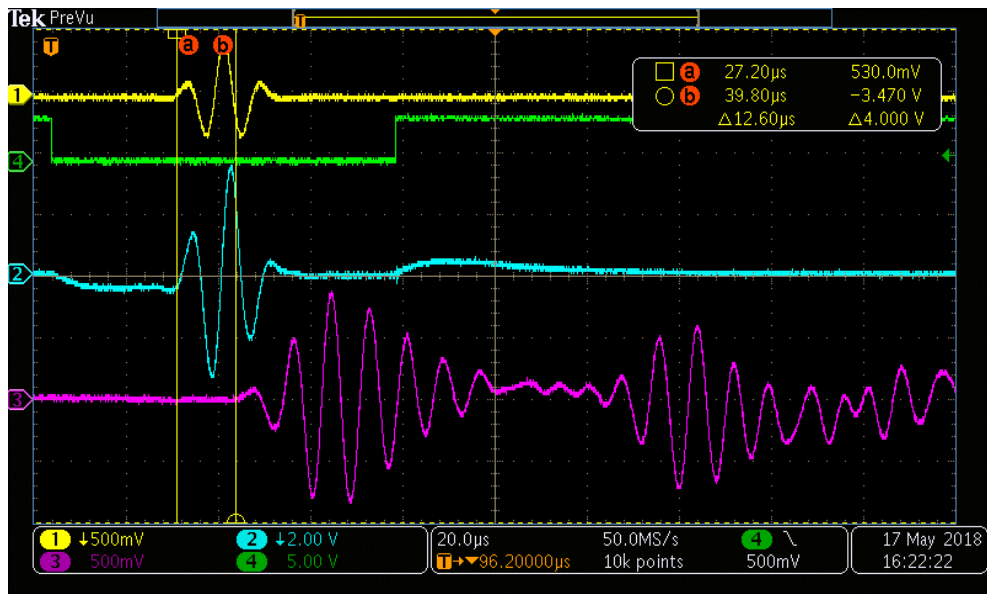
Gausspulsen vid 115 kHz enligt tabellen ovan. Utsignalen från vågformsgeneratoren till RITEC-förstärkaren är 700 mVpp. För dessa parametrar blev utsignalen från RITEC-förstärkaren 700 Vpp.

Försöket är gjort med M2502P-sensorn monterad på den sida av provkroppen den rostiga stålplåten är orienterad mot.

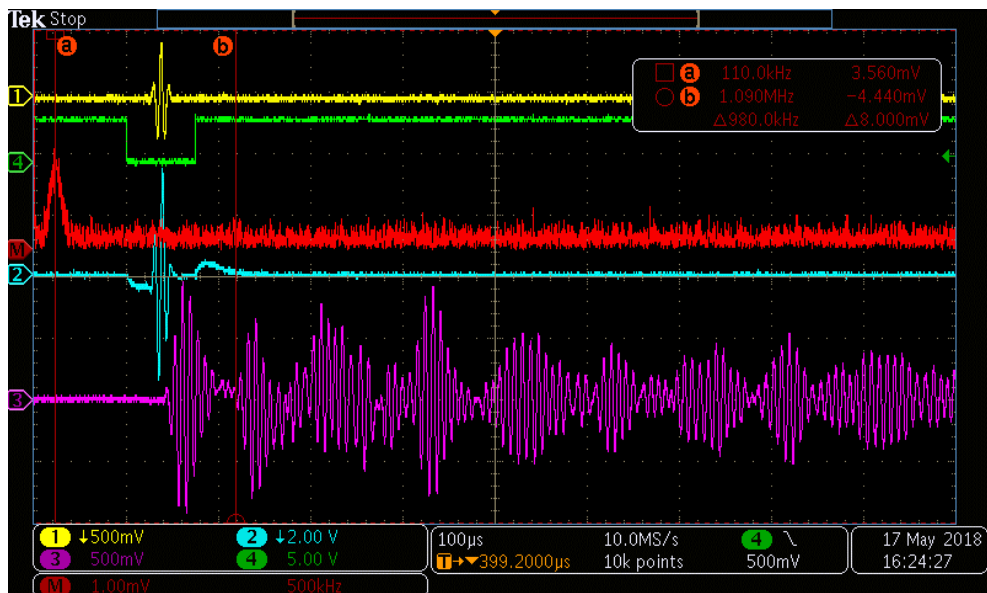
5.4 TESTER MED "GAUSSDIFF" 180517 TEK00136-00138



Figur 90. TEK00136/180517. Kanal 1 är utsignalen från vågformsgeneratoren, kanal 4 är vågformsgenerators gate-signal. Kanal 2 är den från RITEC utsända signalen och kanal 3 är den mottagna signalen. Markörerna indikerar att det är 75.6 µs mellan de två ankomsterna.



Figur 91. Tek00137/180517. Signaler som ovan. Markörerna är inställda på att mäta tiden från utsänd puls till mottagen puls. Denna tid blir 12.6 μ s. Det är alldeles för kort tid för att kunna vara en reflex från den rostiga plåten. Mer sannolikt är det en signal som gått från den sändande elementgruppen i M2502P-sensorn genom den ingjutna aluminiumplåten till den mottagande elementgruppen i M2502P-sensorn.



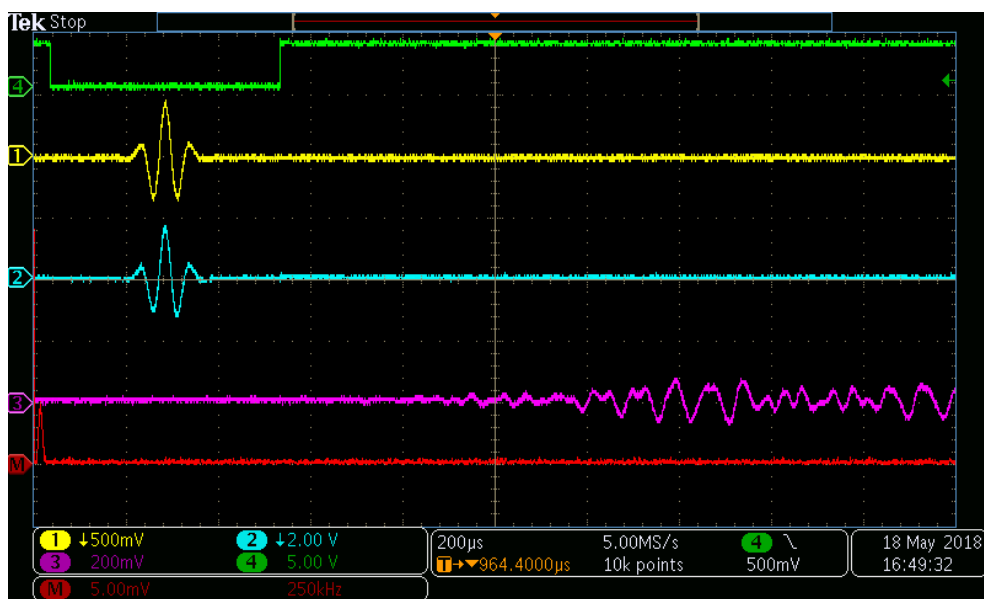
Figur 92. TEK00138/180517. Översikt med längre observationsfönster inställt på oscilloskopet. Signaler som ovan. Den röda kurvan är oscilloskopets spektrumberäkning. Det framgår av markörvärdet a att frekvenstoppen ligger vid 110 kHz, väldigt nära avsedda 115 kHz.

5.5 MÄTNING RAKT IGENOM PROVKROPPEN 180518 TEK00139-

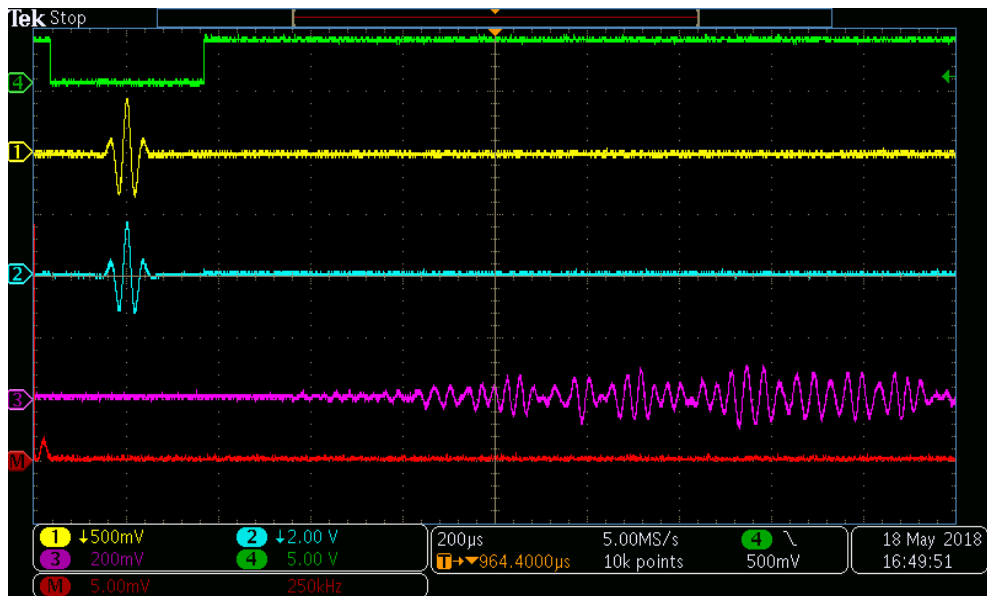
Mätning tvärs igenom 1.20 m. Sändare M2502P 100 kHz (P), mottagare 50 kHz Panametrics @x kHz betyder den utmatningsfrekvens AWG är inställd på för "arbitrary signal=GAUSSDIF RITEC 7.0, 50 Ohm terminering (ger bättre monitor out signal) , 5113 250 ggr / 100 kHz högpas filter. Vågformsgeneratorns utmatningsfrekvens varierar.



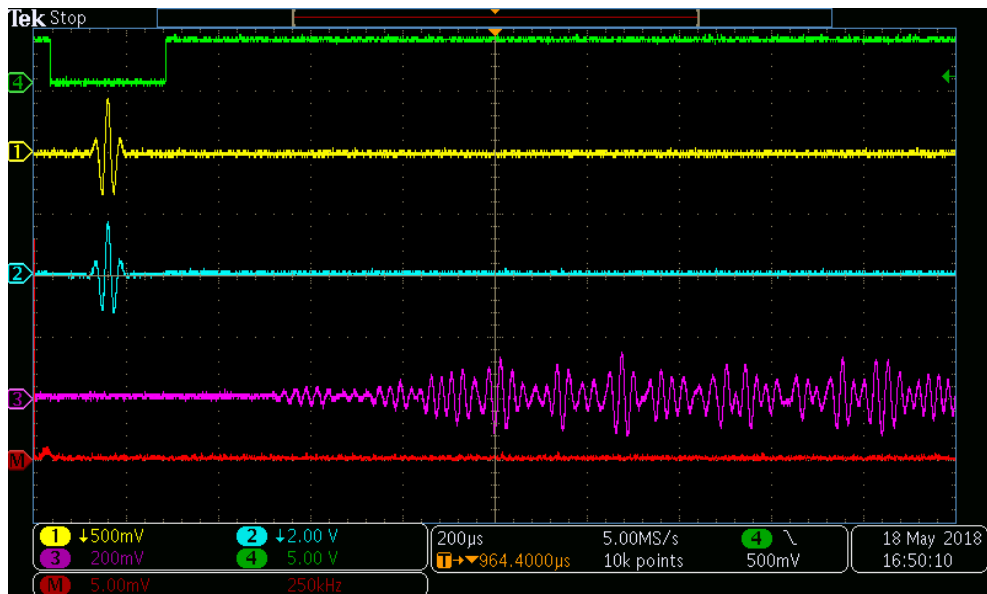
Figur 93. M2502P 100 kHz kompressionsvågtransducer som sändare och mottagare



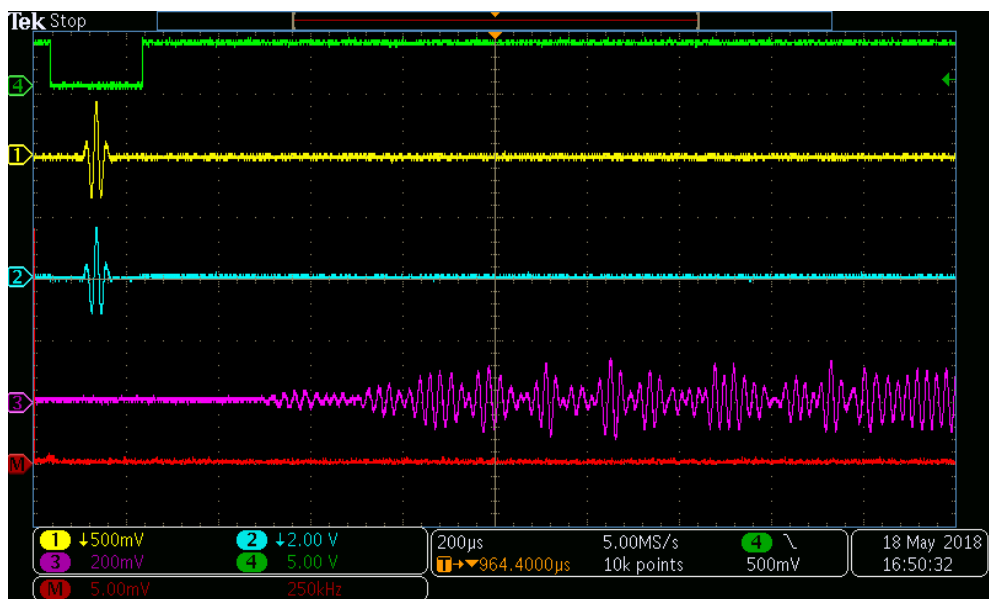
Figur 94. Tek 00140 AWG GAUSSDIF@2kHz



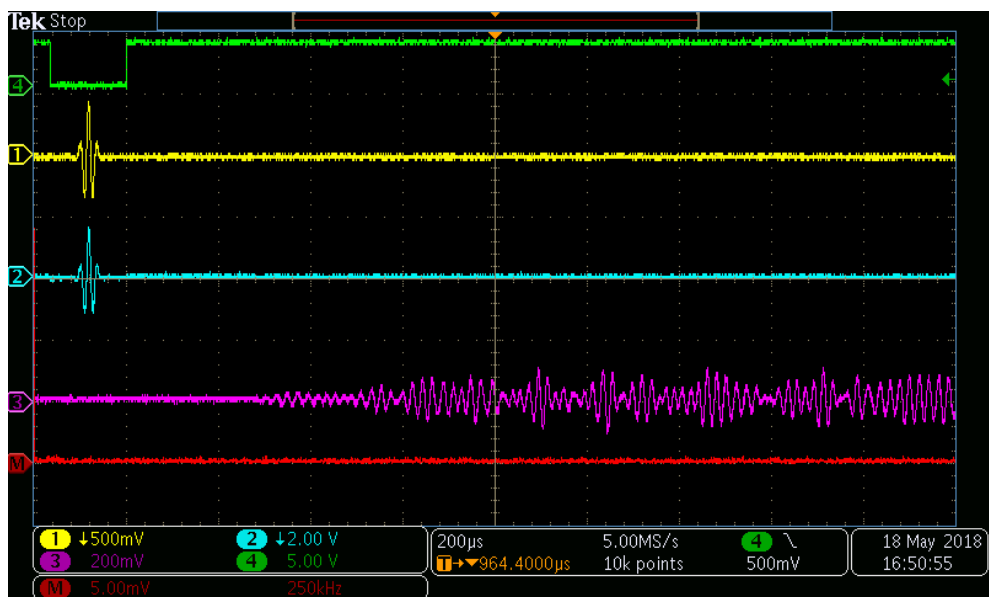
Figur 95. Tek 00141 AWG GAUSSDIF@3 kHz



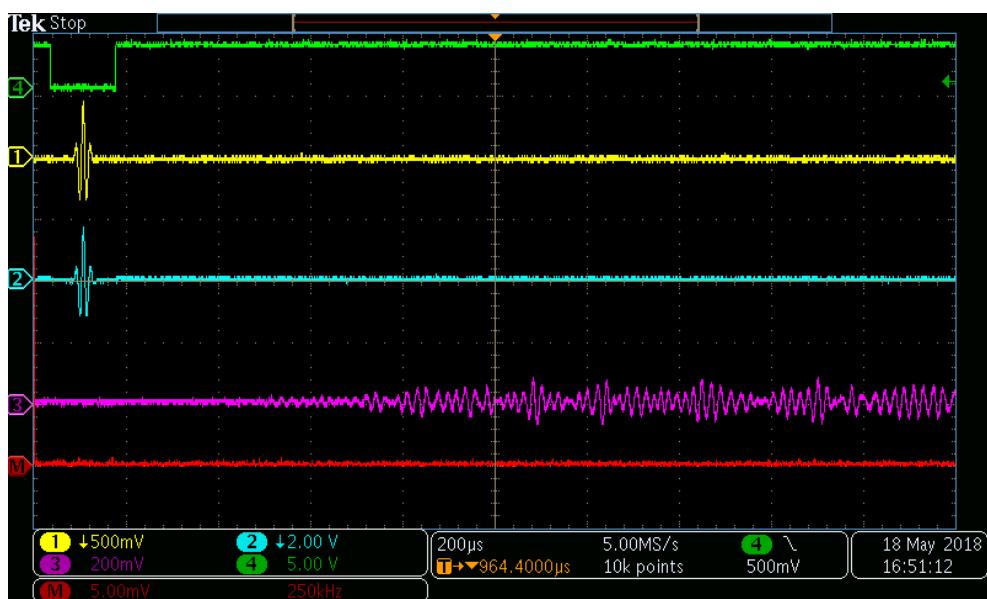
Figur 96. Tek00142 AWG GAUSSDIF@4 kHz OPTIMAL SIGNAL



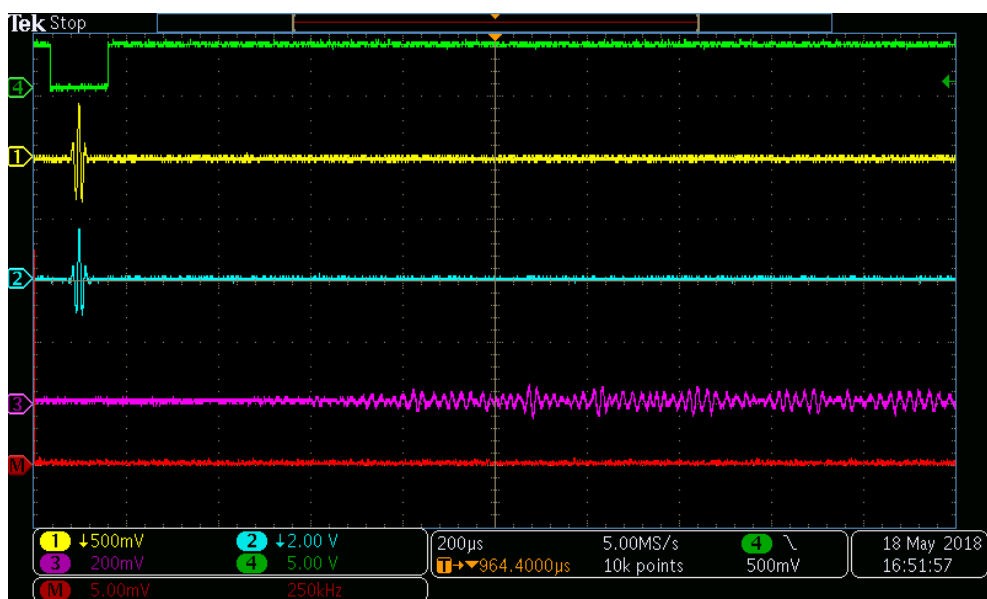
Figur 97. Tek00143 AWG GAUSSDIFF@5kHz OPTIMAL SIGNAL



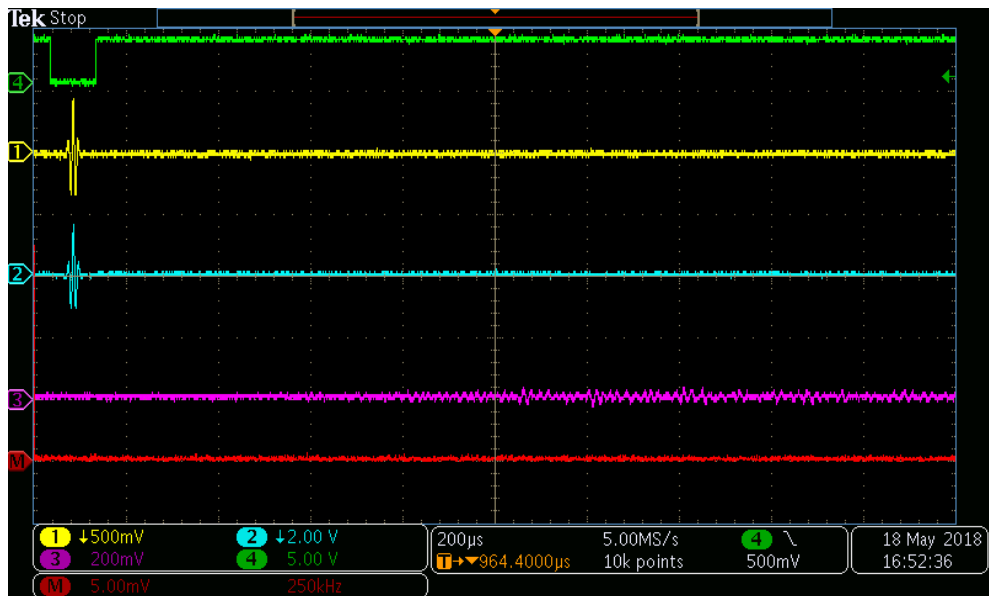
Figur 98. Tek 00144 AWG GAUSSDIF@6kHz



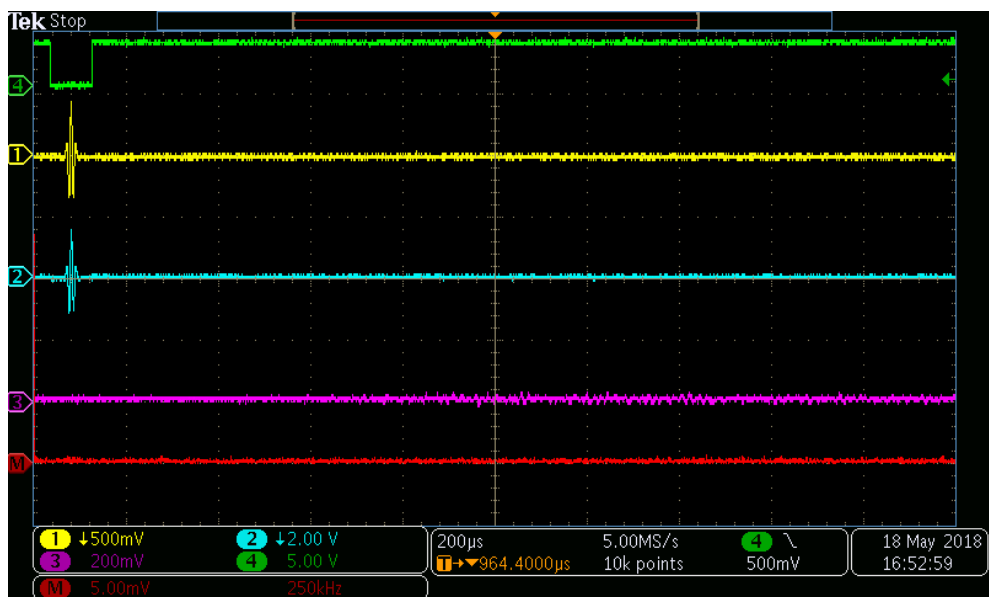
Figur 99. Tek00145 AWG GAUSSDIF@7 kHz



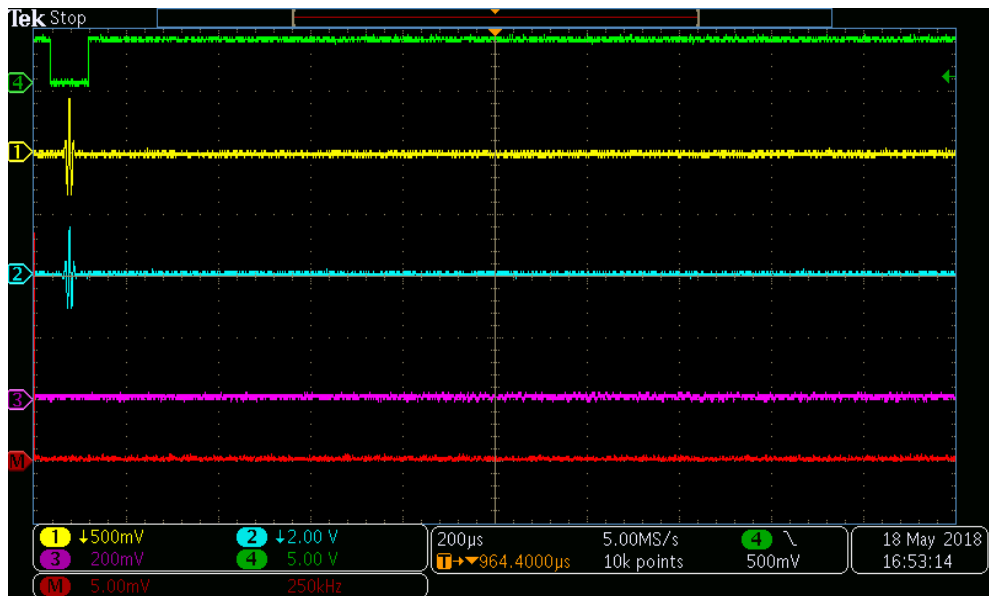
Figur 100. Tek 00146 AWG GAUSSDIF@8 kHz



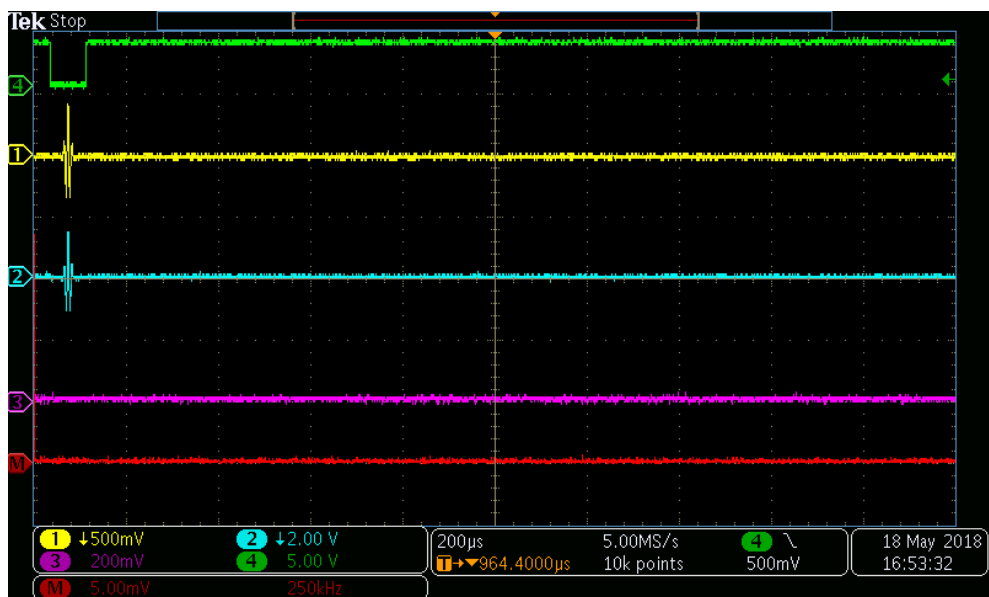
Figur 101. Tek00148 AWG GAUSSDIF@10kHz



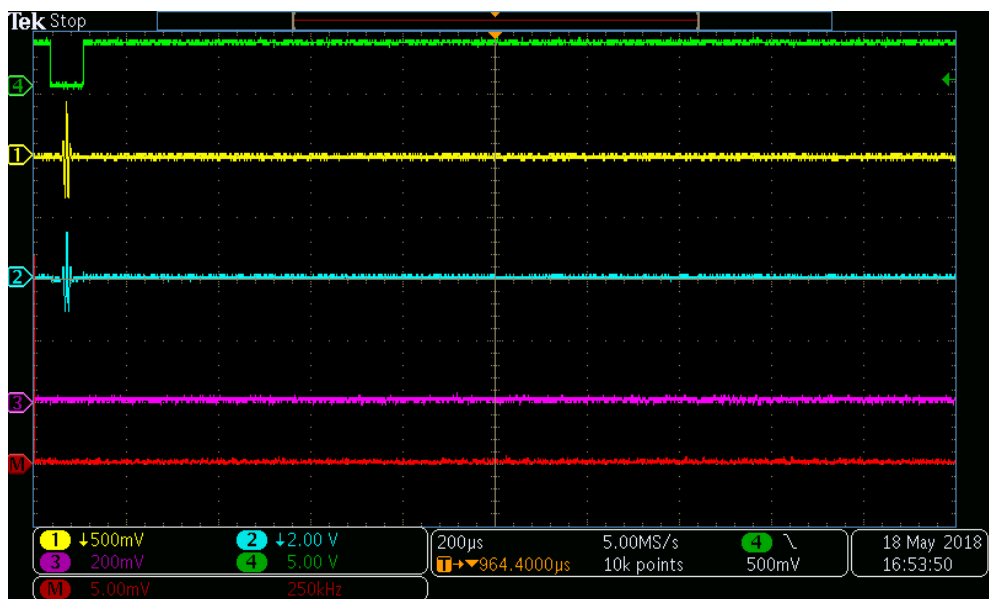
Figur 102. Tek00149 AWG GAUSSDIF@11 kHz



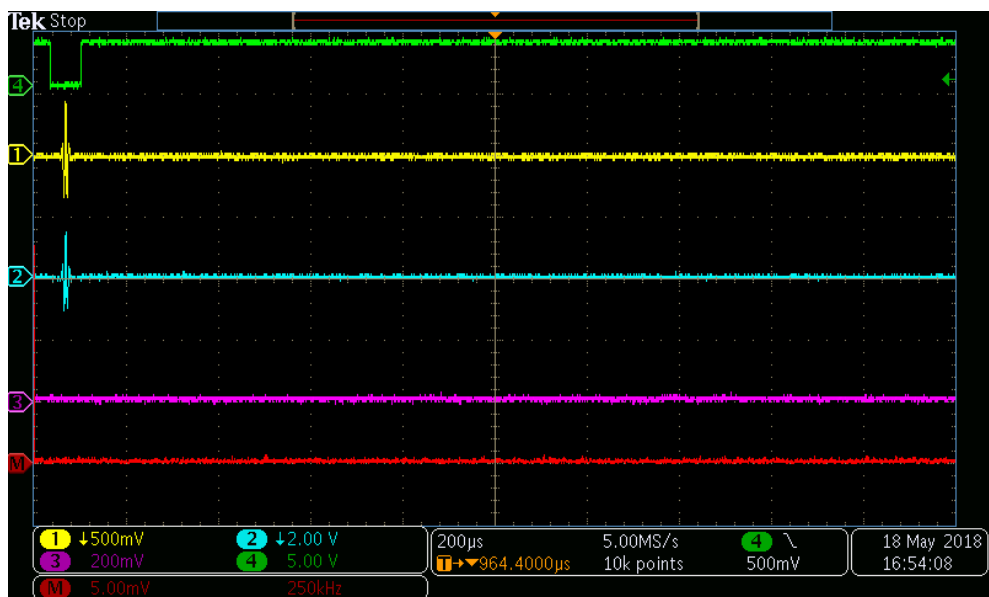
Figur 103. Tek00150 AWG GAUSSDIF@12 kHz



Figur 104. Tek 151 AWG GAUSSDIG @13 kHz

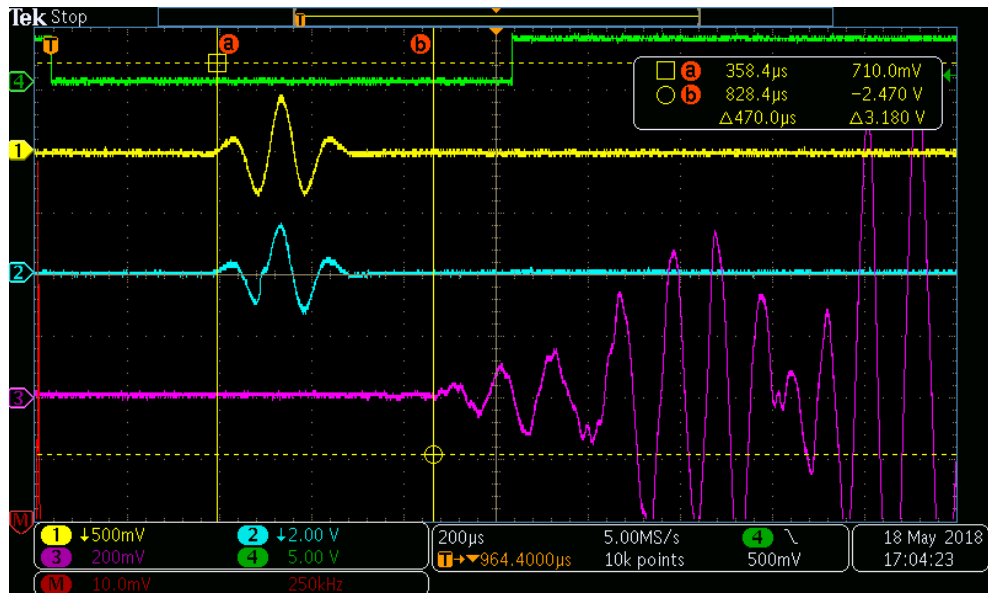


Figur 105. Tek00152 AWG GAUSSDIF @14 kHz

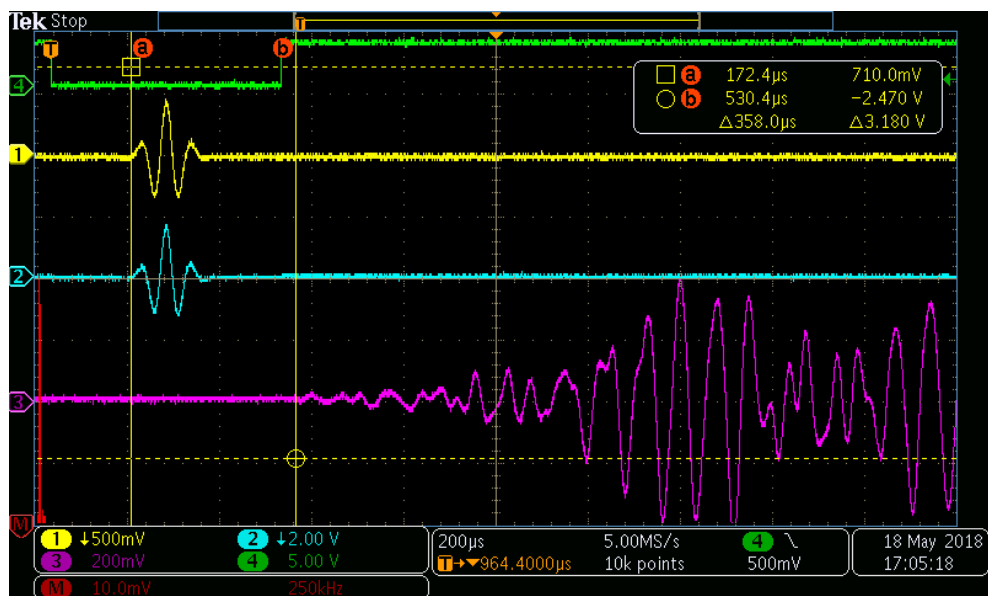


Figur 106. Tek00153 AWG GAUSSDIF @15 kHz

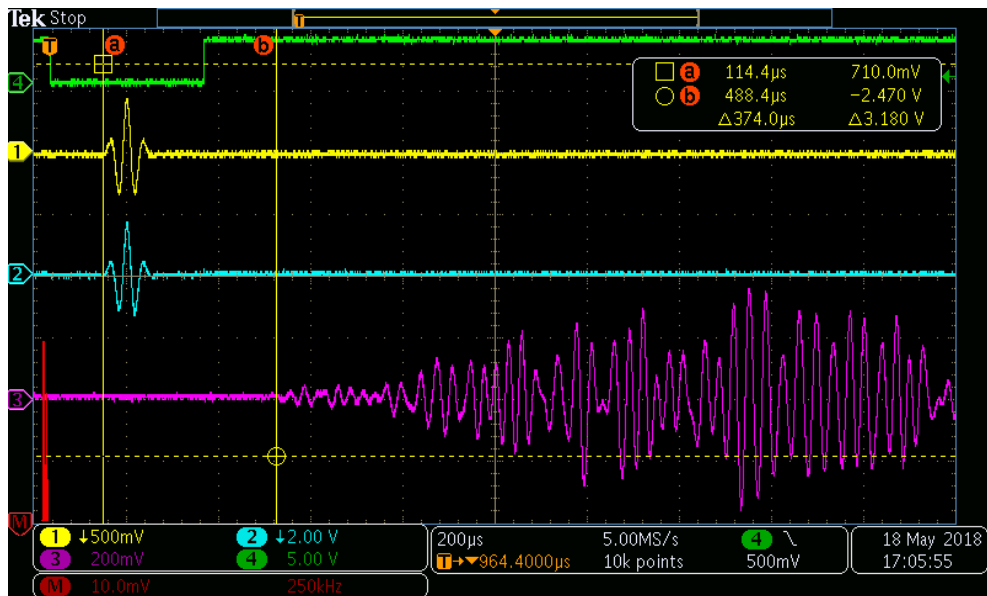
Upprepning av mätserien med högpasstret sänkt till 10 kHz



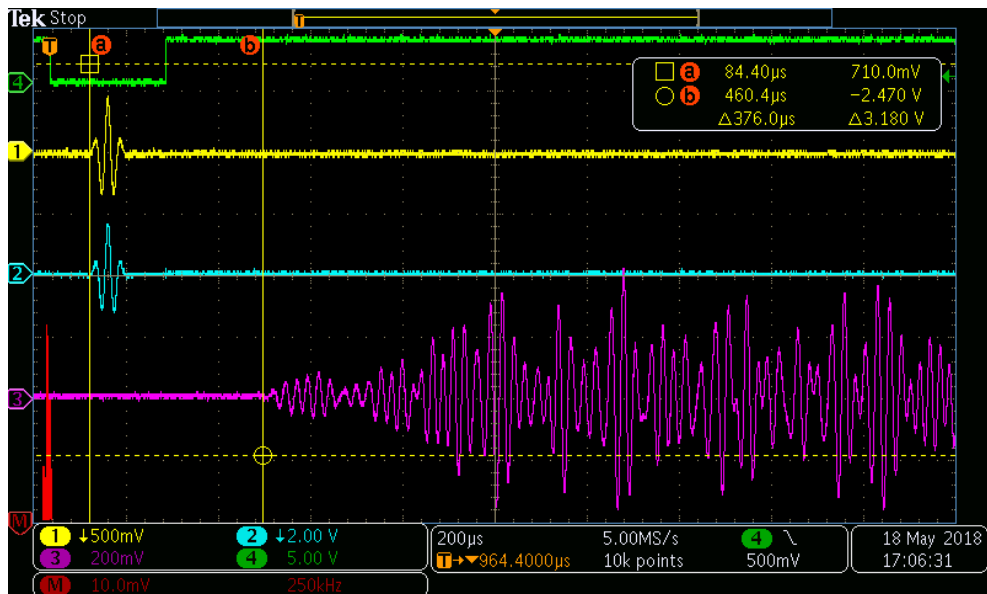
Figur 107. Tek 00154 AWG GAUSSDIF @ 1 kHz



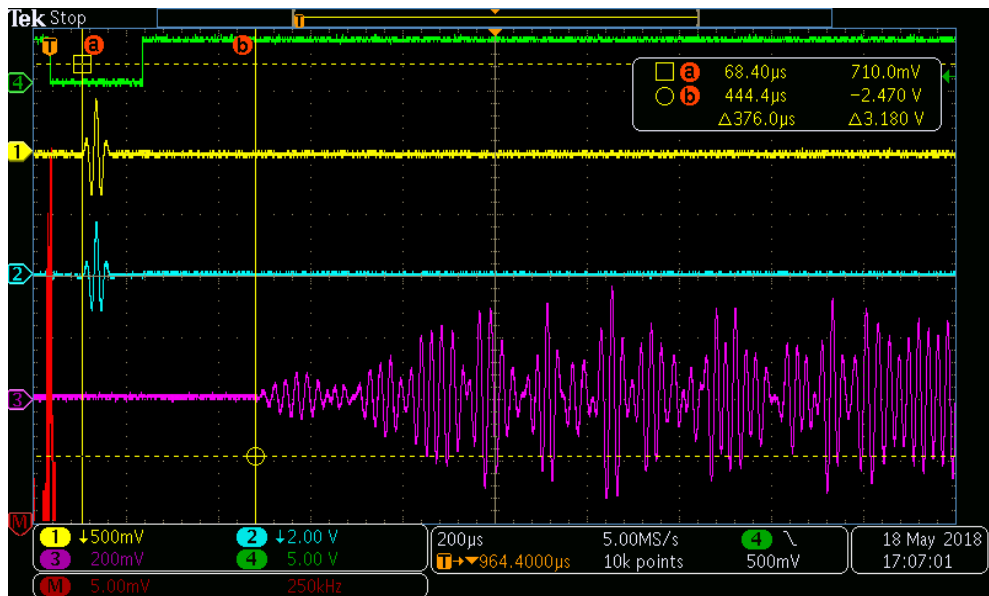
Figur 108. Tek 00155 AWG GAUSSDIF@2kHz



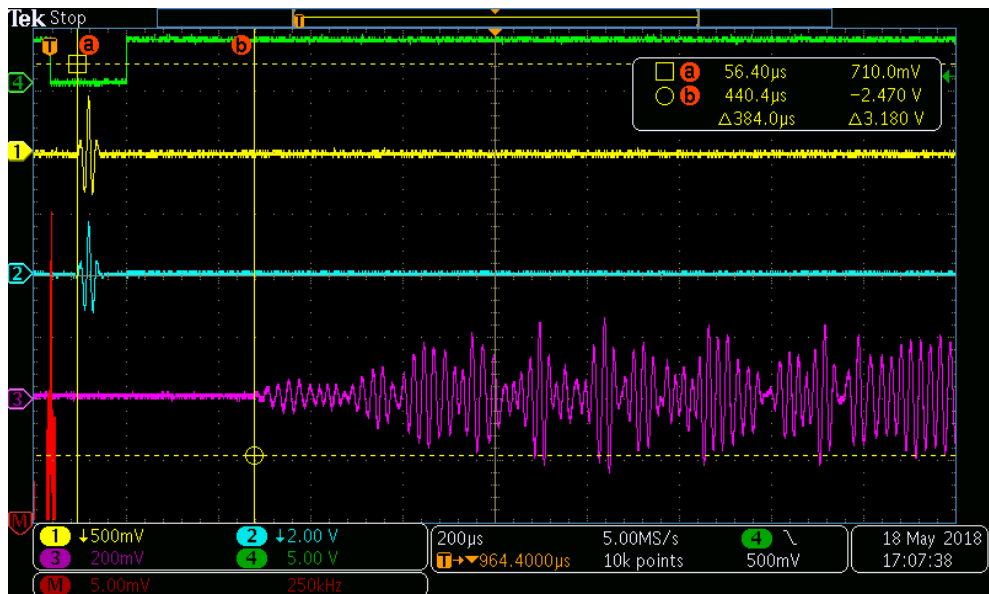
Figur 109. Tek 00156 AWG GAUSSDIF@3kHz



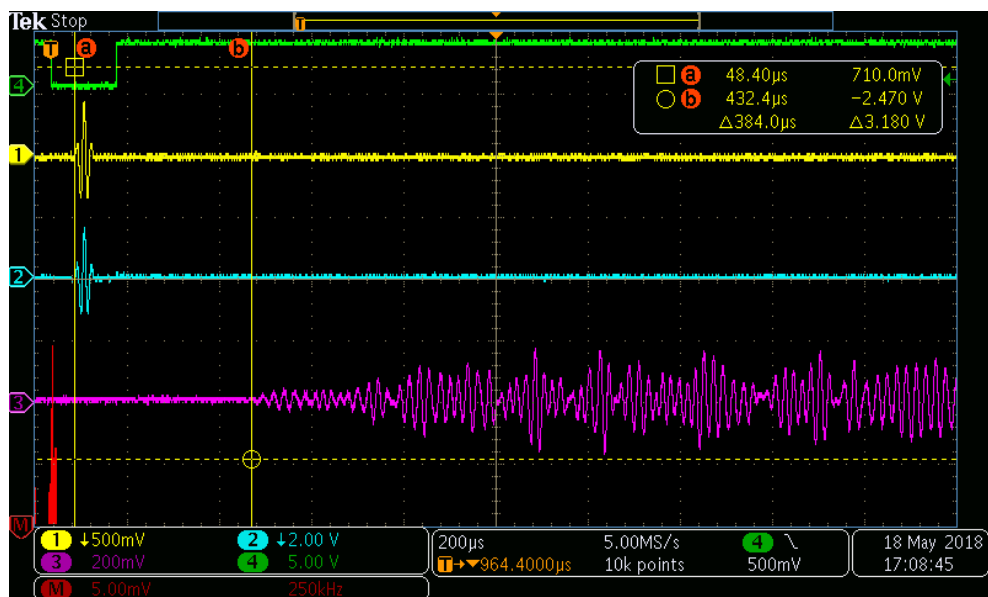
Figur 110. Tek00157 AWG GAUSSDIF@4kHz



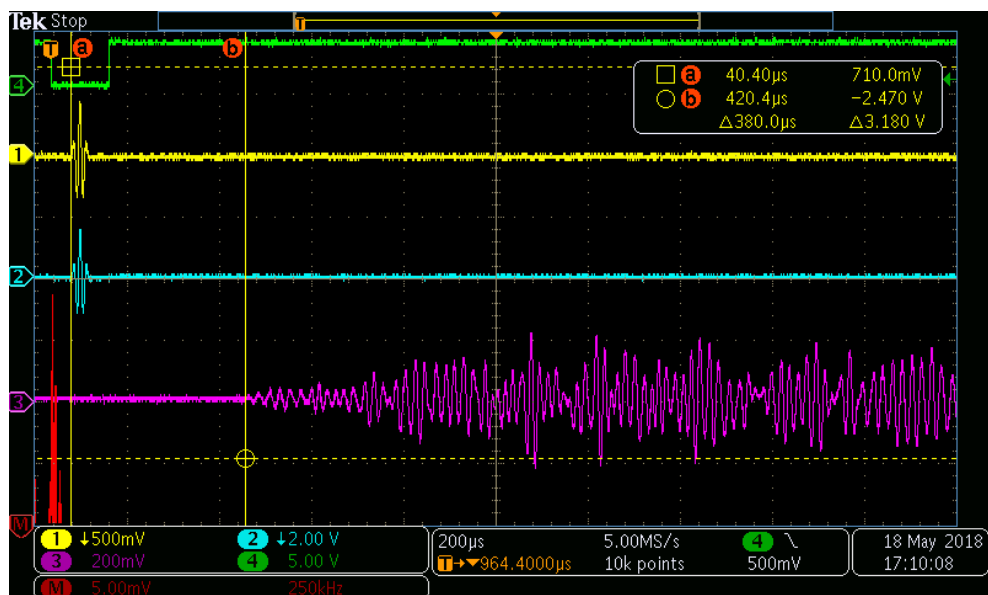
Figur 111. Tek00158 AWG GAUSSDIF@5kHz



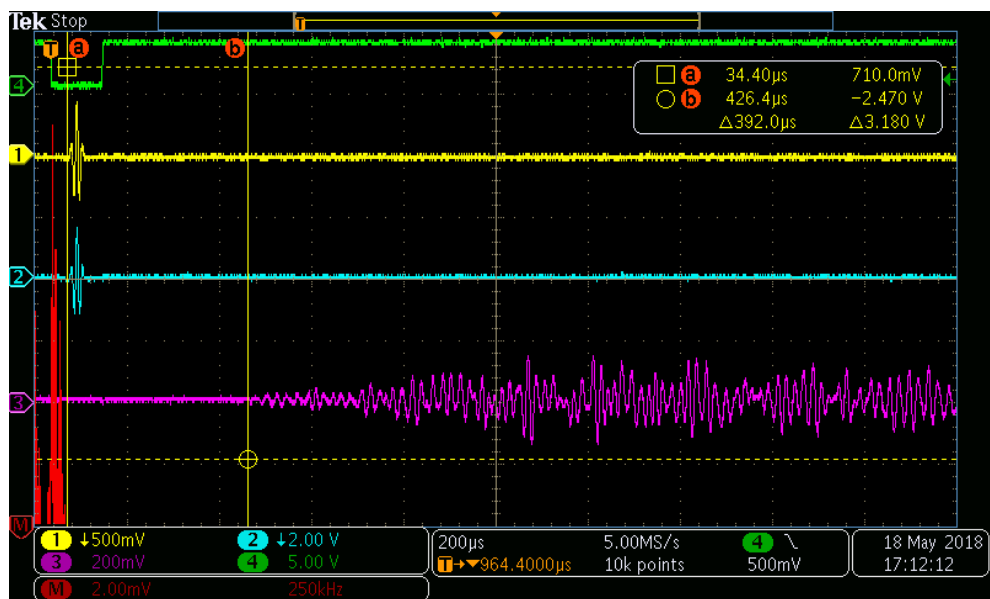
Figur 112.. Tek00159 AWG GAUSSDIF@6kHz



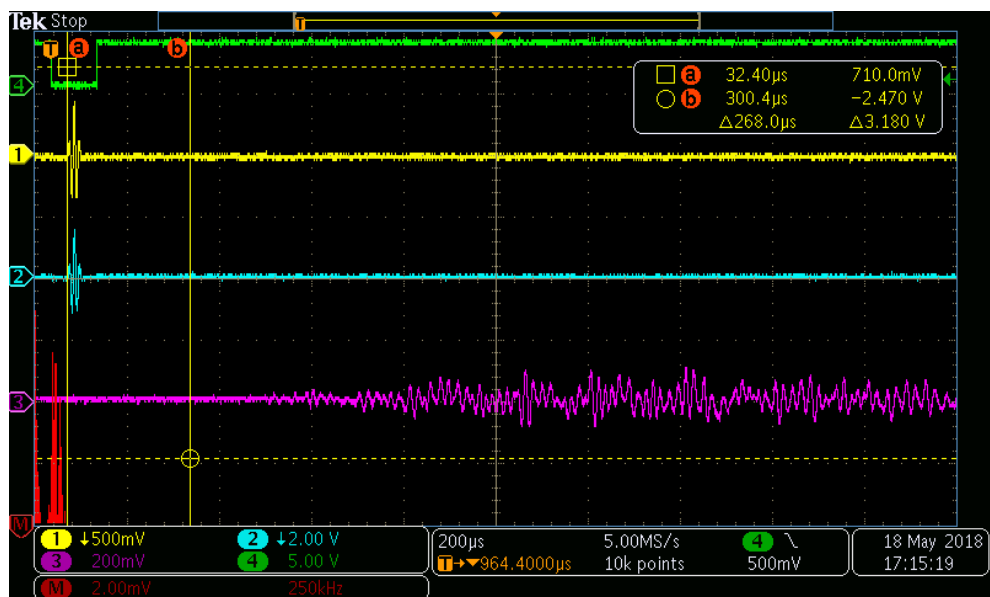
Figur 113. Tek00160 AWG GAUSSDIF@7kHz



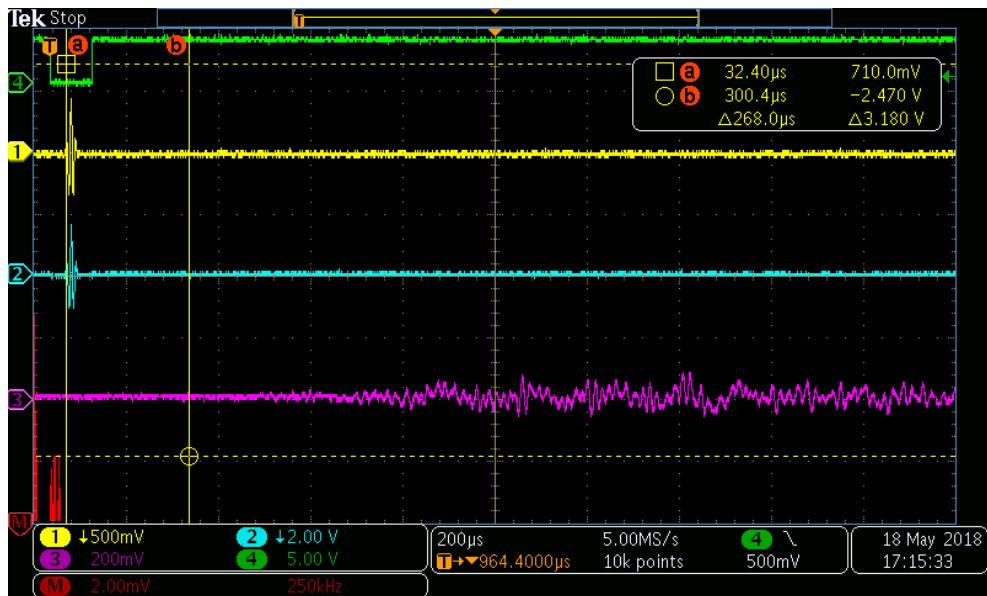
Figur 114. Tek00161 AWG GAUSSDIF@8kHz (Frekvenstopp 45 kHz) Förstärkning i 5113 höjd till 500 ggr



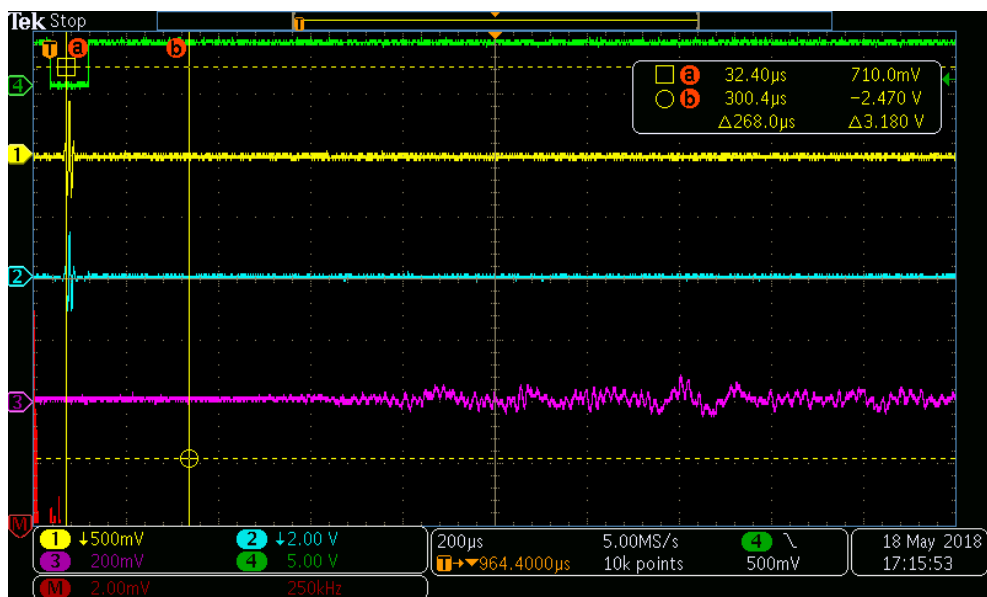
Figur 115. Tek00162 AWG GAUSSDIF@9kHz



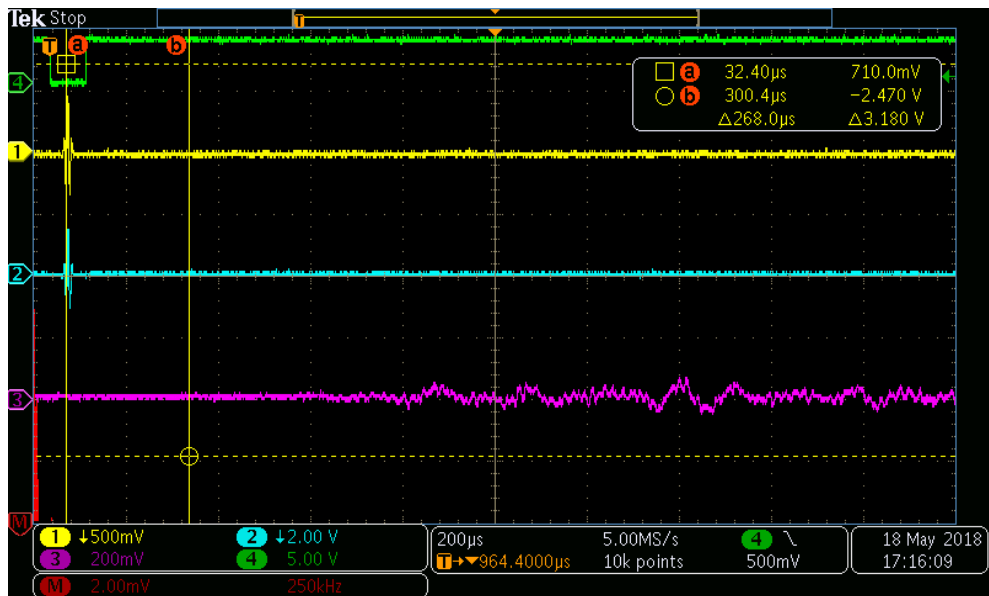
Figur 116. Tek00163 AWG GAUSSDIF@10kHz



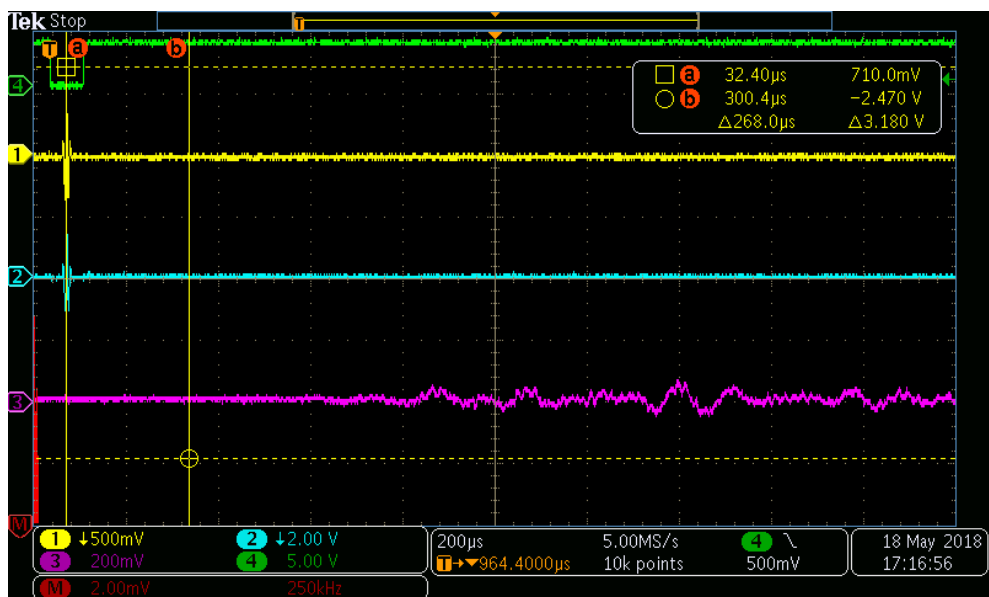
Figur 117. Tek00164 AWG GAUSSDIF@11kHz



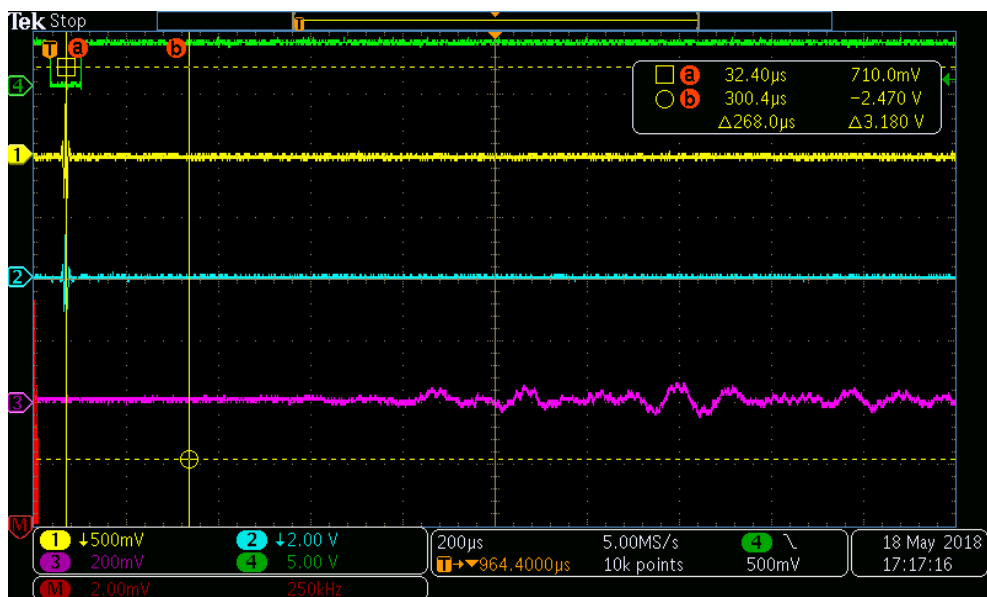
Figur 118. Tek00165 AWG GAUSSDIF@12kHz



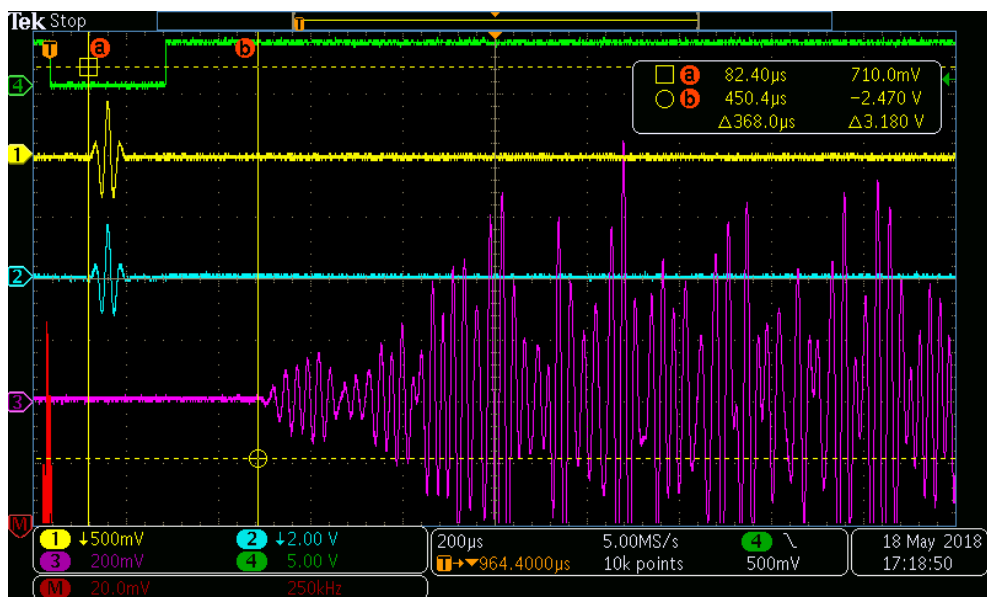
Figur 119. Tek00166 AWG GAUSSDIF@13kHz



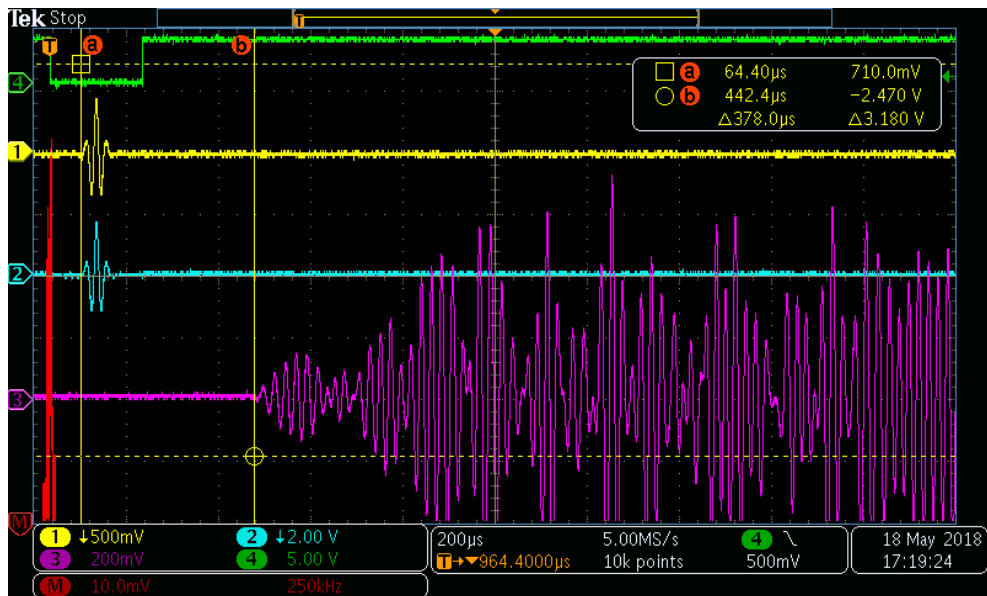
Figur 120. Tek00167 AWG GAUSSDIF@14kHz



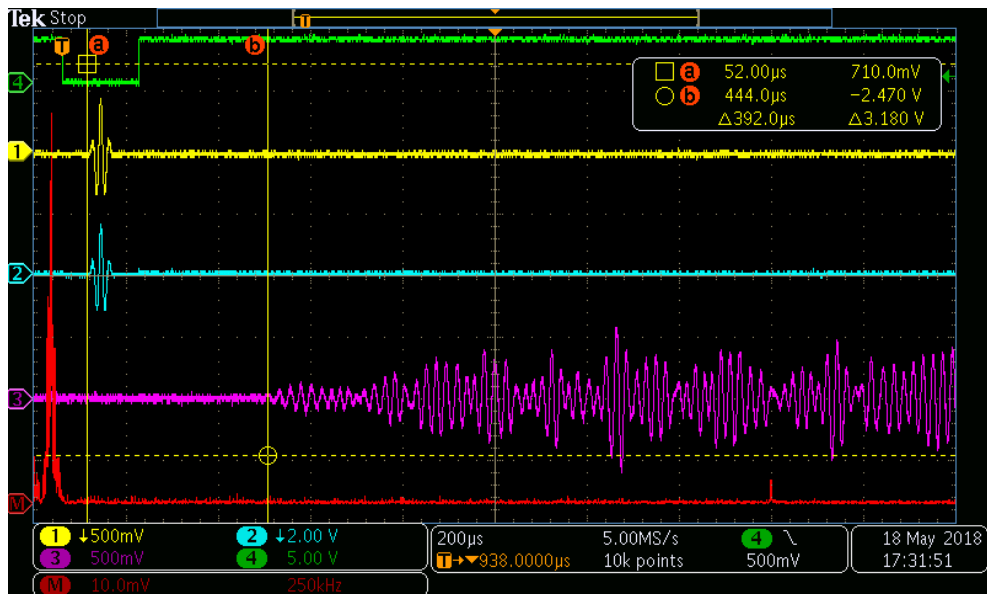
Figur 121. TEK00168 AWG GAUSSDIF@15kHz



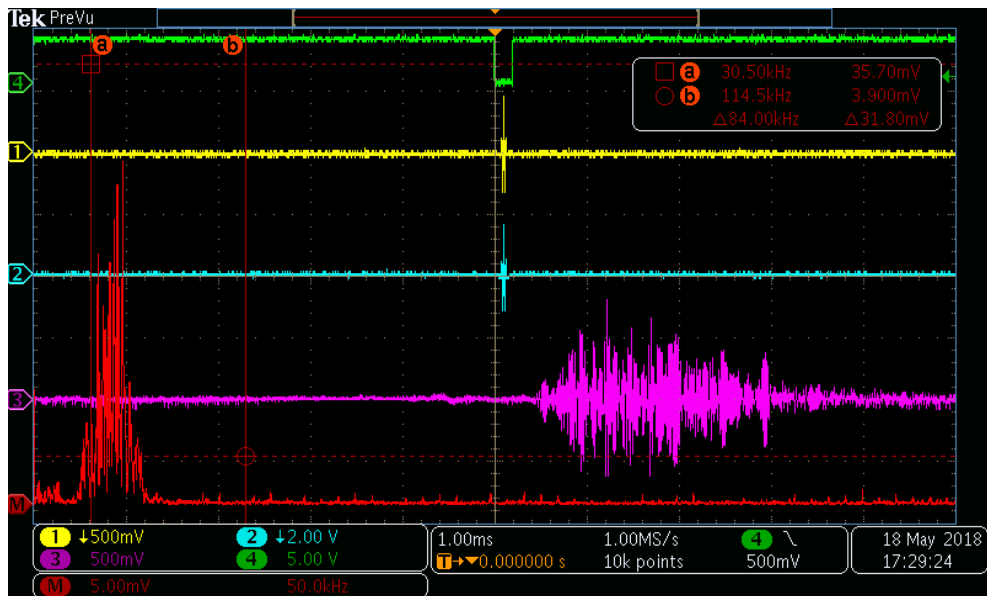
Figur 122. Tek00169 Omtag av 4 kHz med den högre förstärkningen 500 ggr Ch3.



Figur 123. TEK00170 Omtag av 5 kHz med den högre förstärkningen 500 ggr Ch3.



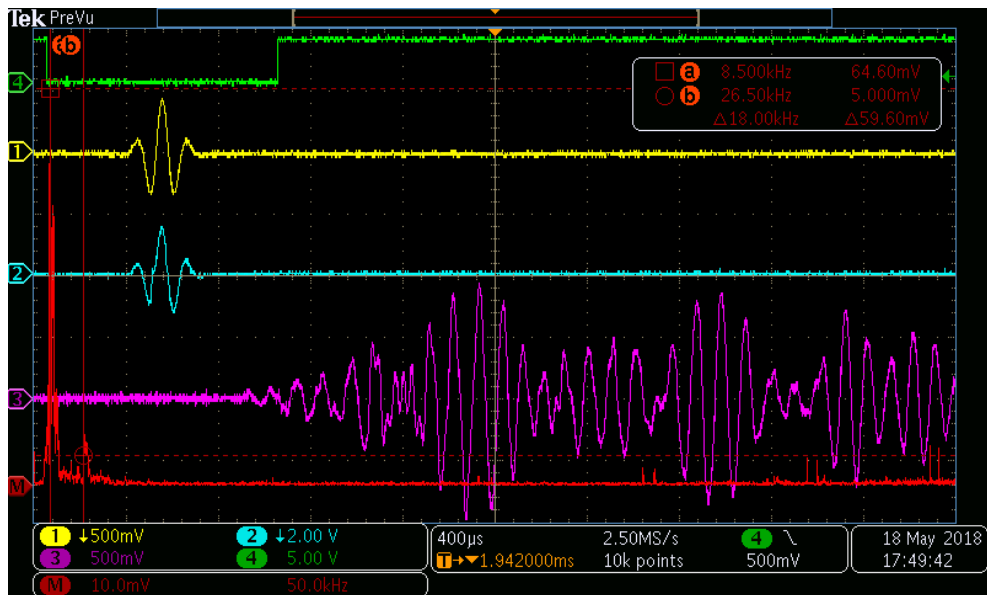
Figur 124. TEK00172 AWG GAUSSDIF@6kHz Omtag av 4 kHz med den högre förstärkningen 500 ggr Ch3.



Figur 125. TEK00171 AWG GAUSSDIF@5kHz Översikt i tiden med 1.00 ms per ruta.

5.6 OMTAGNING MED PANAMETRICS 100 KHZ SOM MOTTAGARE

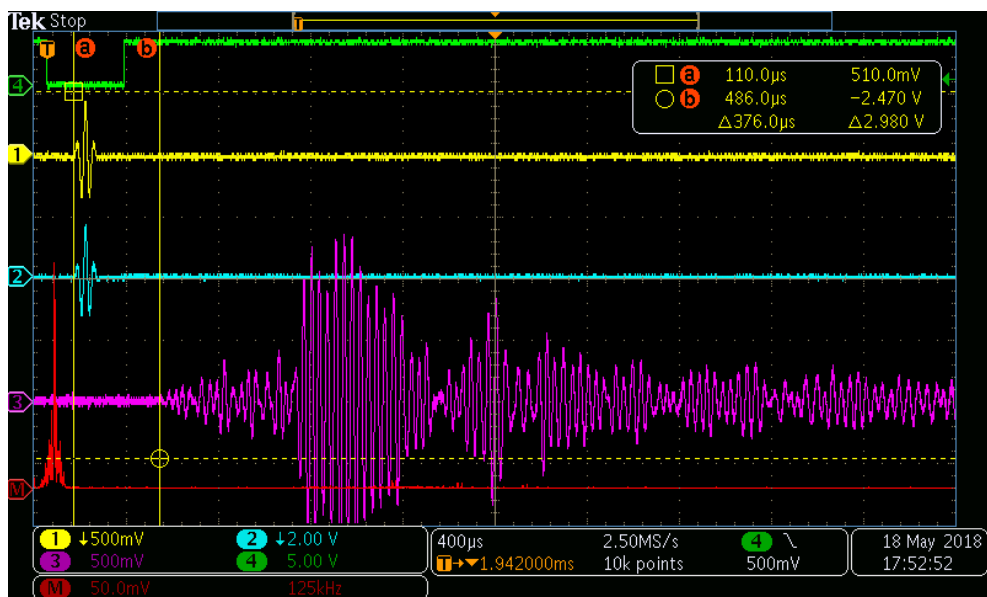
Förförstärkare 5113: 500 ggr förstärkning 10 kHz högpasfilter inställt.



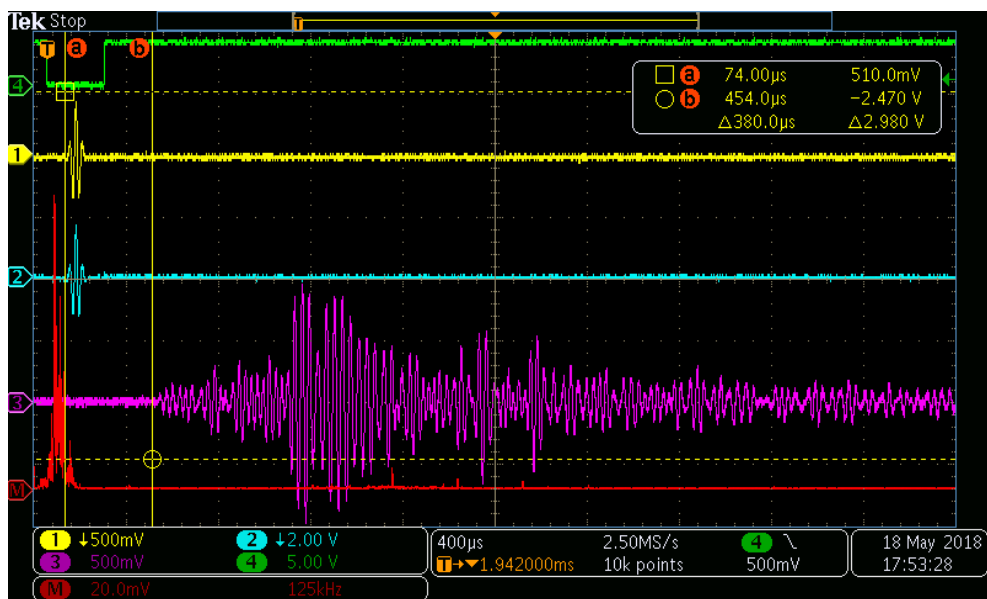
Figur 126. TEK00173 AWG GAUSSDIF@1kHz



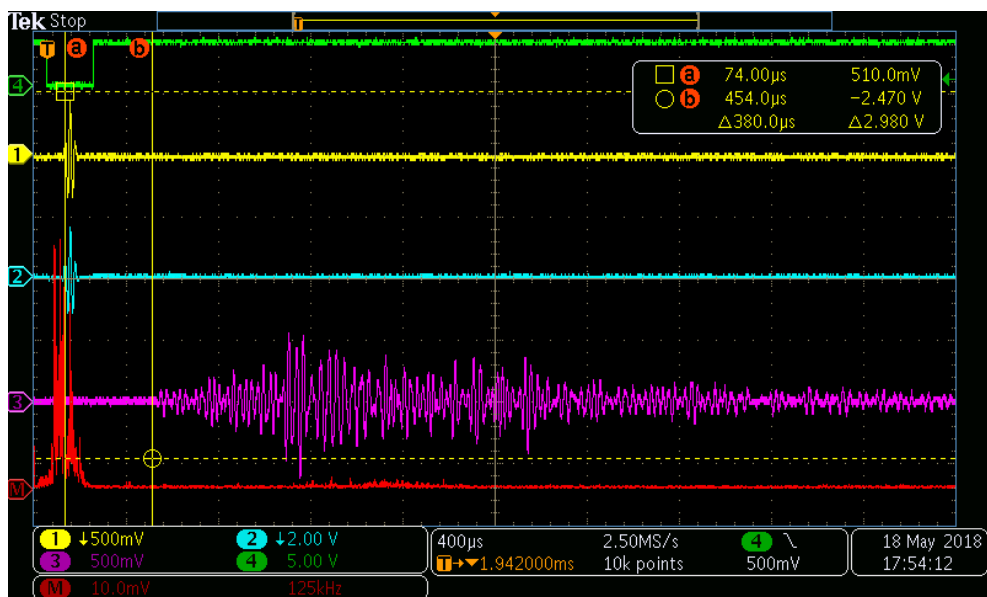
Figur 127. TEK00174 AWG GAUSSDIF@2kHz



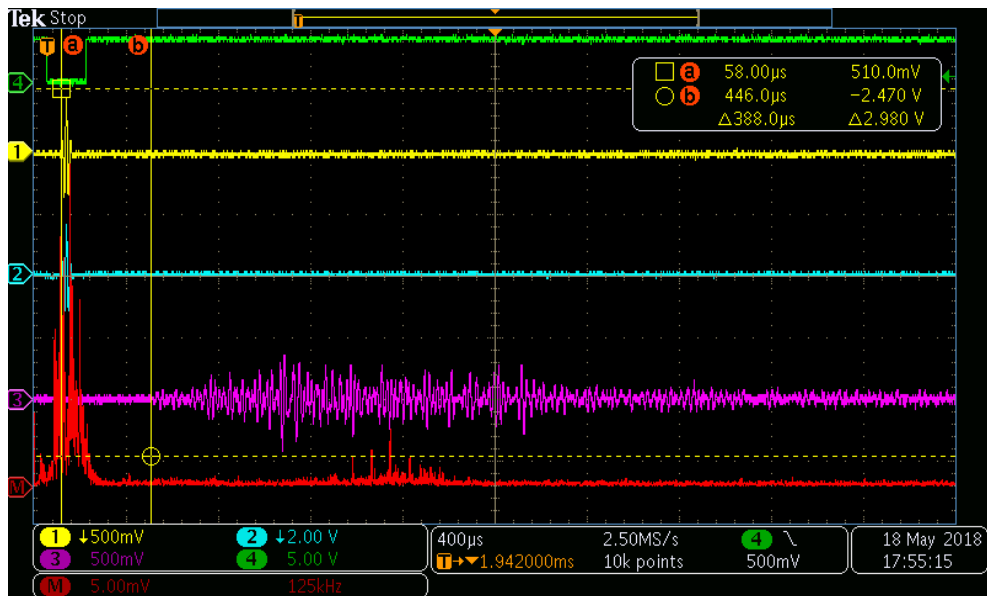
Figur 128. TEK00175 AWG GAUSSDIF@3kHz



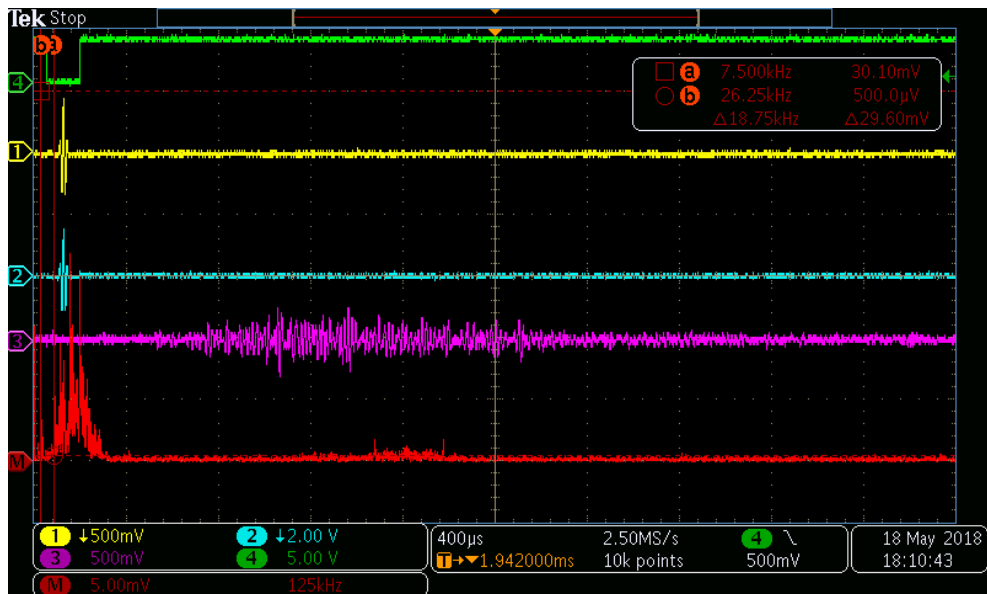
Figur 129. TEK00176 AWG GAUSSDIF@4kHz Optimalt resultat.



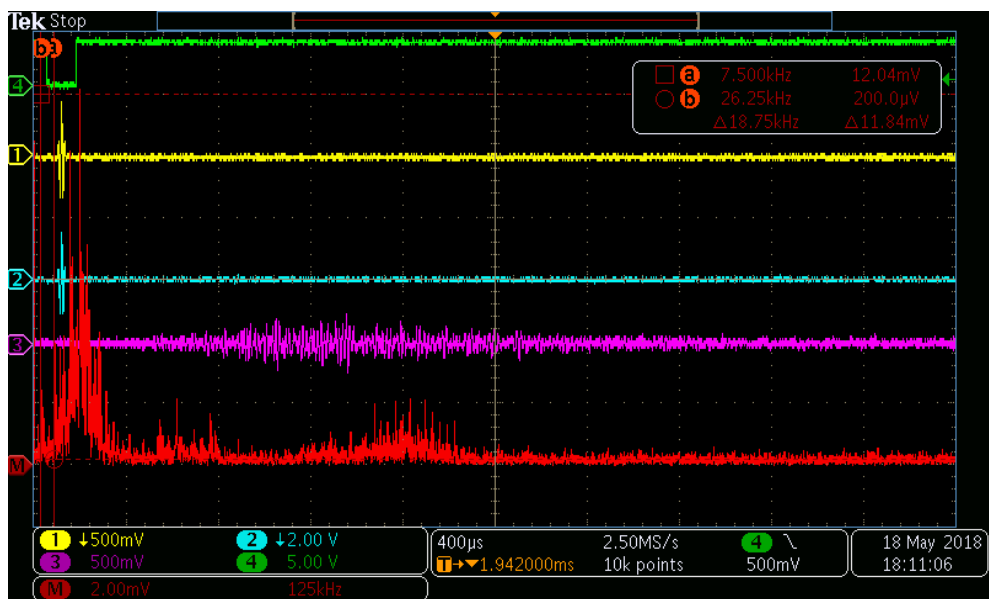
Figur 130. TEK00177 AWG GAUSSDIF@5kHz Optimalt resultat



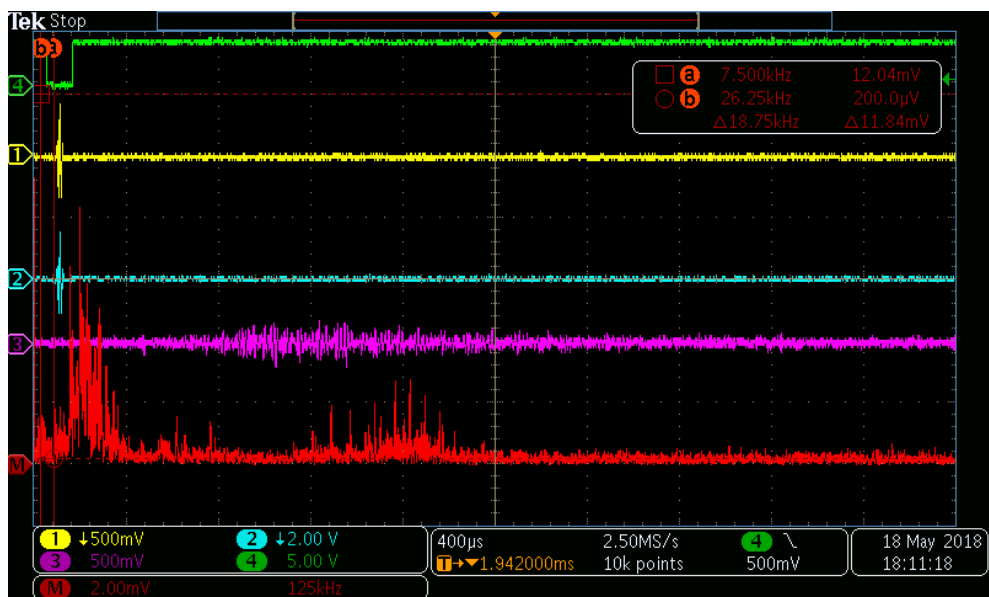
Figur 131. TEK00178 AWG GAUSSDIF@6kHz



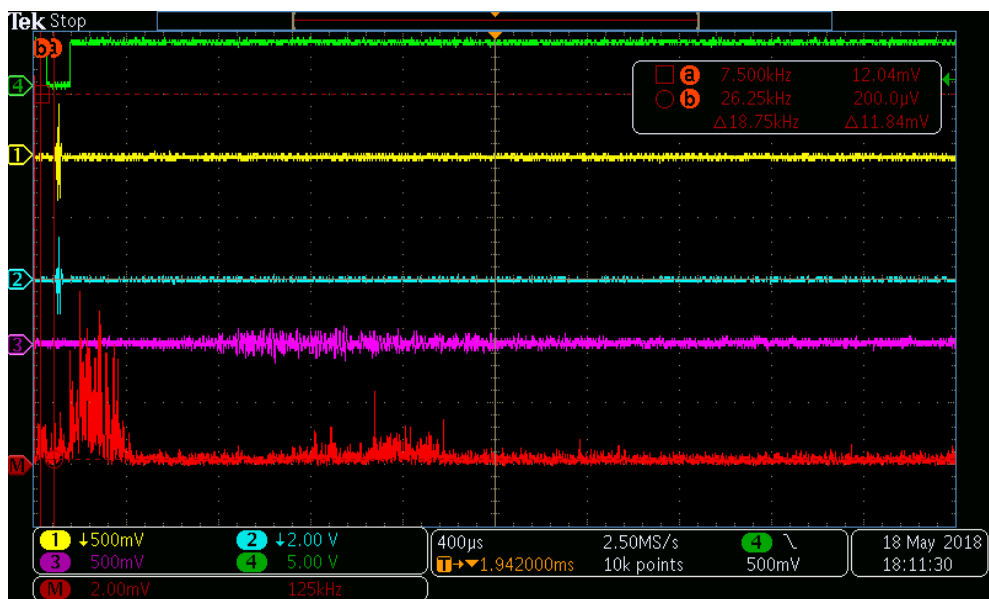
Figur 132. TEK00179 AWG GAUSSDIF@7kHz



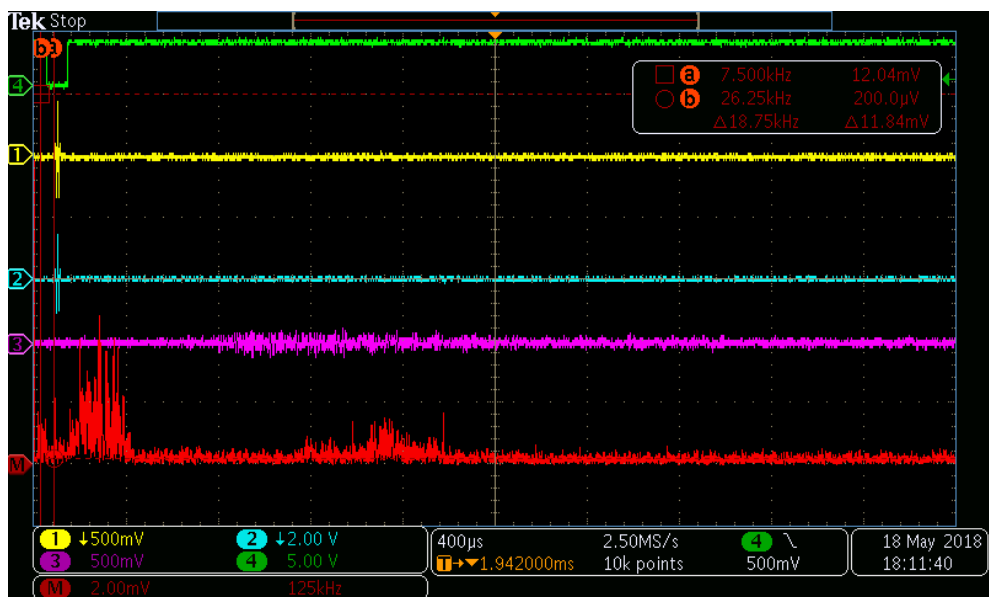
Figur 133. TEK00180 AWG GAUSSDIF@8kHz



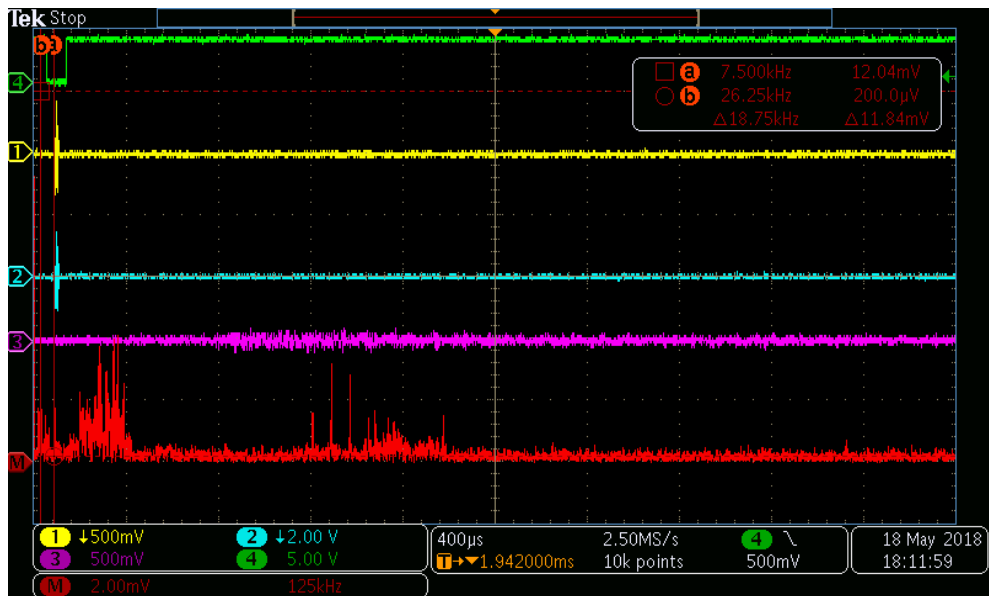
Figur 134. TEK00181 AWG GAUSSDIF@9kHz



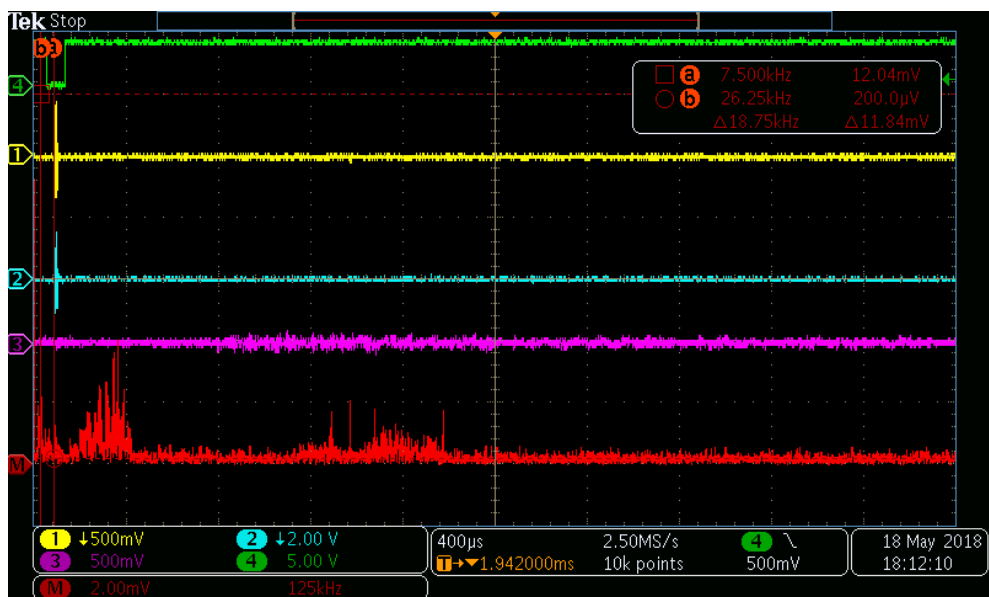
Figur 135. TEK00182 AWG GAUSSDIF@10kHz



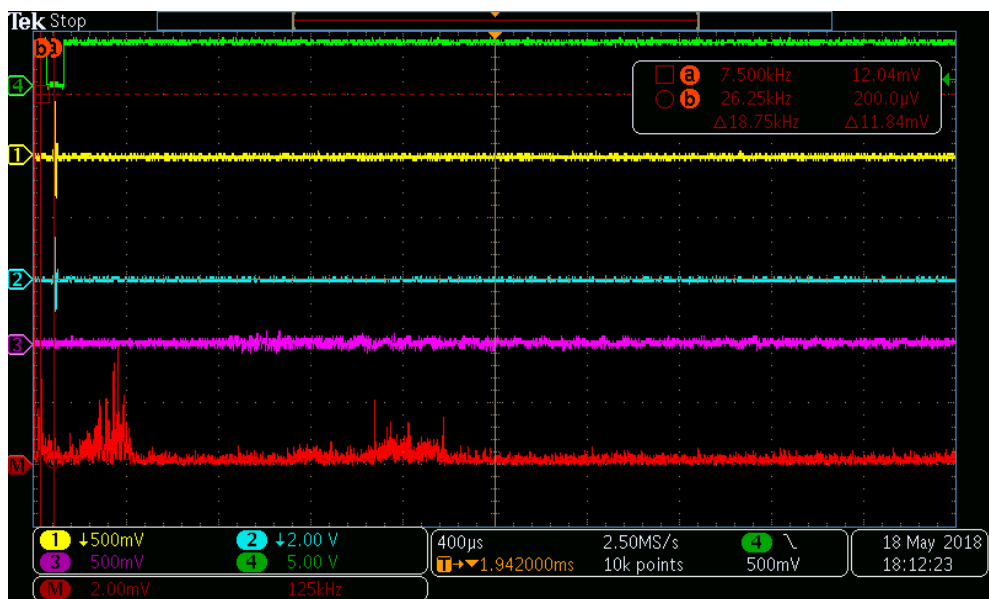
Figur 136. TEK00183 AWG GAUSSDIF@11kHz



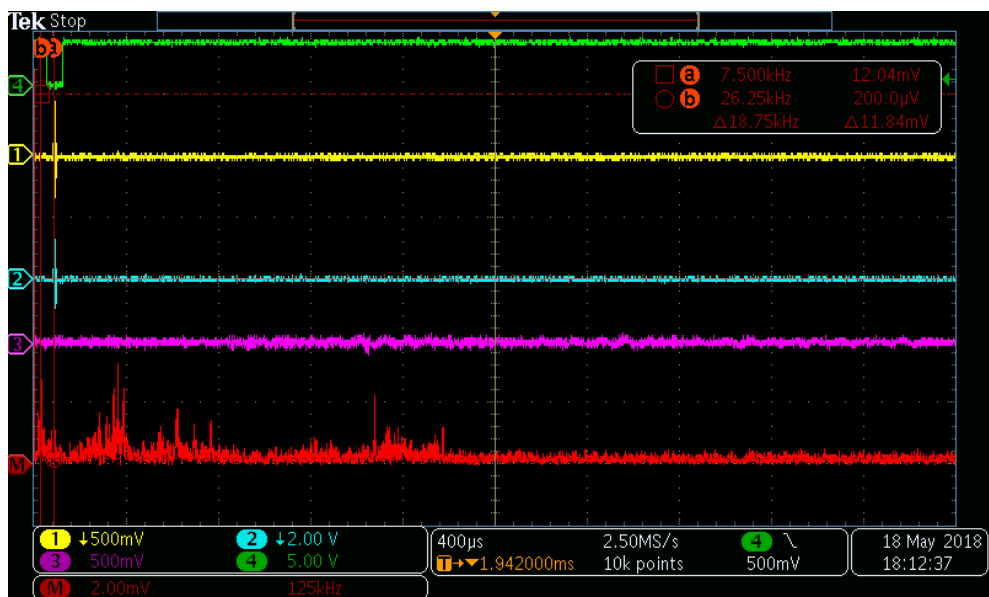
Figur 137. TEK00184 AWG GAUSSDIF@12kHz



Figur 138. TEK00185 AWG GAUSSDIF@13kHz



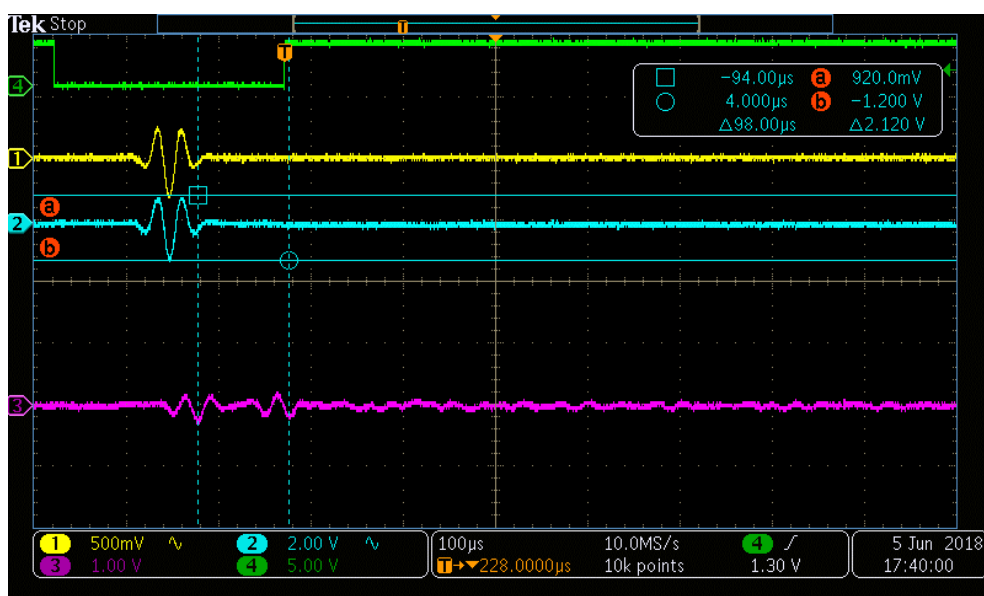
Figur 139. TEK00186 AWG GAUSSDIF@14kHz



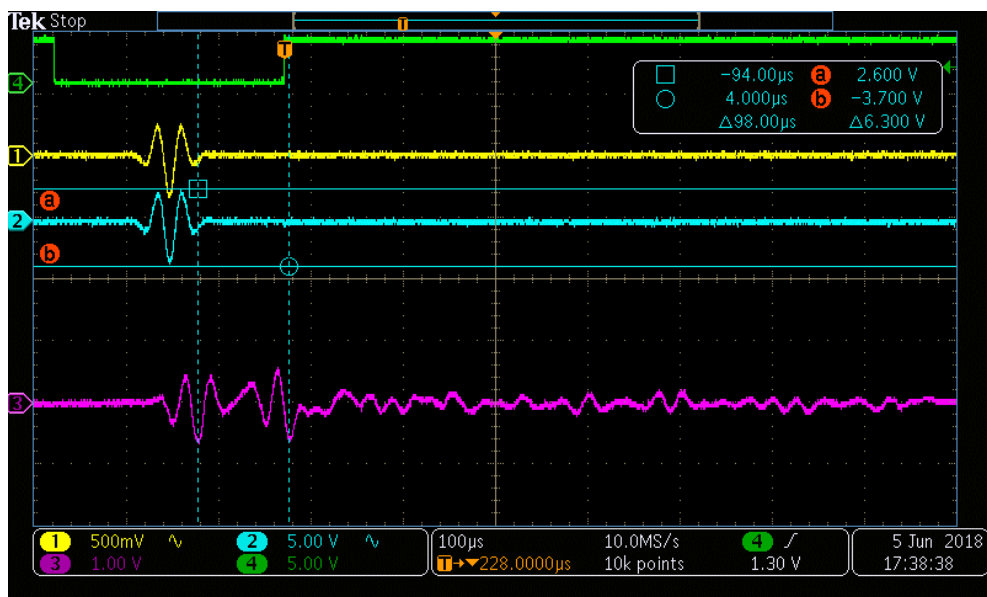
Figur 140. TEK00187 AWG GAUSSDIF@15kHz

5.7 OPTIMAL INSTÄLLNING AV FÖRSTÄRKNING FÖR RITEC FÖRSTÄRKAREN 180705 TEK00191-00193

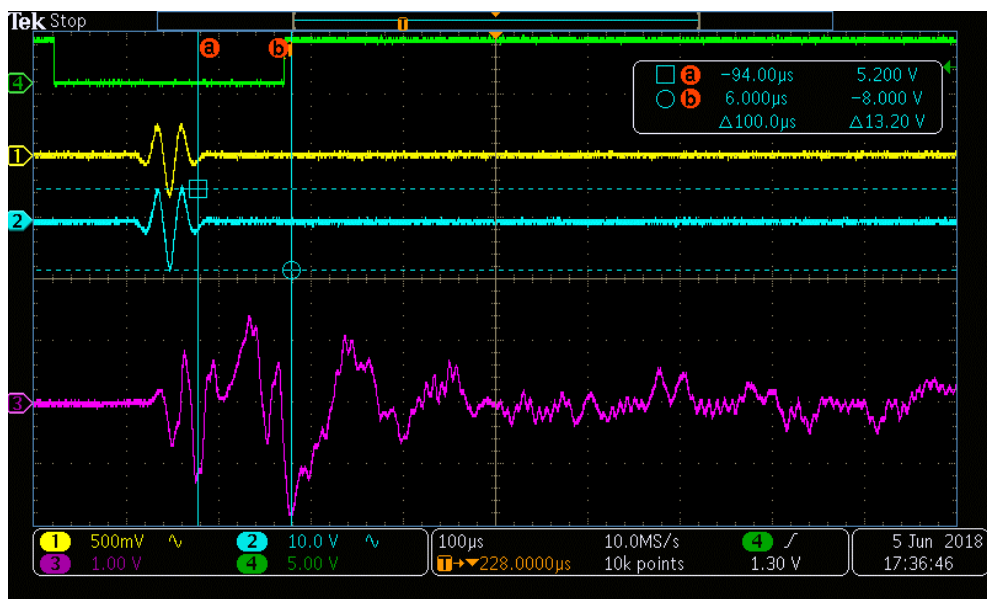
För de transienta mätningarna används en förstärkare av fabrikatet RITEC. Det är en förstärkare som endast kan avge korta pulser – max 2 ms, men i gengäld vid mycket hög spänning - upp till 1500 V. Förstärkningen startas med hjälp av en s.k. gate från vågformsgeneratoren (AWG). Test av utsignal från RITEC med olika förstärkningsnivå 7-9 med 500mVpp utsignal från AWG görs i detta avsnitt. AWG utsignalen är en sex gånger deriverad gausspuls. Observera att den numerära ordningen i TEK-littera är omvänd i denna serie.



Figur 141. TEK00193 RITEG förstärkning 7.0, resulterande spänningsnivå ut till M2502 är 244 Vpp. Kanal 4 är triggfönstret från AWG, kanal 1 är utsignalen från AWG, kanal 2 är monitorsignalen från RITEC (-40dB) och kanal 3 är den mottagna signalen från M2502 förstärkt 500 ggr och med ett 10 kHz högpasfilter.



Figur 142. TEK00192 RITEC förstärkning 8.0 resulterar i en utspänning till M2502 om 612 Vpp. Kanaler som ovan.

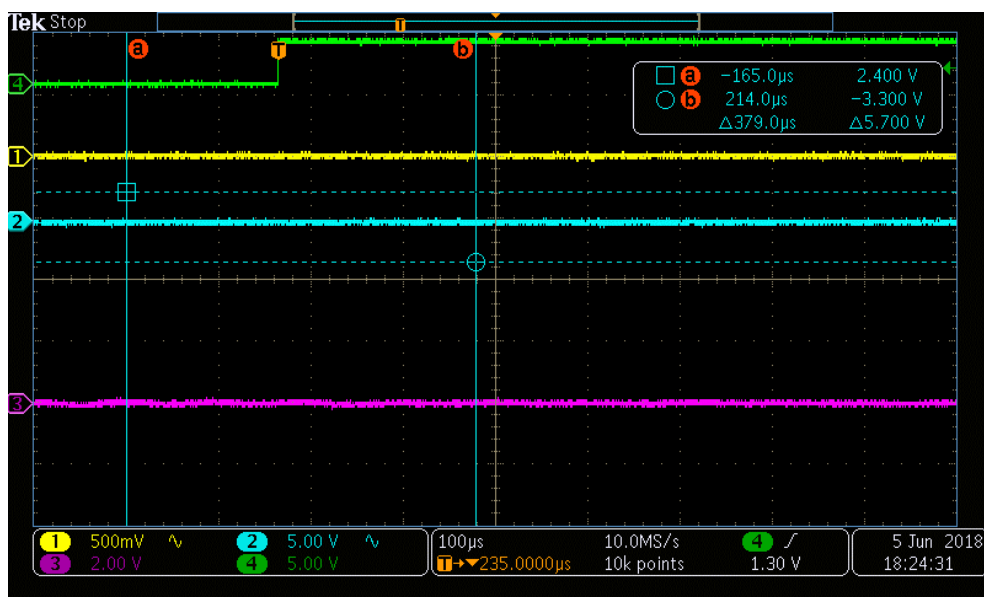


Figur 143. TEK00191 RITEC förstärkning 9.0 resulterar i en utspänning till M2502 om 1320 Vpp. Kanaler som ovan.

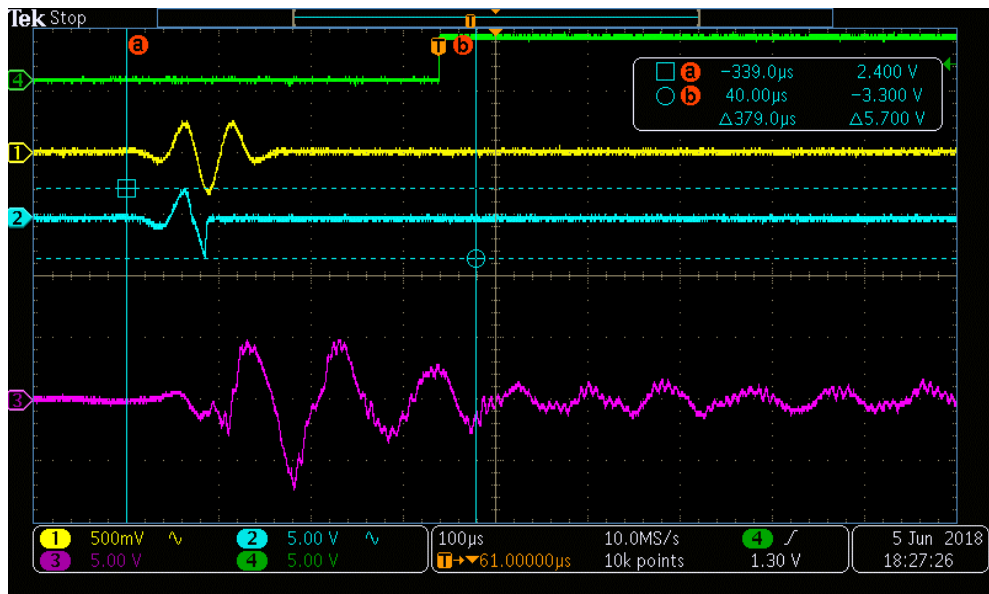
5.8 REFLEKTIONSMÄTNINGAR 180605 TEK00194-00213

Optimal inställning av utmatningsfrekvens för vågformsgeneratoren – AWG med M2502P. AWG (Arbitrary Waveform Generator) skickar ut en godtyckligt programmerad signal om c:a 16000 datapunkter med en frekvens som kan varieras inom vida gränser. I syfte att bestämma vilken frekvensinställning på AWG som ger tydligast reflektion från den rostiga plåten mäts här en serie med olika frekvensinställning upp. Från tidigare mätningar vet vi att det tar 384 us för ljudvågor att passera genom hela provkroppen. Det måste därför ta ungefär samma tid för ljudvågen att reflekteras mot den rostiga plåten som befinner sig exakt mitt i provkroppen. Då provkroppen är 1200 mm lång blir ljudhastigheten i den aktuella betongen 3125 m/s.

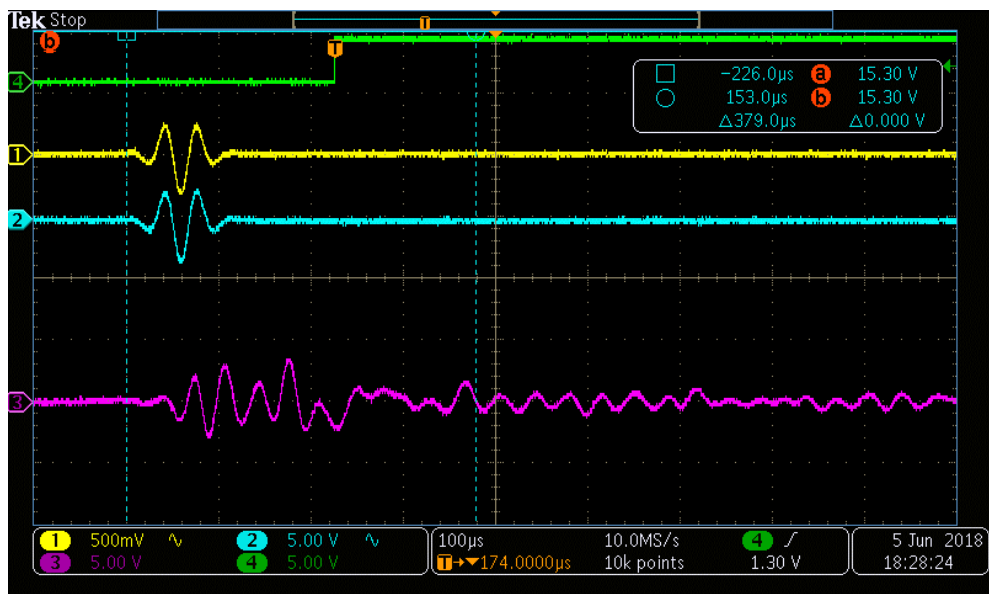
Reflektionsmätning mot den korroderade sidan med M2502P (kompressionsvågor), Ritec (8.0), AWG X Hz, 500mVpp ut. Förförstärkare 5113 250 / 500 ggr 10kHz Högpasfilter.



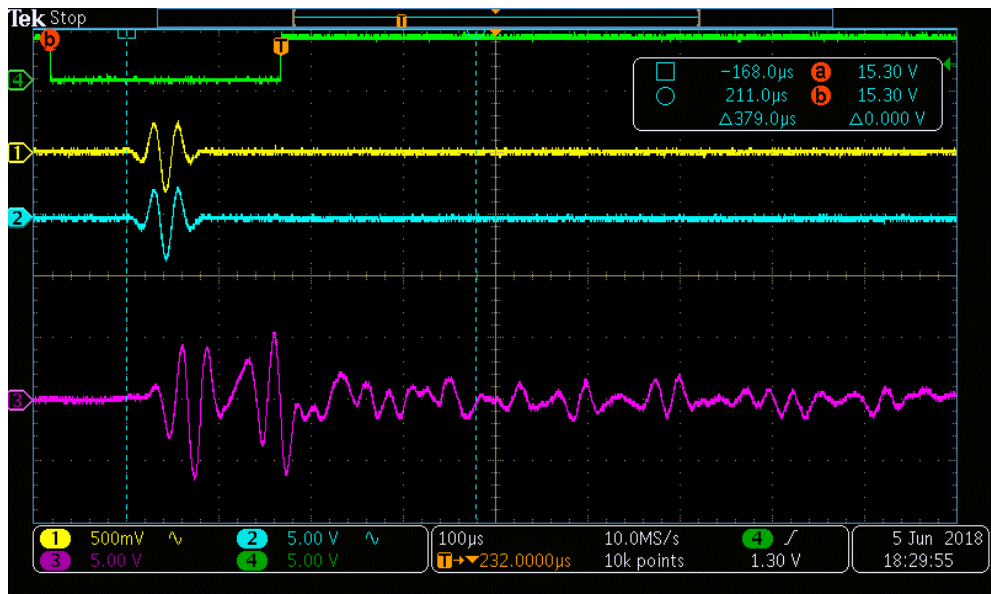
Figur 144. TEK00194. AWG frekvens 1 kHz. Ingen synbar mottagen signal i kanal 3, vilket är rimligt eftersom ingen signal tycks ha skickats ut.



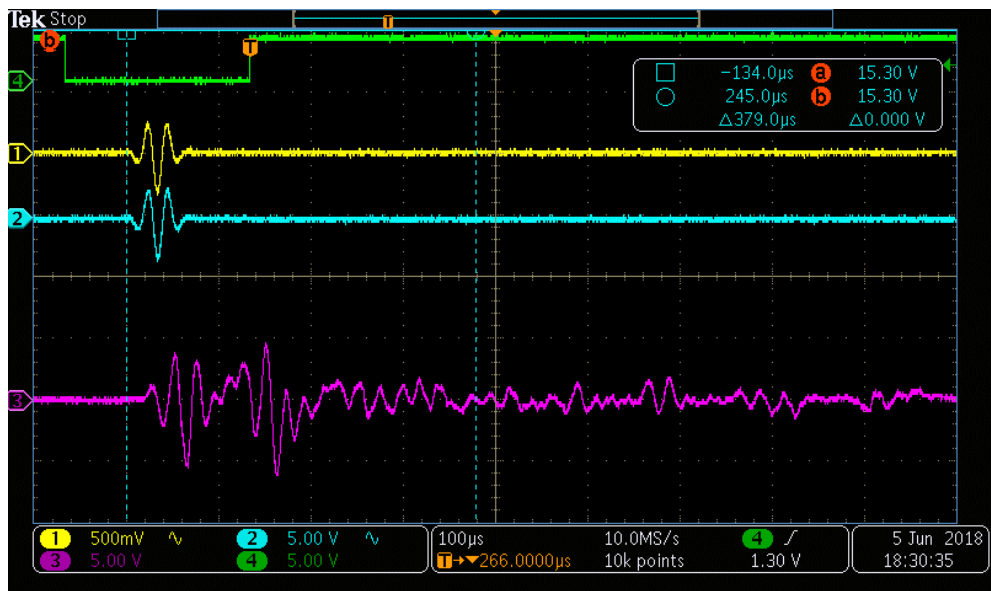
Figur 145. TEK00195. AWG frekvens 2 kHz. Utsignal från RITEC distorderad (Kanal 2). Mottagen signal ser inte trovärdig ut beroende på den tvära flanken i den utsända signalen som genererar högfrekvens. Den högra vertikala cursorn (turkos) är placerad där reflexen från tätplåten bör anlända.



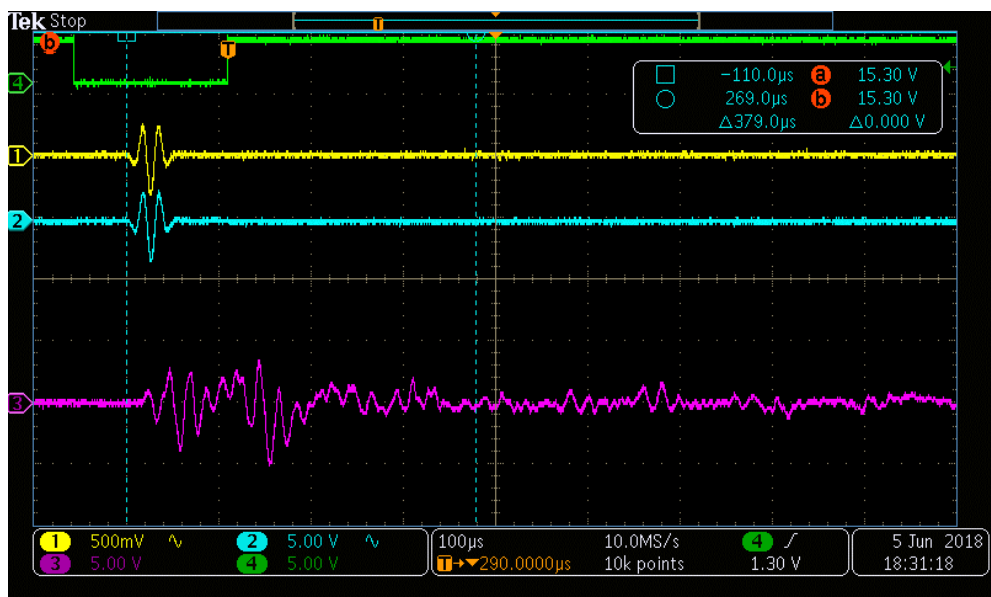
Figur 146. TEK00196. AWG frekvens 3 kHz. Signalerna börjar se sammanhängande ut, men ingen reflex från den korroderade plåten framträder.



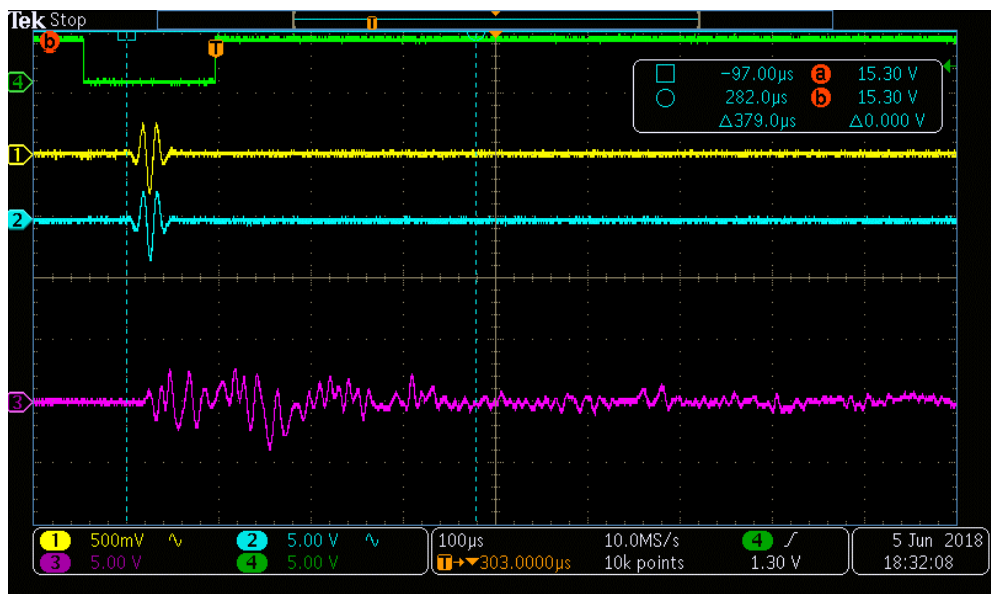
Figur 147. TEK00197. AWG frekvens 4 kHz. Här börjar en andra transient framträda i den mottagna signalen. Då den kommer alltför tidigt för att vara en reflex från plåten är det troligen en signal som gått genom den aluminiumplåt, från sändargrupp till mottagargrupp, och som är fäst på betongens kortsida och som tjänar som fäste för alla transducers som används i försöken. Detta ger upphov till tanken att denna plåt kanske inte var en så god idé. Fenomenet kommer att bli föremål för senare utredning.



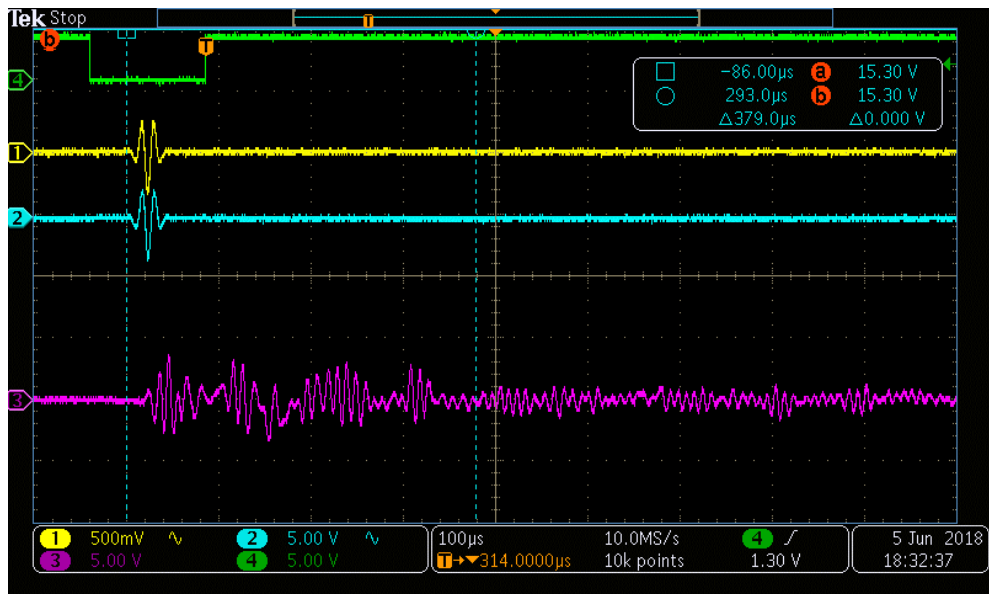
Figur 148. TEK00198. AWG frekvens 5 kHz.



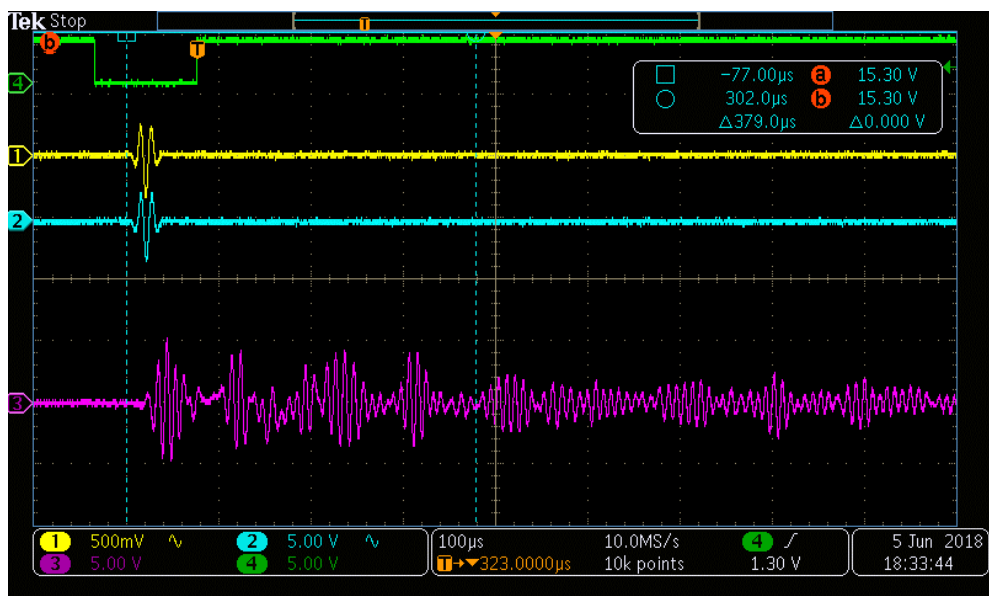
Figur 149. TEK00199. AWG frekvens 6 kHz



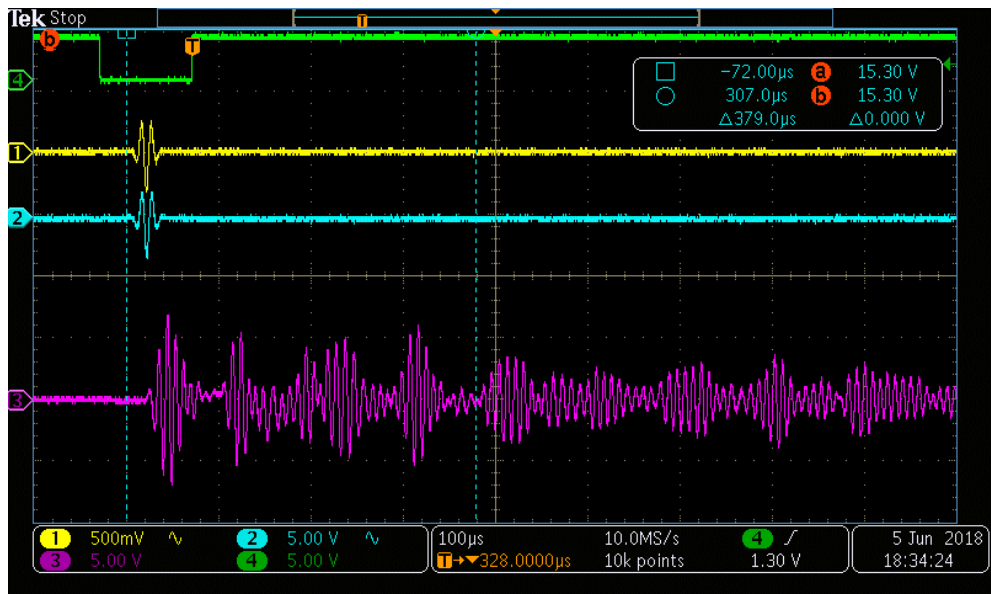
Figur 150. TEK200. AWG frekvens 7 kHz.



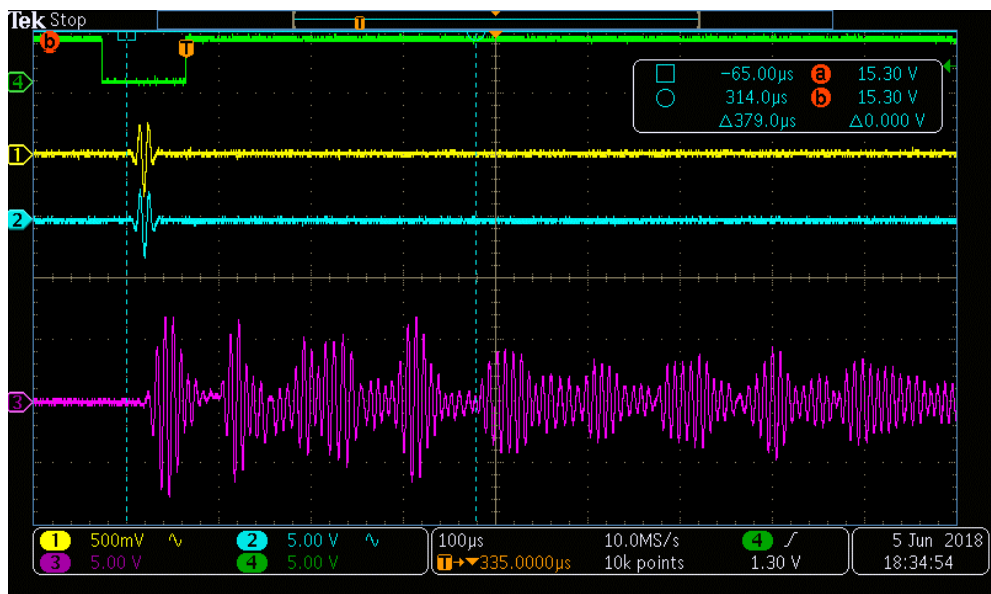
Figur 151. TEK00201. AWG frekvens 8 kHz. Nu framträder flera grupper av signaler innan den tid vid vilken reflexen från plåten borde anlända.



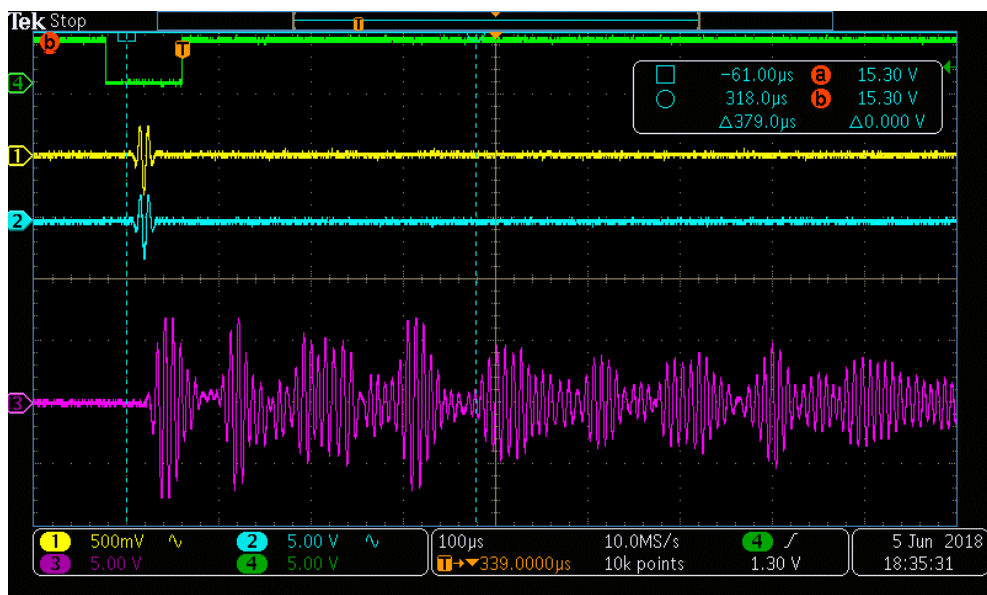
Figur 152. TEK00202 AWG frekvens 9 kHz. Här börjar en tydlig reflex vid förväntad tid c:a 380 µs, att framträda.



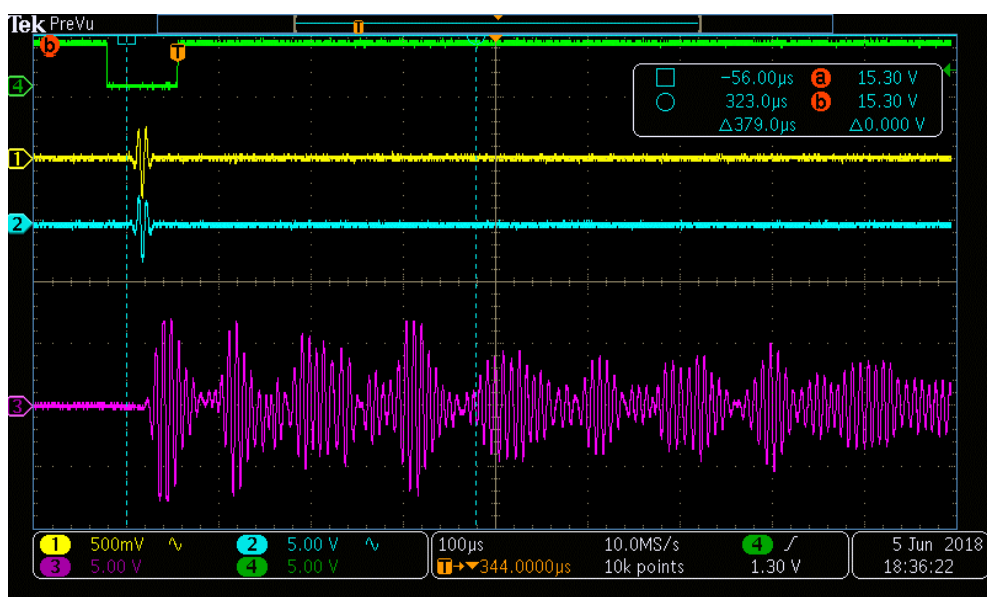
Figur 153. TEK00203. AWG frekvens 10 kHz



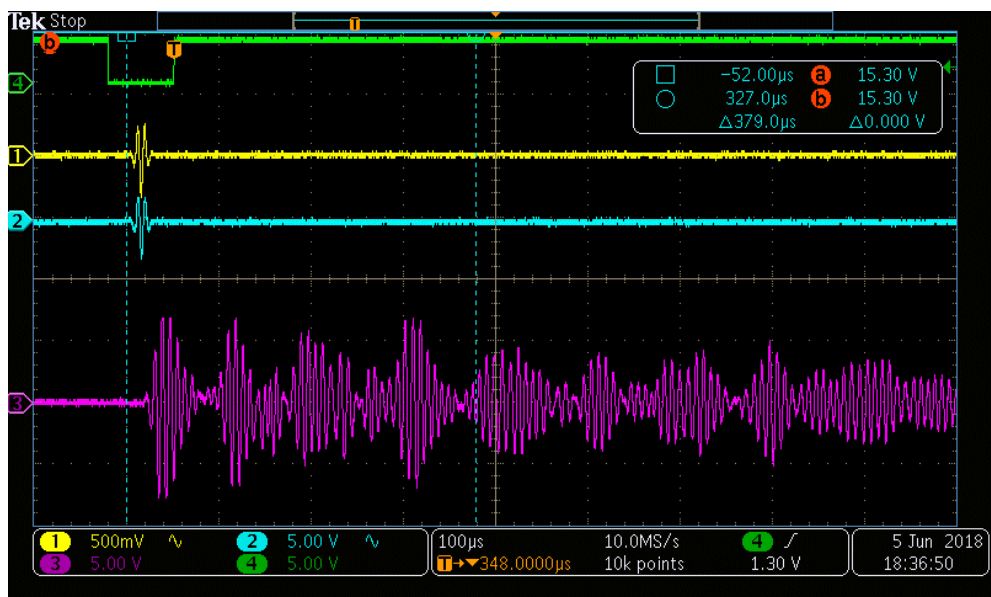
Figur 154. TEK00204. AWG frekvens 11 kHz



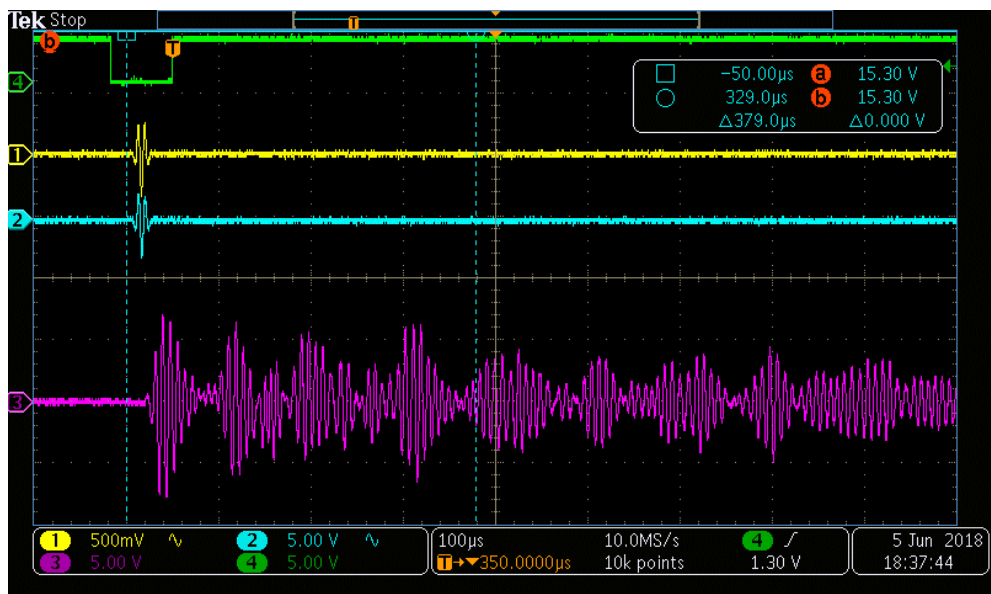
Figur 155. TEK00205 AWG frekvens 12 kHz, frekvenstopp i resulterande spektra är 105 kHz. Den uppgivna frekvensen för A1220P är 100 kHz.



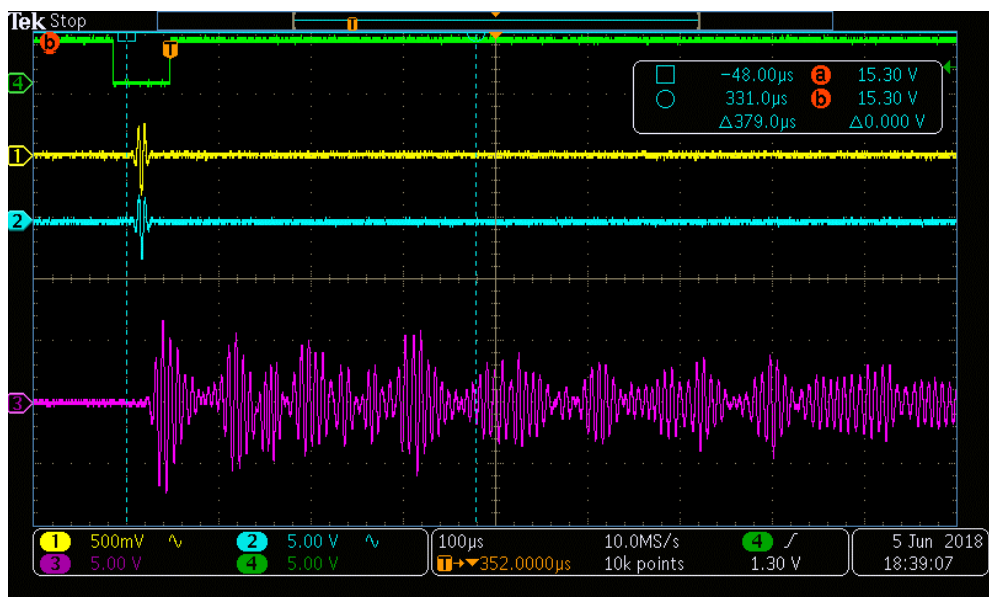
Figur 156. TEK00206. AWG frekvens 13 kHz.



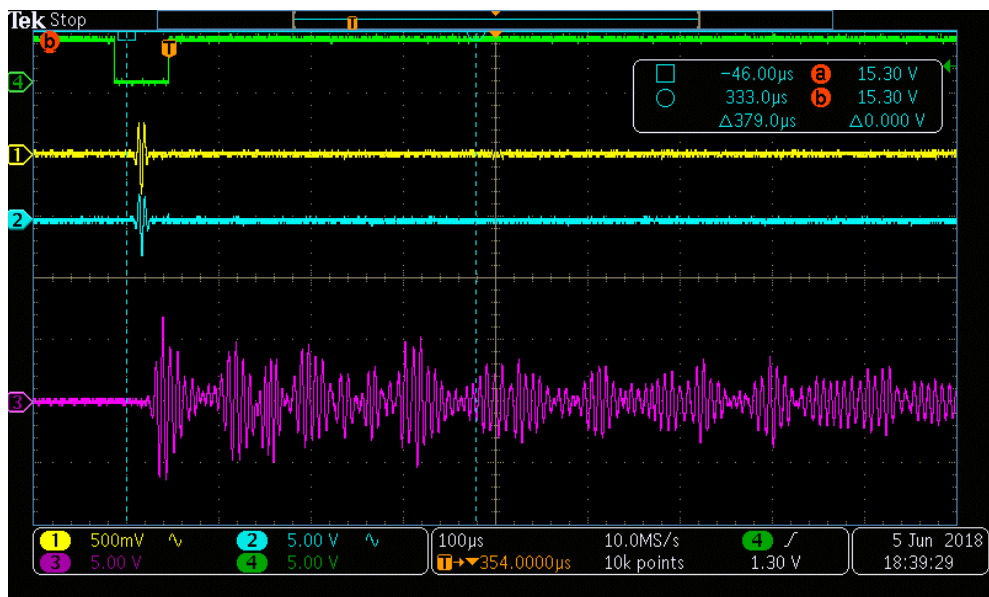
Figur 157. Tek00207. AWG frekvens 14 kHz



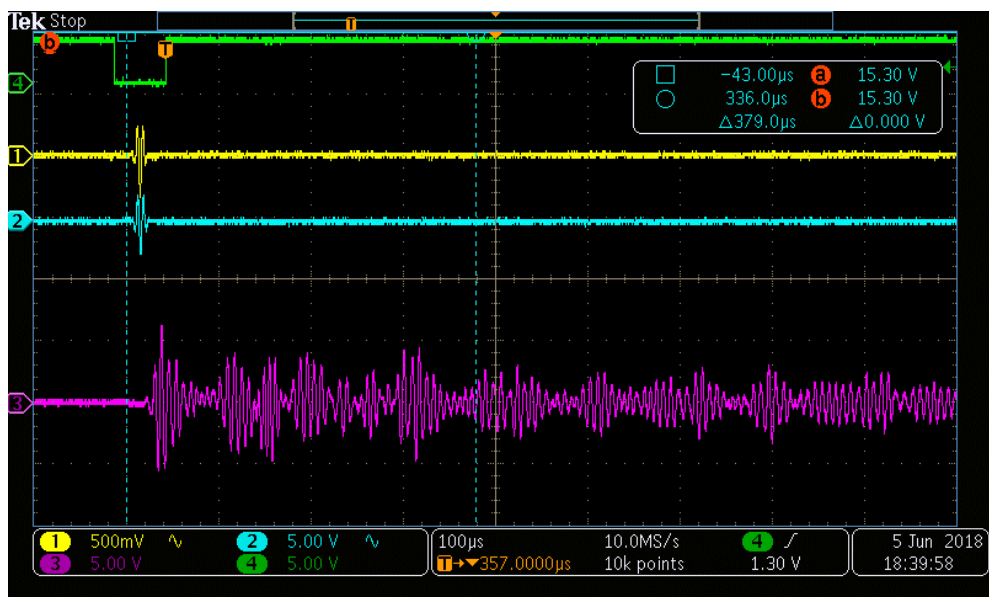
Figur 158. Tek00208. AWG frekvens 15 kHz



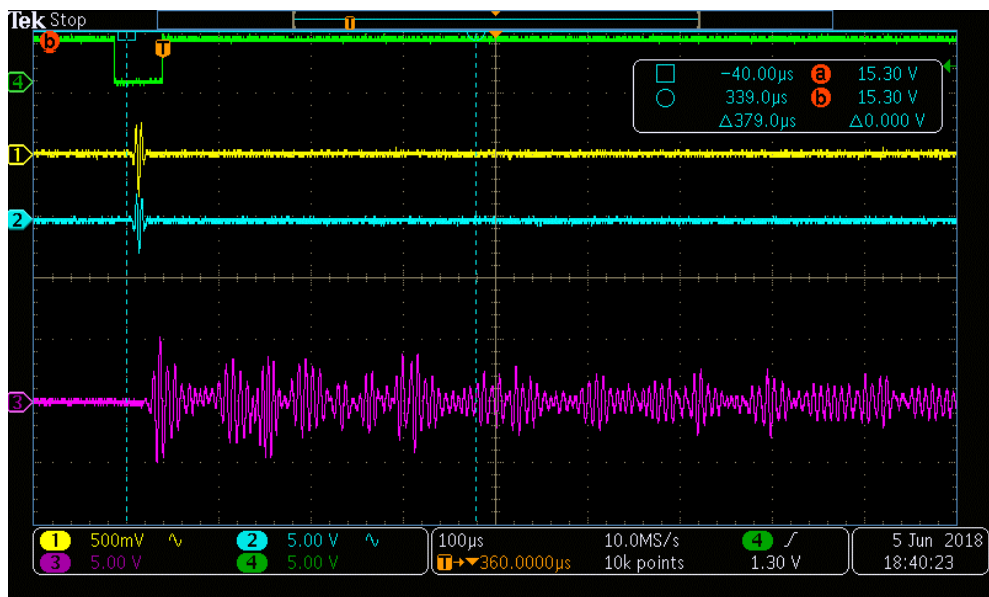
Figur 159. Tek00209 AWG frekvens 16 kHz



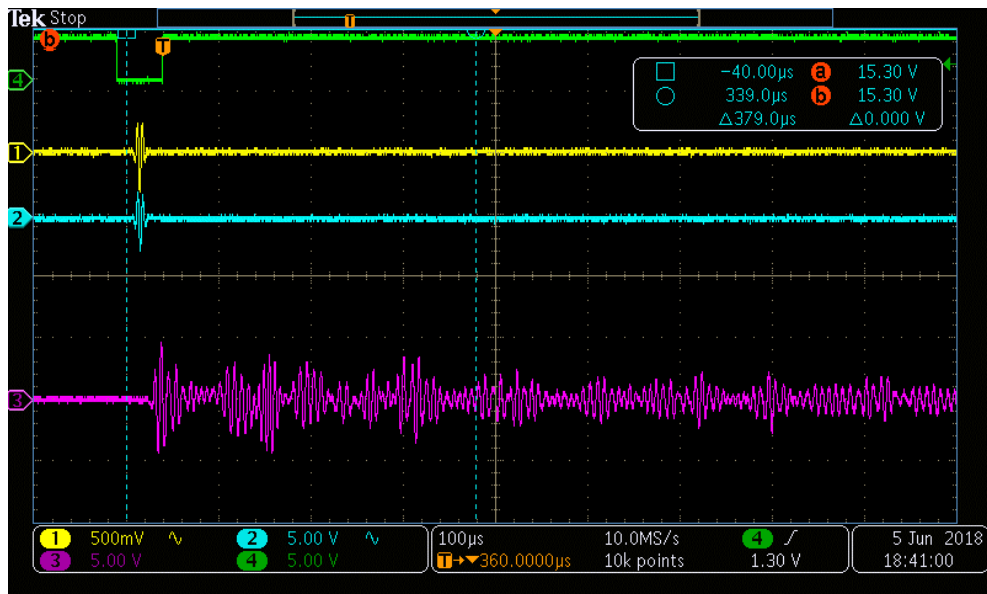
Figur 160. Tek 00210. AWG frekvens 17 kHz. Den förväntade signalen börjar försvagas.



Figur 161. Tek00211. AWG frekvens 18 kHz



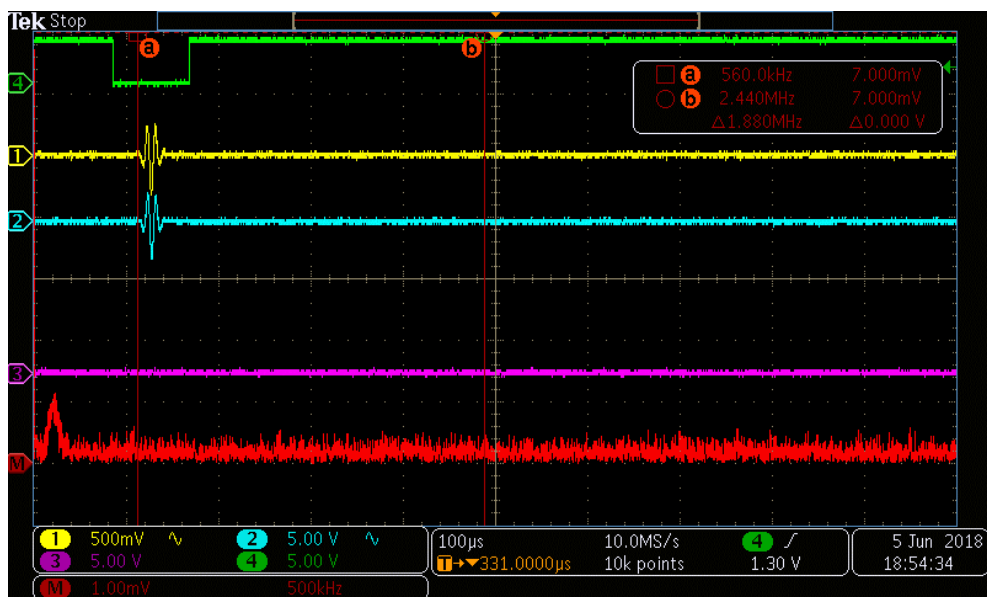
Figur 162. Tek00212. AWG frekvens 19 kHz



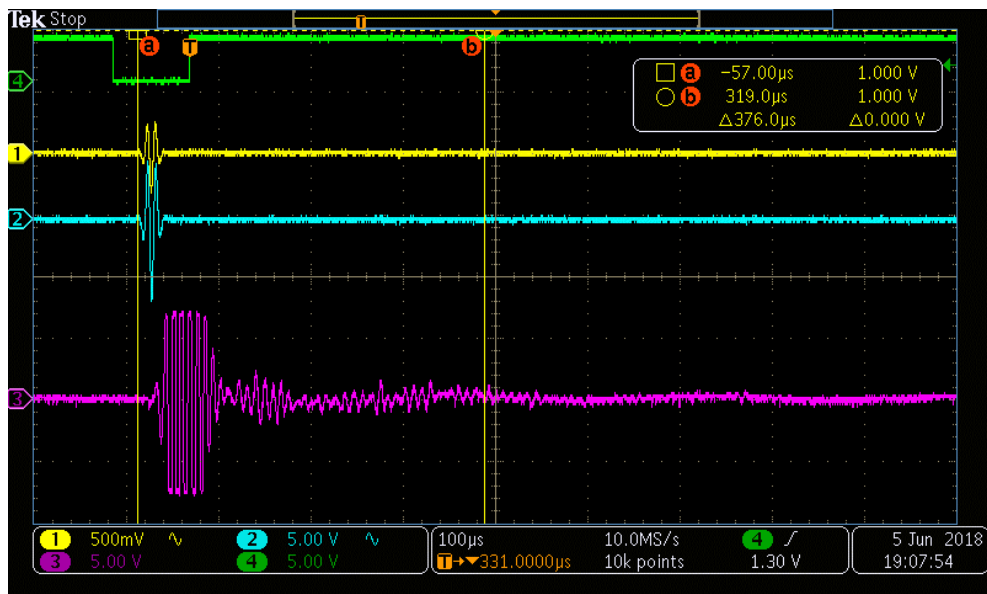
Figur 163. Tek00213. AWG frekvens 20 kHz. Resultande frekvenstopp i mottaget spektrum är 165 kHz. Den förväntade reflexen är nu märkbart svagare än för AWG-frekvensintervallet 10-14 kHz.

5.9 KONTROLLMÄTNINGAR OM STÖRNINGAR UPPSTÅR I FÄSTPLATTAN 180705 TEK00215-00215

Efter denna mätserie utfördes några kontrollmätningar. Den första med A1220P 24 element i luften för att utröna om den rika förekomsten av signalpaket innan det förväntade kan tänkas uppstå inuti sensorn. Därefter pressades A1220 mot ovansidan på provkroppen där en fri betongyta finns tillgänglig. Föregående mätserie visade att optimal AWG-frekvens ligger i intervallet 10-14 kHz. För kontrollmätningarna valdes därför AWG frekvensen 12 kHz. Slutligen monteras en likadan aluminiumplatta, som den som är ingjuten i betongen, mot A1220 sensorer.



Figur 164. Tek00214. AWG frekvens 12 kHz. Då sensorerna mynnar i luften måste all eventuell mottagen signal ha uppstått inuti elementhållaren A1220. Eftersom kanal 3 är helt stilla sker ingen överhörning inuti A1220. Då återstår att de tidiga reflexerna uppstår i betongen mellan ytan och den korroderade plåten eller att de skapas i den aluminiumplåt som är fastgjuten i betongprovkroppens gavel.



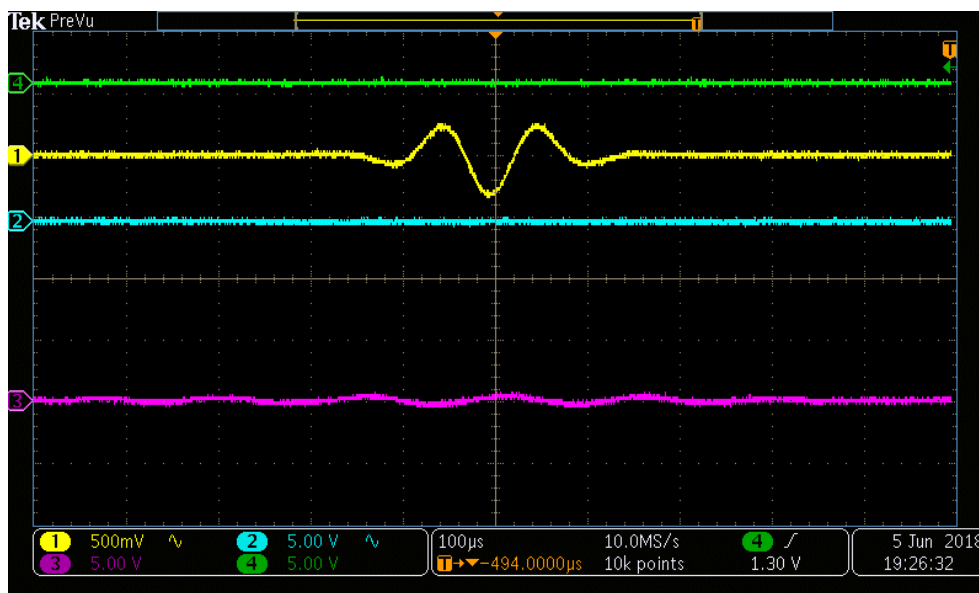
Figur 165. Tek00215. AWG frekvens 12 kHz. RITEC förstärkning 9.0 (1150 Vpp). Mottagarförstärkning 5113 är 10.000 ggr. Man ser en kraftig direktsignal som sannolikt går från de 12 sändarelementen genom betongen till de tolv mottagarelementen. Därefter kommer några andra signaler, men de är svaga jämfört med dem som tidigare registrerats, med A1220 monterad mot den ingjutna aluminiumplåten.

5.10 OPTIMAL INSTÄLLNING AV UTMATNINGSFREKVENNS FÖR VÅGFORMSGENERATORN MED M2502 S TEK00216-00223

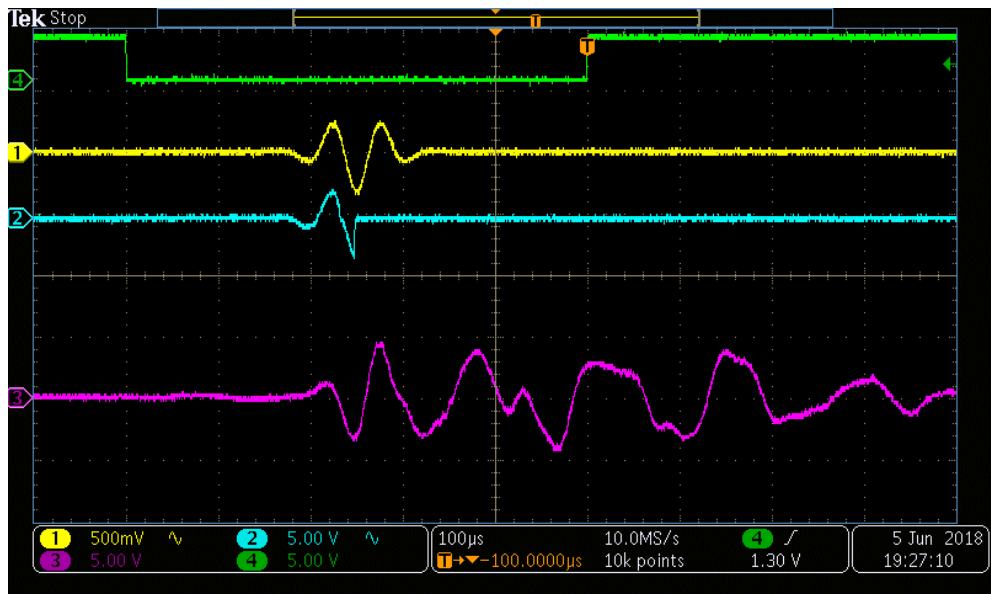
Det finns två sensortyper till M2502. Förutom den ovan använda M2502P (kompressionsvågor) – 100 kHz) finns det en M2502 S (skjuvvågor – 55 kHz). I syfte att bestämma vilken frekvensinställning på AWG som ger tydligast reflektion från den rostiga plåten med skjuvvågssensorn mäts här en serie med olika frekvensinställning upp. Man kan vänta sig att ljudhastigheten för skjuvvågor skall vara ungefär halva kompressionsvåghastigheten. En reflex från stålplåten bör därför ankomma efter c:a 780 μ s.

Reflektionsmätning mot den korroderade sidan med M2502 S (skjuvvågor), Ritec (8.0), AWG 500mVpp ut.

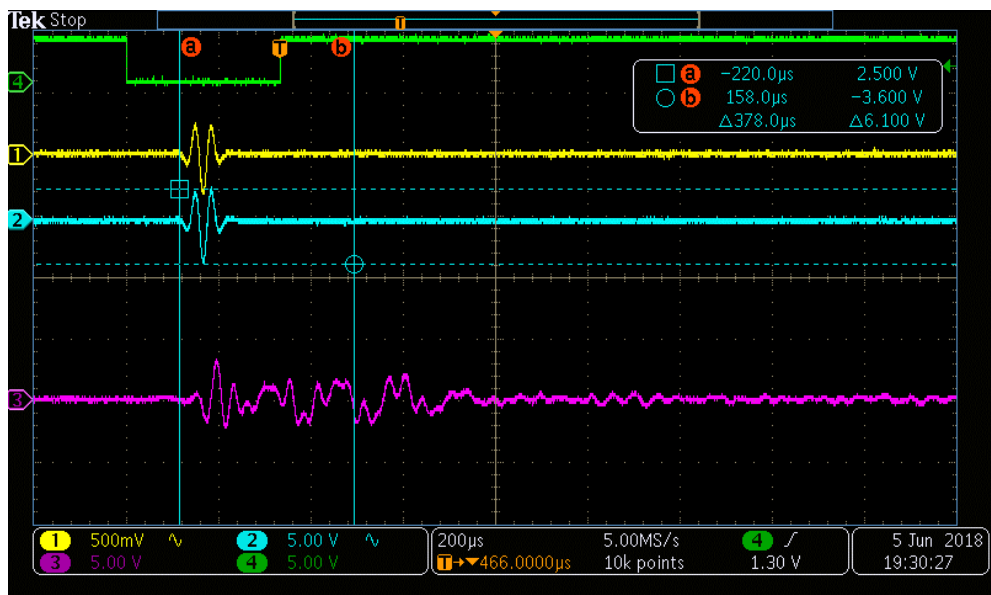
Förförstärkare 5113: 500 ggr 10kHz Högpasfilter.



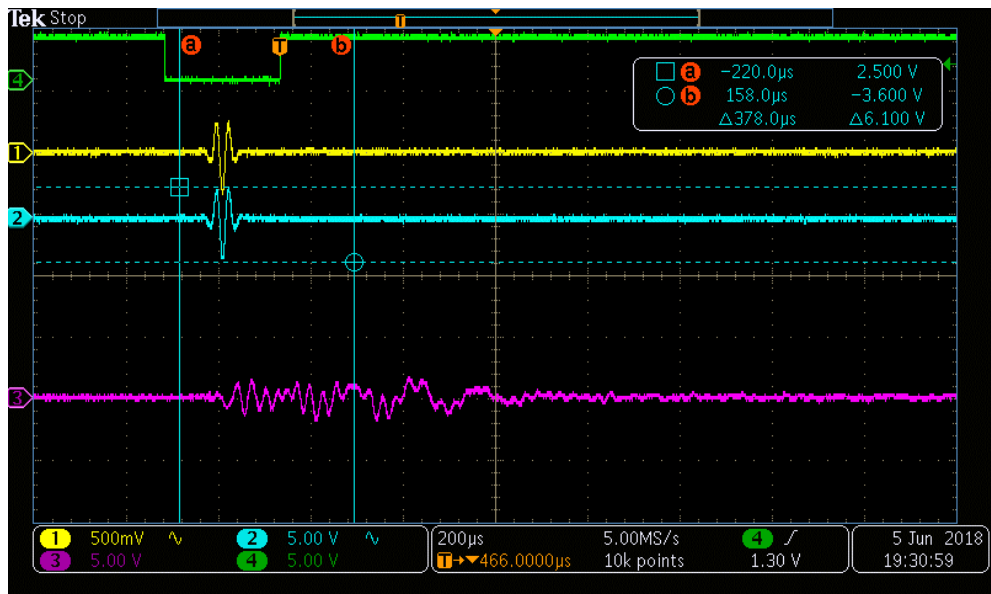
Figur 166. Tek00216. M2502S (skjuvvåg) Nominellt 55 kHz. AWG frekvens 1 kHz.



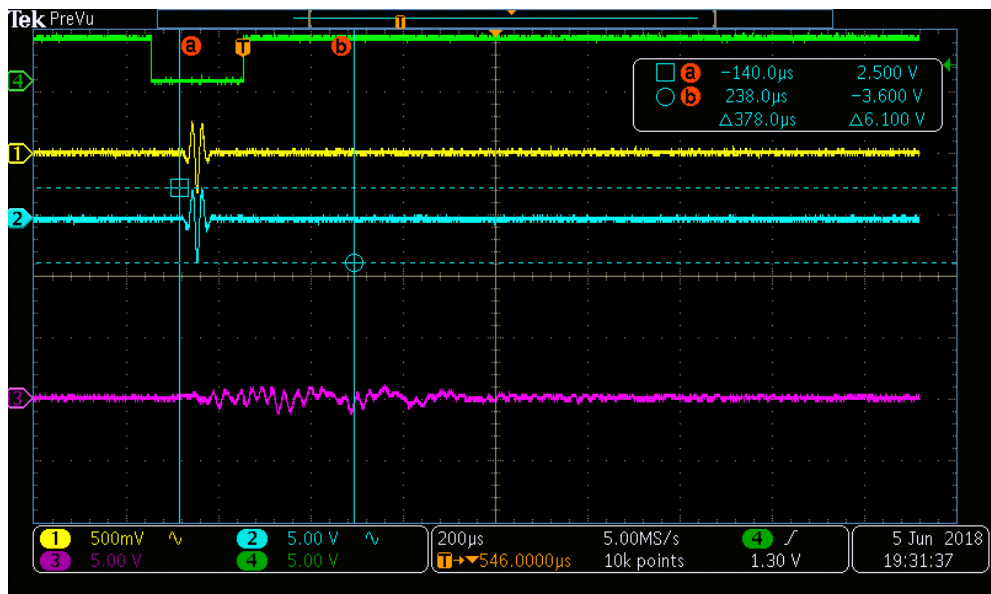
Figur 167. Tek00217. AWG frekvens 2 kHz. Signal börjar framträda. Den tidigare distorsionen av utsignalen från RITEC förstärkaren framgår i kanal 2 (turkos). Den orsakas av att frekvensen ligger under förstärkarens nedre gränshfrekvens.



Figur 168. Tek00218. AWG frekvens 3 kHz.

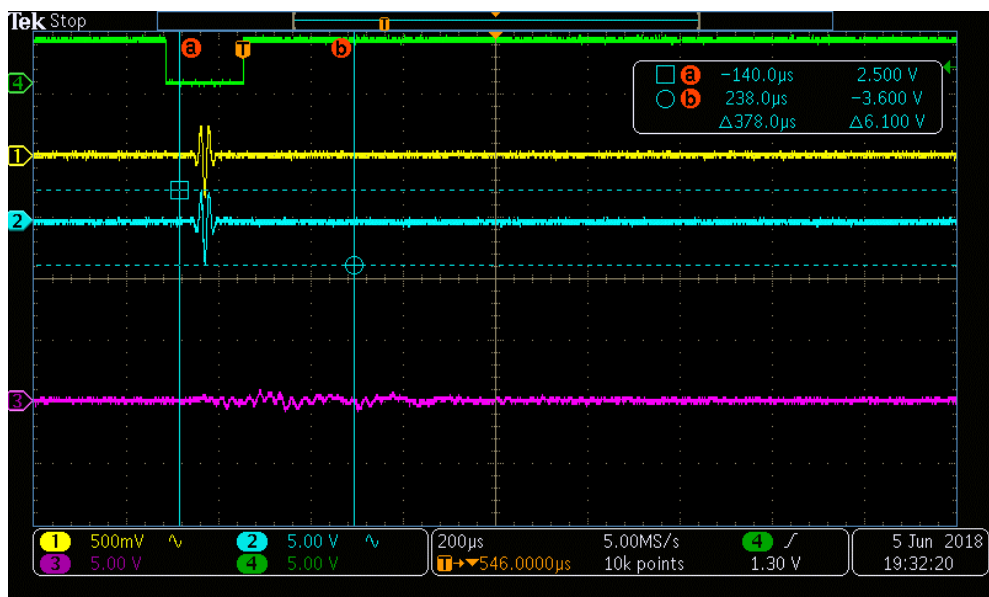


Figur 169. Tek00219. AWG frekvens 4 kHz.

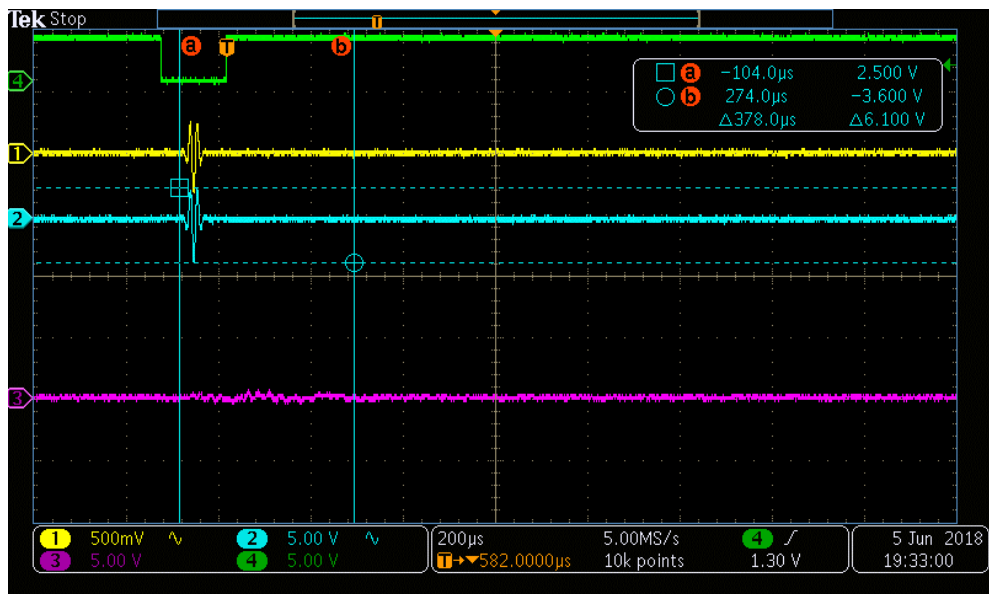


Figur 170. Tek00220. AWG frekvens 5 kHz. Mottagen signal försvagad.

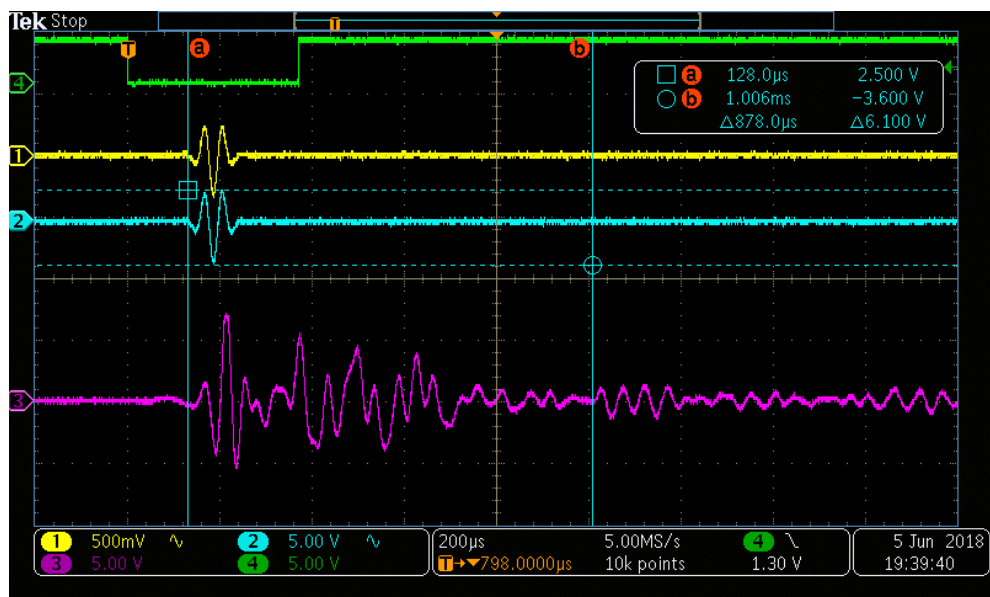
För skjuvvågor verkar signalen bli starkast och ha bäst upplösning mellan 2 och 4 kHz.



Figur 171. Tek00221. AWG frekvens 6 kHz. Signalen kraftigt försvagad.



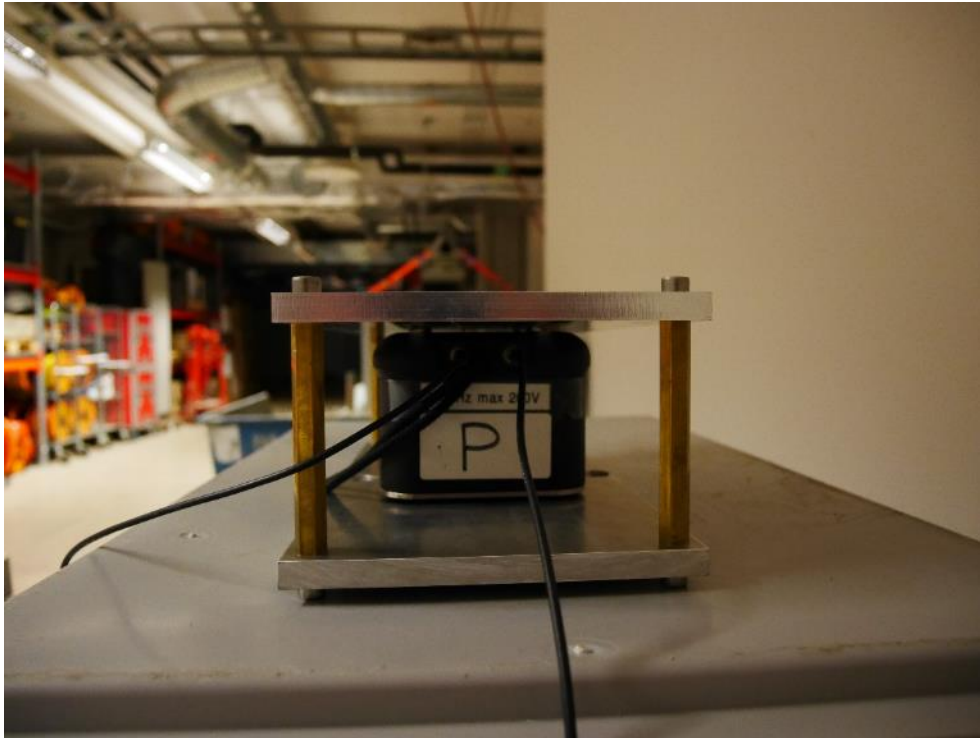
Figur 172. Tek00222. AWG frekvens 7 kHz. Mottagen signal har nästan upphört. Serien avbröts.



Figur 173. Tek00223. AWG frekvens 2.7 kHz. Den mottagna signalens frekvensinnehåll är då 22.5 kHz. En möjlig reflex från stålplåten framträder vid 878 us. 878 us skulle ge en skjuvvågshastighet i betongen uppgående till 1367 m/s.

5.11 TESTER MED M2502 P OCH S INFÖR ATT FÄSTPLATTAN DEMONTERAS TEK00224-00228

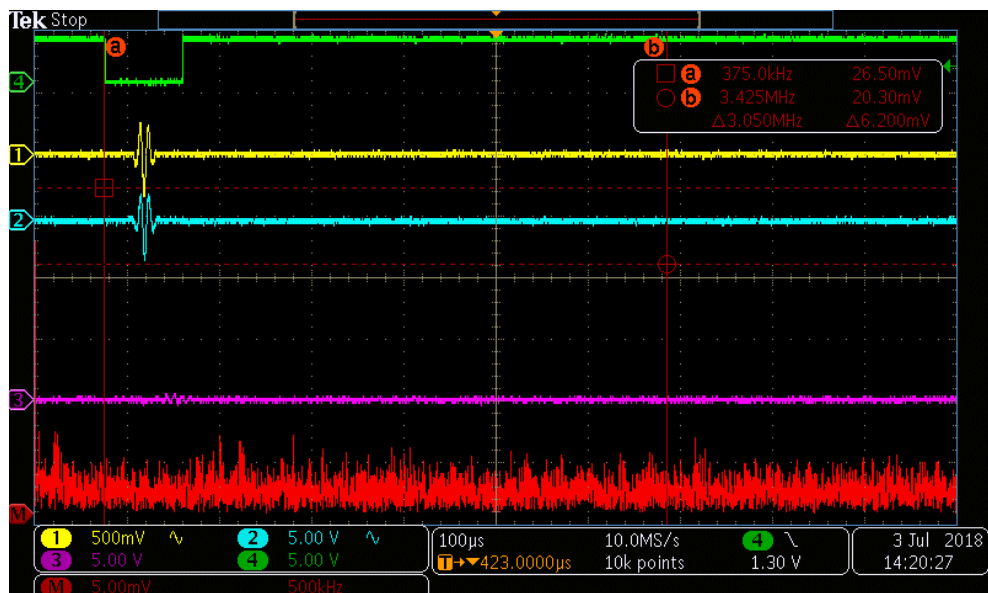
Detta avsnitt är en fortsättning på avsnitt 5.9. Skillnaden är att det här tillkommer att en aluminiumplatta med samma geometri som den ingjutna pressas mot sensorn i syfte att se vilka signaler som uppstår i plattan.



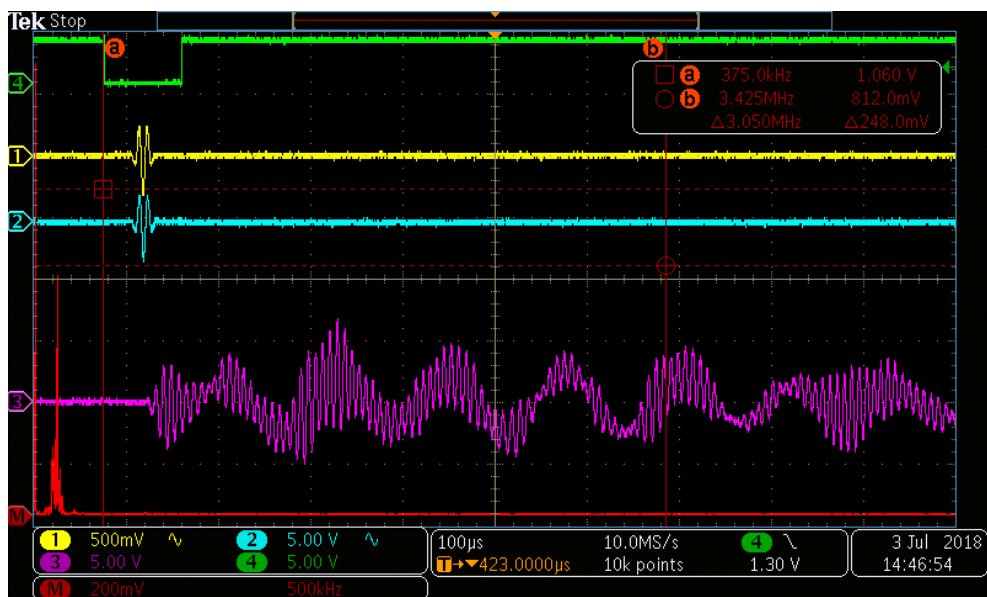
Figur 174. M2502P testas mot en lös aluminiumplatta i syfte att förstå hur plattan påverkar de mottagna signalerna.



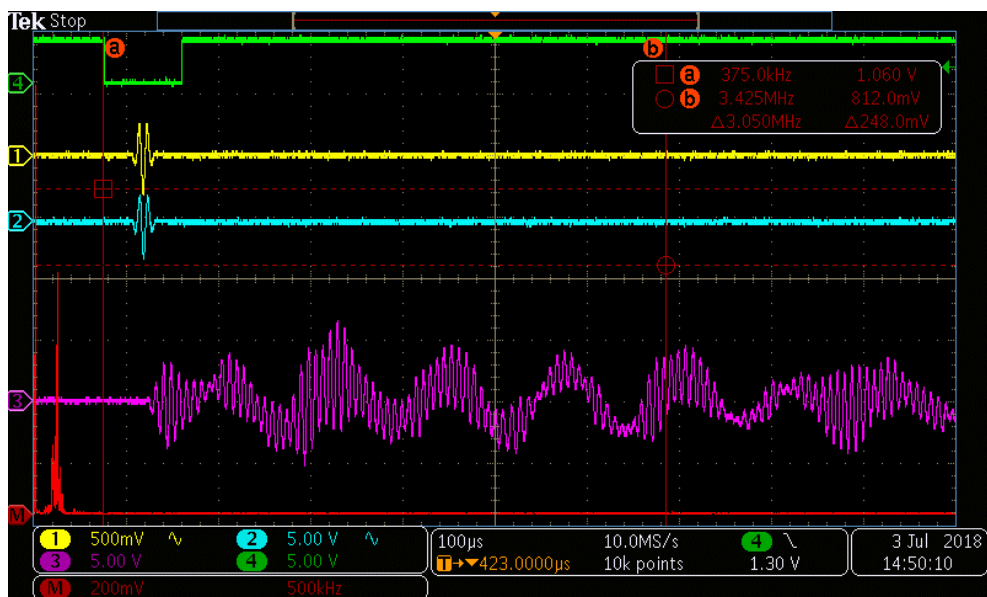
Figur 175. M2502S testas mot en lös aluminiumplatta i syfte att förstå hur plattan påverkar de mottagna signalerna.



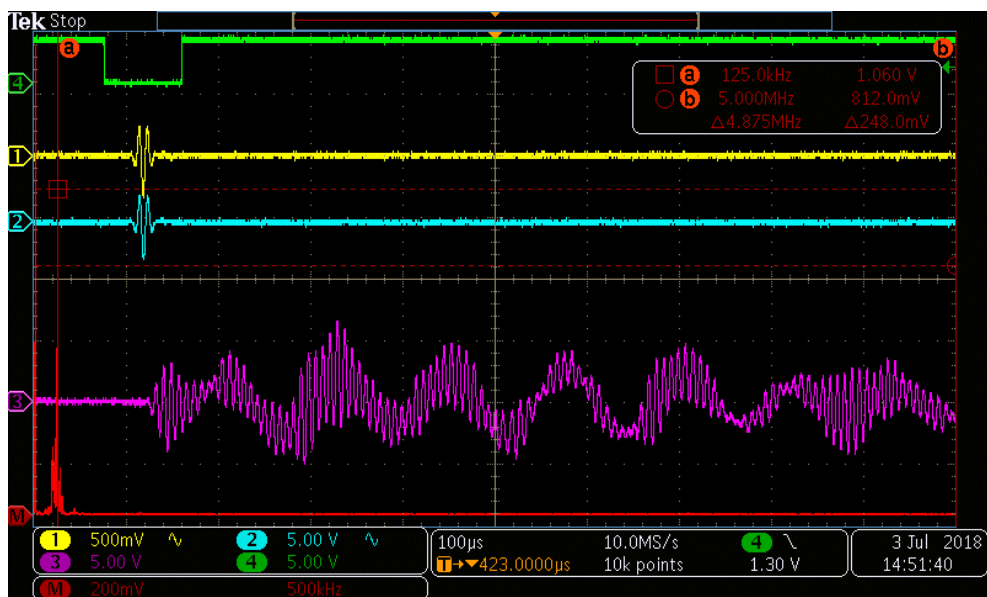
Figur 176. TEK00224 M2502P pressad direkt mot betongen på provkroppens ovansida



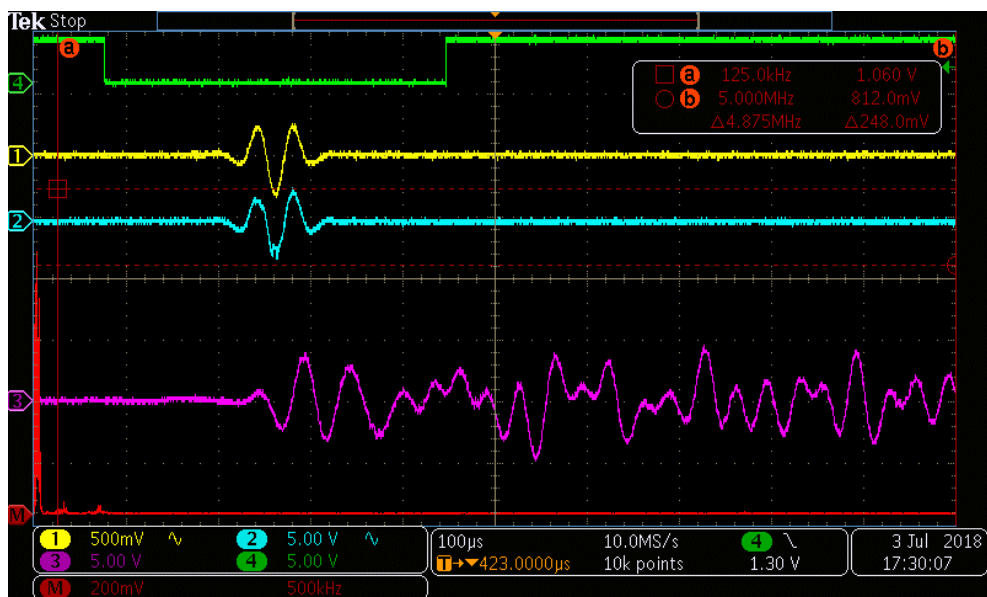
Figur 178. TEK00225 Rätvänd M2502P med aluminiumplåt pressad mot sensorelementen



Figur 179. TEK00226 Som föregående men M2502 P och aluminiumplatta vänd upp och ner som i figuren ovan.



Figur 180. TEK00227 M2502 P Som föregående men med montage liggande på en upp och nedvänd plastlåda.



Figur 181. TEK00228 M2502 S pressad mot aluminiumplatta.

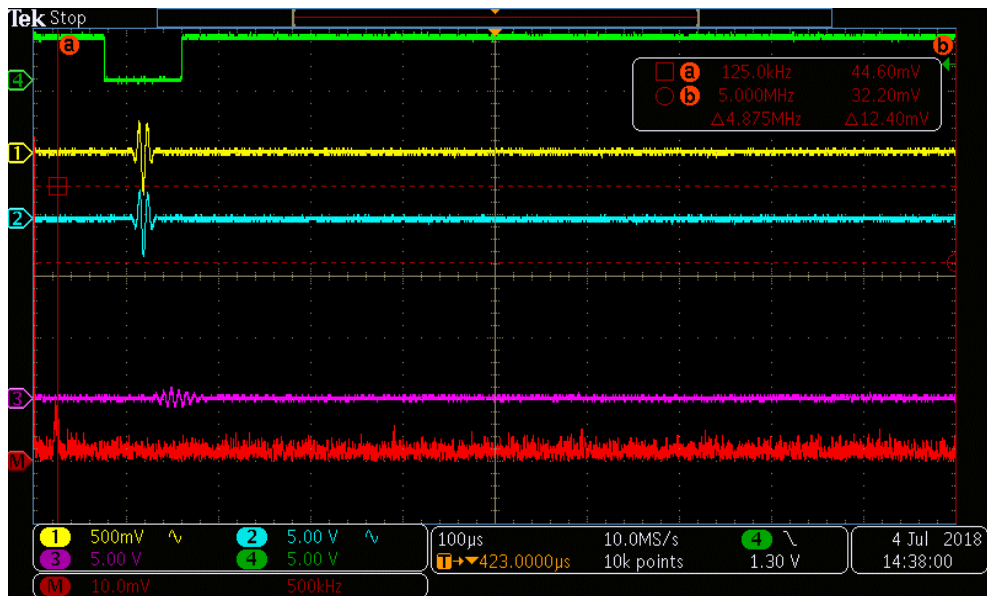
5.12 TESTER I PROVKROPPEN MED ALUMINIUMFÄSTPLATTAN BORTTAGEN 180704 TEK00229-00266



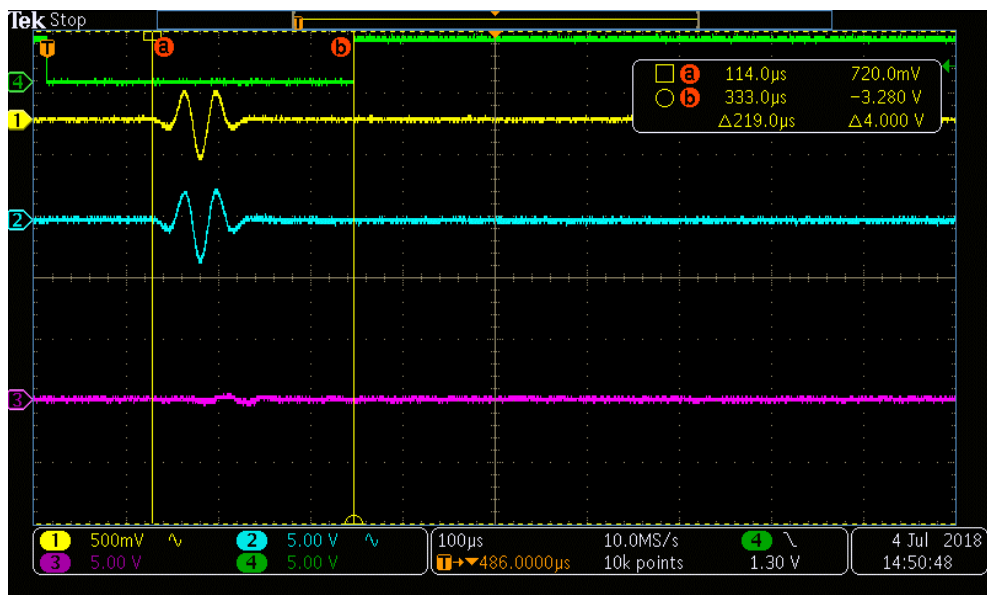
Figur 182. För att kunna demontera aluminiumplattan överborrades de ingjutna skruvarna som också var skruvade fast i aluminiumplattan. Därefter sattes skruvar i två av hålen i plattans mitt vilka pressade mot bakomliggande betong och när dessa drogs åt lossnade plattan.



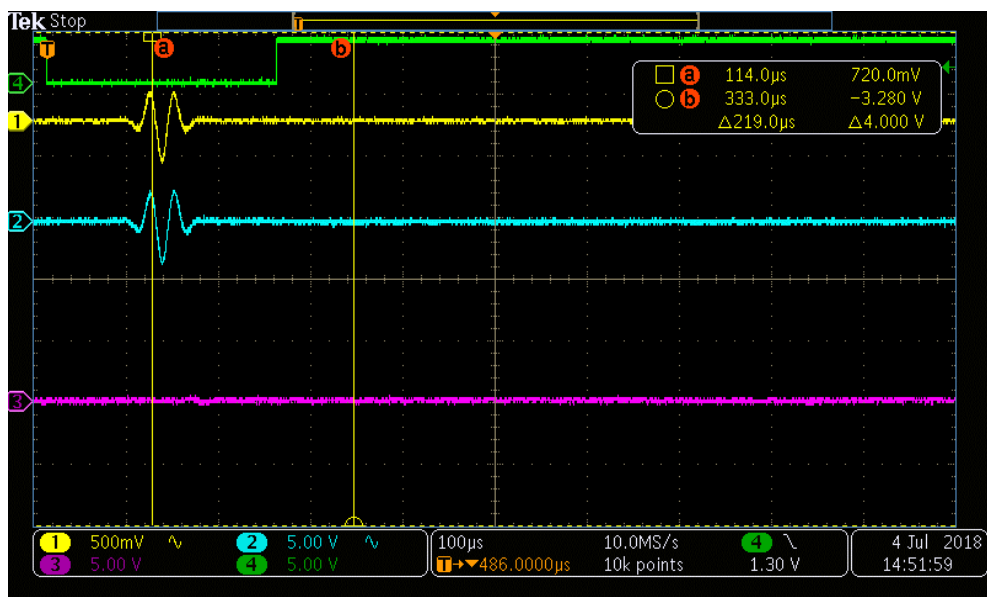
Figur 183. Aluminiumplattan togs bort, då det misstänktes att det uppstod reflektioner inuti den som kunde störa mätresultatet. Vidhäftningen kunde också ifrågasättas då det uppstått en kemisk reaktion mellan aluminium och cement. Detta hade troligen inte inträffat om plattan varit av rostfritt stål.



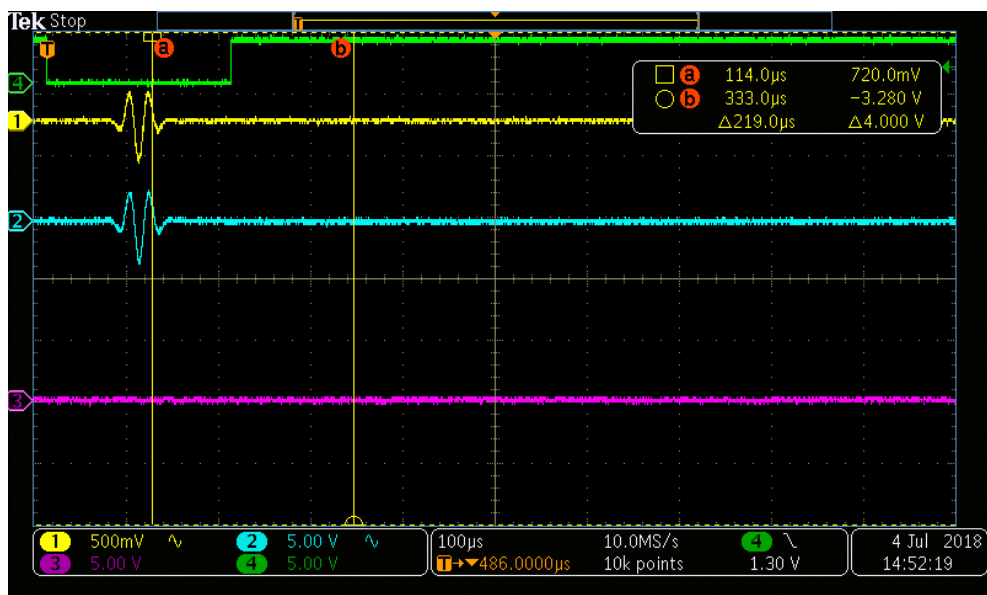
Figur 184. TEK00229 Förprov 12 kHz inställt på vågformsgeneratoren (AWG) med 500mVpp utsignal och RITEC förstärkning 8.0



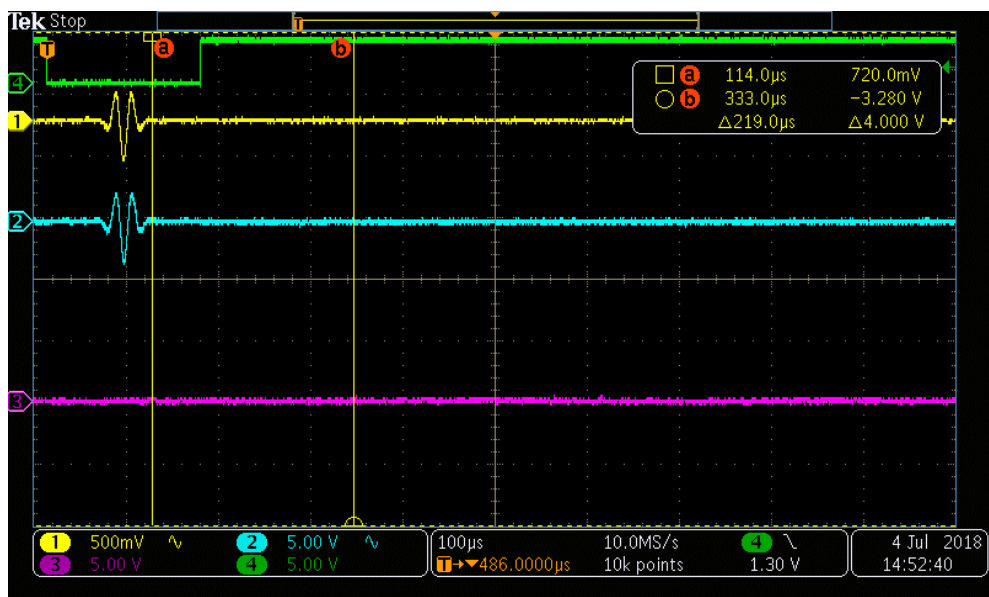
Figur 185. TEK00230 Mätserie påbörjas. AWG 3 kHz



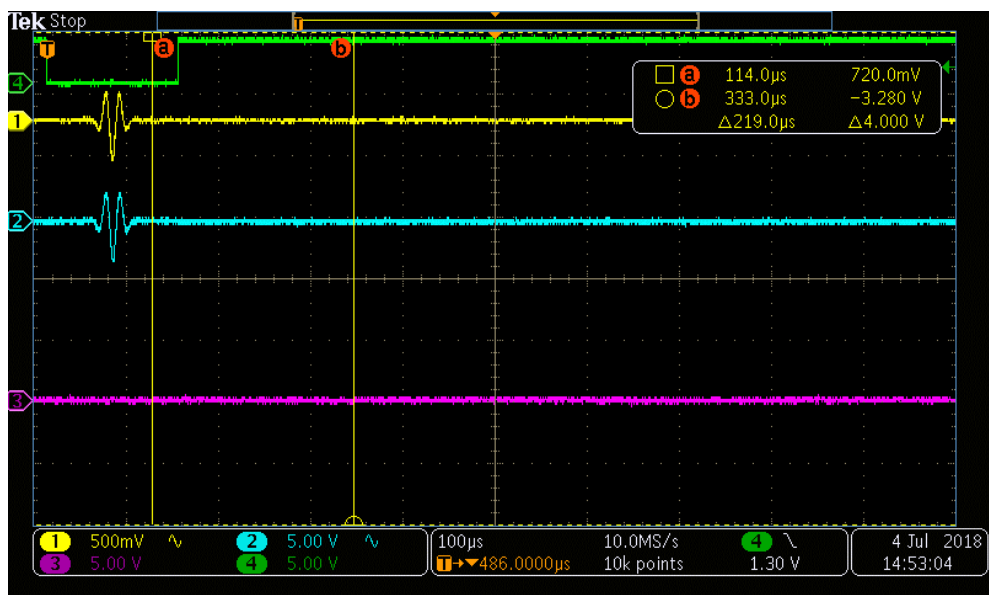
Figur 186. TEK00231 AWG 4 kHz



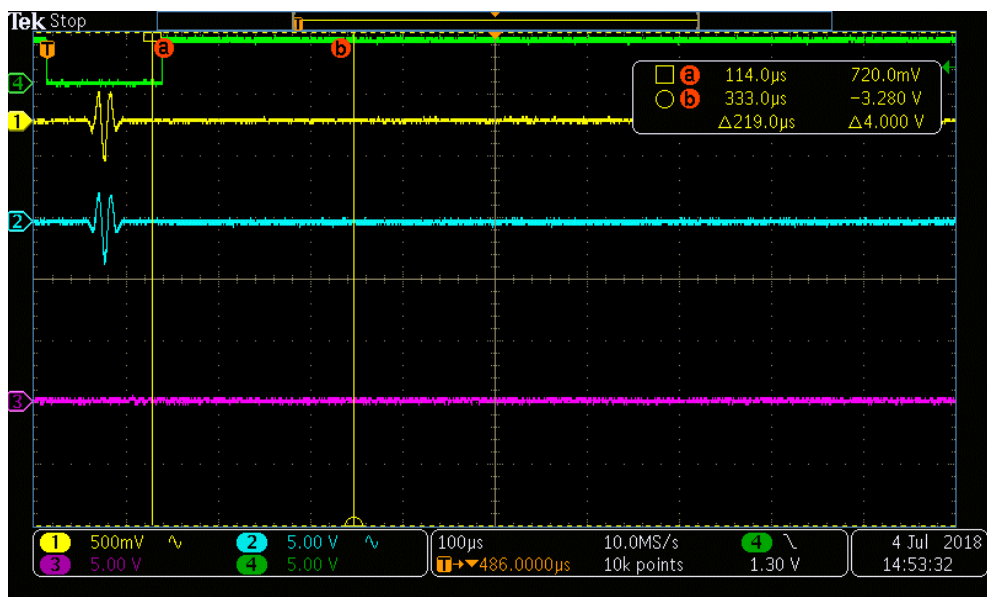
Figur 187. TEK00232 AWG 5 kHz



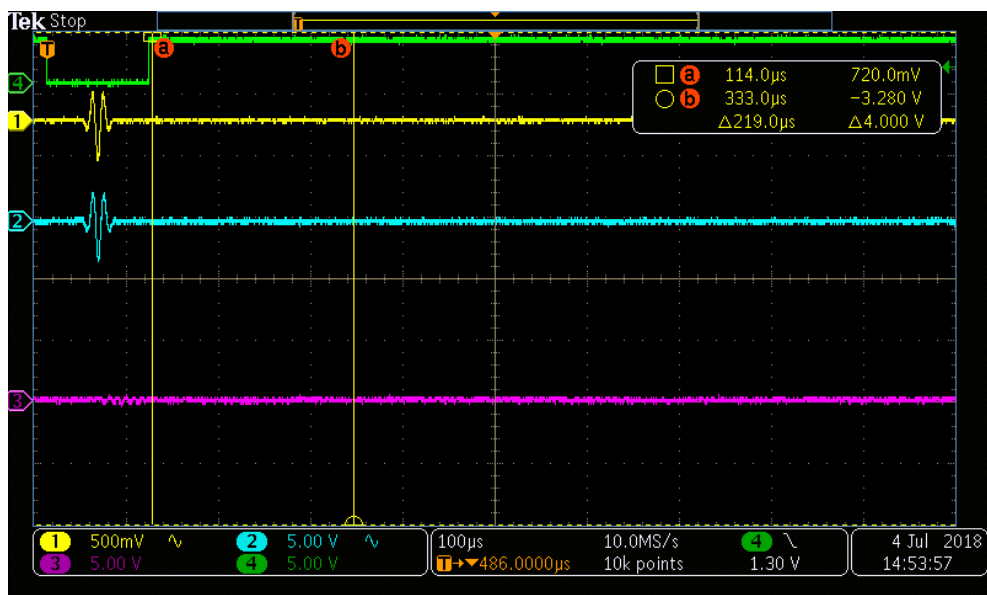
Figur 188. TEK00233 AWG 6 kHz



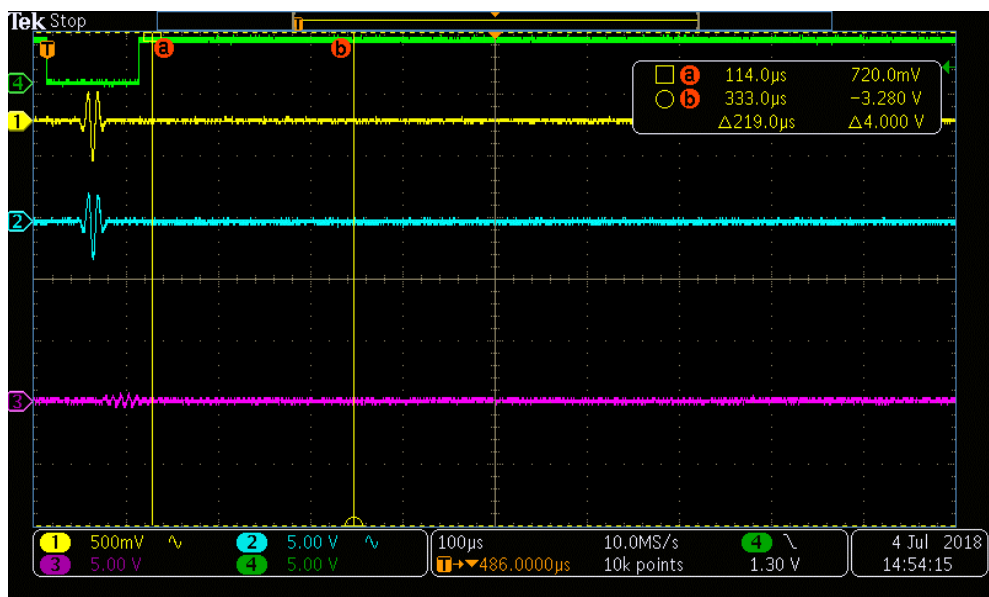
Figur 189. TEK00234 AWG 7 kHz



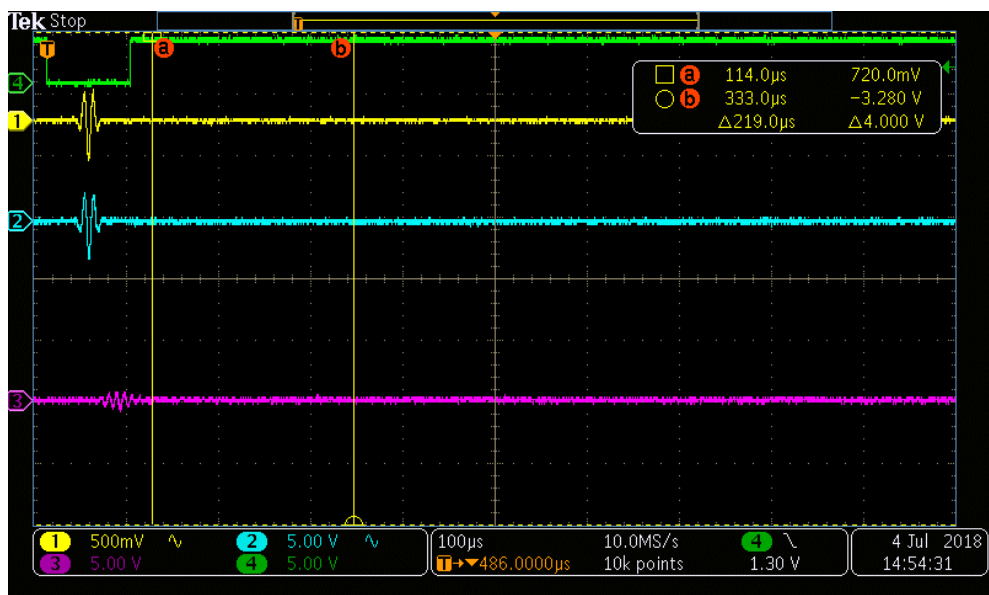
Figur 190. TEK00235 AWG 8 kHz



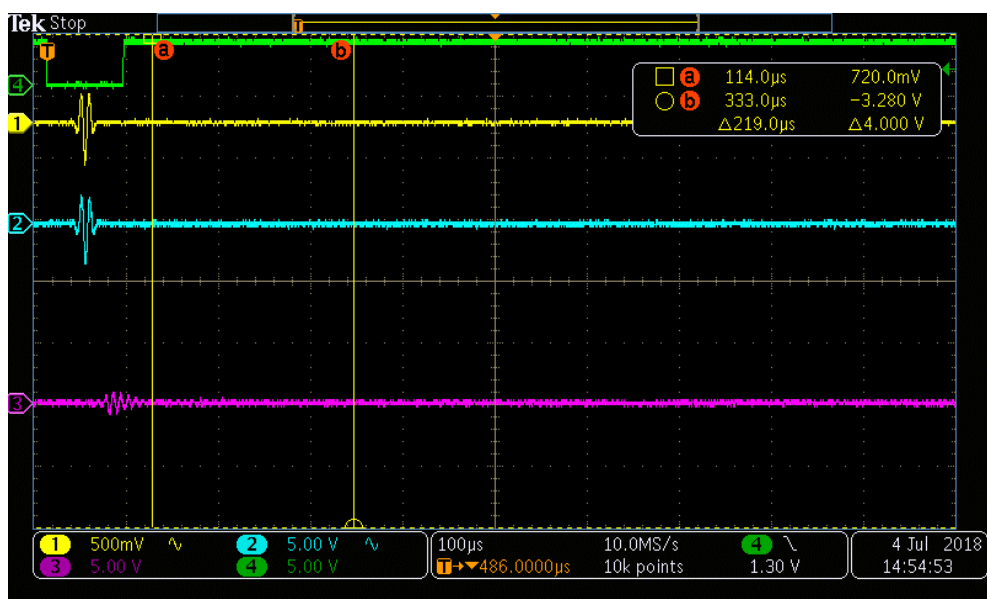
Figur 191. TEK00236 AWG 9 kHz



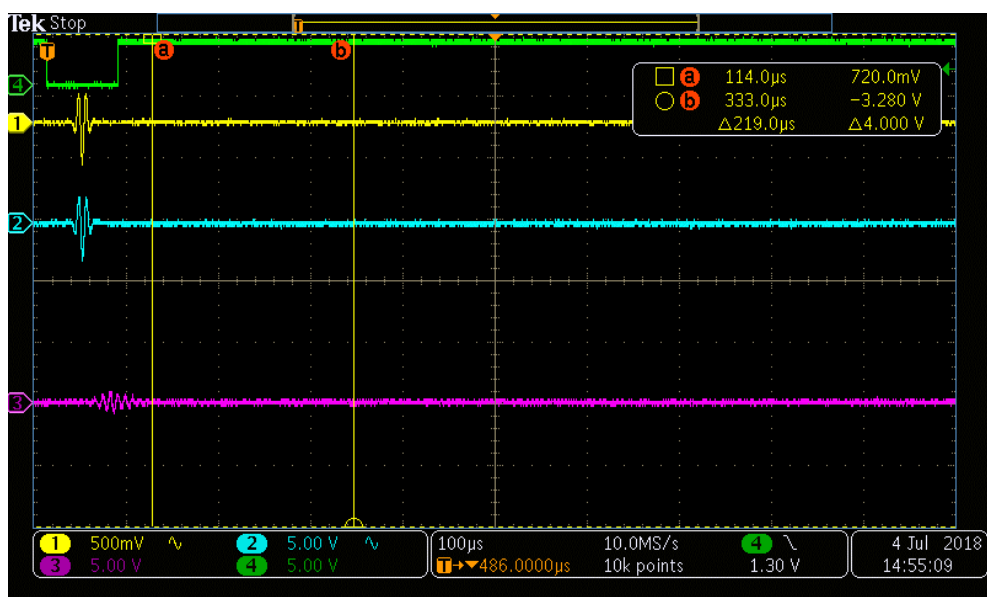
Figur 192. EK00237 AWG 10 kHz



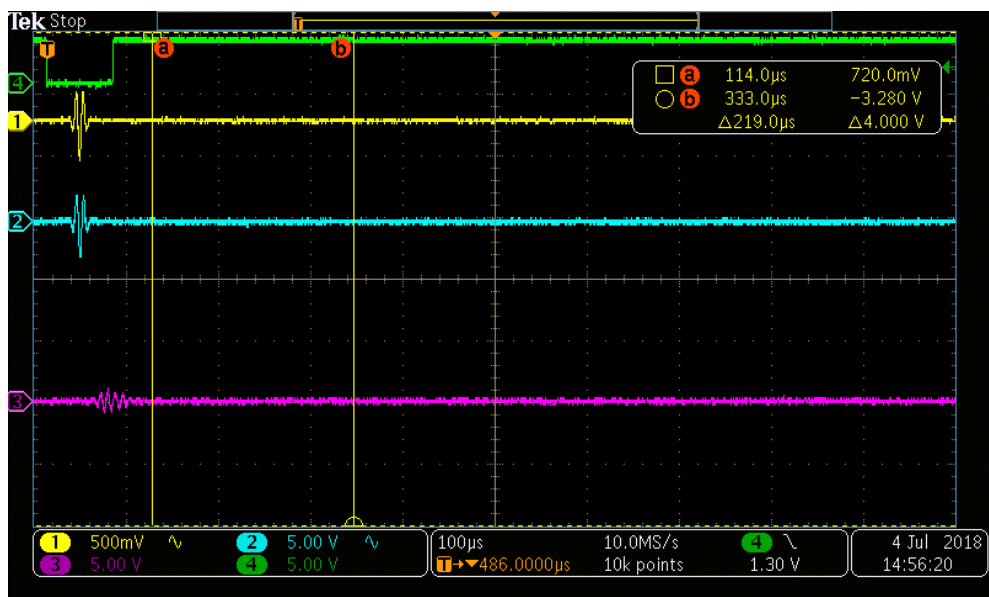
Figur 193. TEK00238 AWG 11 kHz



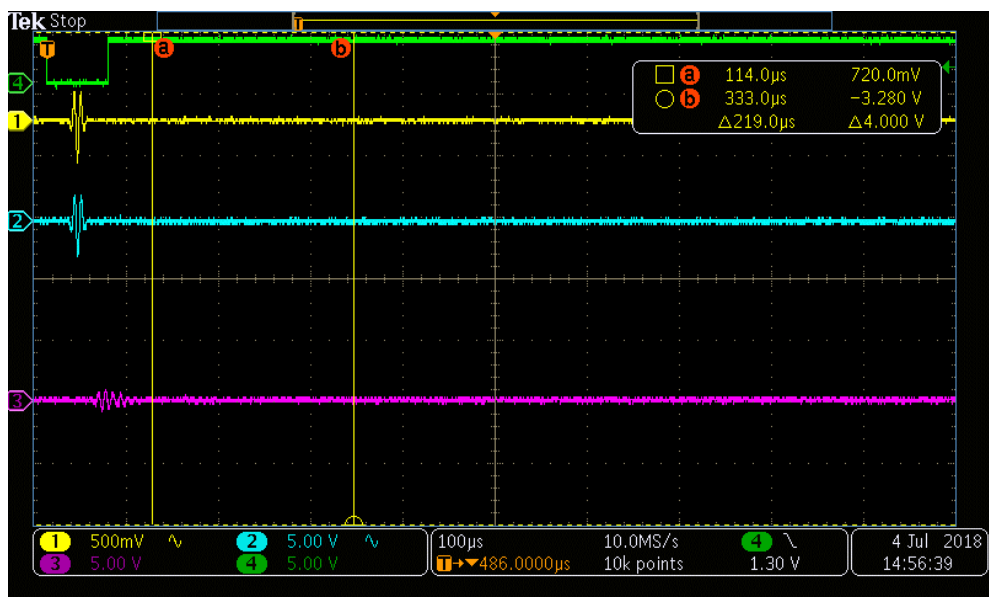
Figur 194. TEK00239 AWG 12 kHz



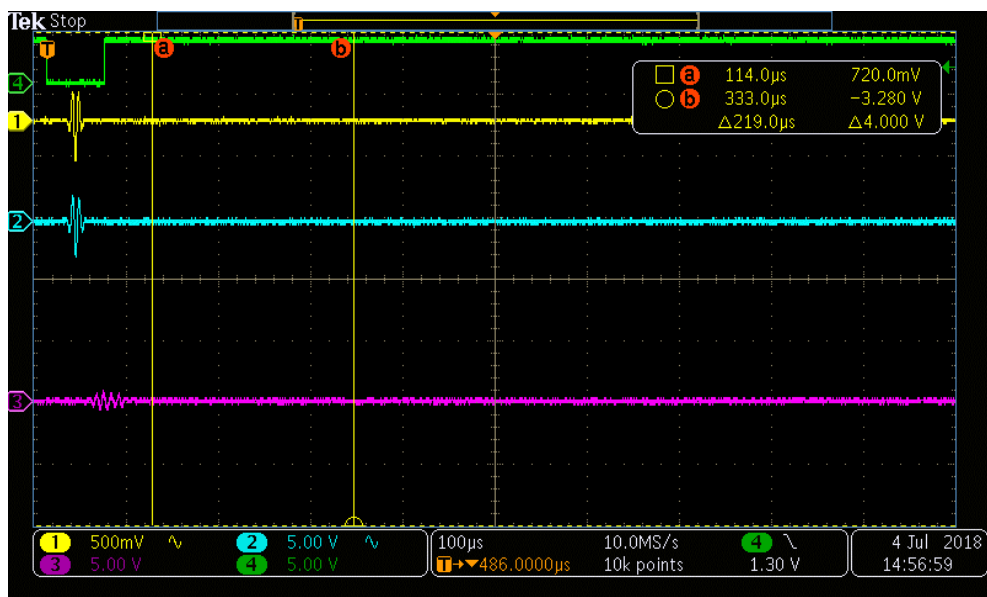
Figur 195. TEK00240 AWG 13 kHz



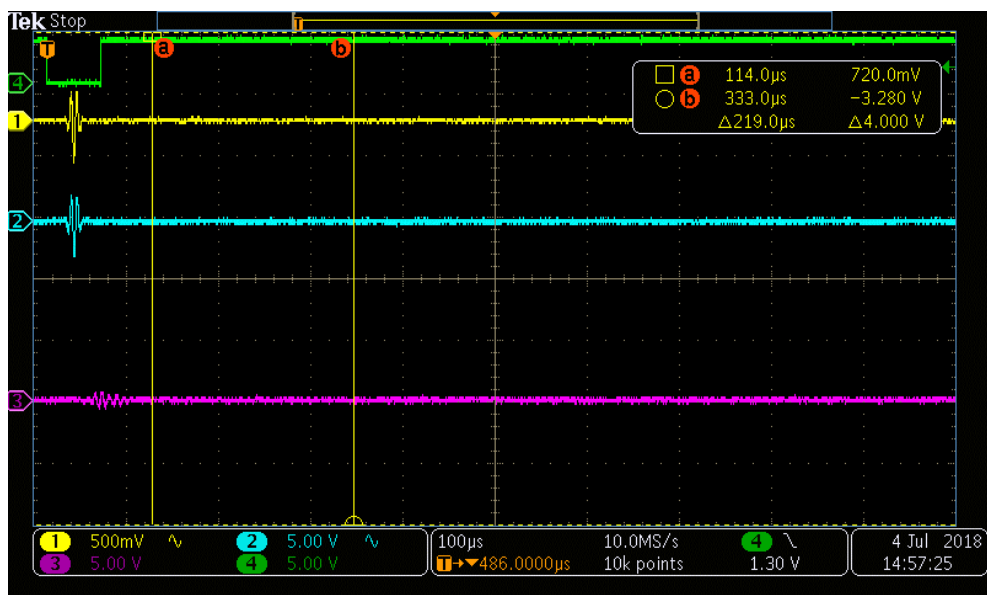
Figur 196. TEK00241 AWG 14 kHz



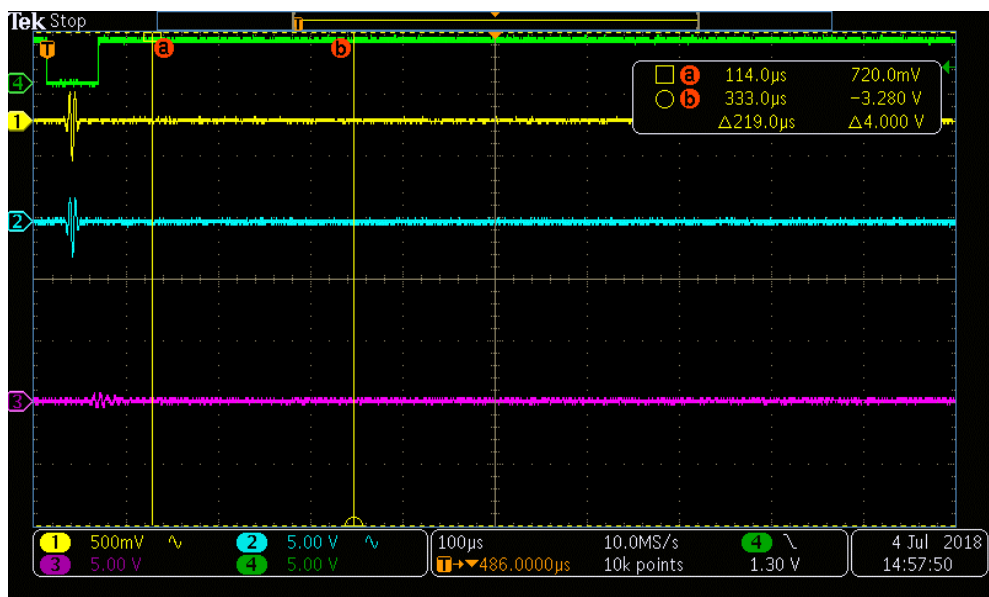
Figur 197. TEK00242 AWG 15 kHz



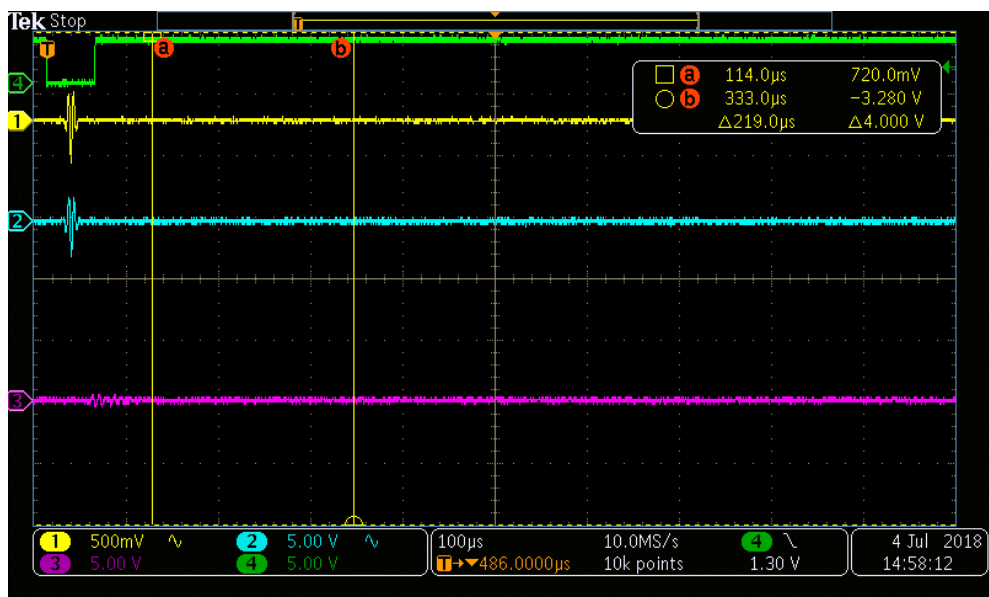
Figur 198. TEK00243 AWG 16 kHz



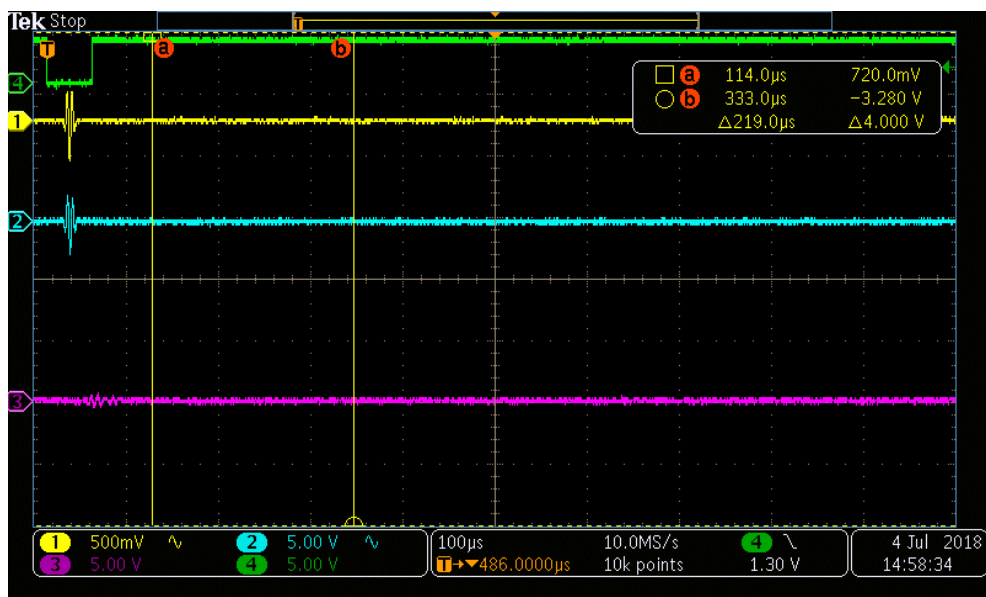
Figur 199. TEK00244 AWG 17 kHz



Figur 200. TEK00245 AWG 18 kHz



Figur 201. TEK00246 AWG 19 kHz



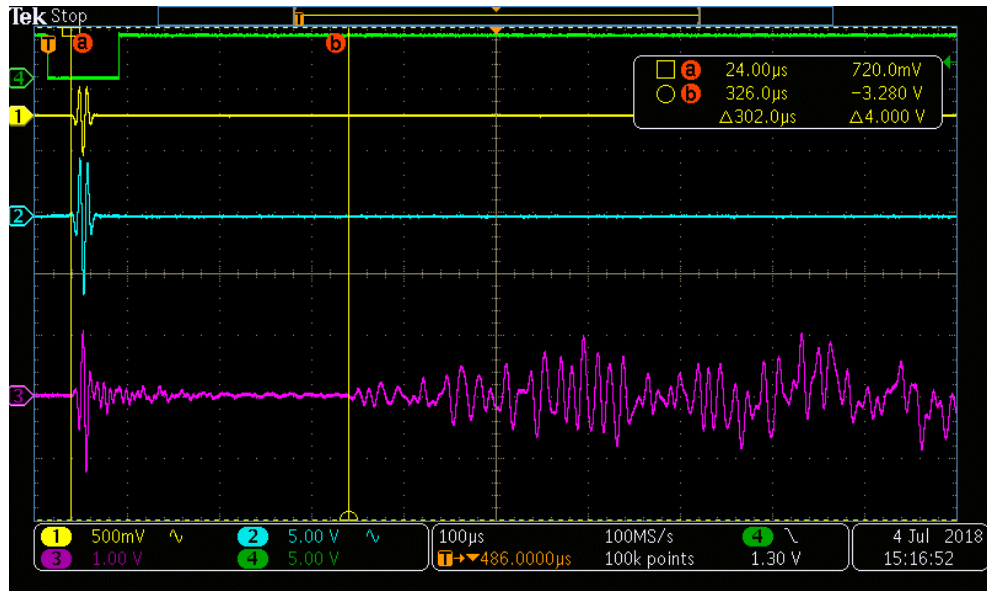
Figur 202. TEK00247 AWG 20 kHz

5.13 M2502 P RAKT IGENOM PROVKROPPEN MOT SAMMANKOPPLADE PANAMETRIC 50+100 KHZ SAMT REFLEKTION TEK00248-00252

I dessa mätningar har utsignalen från vågformsgeneratoren varit 500 mVpp, RITEC har varit inställd på förstärkning 9.0 och signalen från de kombinerade Panametricssensorerna förstärkts med 5000 ggr i förförstärkaren Signal Recovery 5113. Mottagna signaler har medelvärdesbildats med faktorn 16 ggr. I enlighet med föregående mätseries resultat har AWG frekvens ställts till 13 kHz, vilket gav starkast resultat. Signalfrekvensen blir då 126 kHz. Displayen på förförstärkaren 5113 kan stängas av, vilket reducerar störningsnivån.

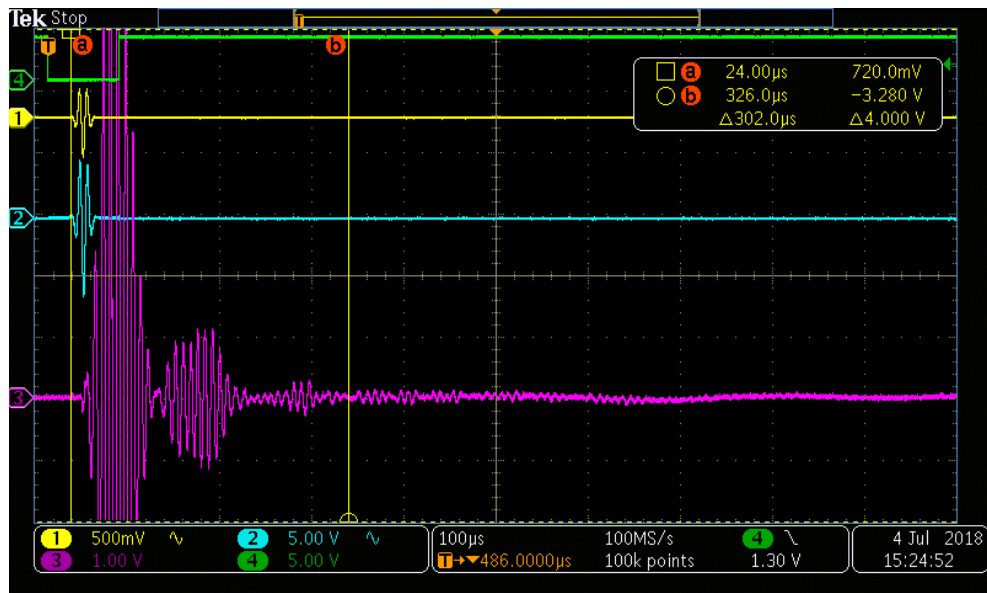
Utöver bilderna av oscilloskopskärmen finns även mätdata lagrade i s.k. .csv-filer. I dessa ligger 100.000 mätvärden per signal.

5.13.1 Transmission

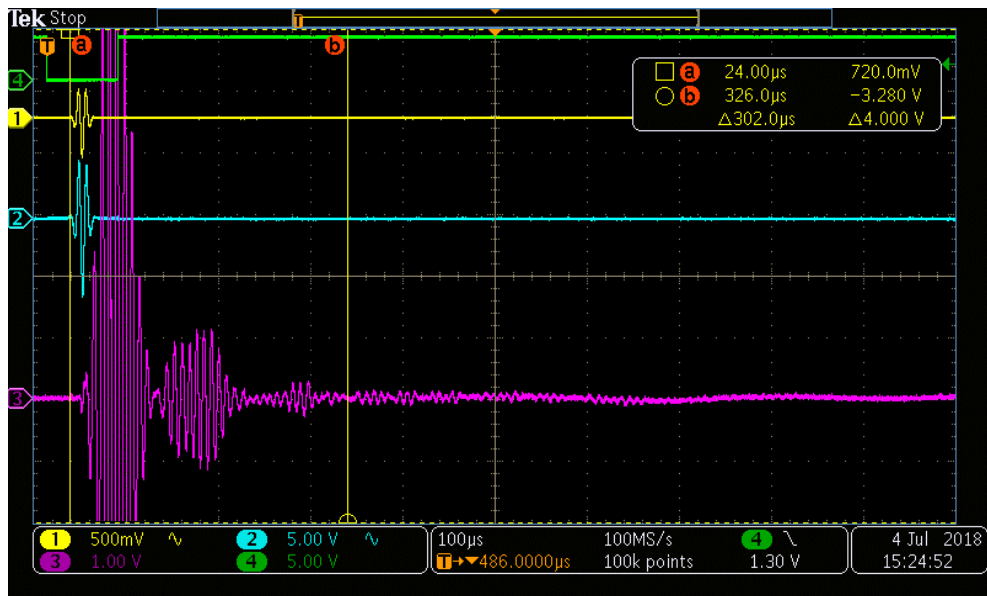


Figur 203. TEK00248 Sändning rakt igenom provkroppen—transmission-med M2502 P. Motsvarande data för alla kurvorna finns lagrade i datafilen TEK0012ALL.csv. En version av data med 5113 display avstängd är lagrad i datafilen TEK0013ALL.csv.

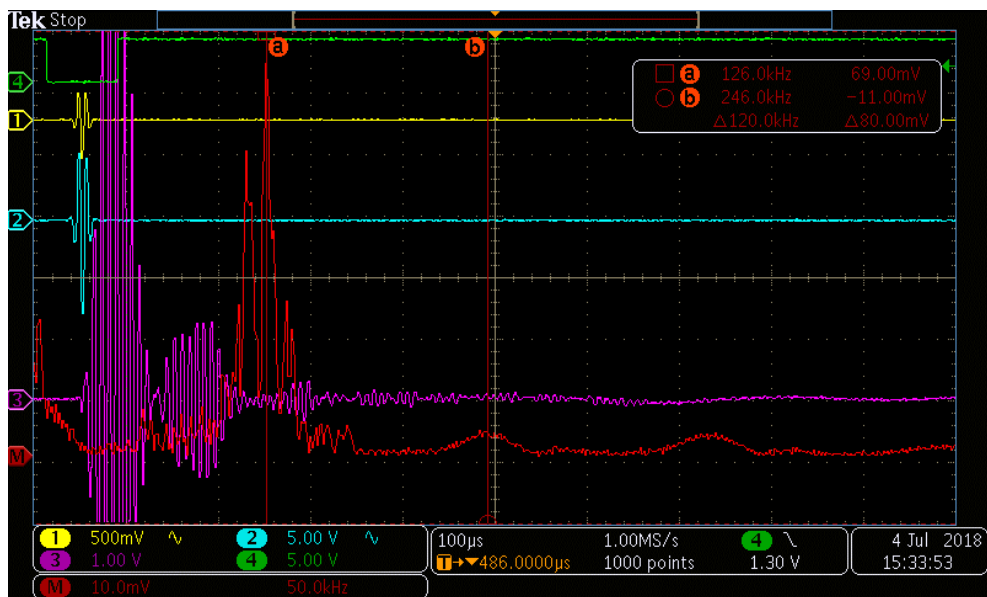
5.13.2 Reflektion



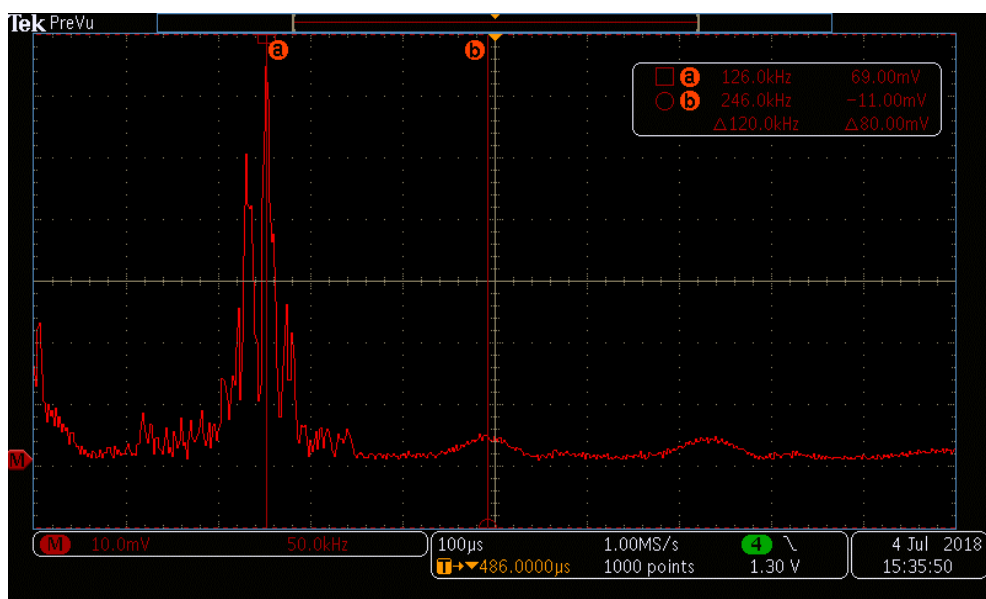
Figur 204. TEK00249 Med samma inställningar som ovan registreras nu reflektion, dvs signaler mottagna med M2502 P mottagardel, sändning och mottagning i samma punkt.



Figur 205. TEK00250 Som ovan men med displayen på förstärkaren 5113 avstängd. Signalerna finns lagrade i datafilen



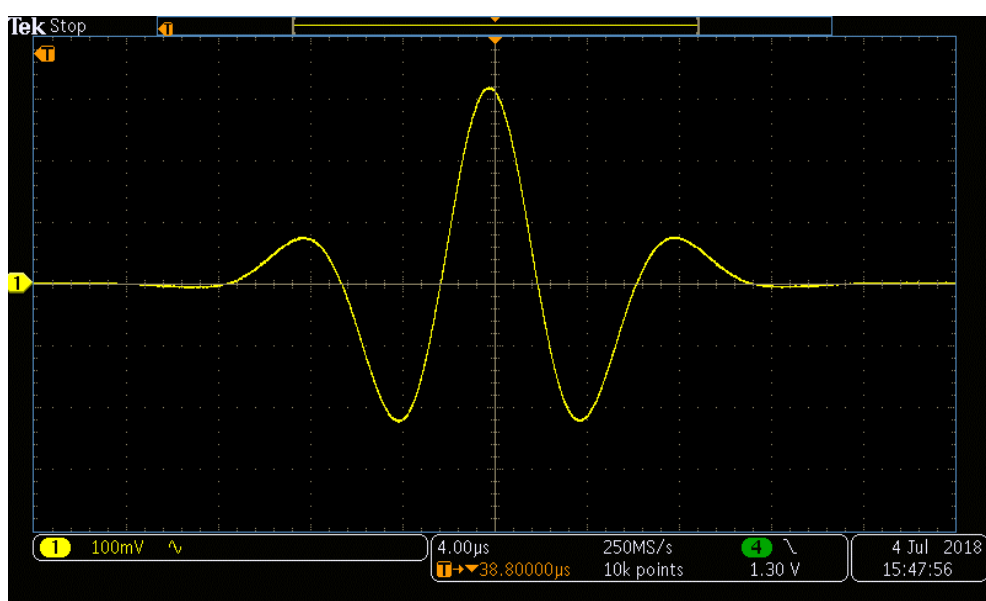
Figur 206. TEK00251/180704 Samma data som i föregående bild men med spektrum utskrivet. Alla data finns lagrade i datafilen TEK0014ALL.csv



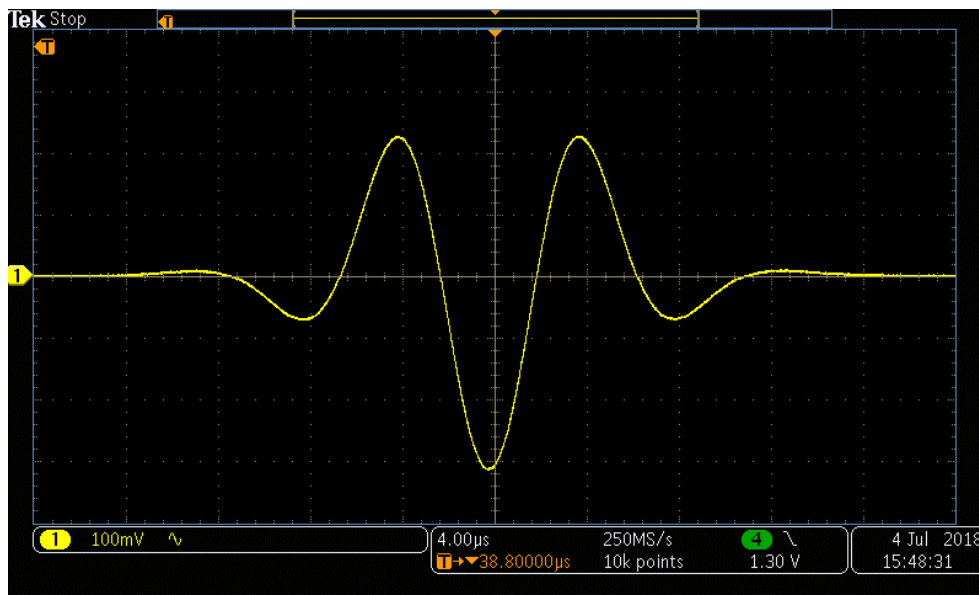
Figur 207. TEK00252/180704 Samma data som i föregående men endast spektrum plottat. Det verkar finnas övertonerna 2F och 3F representerade i spektrumet. Grundtonen är 126 kHz.

5.14 INVERTERADE SIGNALER 180704 TEK00253-00254

En metod att vid reflektion konstatera olinjäritet hos en reflektor är att sända en positiv version av signalen och en negativ. Är materialet linjärt blir dessa signaler lika, fast med olika tecken och summan blir noll. Är materialet olinjärt skiljer sig summan från noll. Nedan visas två sådana signaler. De är lagrade som datafiler och omfattar vardera 10.000 mätvärden. Provkroppen är inte inblandad i dessa data.



Figur 208. TEK00253 Gauss Positive AWG 13 kHz. Data finns lagrade i filen TEK0016CH3.csv



Figur 209. TEK00254 Gauss Negative AWG 13 kHz. Data finns lagrade i filen TEK0017CH3.csv

5.15 M2502 S RAKT IGENOM PROVKROPPEN MOT SAMMANKOPPLADE PANAMETRICS 50+100 KHZ SAMT REFLEKTION 180704 TEK00255-00266

I denna försöksserie undersöks bästa inställning av vågformsgeneratorns frekvens för sändning med M2502 S i skjuvvågsutförande. Denna sensor skall nominellt arbeta vid 55 kHz. Mätningar utfördes både i transmissions och reflektionsmod.

Dessa mätdata ligger kvar på en USB-sticka som har förkommit varför inga oscilloskopplottar kan visas.

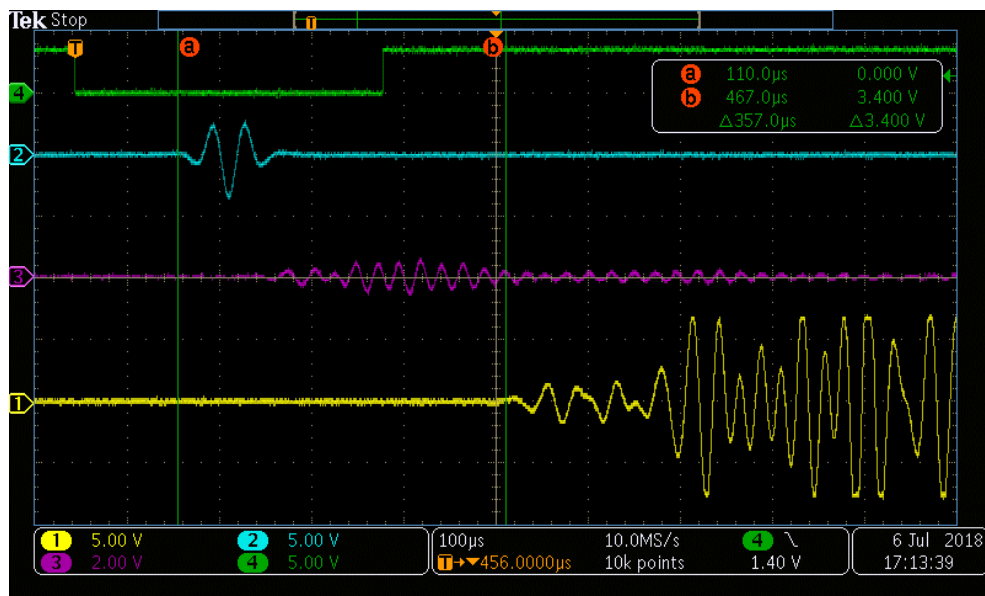
Resultatet av mätserien var emellertid att för transmission var utmatningsfrekvensen 4.5 kHz på vågformsgeneratoren den som gav starkast signalamplitud i mottagaren.

5.16 LTH EAGENTILLVERKADE SENSORER 180706 TEK00267-00277

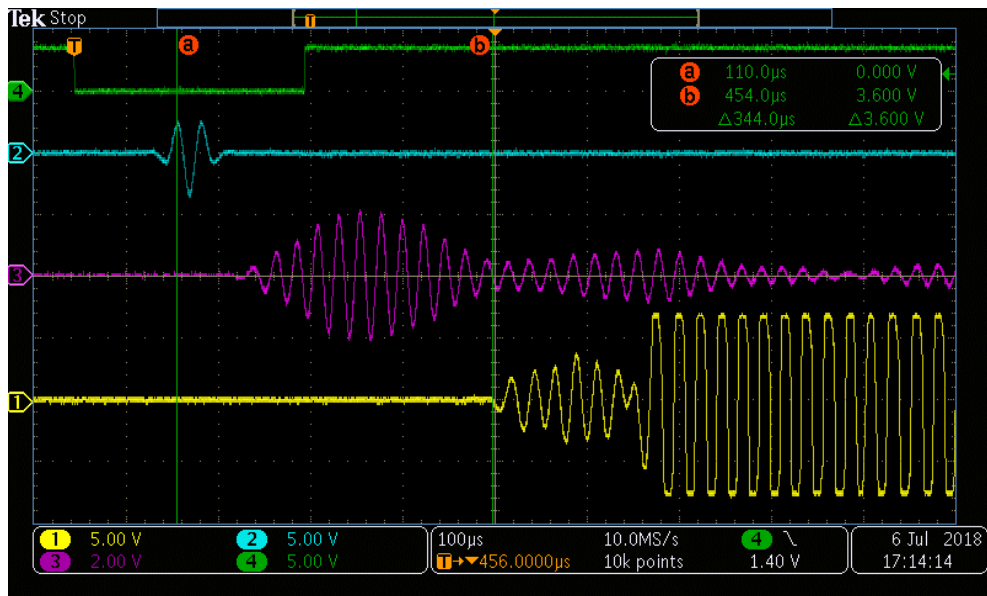
På samma sida av provet monterades två av de egentillverkade sensorerna, en användes för sändning den andra för mottagning. På provkroppens andra sida monterades Panametrics 50+100 kHz sensorer parallellt som mottagare. AWG 500 mVpp, RITEC 8.0. Panametrics signal genom förförstärkaren 5113 inställd på 500 ggr förstärkning.



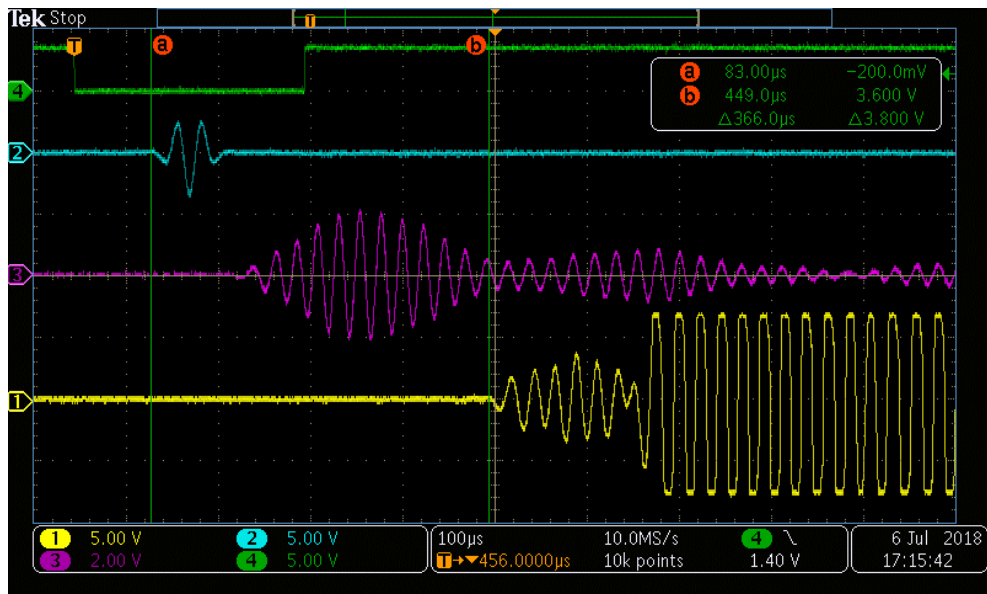
Figur 210 Exempel på montering av de vid LTH tillverkade sensorerna när aluminiumplattan avlägsnats. Sensorerna skruvas fast med hjälp av en M5 stoppskruv i ett gängat hål i de på betongen fastklistrade stålplattorna. Avståndet mellan sensorerna är 120 mm. Som mottagare på andra sidan används 50+100 kHz Panametrics sensorer



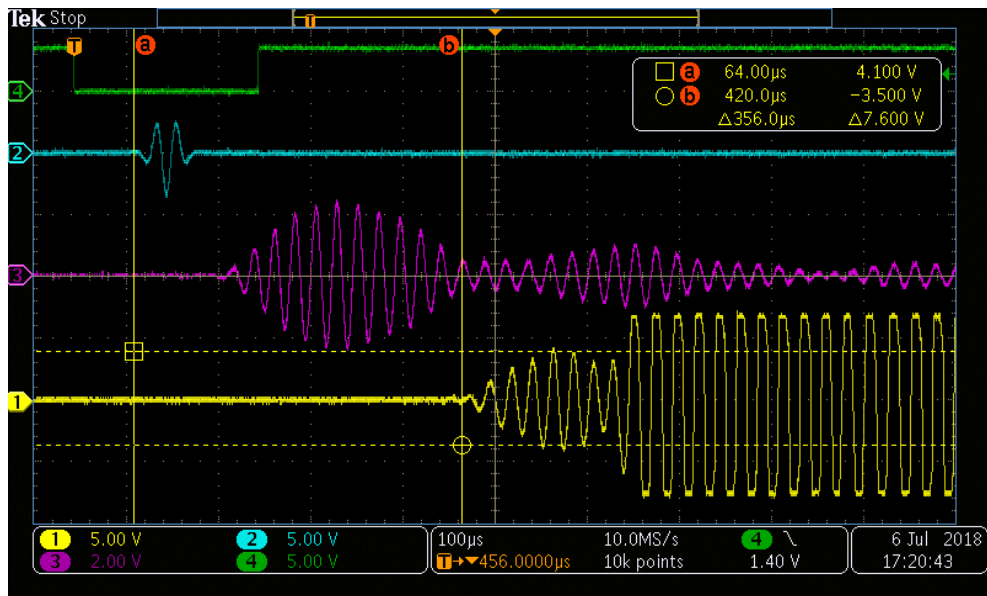
Figur 211. TEK00267 AWG f=3kHz. Kanal 4 AWG gate (trigg), kanal 2 utsänd signal dividerad med 100, kanal 3 mottagen signal bredvid sändaren (innehållande ev reflex) och kanal 1 transmitterad signal, dvs rakt igenom provkropp och stålplåt. Transmissionstid 357 us.



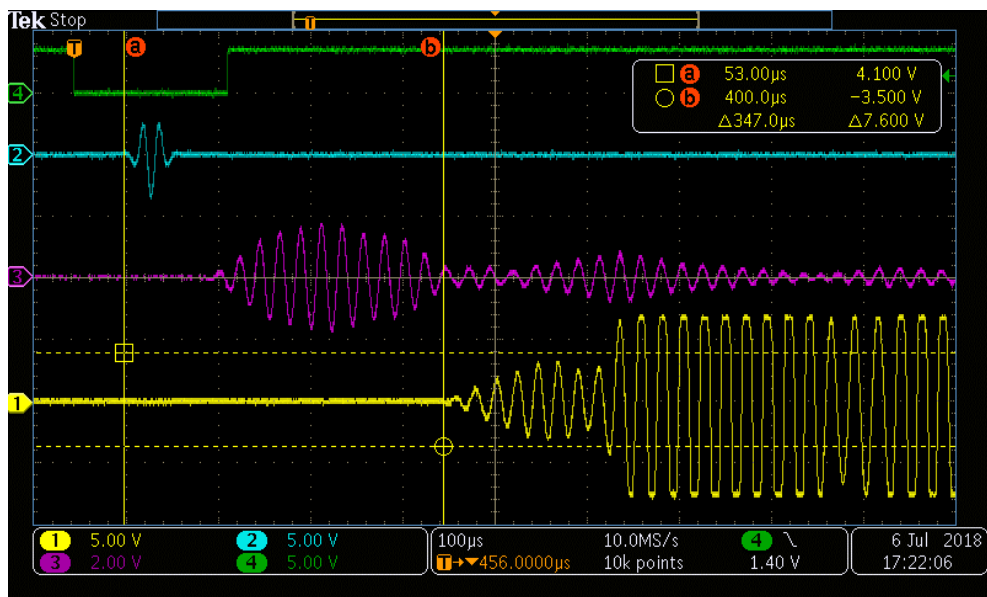
Figur 212. TEK00268 f=4 kHz.



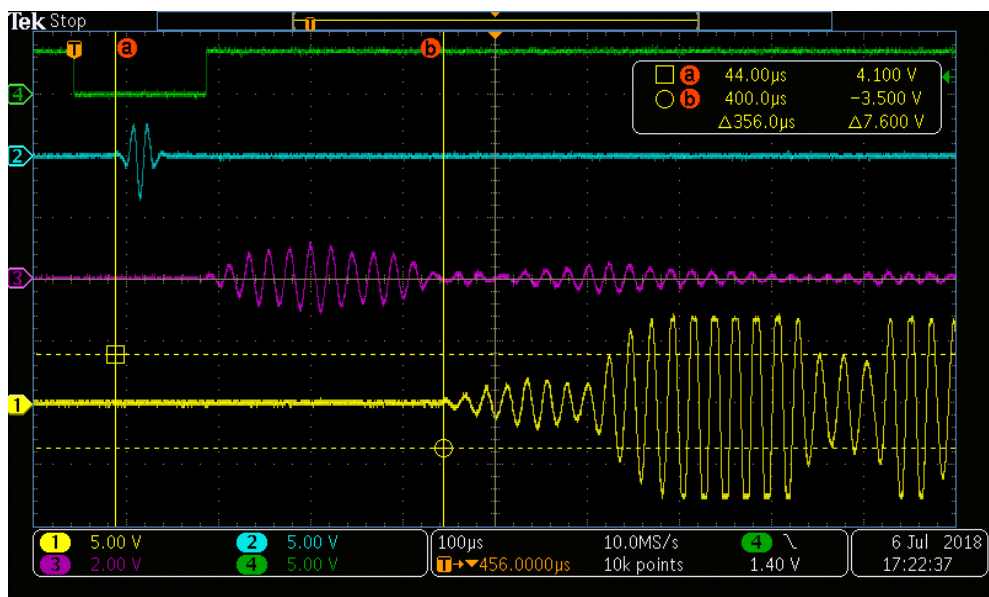
Figur 213. TEK00269 f=4 kHz. Upprepad mätning med markör a ställd vid sändtillfället för att mäta passagetiden genom provkroppen i kanal 1. Den är 366 us, vilket överensstämmer med andra mätningar.



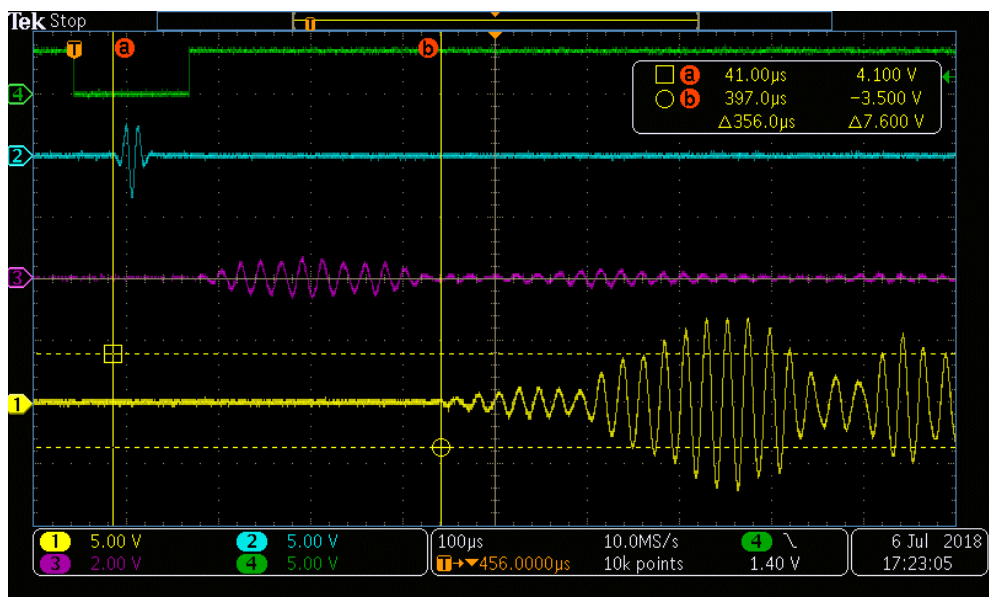
Figur 214. TEK00270 f=5 kHz. Transmitterad amplitud (kanal 1) enligt markörerna 7.6 Vpp vilket är max i denna mätserie.



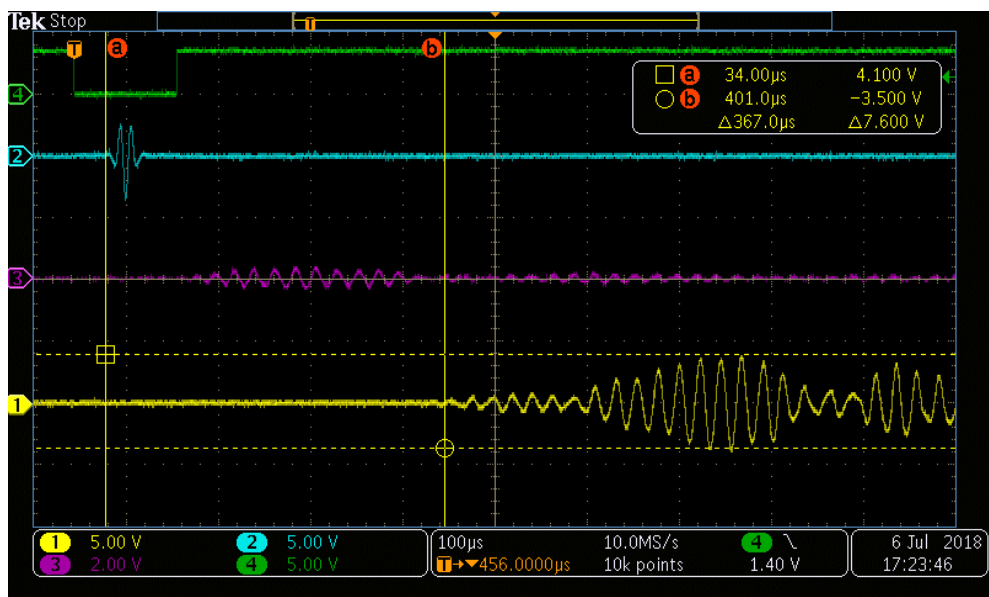
Figur 215. TEK00271 f= 6 kHz. Sjunkande amplitud i kanal 1.



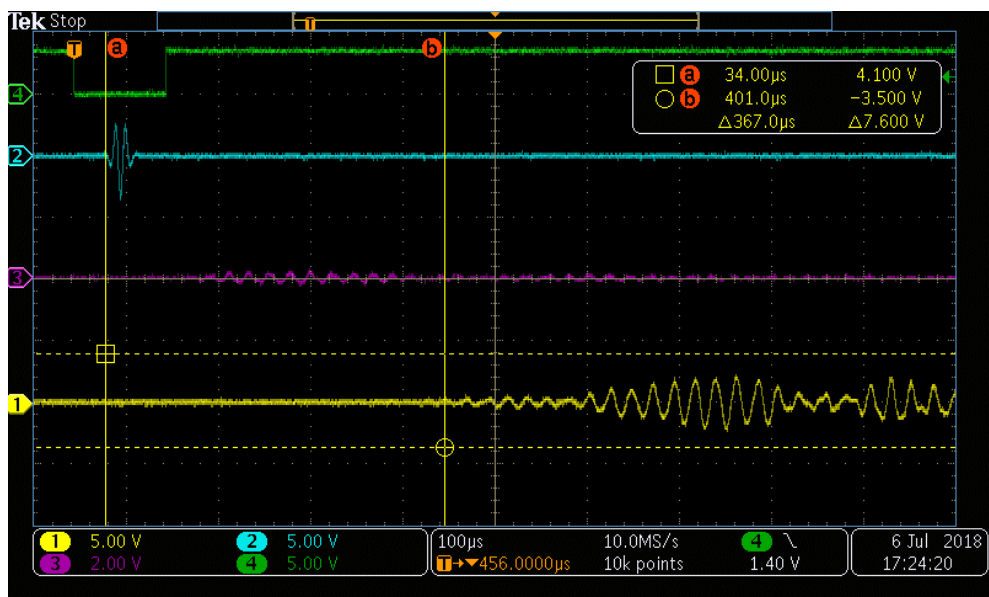
Figur 216. TEK00272 f=7 kHz



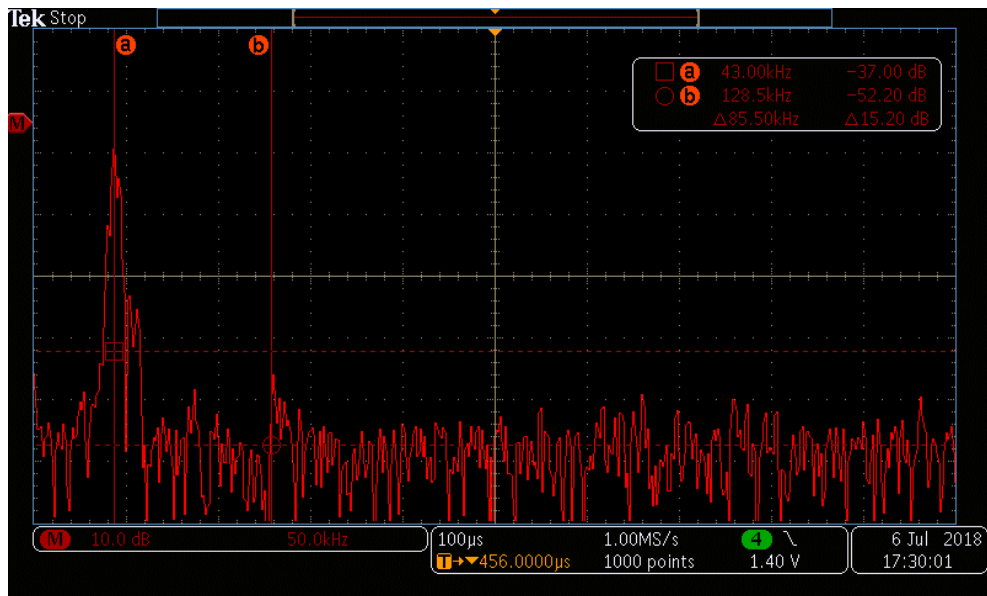
Figur 217. TEK00273 f=8 kHz



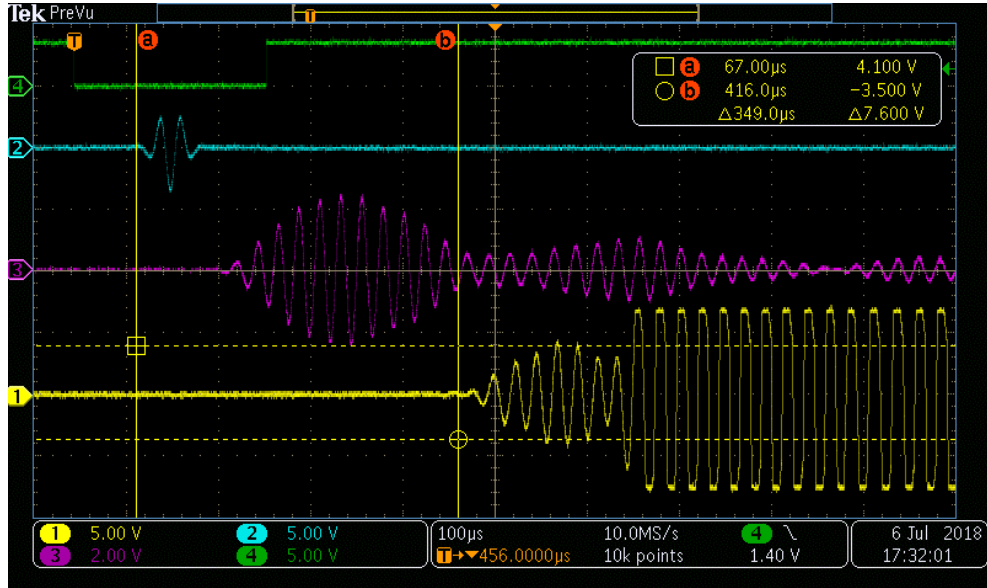
Figur 218. TEK00274 f=9 kHz



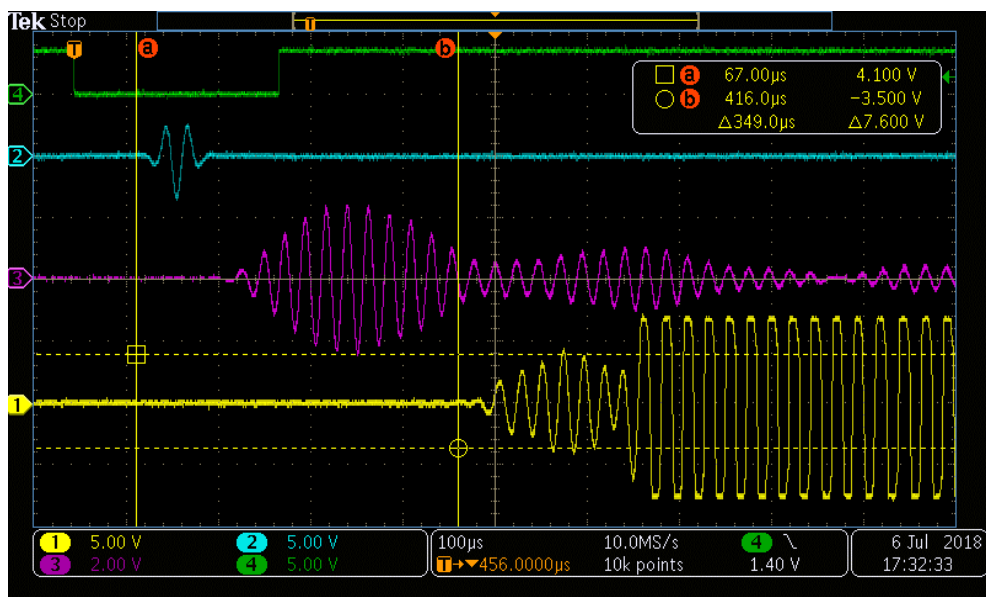
Figur 219. TEK00275 f=10 kHz



Figur 220. TEK00276 Spektralanalys med oscilloskopets inbyggda FFT-analysator, av signalen i kanal 3. Grundtonen vid 43 kHz (markör a) ackompanjeras av övertoner vid 86 och 129 kHz (markör b), dvs första och andra övertonen. Troligen alstras dessa övertoner av att signalen i kanal 1 är överstyrd.



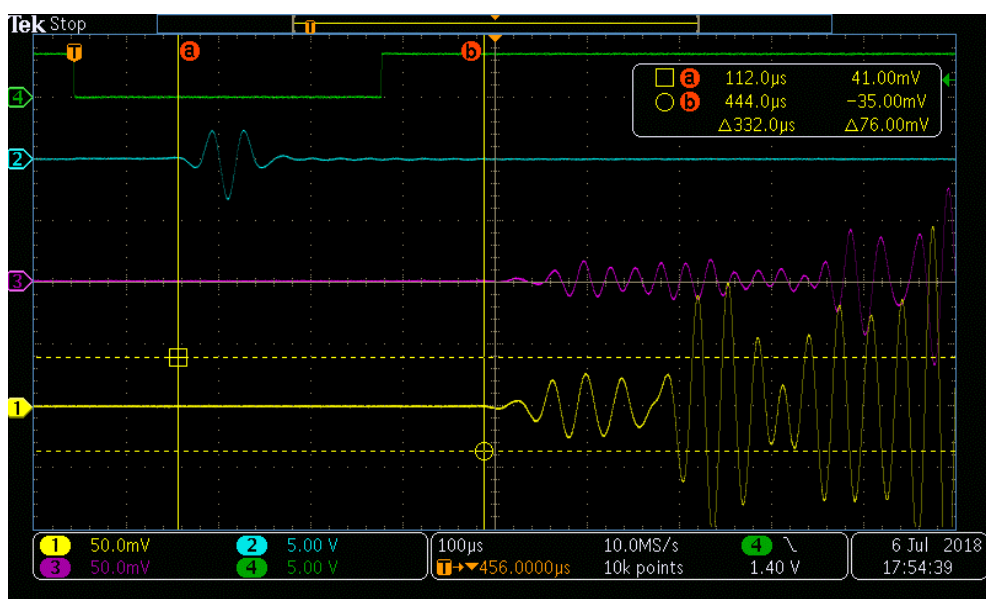
Figur 221. TEK00277 $f=4.8$ kHz. Syftet är att gaffla in amplitudmax



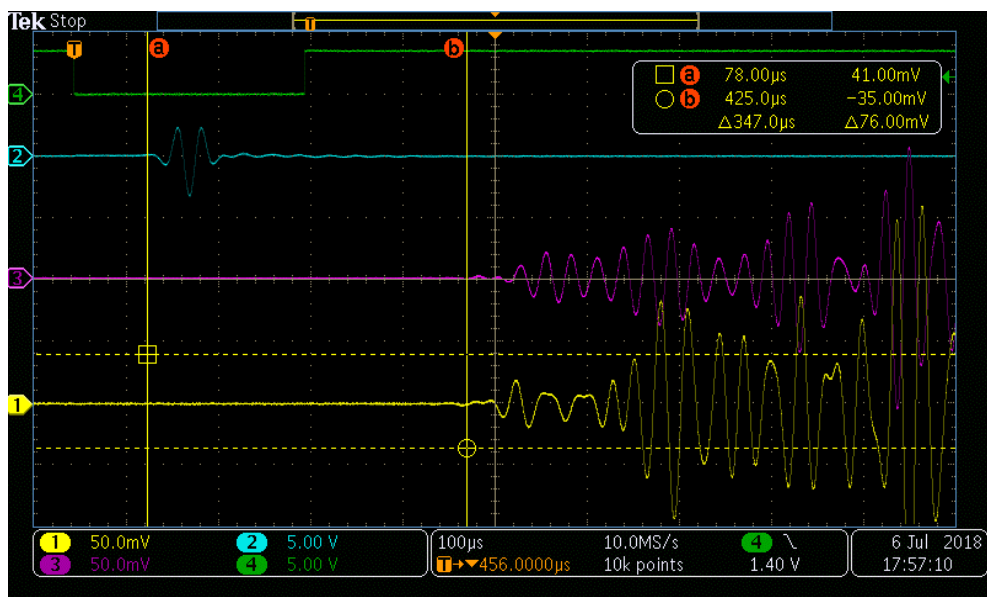
Figur 222. TEK00278 $f=4.5$ kHz. Syftet är att gaffla in amplitudmax. Det tycks inträffa mellan 4.5 och 5 kHz. Den utsända frekvensen har då en topp vid 43 kHz.

5.17 PANAMETRICS 50+100 KHZ SOM SÄNDARE 180706 TEK00279-00289

I denna serie vänds på sändriktningen jämfört med under avsnitt 5.15. Således sänder kombinationen av Panametrics 50+100 kHz och mottages med de båda LTH-tillverkade sensorerna individuellt (kanal 1 och 3). AWG 500 mVpp och RITEC 8.0. De egentillverkade sensorerna har så kraftig utsignal att ingen förstärkning erfordrades. Kanal 4 är AWG gate (trigg) och kanal 2 är utsänd signal dämpad 40 dB, dvs dividerad med 100.



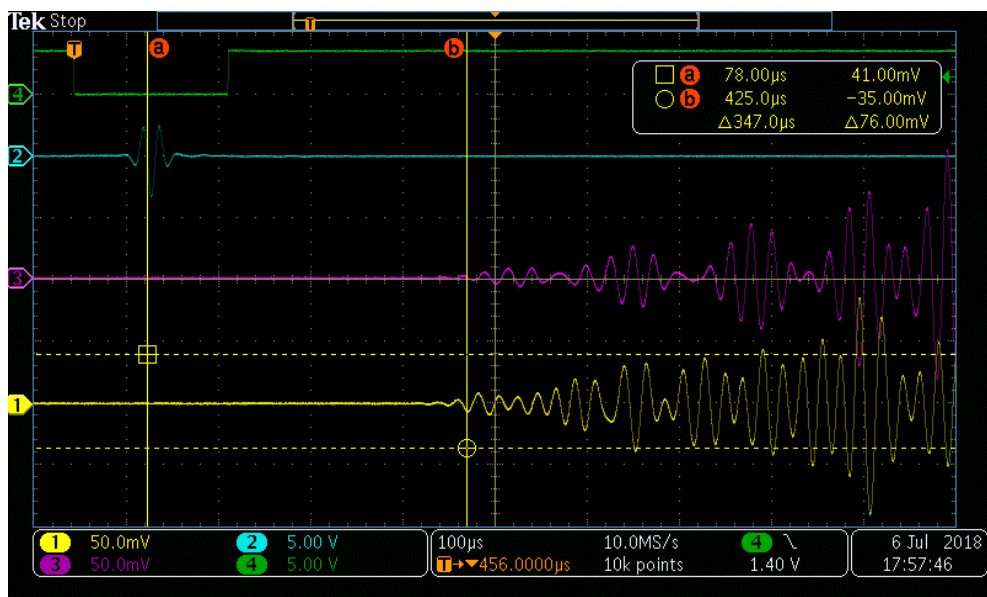
Figur 223. TEK00279 AWG $f=3$ kHz.



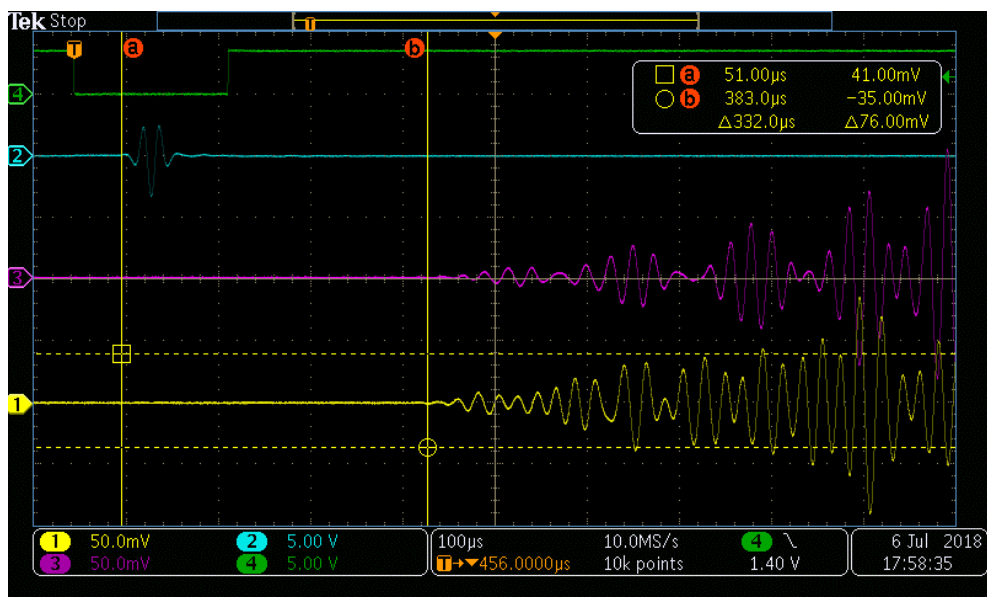
Figur 224. TEK00280 f=4 kHz. Amplituden avtar i kanal 1 och 3.



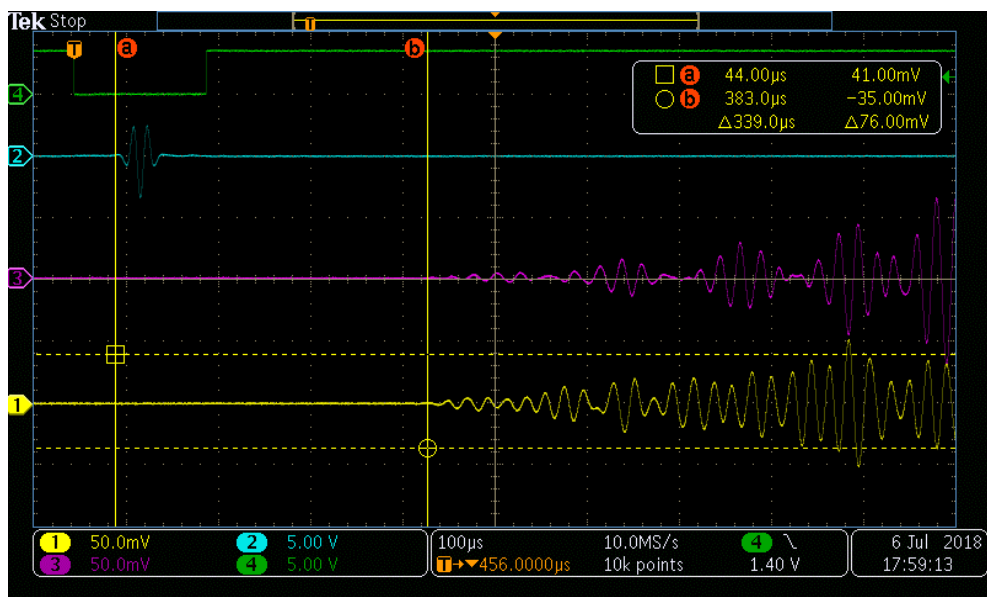
Figur 225. TEK00281 f=5 kHz



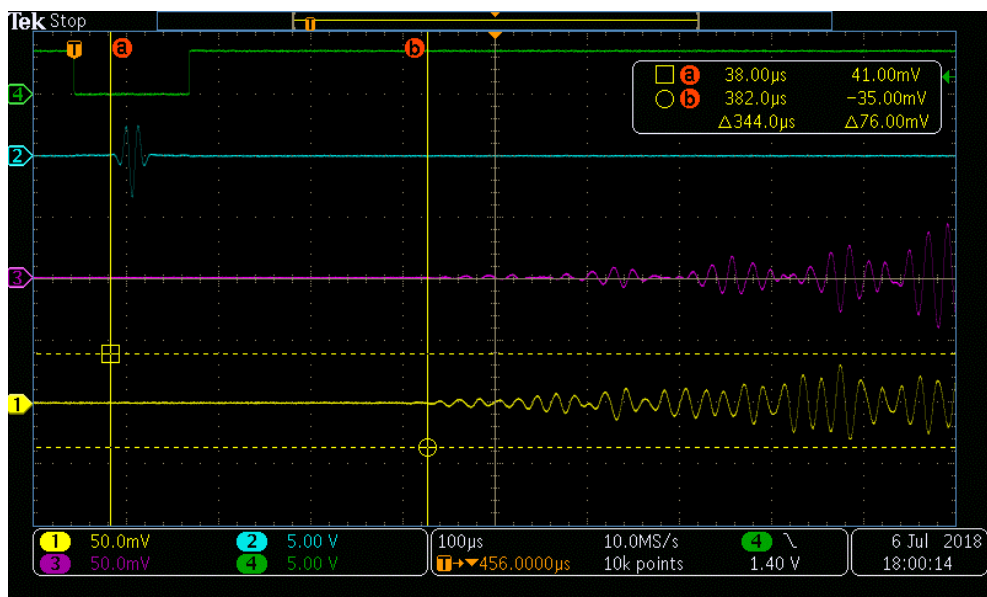
Figur 226. TEK00282 f=6 kHz



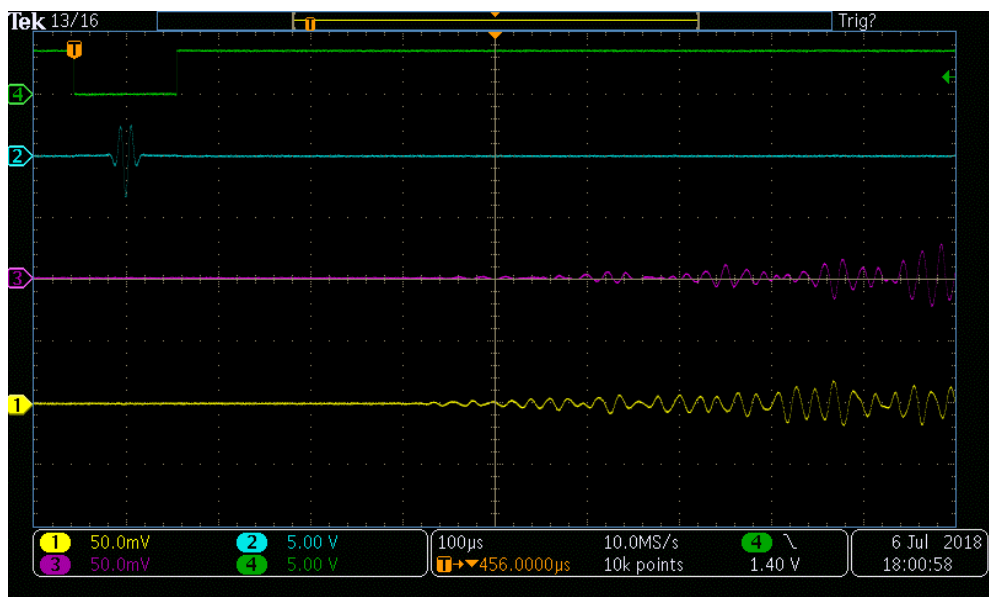
Figur 227. TEK00283 f=6 kHz Upprepning vid denna frekvens med korrekt placerade markörer.



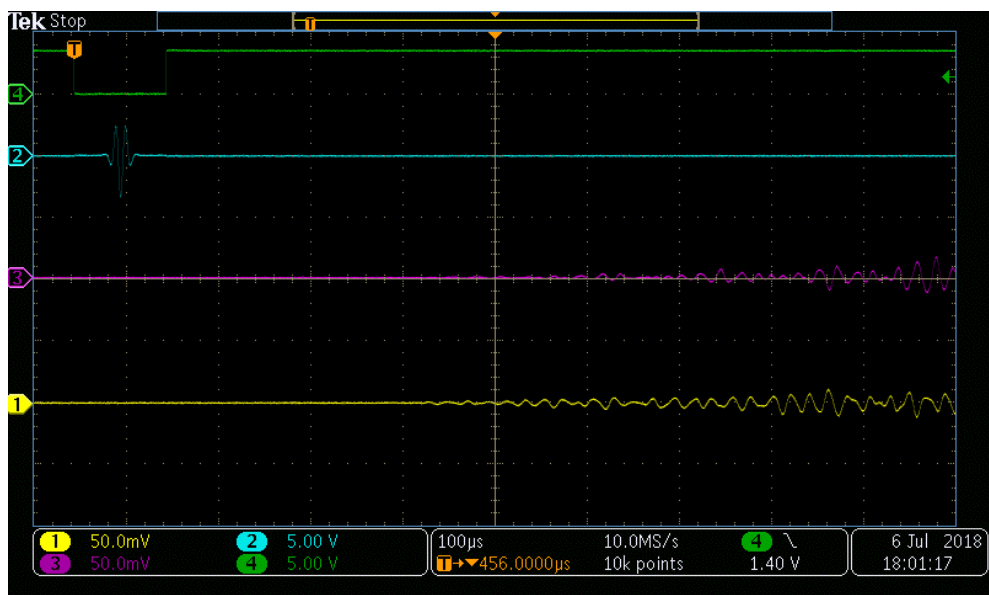
Figur 228. TEK00284 f=7 kHz



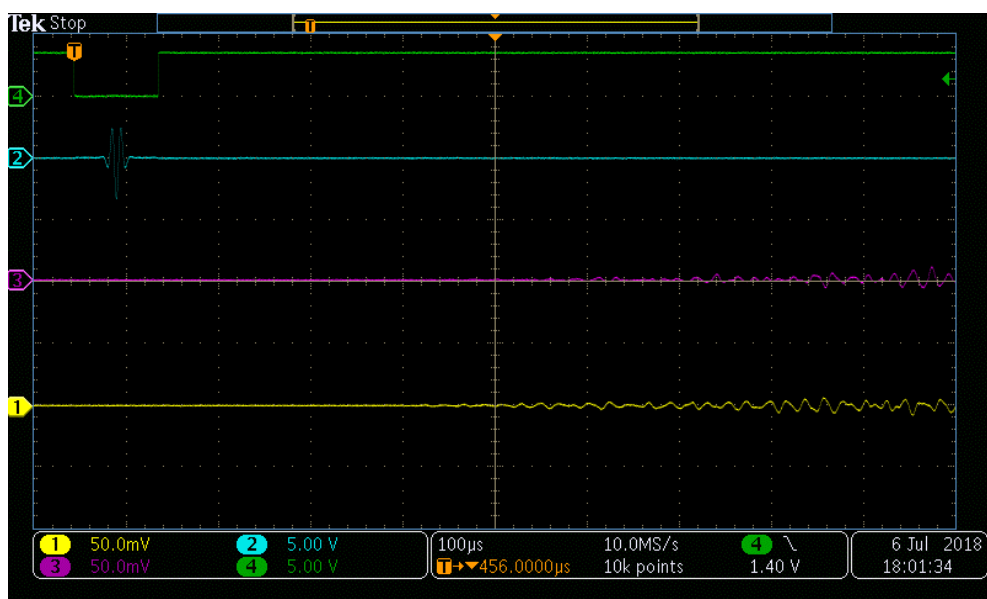
Figur 229. TEK00285 f=8 kHz



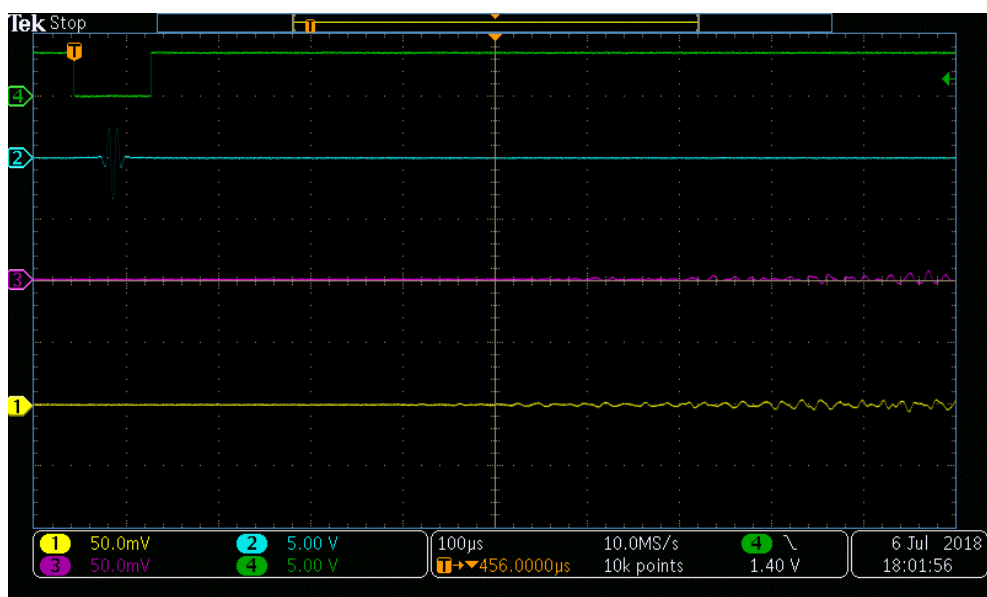
Figur 230. TEK00286 f=9 kHz



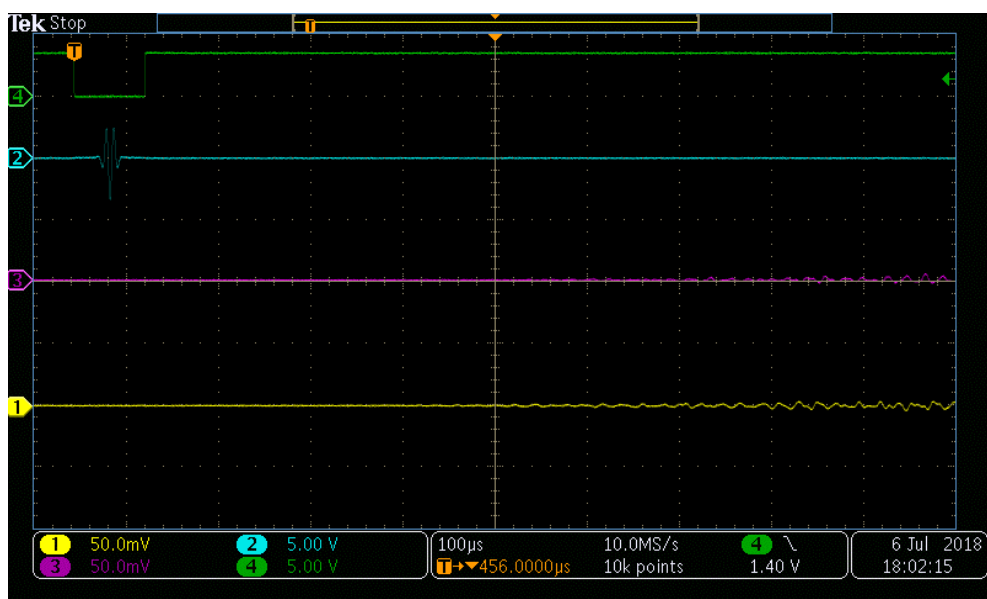
Figur 231. TEK00287 10 kHz



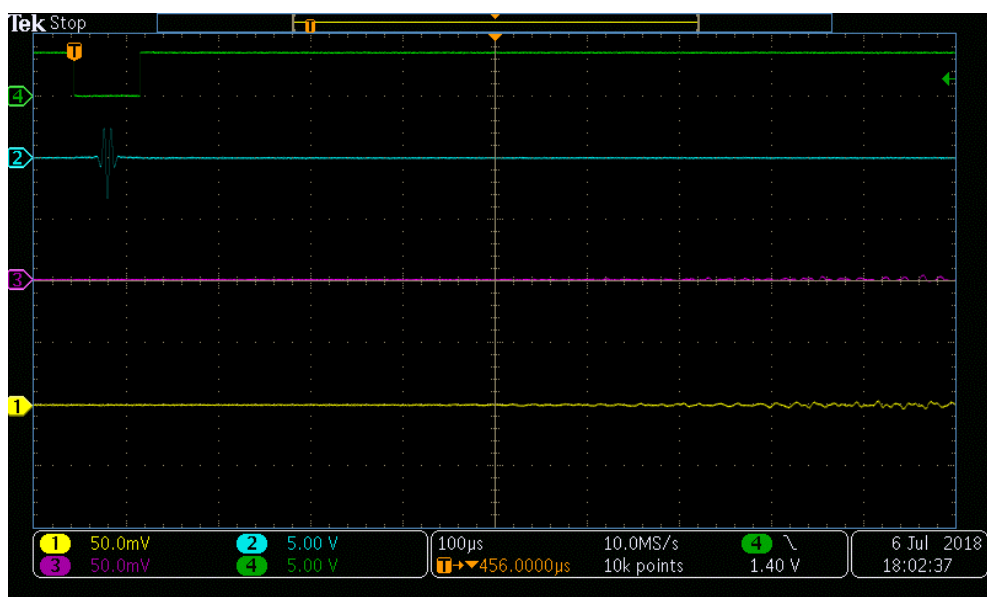
Figur 232. TEK00288 f=11 kHz



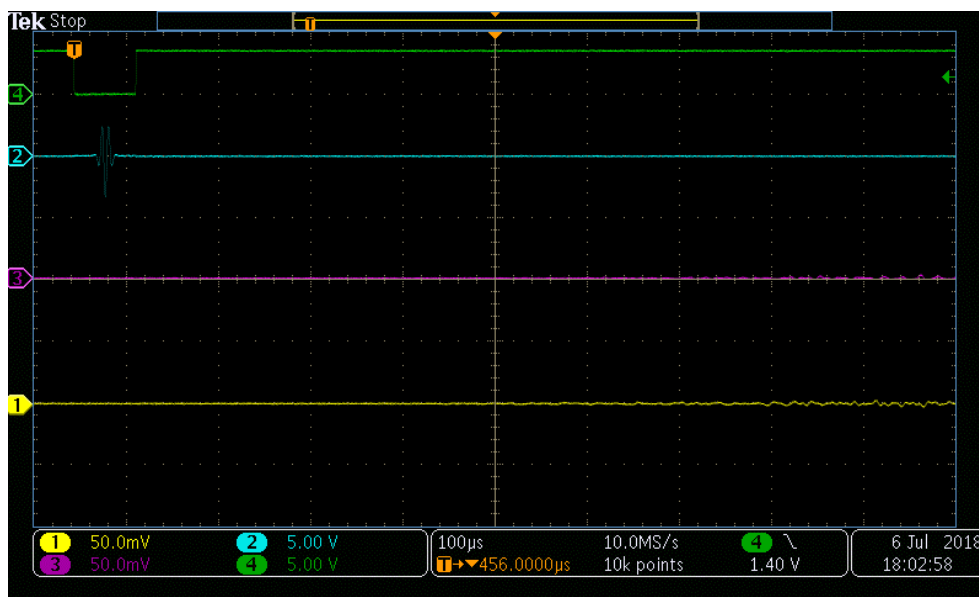
Figur 233. TEK 00289 f=12 kHz



Figur 234. TEK00290 f=13 kHz



Figur 235. TEK00291 f=14 kHz



Figur 236. TEK00292 f=15 kHz

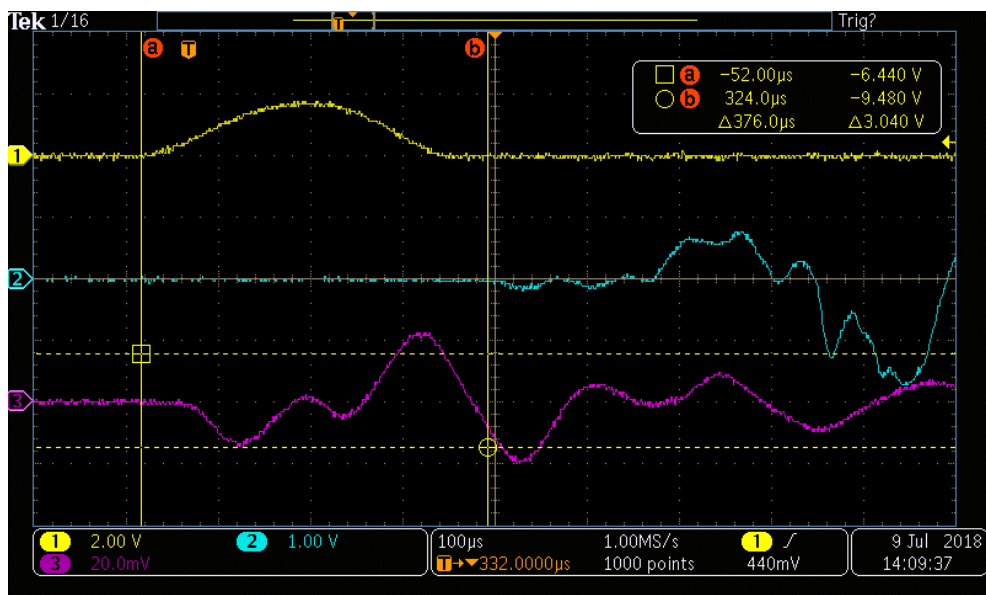
Sensorkombinationen gav starkast transmitterad signal vid 3 kHz. Det är möjligt att AWG frekvens under 3 kHz skulle givit ännu starkare transmissionssignal. Som tidigare nämnts är effektförstärkaren RITEC avsedd för frekvensområdet 50 kHz - 5 MHz. Om man försöker sända lägre frekvens än 50 kHz blir utsignalen distorderad, dvs den liknar inte insignalen. 3 kHz är repetitionsfrekvensen för vågformsgeneratoren så själva signalens frekvensområde är högre, men dock under 50 kHz, så det frekvensområdet kan inte användas med RITEC som effektförstärkare.

5.18 SPECIALHAMMARE 180709 TEK00293-00295

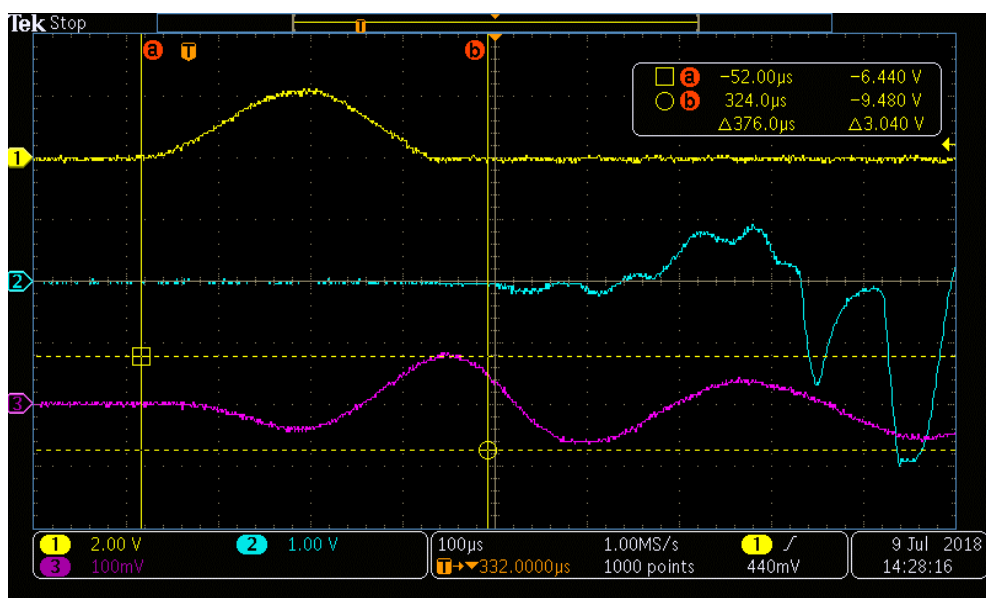
Test med liten PCB-hammare med kraftgivare. Mottagning med A1220 eller Panametrics 50+100kHz och slag nära A1220 placering.



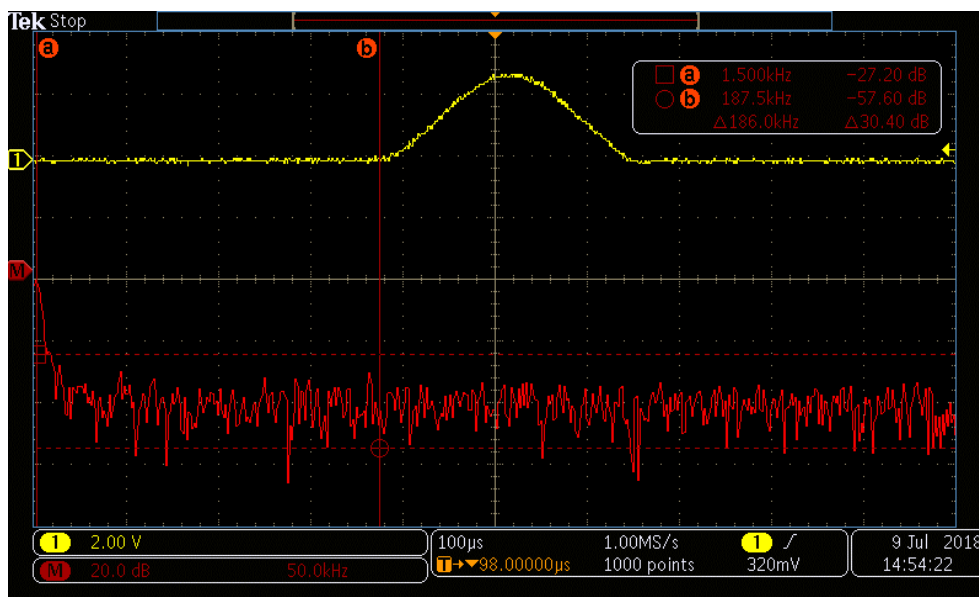
Figur 237. Hammare använd i detta försök (PCB). Den är instrumenterad med en kraftgivare och speciellt tillverkad för att ge en ringningsfri signal.



Figur 238. TEK00293 Ch1: Kraftsignal från hammare x 10 (PCB 480E09). Ch2: Signal uppmätt på motstående sida med Panametrics 50+100 kHz. Ch3: Reflekterad signal mottagen med M2502S (skjuvvåg). Markören b placerad där en reflex från stålplåten borde inträffa i kanal 3. Det låga frekvensinnehållet gör att någon sådan reflex inte kan urskiljas. Av kanal 1 framgår att kontakttiden mellan hammare och provkropp motsvarar passage genom hela provkroppen.



Figur 239. TEK00294 D:o men med A1220P (kompressionsvåg) som mottagare i Ch3. Panametrics 50+100 kHz mottagare andra sidan parallellt genom Först 5113 x 100 Ch2.



Figur 240. TEK00295 Kraftpuls med liten hammare med FFT av signalen. Förstärkaren till kraftgivaren inställd på 10 ggr förstärkning. Det saknas frekvenskomponenter över 10 kHz.

5.19 NYA VÅGFORMER

En serie tester med vågformer genomförs. De är positiv fyrkantvåg (spike/Dirac), positiv och förskjuten negativ fyrkantvåg, positiv Ricker och negativ Ricker. Ricker är en två gånger deriverad Gausspuls. Tanken med förskjuten fyrkantvåg är att den oscillation som startas av den första, positiva fyrkantvågen skall motverkas av den andra, negativa fyrkantvågen. Därigenom skall den alstrade vågformen bli så kort som möjligt trots att man ligger nära sensorns resonansfrekvens.

Kanal 1 utsignal från vågformsgeneratoren AWG

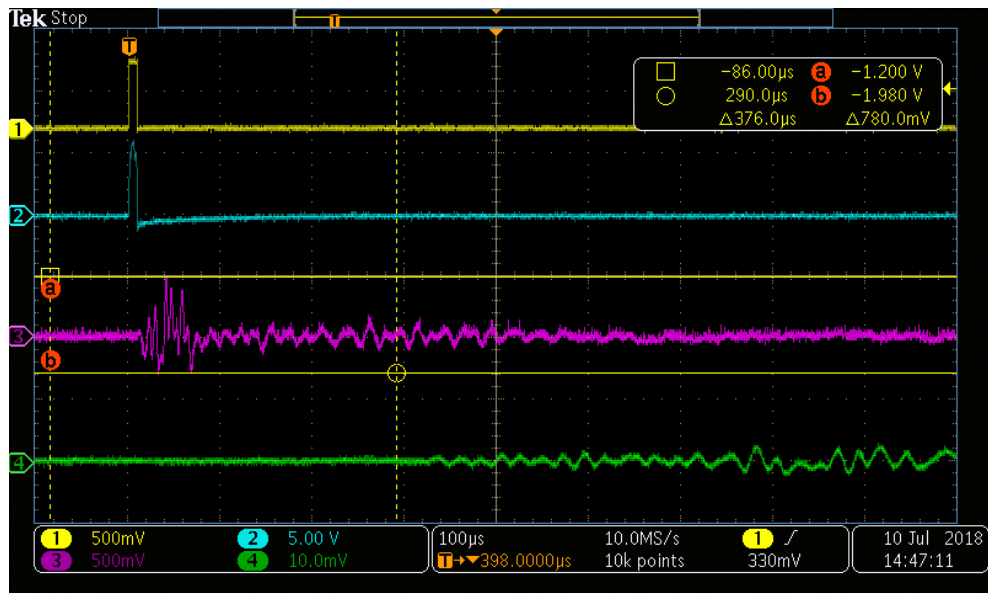
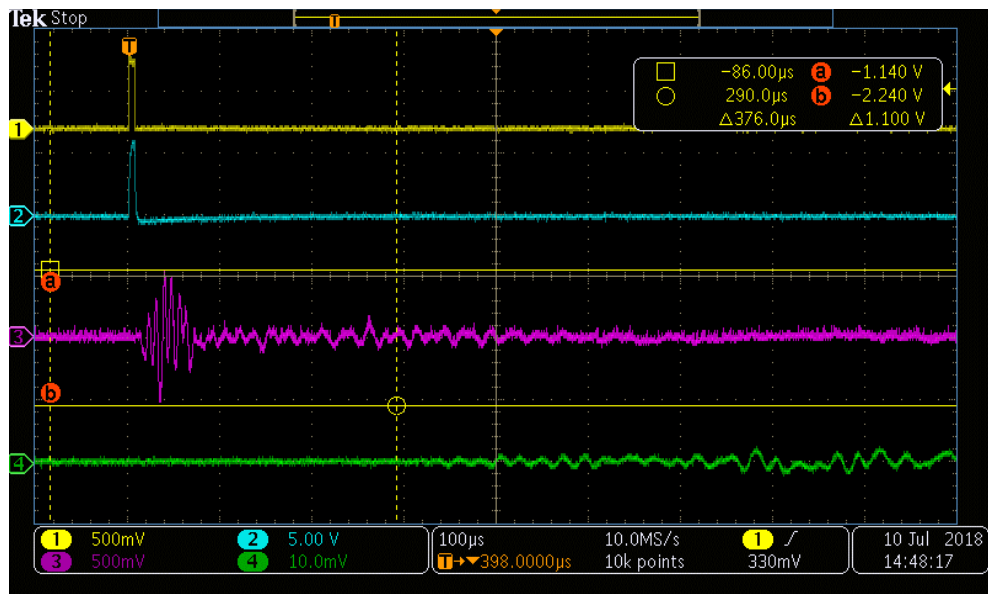
Kanal 2 är monitorsignalen från RITEC effektförstärkare

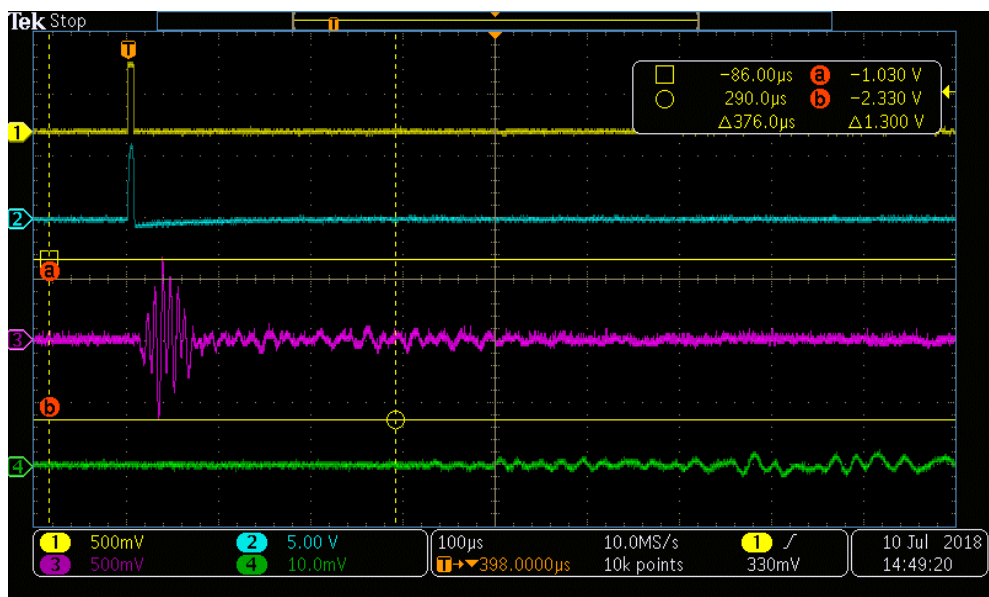
Kanal 3 är M2502 P vågformen mottagen invid sändaren via 5113 med 1000 ggr förstärkning om inte annat anges. Här syns direktvåg S-M samt ev reflex från stålplåten. Den senare bör inträffa samtidigt med den transmitterade vågens ankomst.

Kanal 4 är transmitterad vågform, alltså tvärs genom provkroppen uppmätt med Panametrics 50+100 kHz sensorerna.

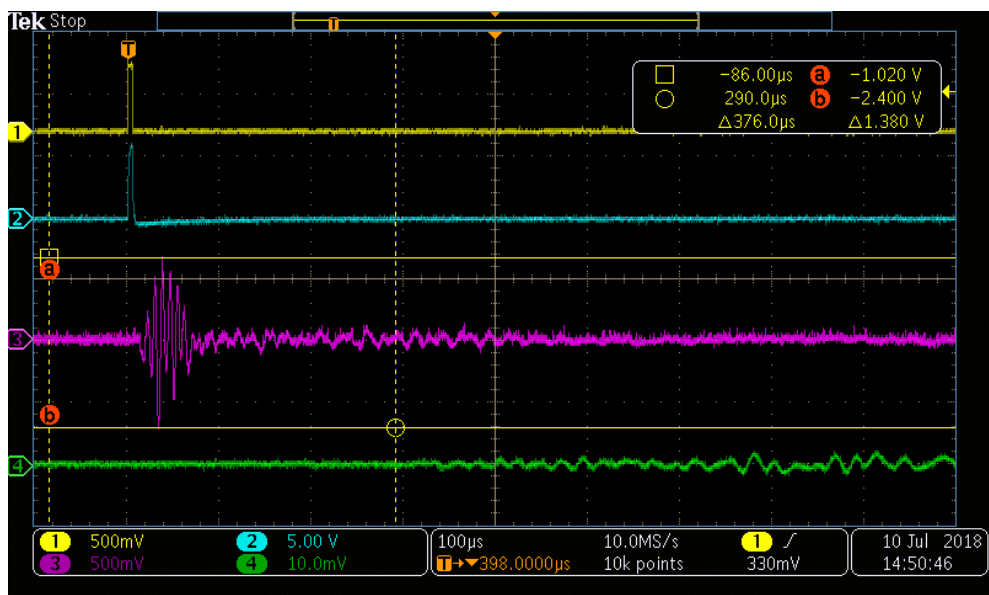
Oscilloskopplottarna 296-305 skrotas, därav glipan i numreringen.

5.19.1 Spike 180710 TEK00306-00324

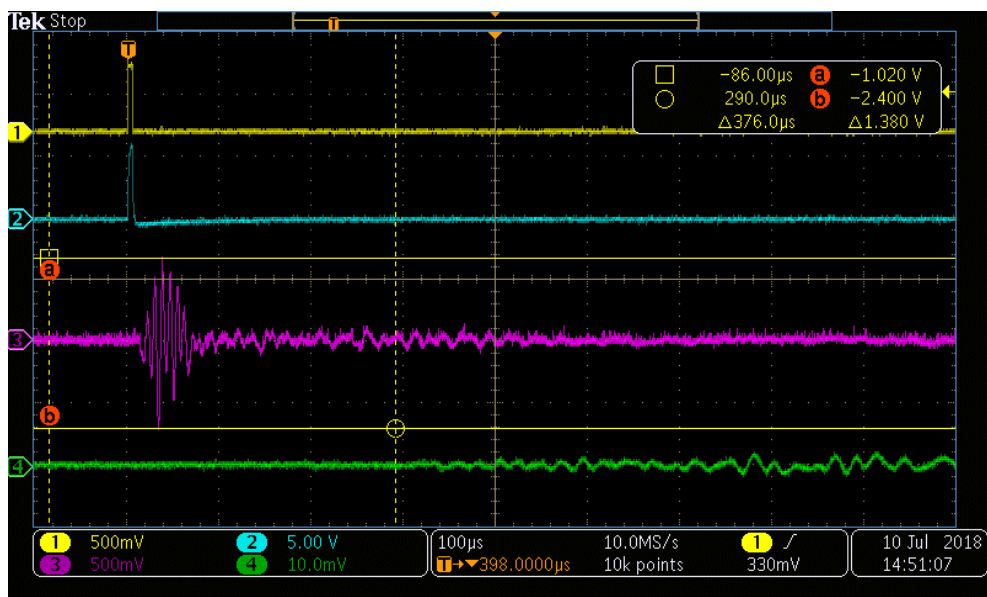
Figur 241. TEK00306. Fyrkantvåg AWG frekvens $f=0.7$ kHz. Amplitud kanal 3 $A=0.780$ VFigur 242. TEK00307 $f=0.9$ kHz, $A=1.100$ V



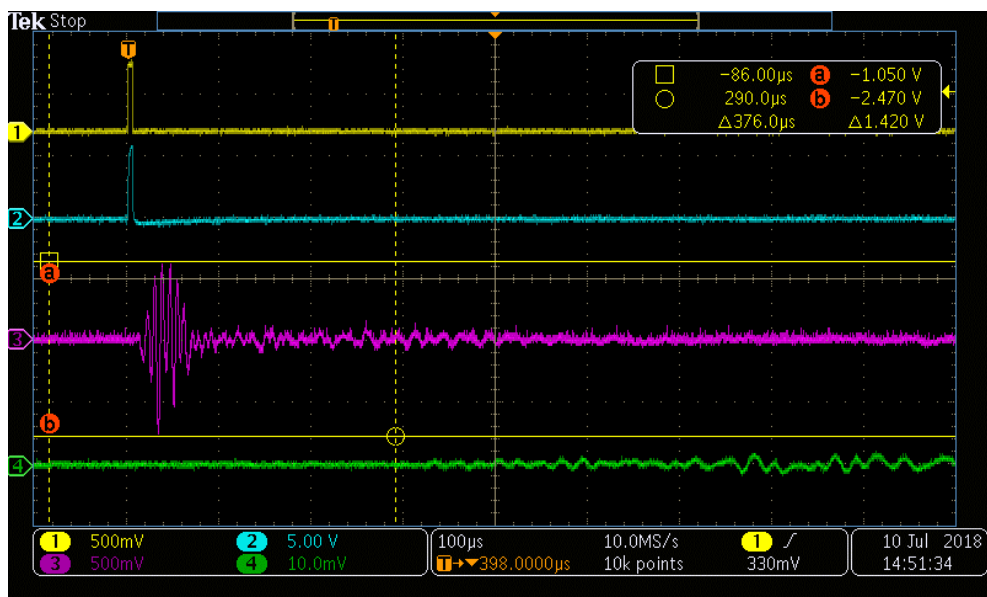
Figur 243. TEK00308 f=1.0 kHz, A=1.300 V



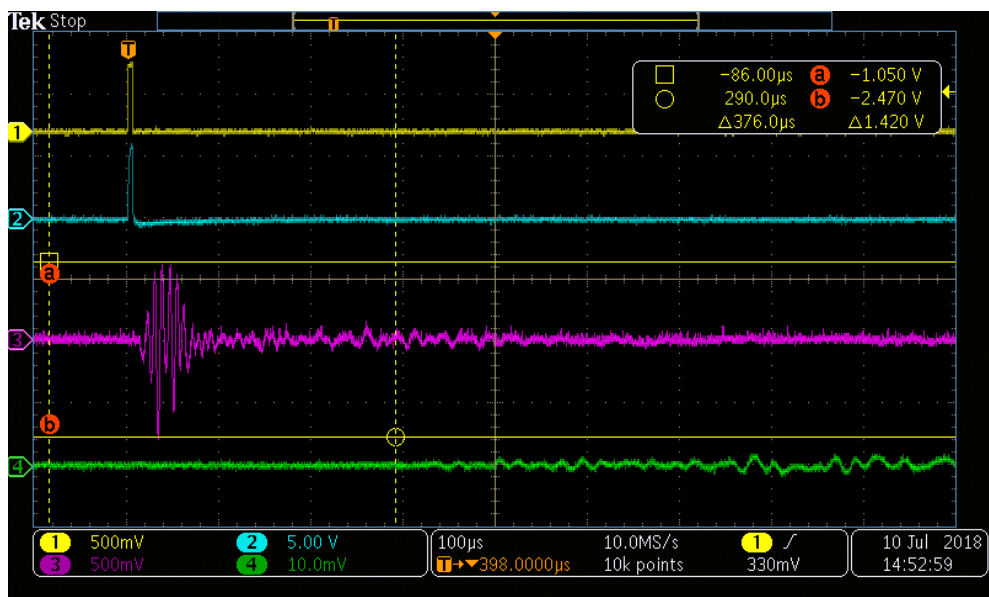
Figur 244. TEK00309 f=1.1 kHz, A=1.380 V



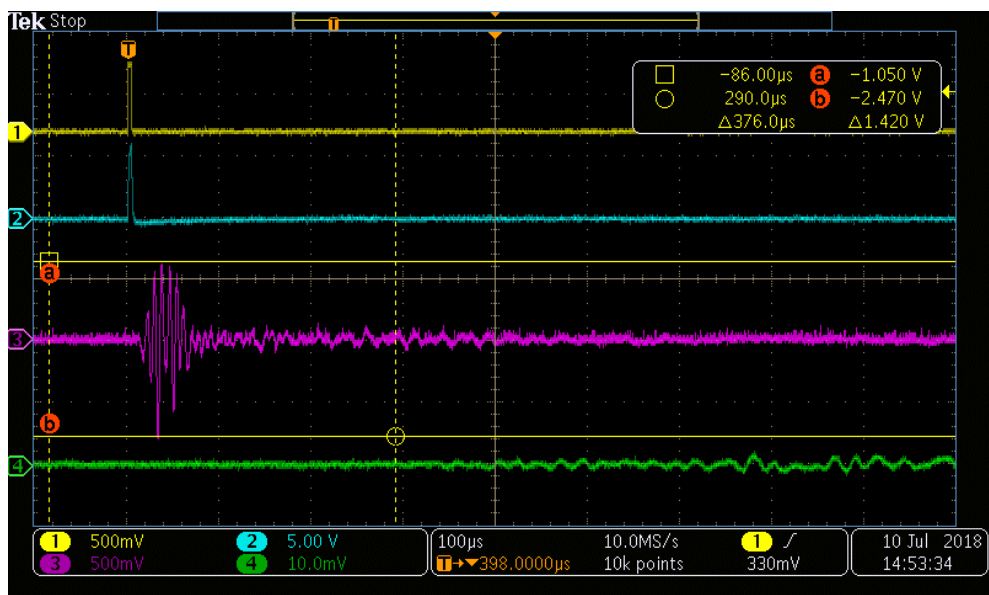
Figur 245. TEK00310 f=1.2 kHz, A=1.380 V



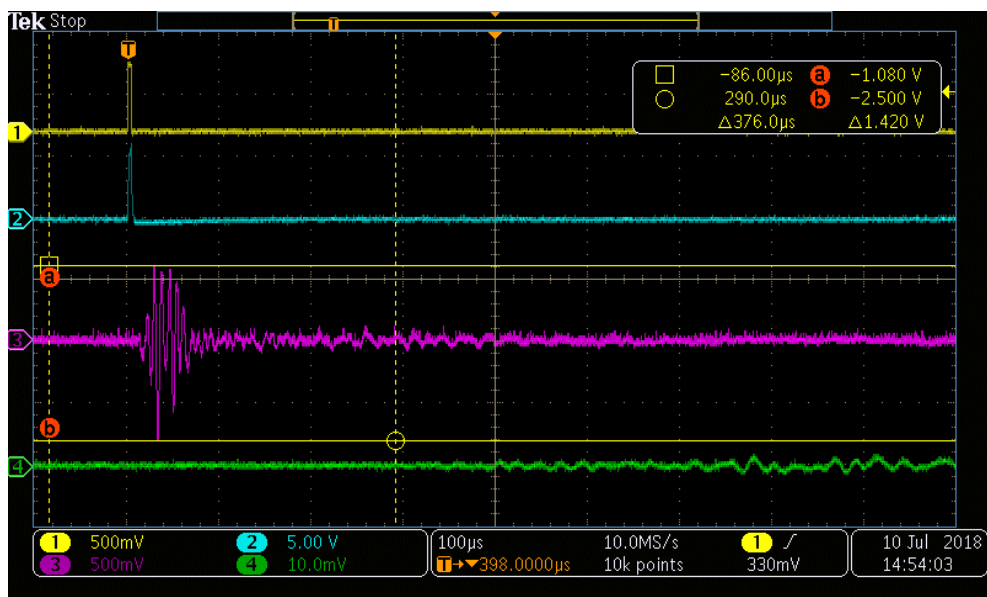
Figur 246. TEK00311 f=1.3 kHz, A=1.420 V MAX



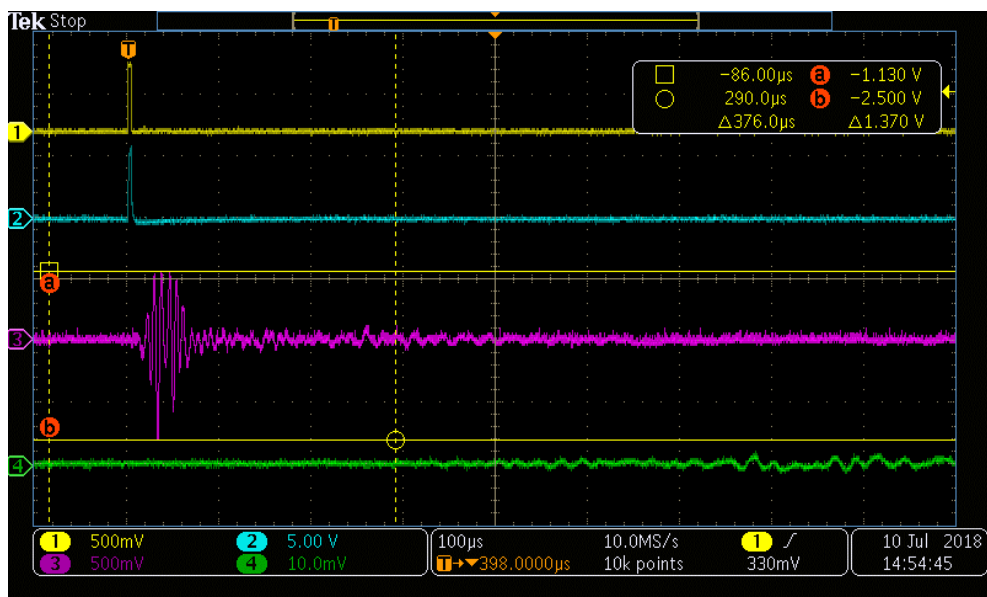
Figur 247. TEK00312 f=1.4 kHz, A=1.420 V MAX



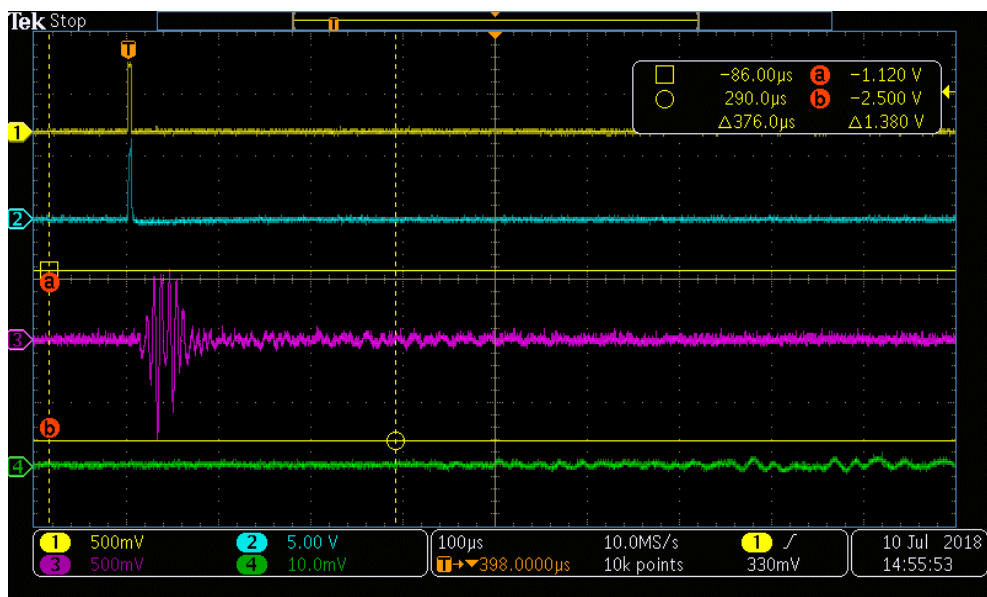
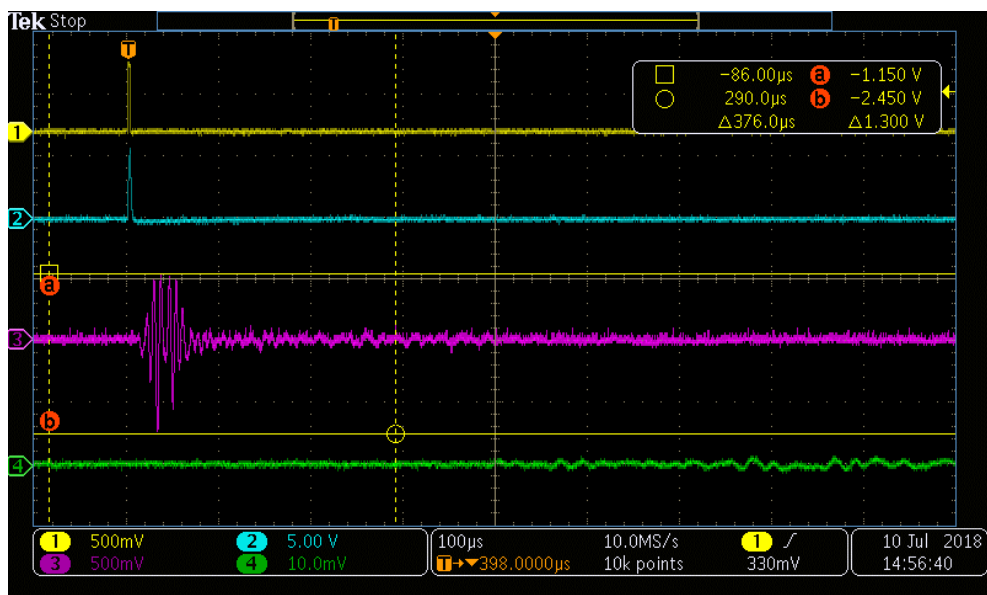
Figur 248. TEK00313 1.5 kHz, A=1.420 V MAX

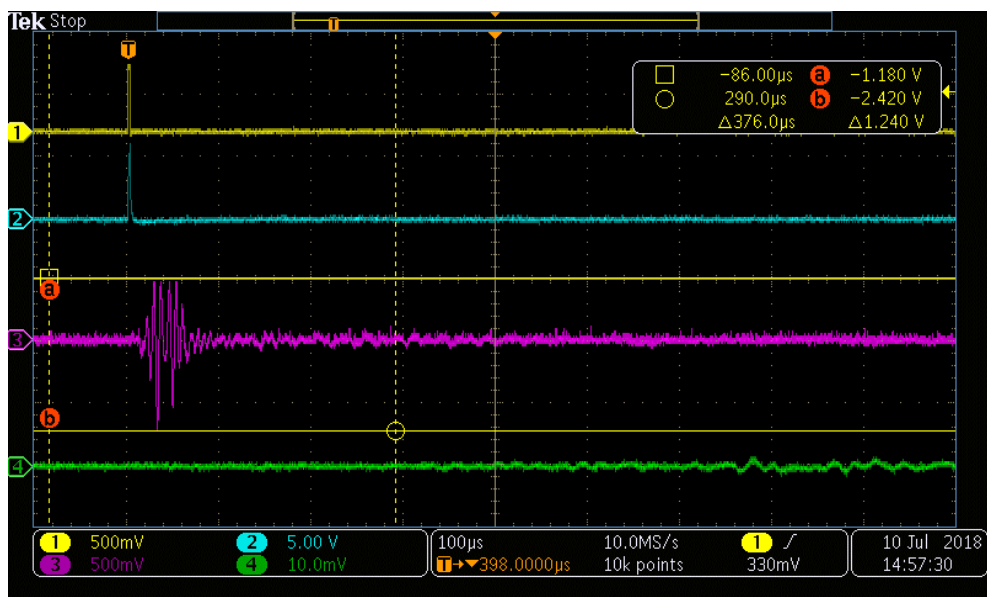
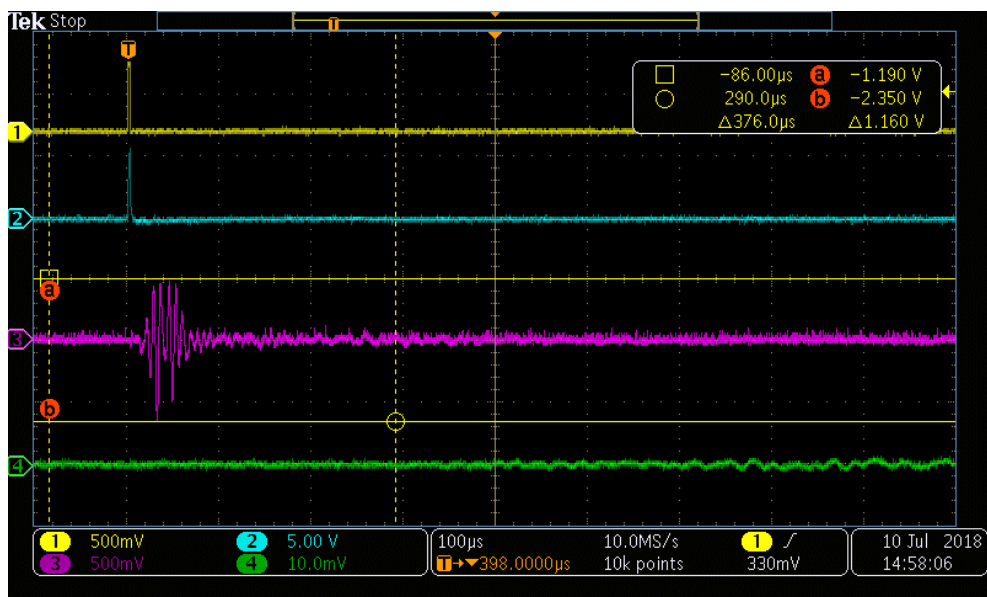


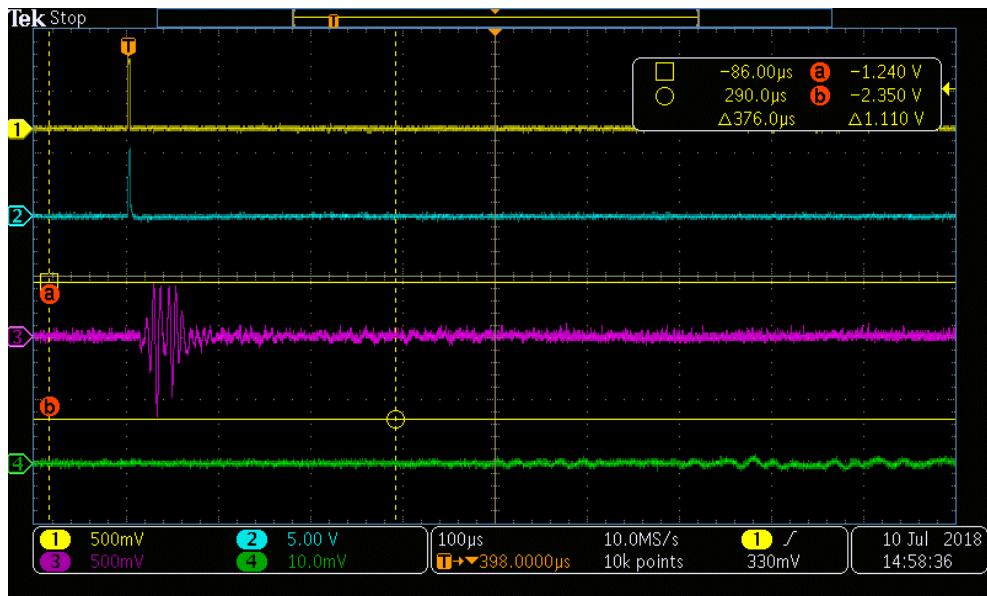
Figur 249. TEK00314 1.6 kHz, A=1.420 V MAX



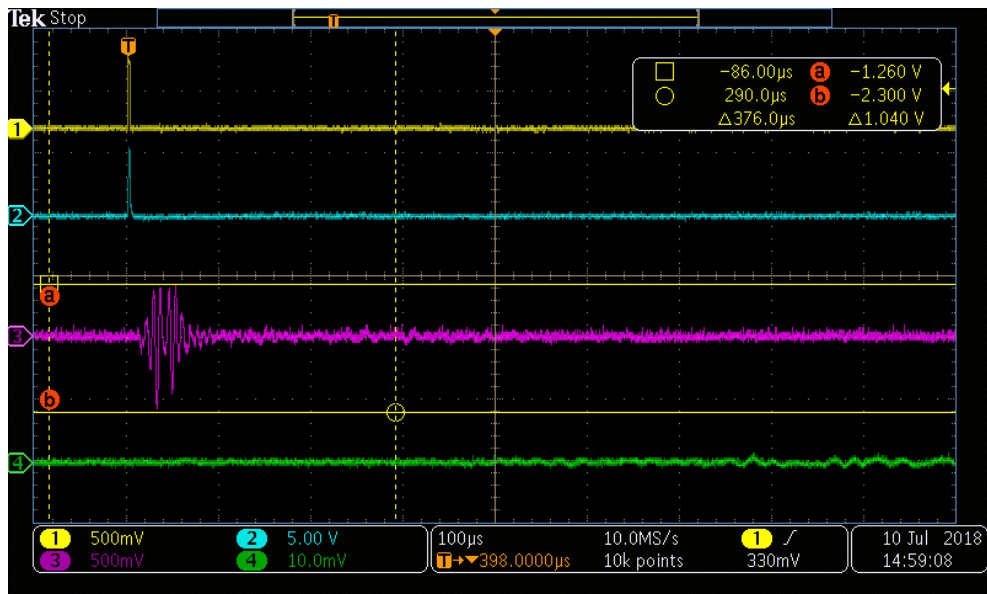
Figur 250. TEK00315 f=1.7 kHz, A=1.370 Vpp

Figur 251. TEK00316 $f=1.8$ kHz, $A=1.380$ VFigur 252. TEK00317 $f=1.9$ kHz, $A=1.300$ V

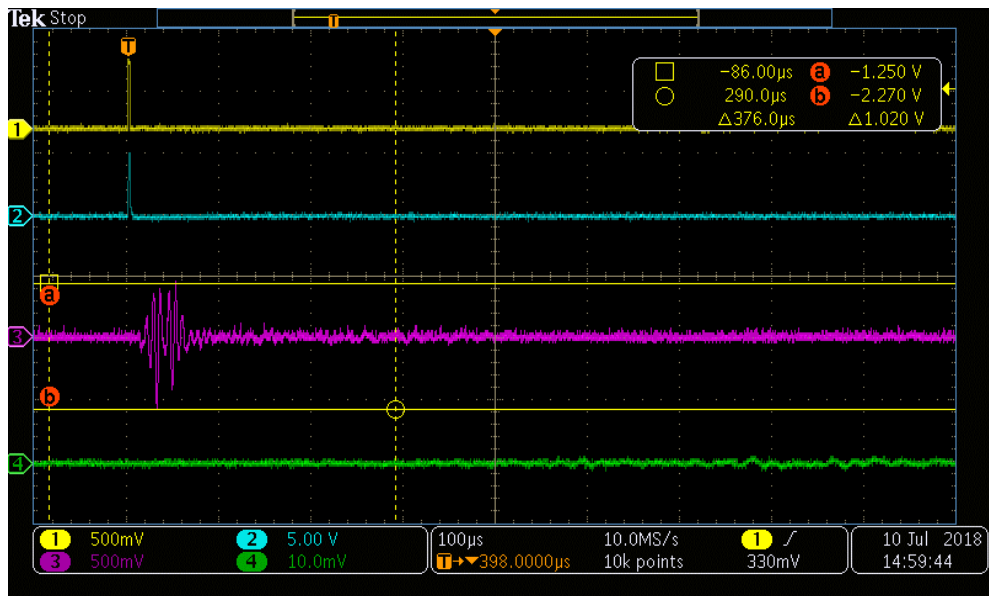
Figur 253. TEK00318 $f=2.0$ kHz, $A=1.240$ VFigur 254. TEK00319 $f=2.4$ kHz, $A=1.160$ V



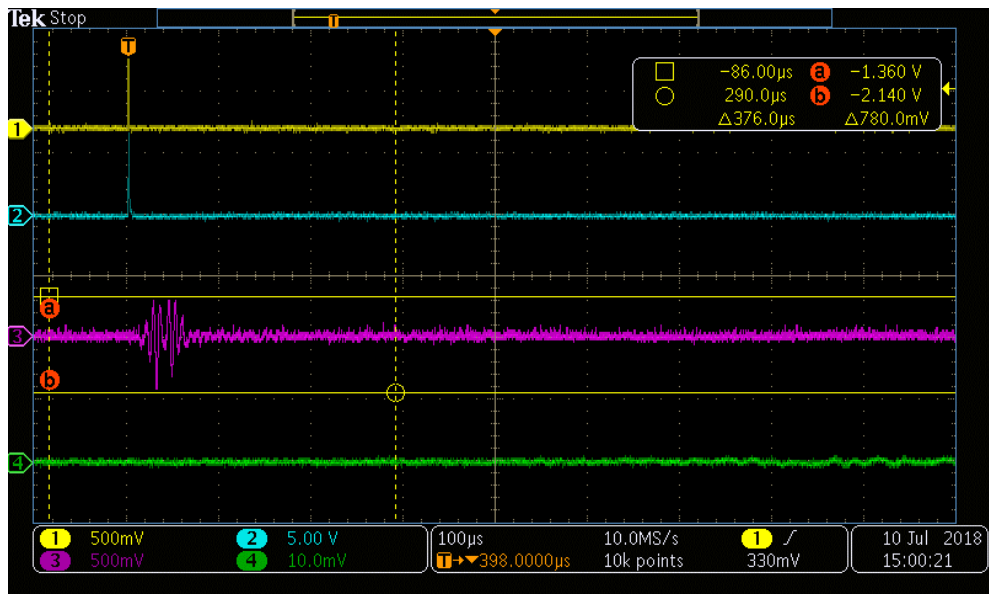
Figur 255. TEK00320 f=2.6 kHz, V=1.110 Vpp



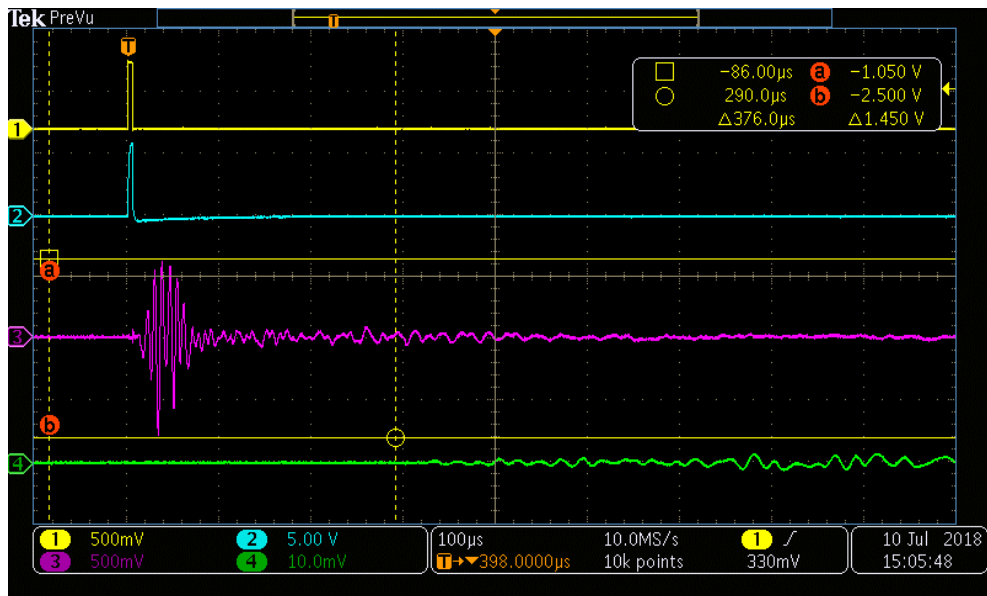
Figur 256. TEK00321 f=2.8 kHz, A=1.040 Vpp



Figur 257. TEK00322 $f=3.0$ kHz, $A=1.020$ Vpp

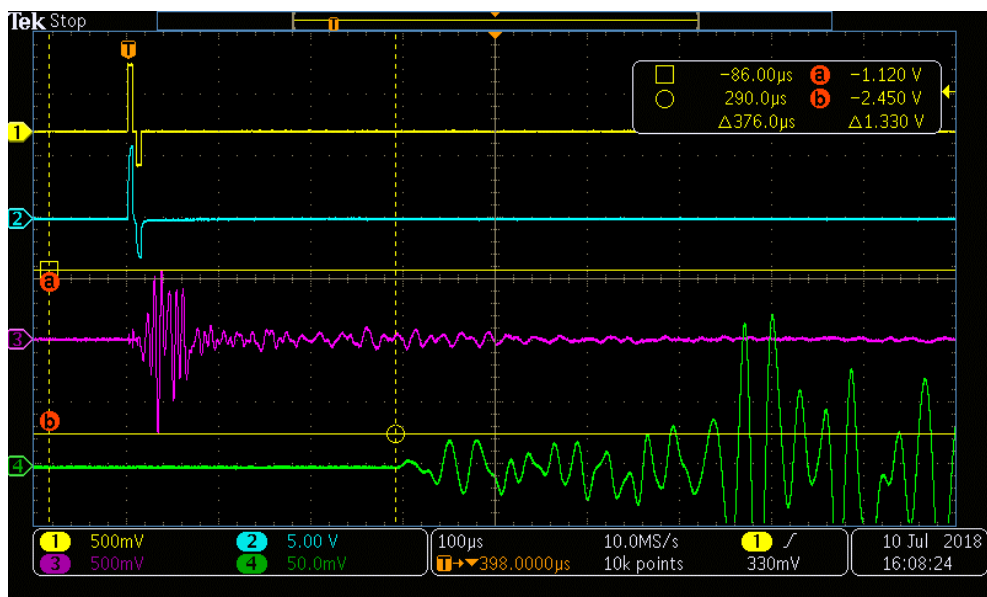


Figur 258. TEK00323 $f=4.0$ kHz, $A=0.780$ Vpp

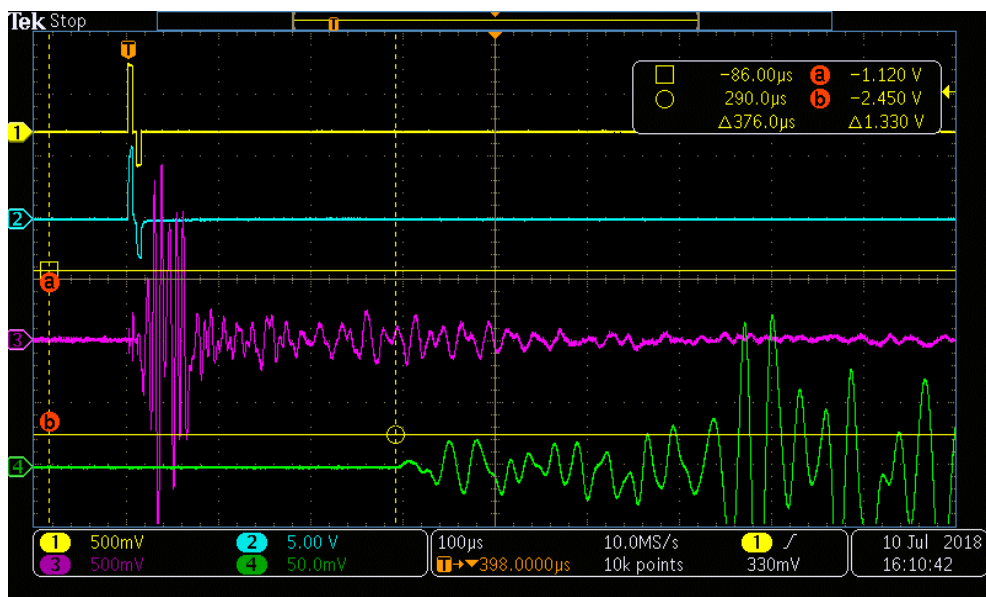


Figur 259. TEK00324 $f = 1.3$ kHz 16 medelvärdesbildade signaler $V = 1.450$ Vpp

5.19.2 Förskjuten fyrkantvåg 180710-11 TEK 00325-00357



Figur 260. TEK00325 Förtest förskjuten fyrkantvåg. AWG: $F = 1.3$ kHz, $U_t = 0.500$ Vpp. RITEC 8. Kanal 3 5113 / 1000 ggr förstärkning, kanal 4 B&K 2635. Medelvärde av 16 signaler.



Figur 261. TEK00326 Som ovan men förstärkaren 5113 ökad förstärkning till 2500 ggr.

Full serie påbörjas med M2502P som sändare och följande inställningar

Kanal 1: AWG ut 0.5 Vpp vid frekvensinställning f

Kanal 2: RF pulse monitor på RITEC dvs utsignal/100

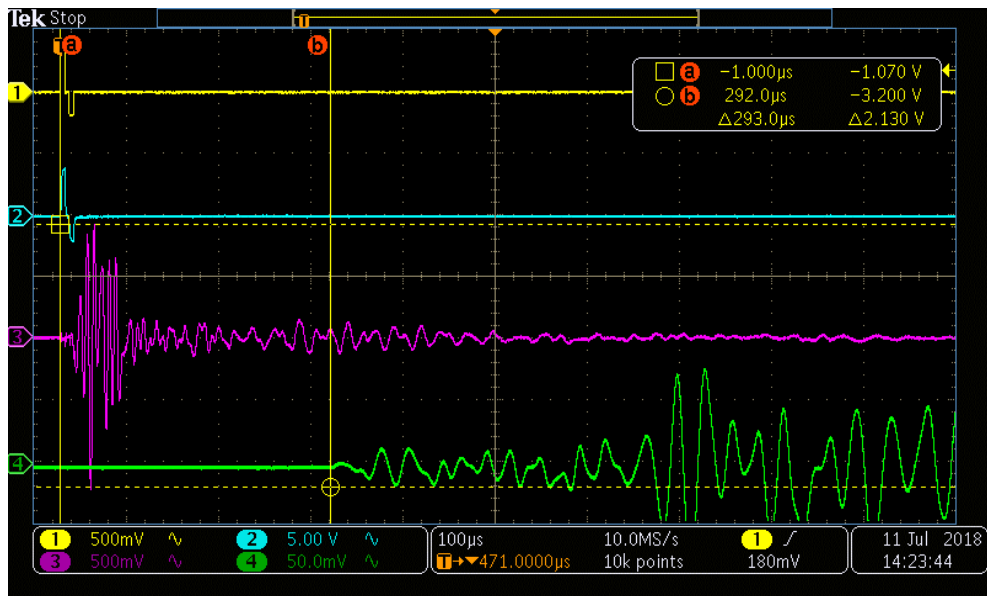
Kanal 3: M2502P mottagen signal via förstärkare 5113/2500 ggr 30 kHz Highpass. Sändare.

Kanal 4: Panametrics 50+100 via B&K 2635 0.900/10

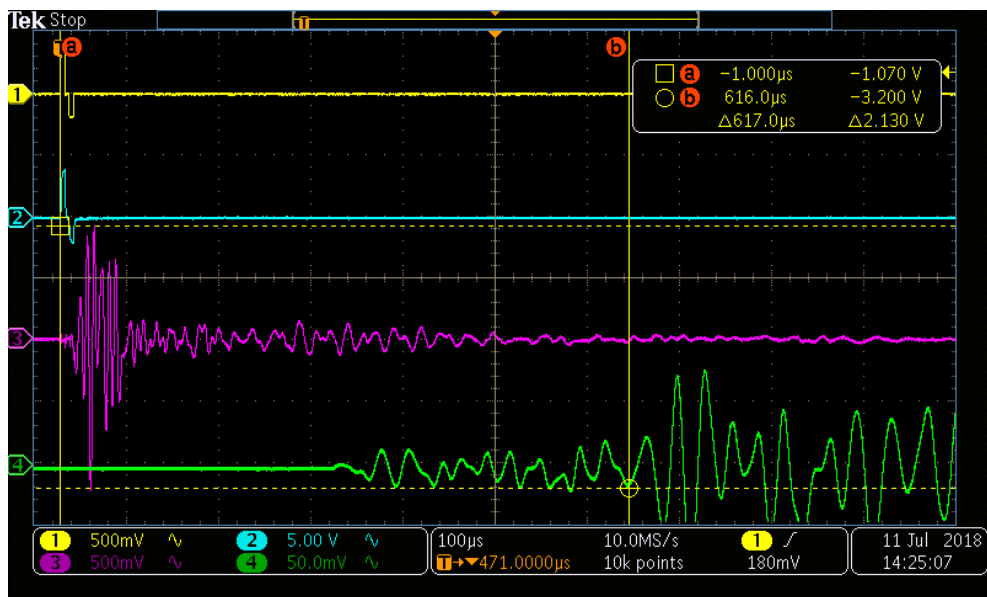
I kanal 3 framträder direktvågen från sändarsidan av A1220P till mottagarhalvan direkt. En reflex från stålplåten bör inträffa samtidigt med att den transmitterade signalen ankommer i kanal 4.

TEK00327 och 00328 är en undersökning av transmissionstider och vågtyper.

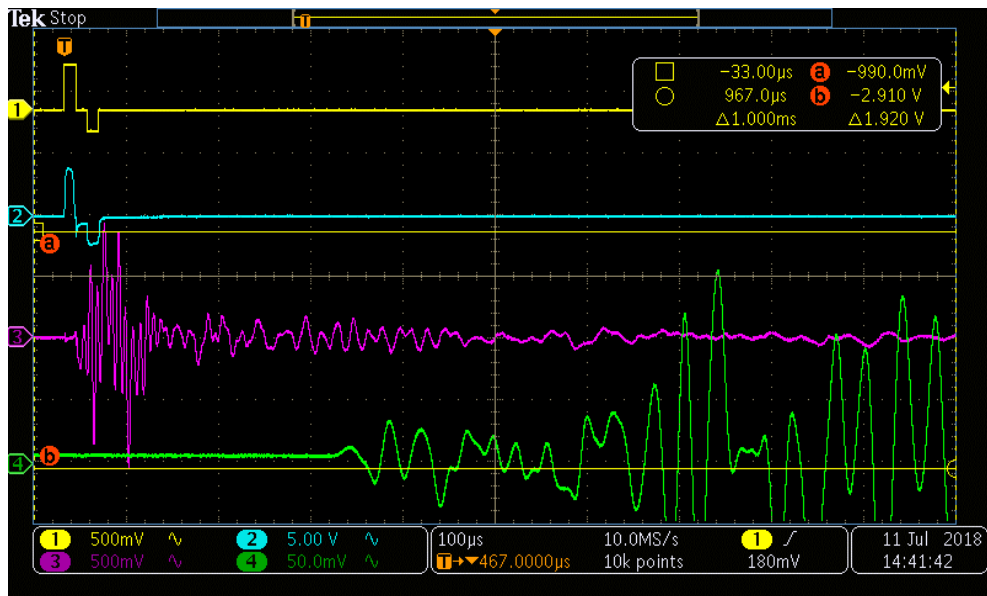
Mätserien varierar enbart pulslängden. Det relativa avståndet i tid mellan den positiva och den negativa delen ändras inte. Pulslängden varierar genom att utmatningshastigheten, frekvensen, från vågformsgeneratoren ändras. Max signalamplitud associeras med den lämpligaste utmatningsfrekvensen.



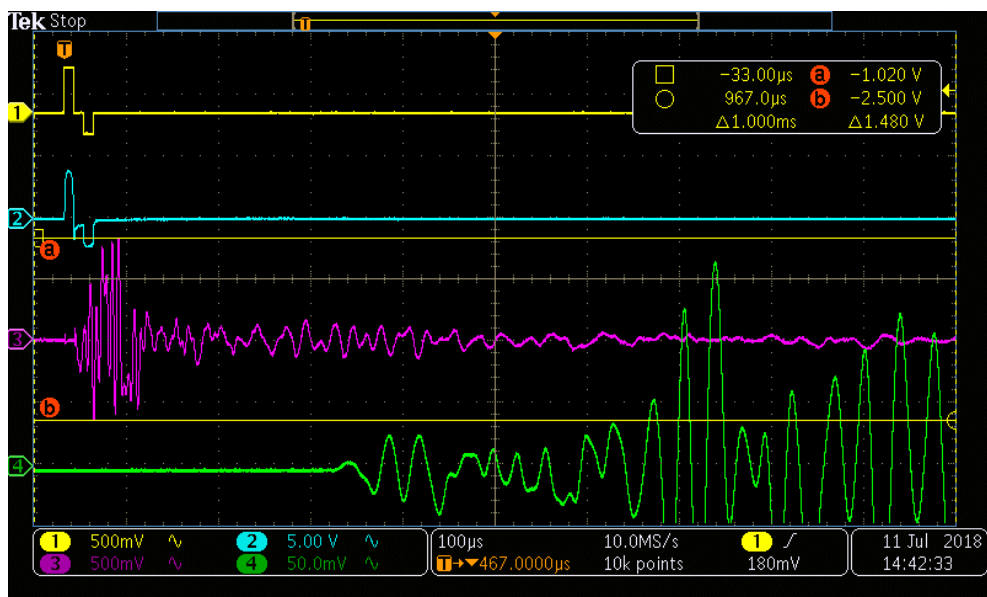
Figur 262. TEK00327 AWG f=1.3KHz Transmissionstid 293 us. Kort tid jämfört med tidigare resultat. Ger hastigheten 4095 m/s.



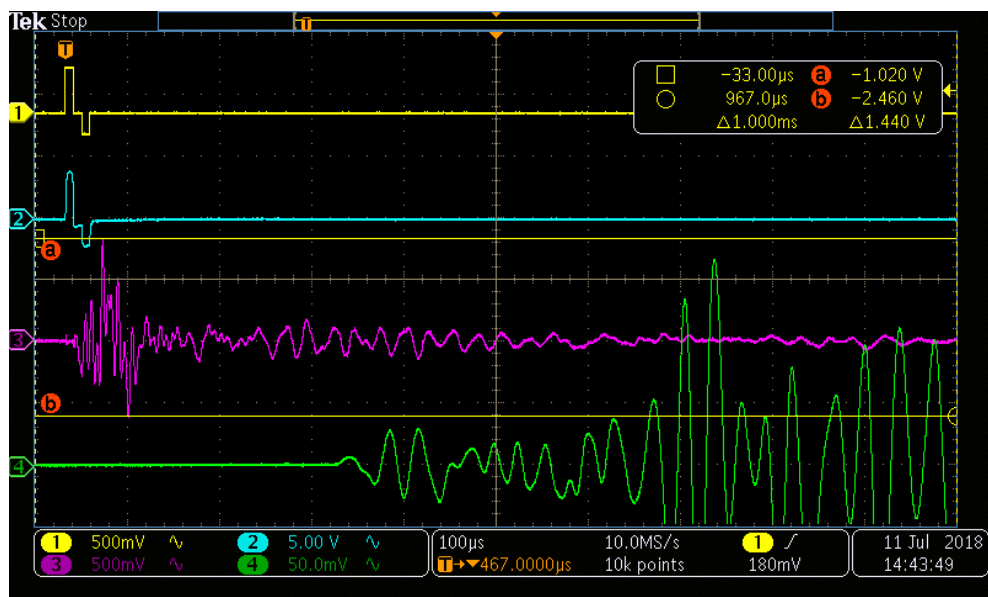
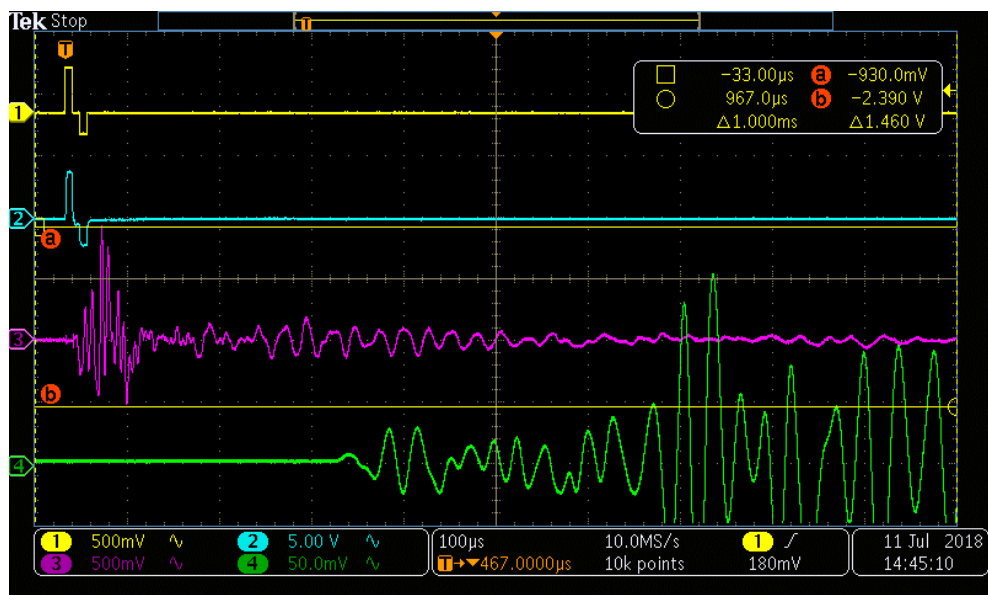
Figur 263. TEK 00328. Bestämning av tiden för eventuellt dubbeleko, alltså att vågen gått genom provkroppen tre gånger. Då tiden endast är dubbla enkelpassagetiden kan det snarare röra sig om skjuvvågen, vilken utbreder sig med ungefär halva kompressionsvåghastigheten, i det här fallet 1944 m/s.

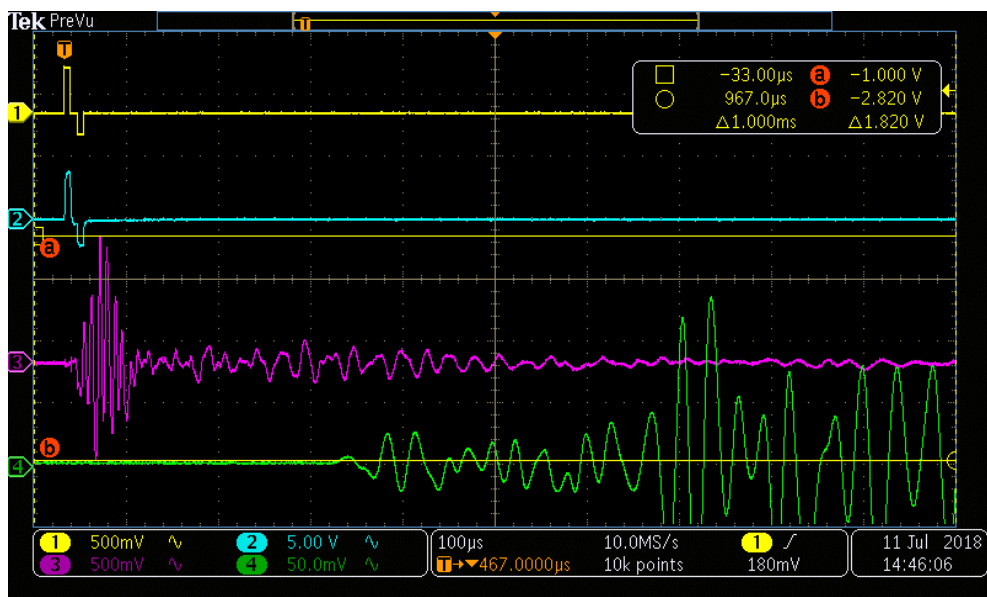
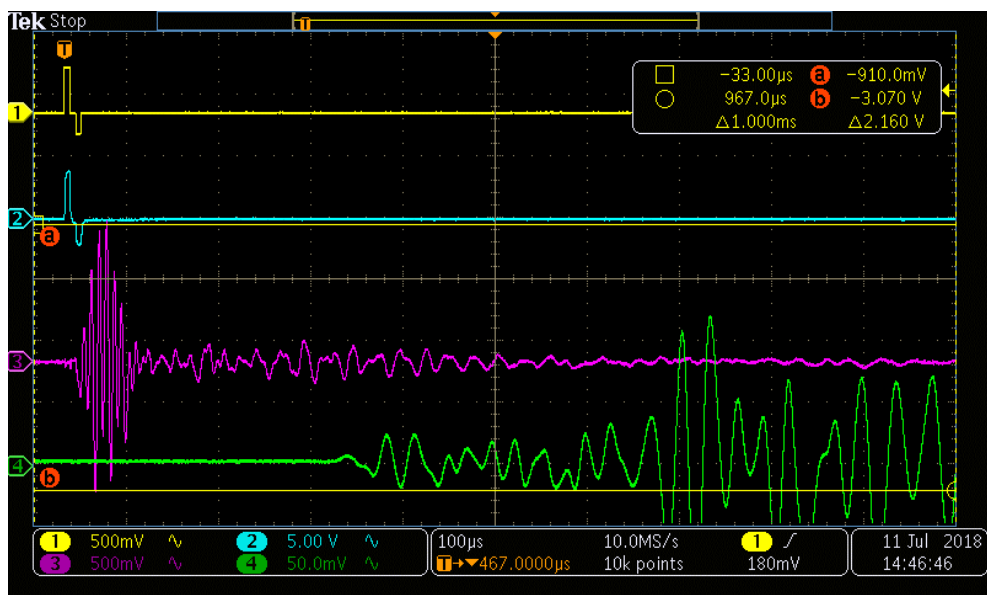


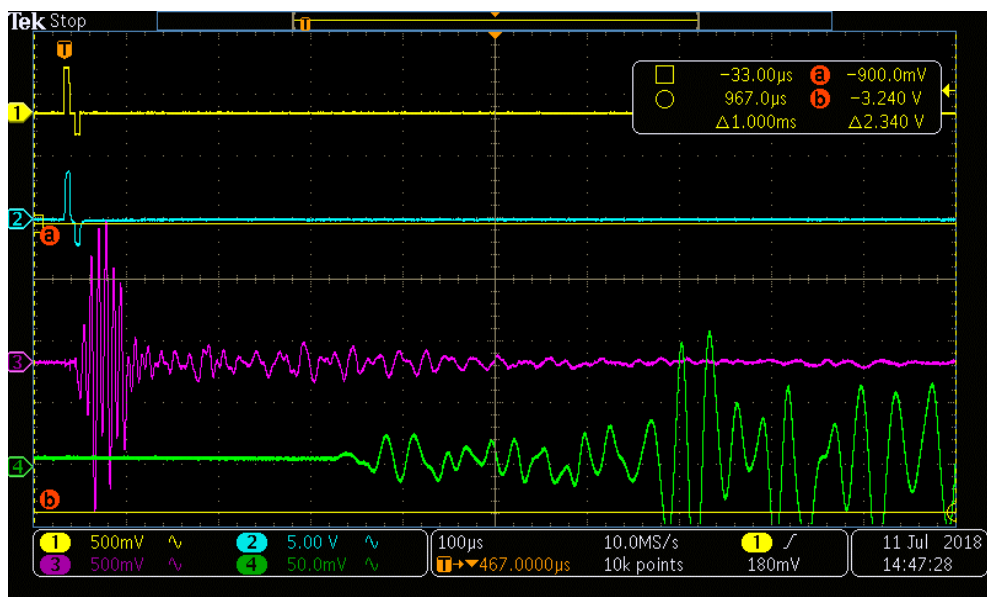
Figur 264. TEK 00329 Serien påbörjas AWG f=0.5 kHz, A(Ch3)=1.920V



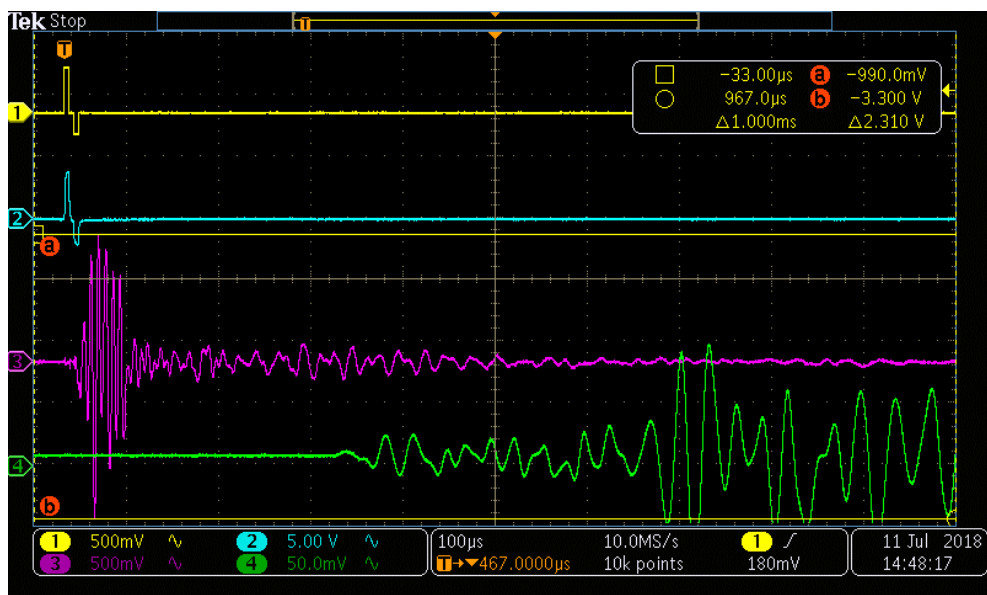
Figur 265. TEK00330 f=0.6 kHz, A=1.480 Vpp

Figur 266. TEK00331 $f=0.7$ kHz, $A=1.440$ VppFigur 267. TEK00332 $f=0.8$ kHz, $V=1.460$ Vpp

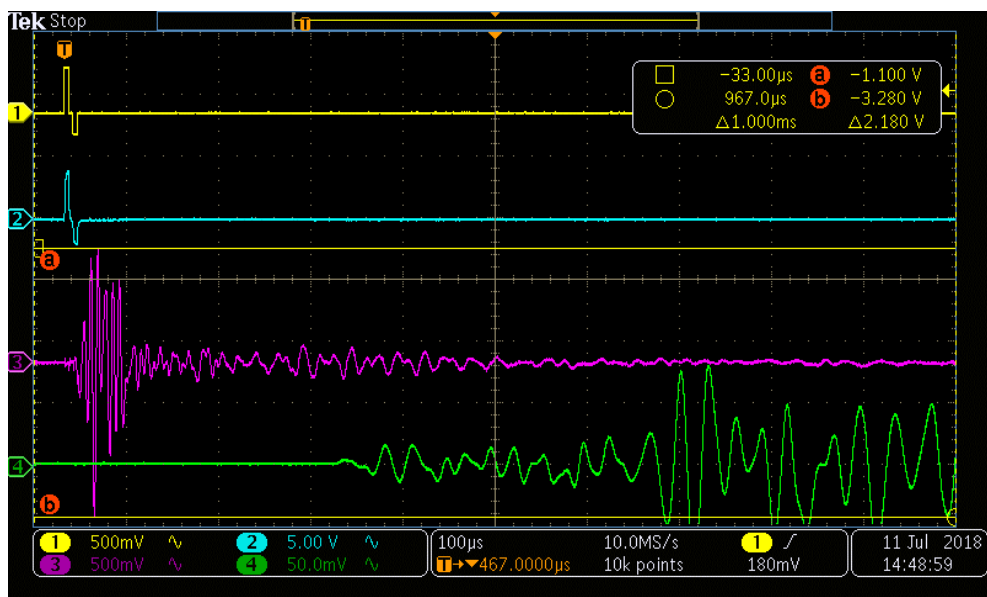
Figur 268. TEK00333 $f=0.9$ kHz, $A=1.820$ VppFigur 269. TEK00334 $f=1.0$ kHz, $A=2.160$ Vpp



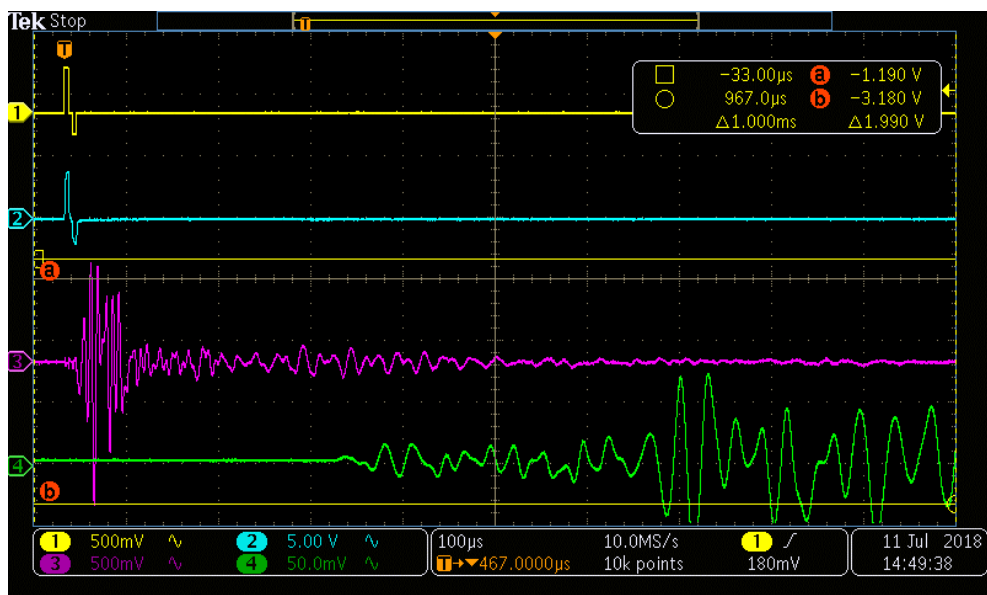
Figur 270. TEK00335 $f=1.1$ kHz, $A=2.340$ Vpp. Kraftigaste uppmätta amplituden.



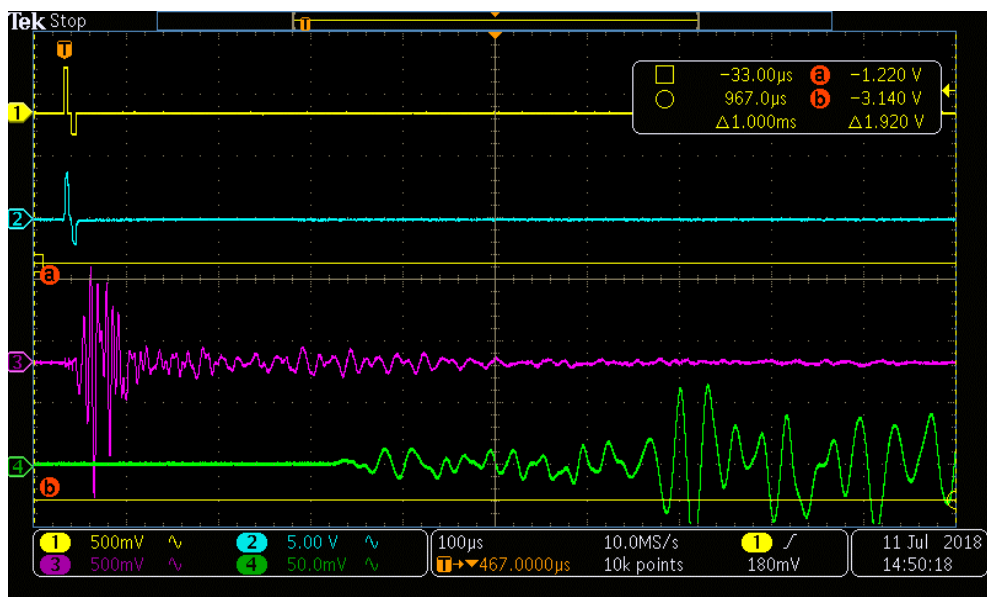
Figur 271. TEK00336 $f= 1.2$ kHz, $A=2.310$ Vpp



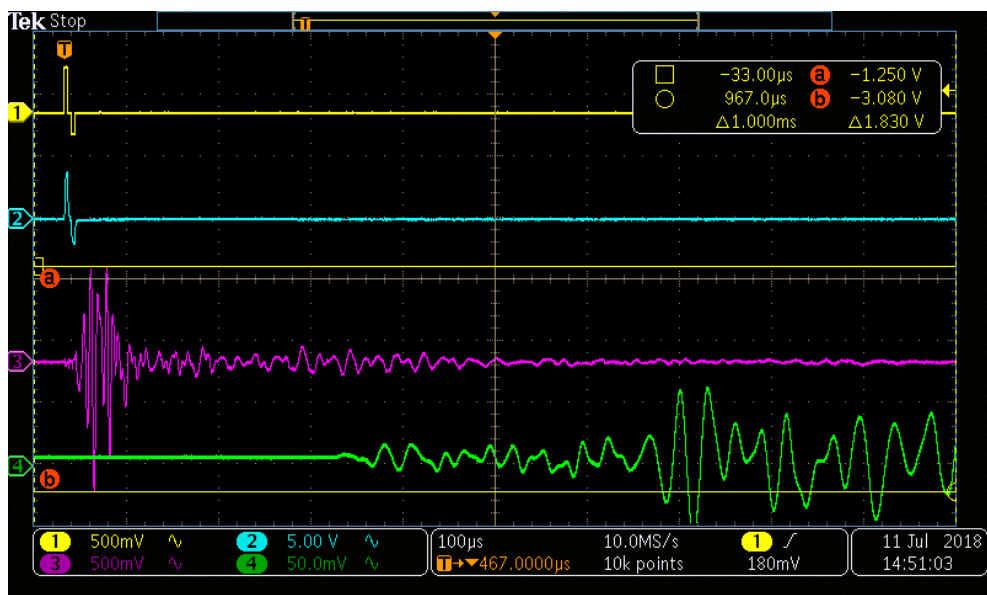
Figur 272. TEK00337 f=1.3 kHz, A=2.180 Vpp



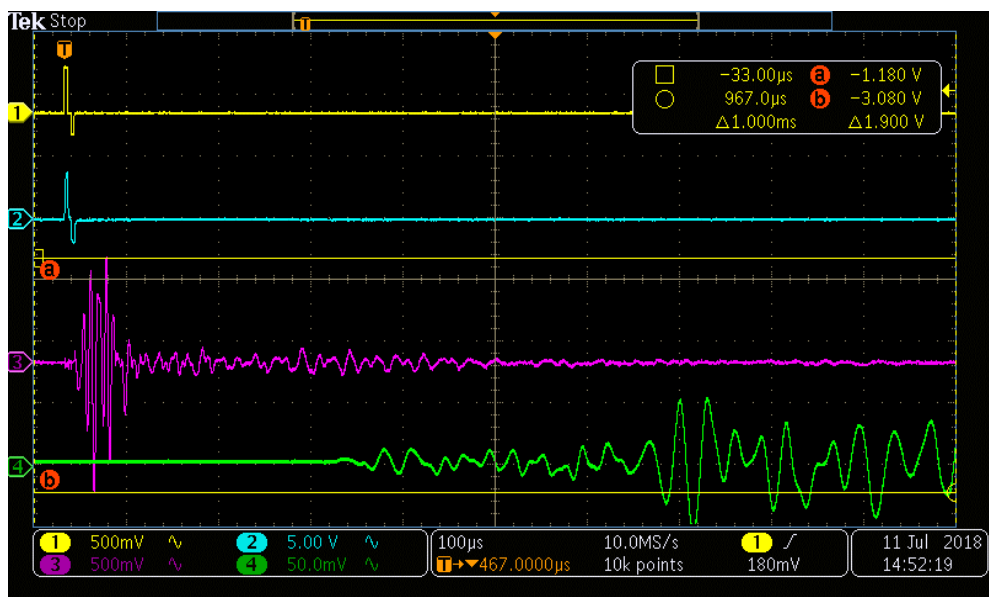
Figur 273. TEK00338 f=1.4 kHz, A=1.990 Vpp



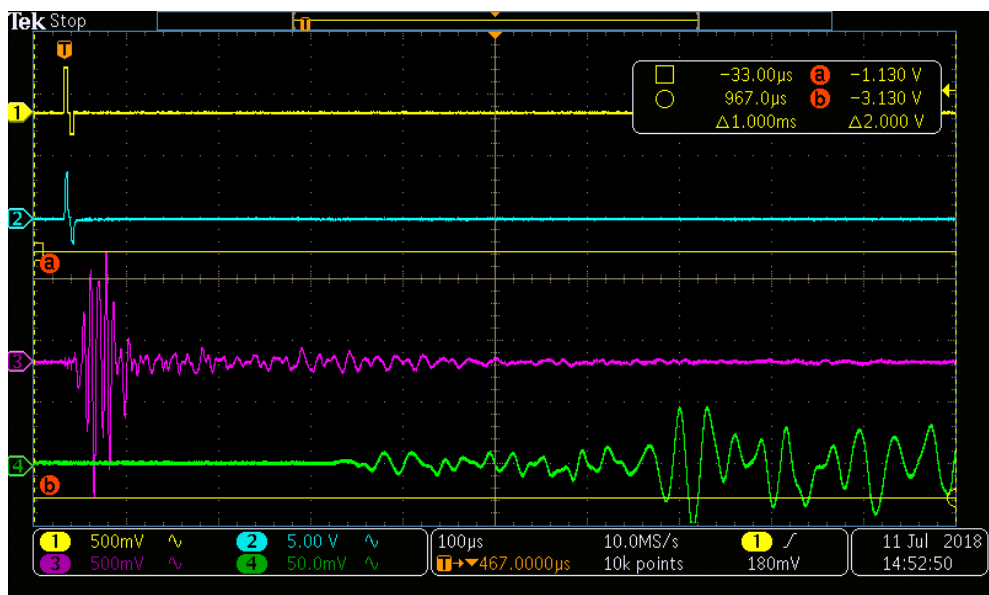
Figur 274. TEK00339 $f=1.5$ kHz, $A=1.920$ Vpp



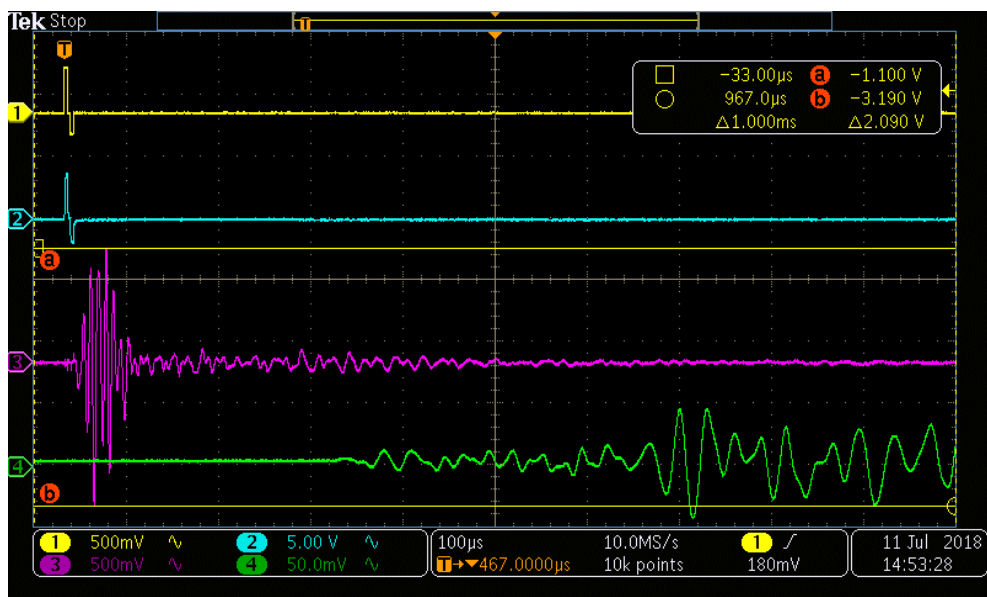
Figur 275. TEK00340 $f=1.6$ kHz, $A=1.830$ Vpp



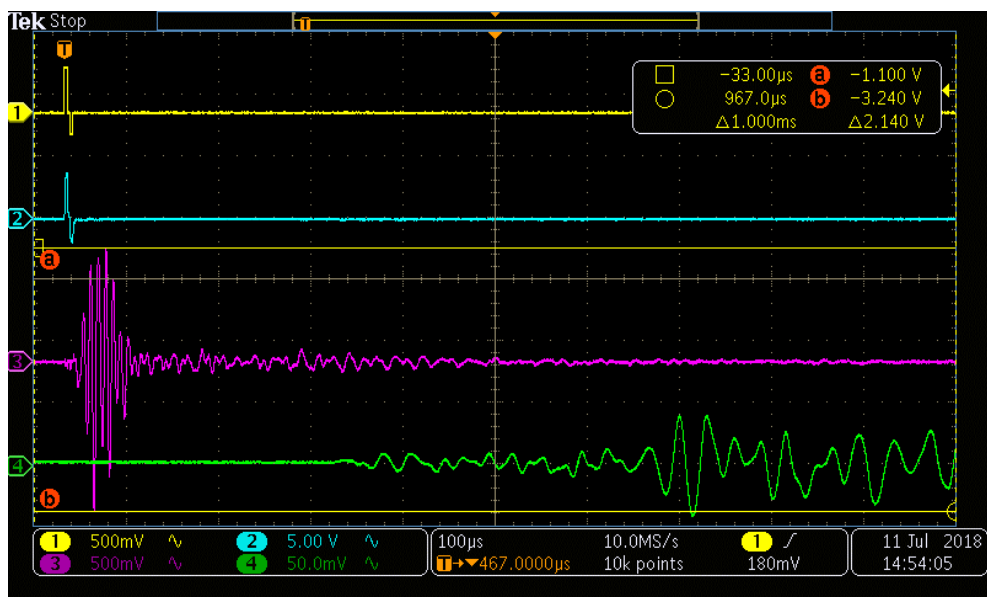
Figur 276. TEK00341 f=1.7 kHz, A=1.900 Vpp



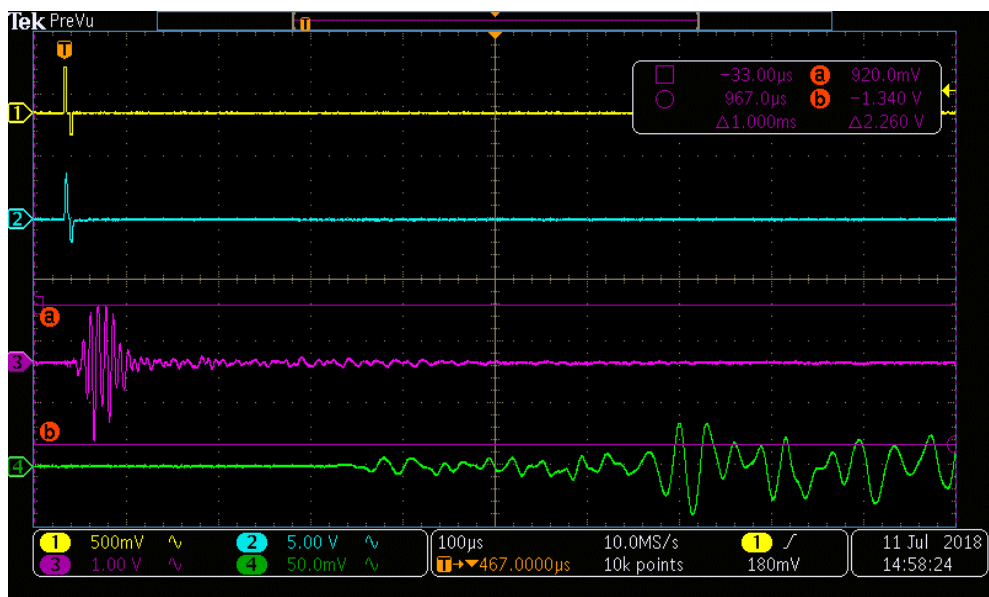
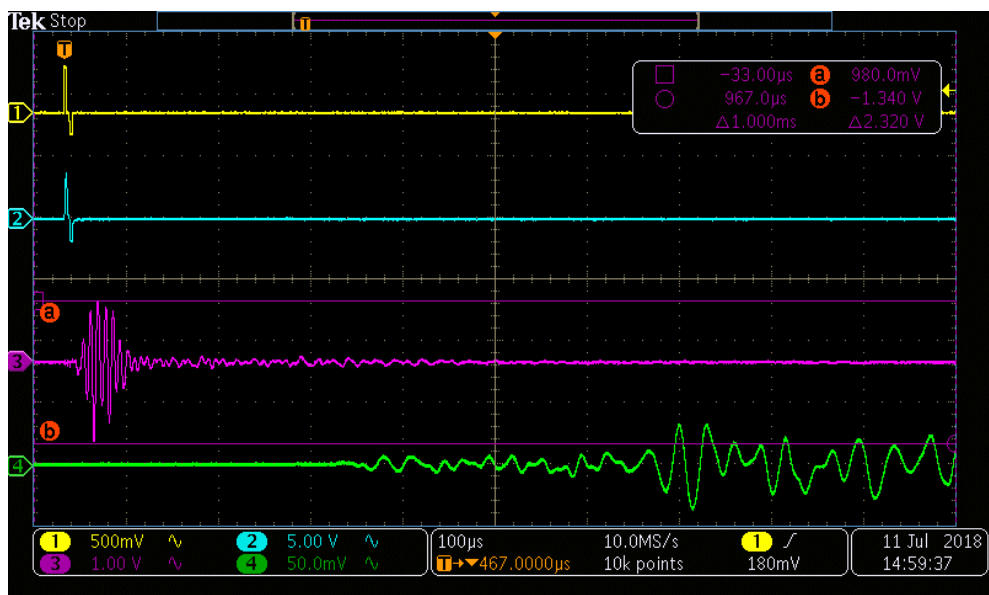
Figur 278. TEK00342 f=1.8 kHz, A= 2.000 Vpp

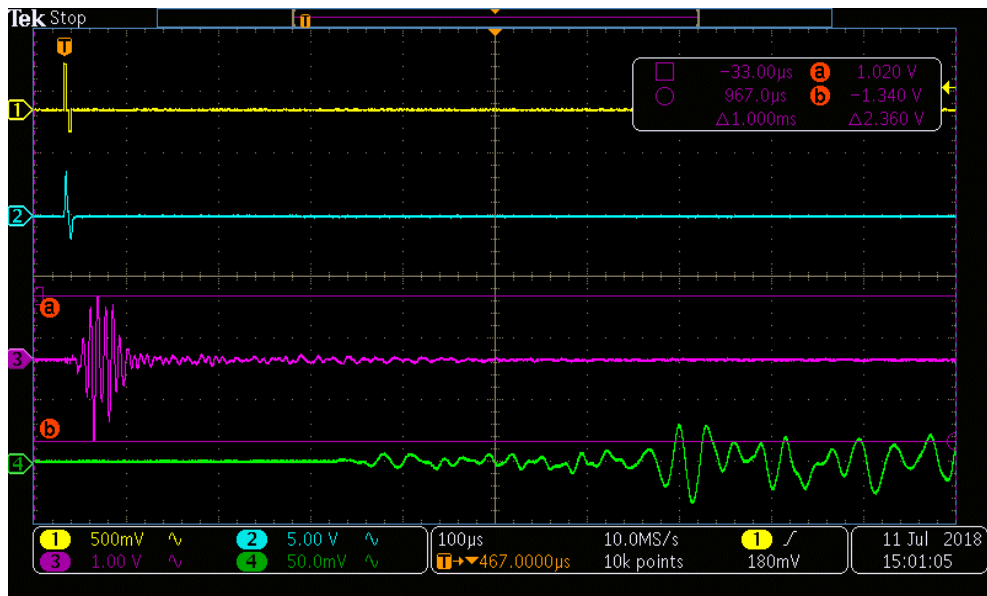


Figur 279. TEK00343 f=1.9 kHz, A=2.090 Vpp

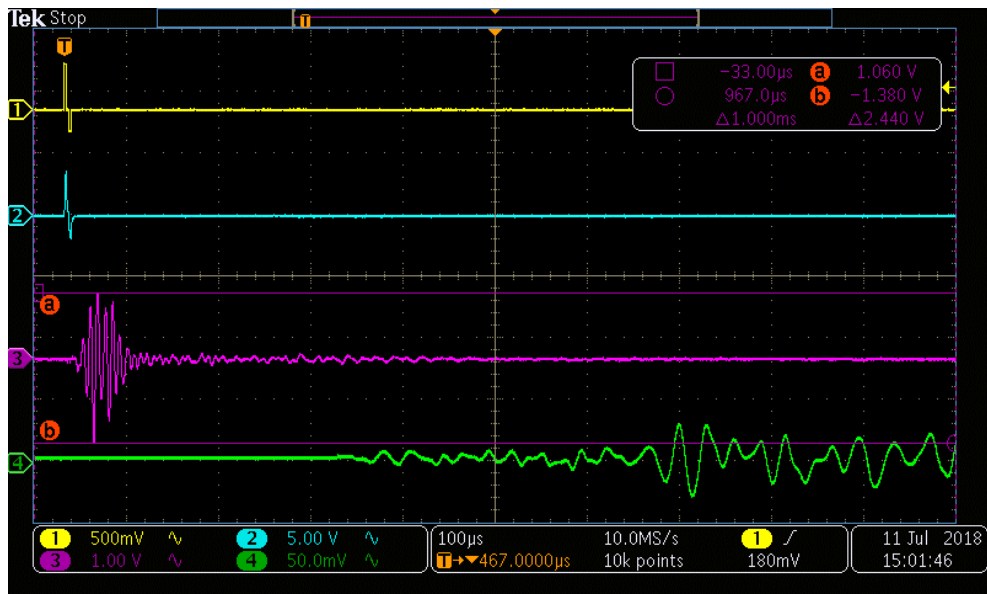


Figur 280. TEK00344 f=2.0 kHz, A= 2.140 Vpp

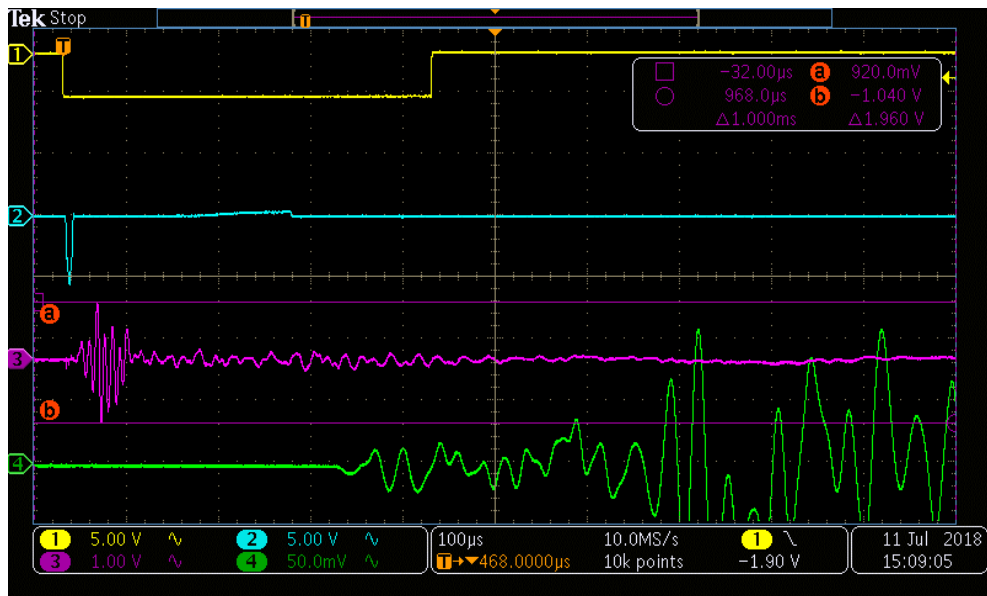
Figur 281. TEK00345 $f=2.1$ kHz, $A=2.260$ VppFigur 282. TEK00346 $f=2.2$ kHz, $A=2.320$ Vpp



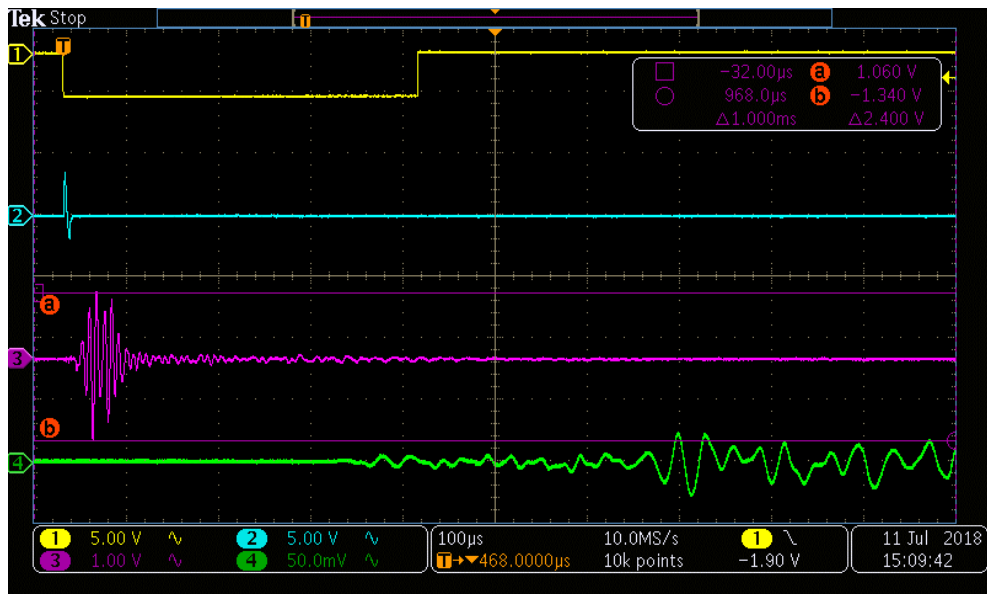
Figur 283. TEK00347 $f=2.3$ kHz, $A=2.360$ Vpp



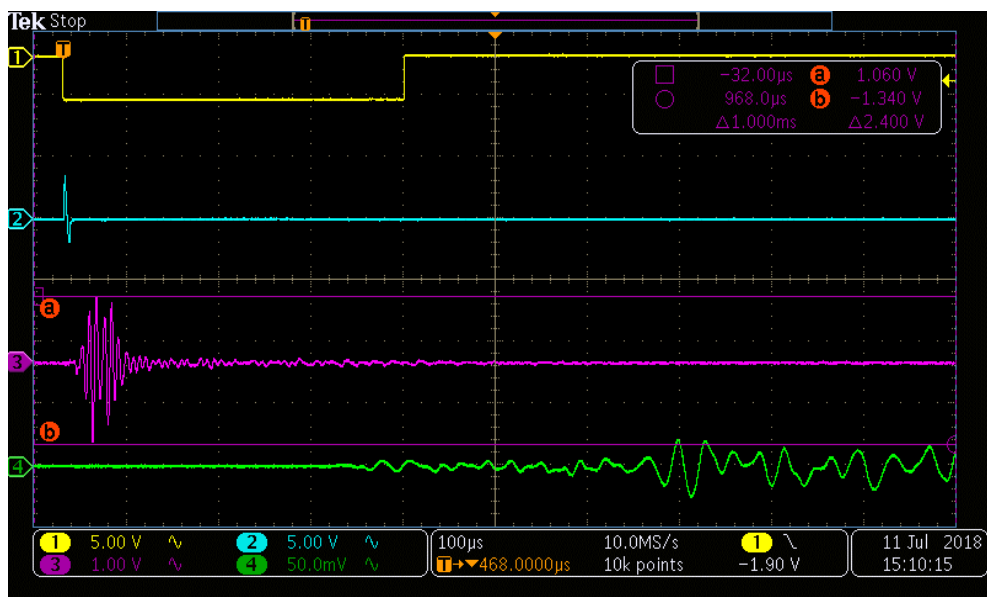
Figur 284. TEK00348 $f=2.4$ kHz, $A=2.440$ Vpp Högsta uppmätta amplituden för utsänd signalstyrka. Optimal AWG-frekvens för amplitud. Däremot är dämpningen av den transmitterade signalen (Ch 4) lägre för de lägsta använda AWG-frekvenserna.



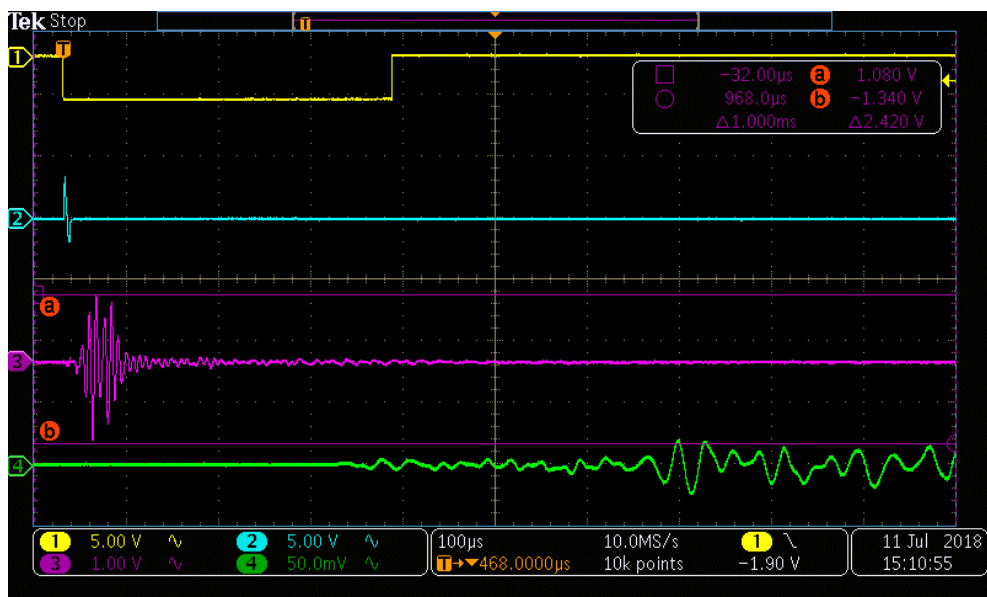
Figur 285. TEK00349 $f = 2.5 \text{ kHz}$, $A = 1.960 \text{ Vpp}$



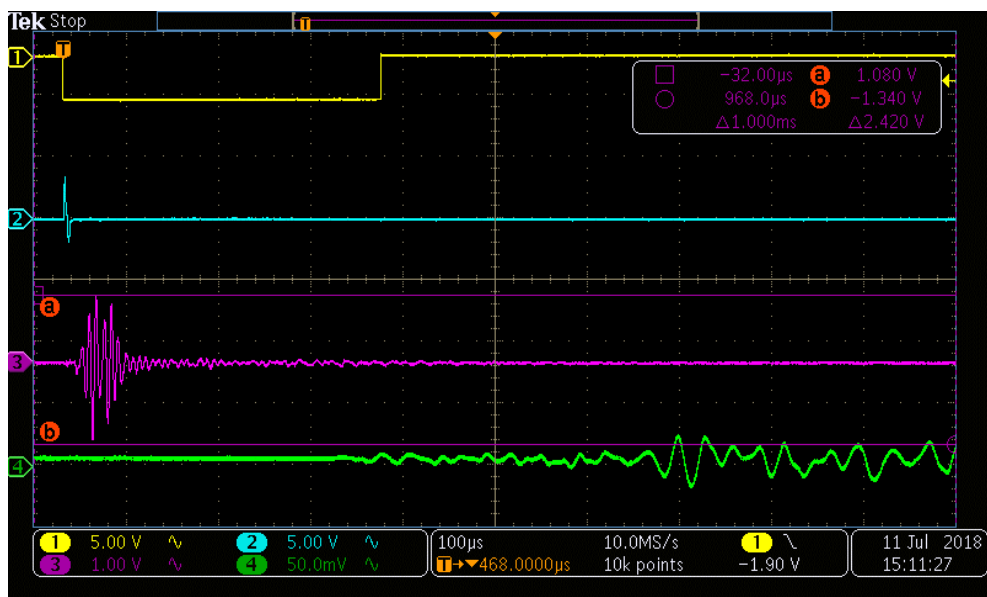
Figur 286. TEK00350 $f = 2.6 \text{ kHz}$, $A = 400 \text{ Vpp}$



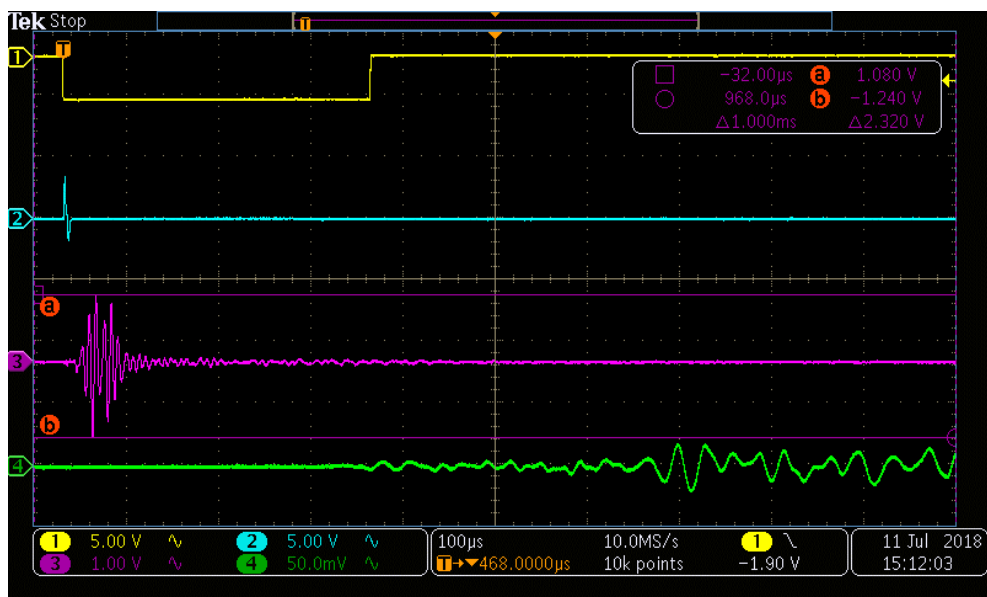
Figur 287. TEK00351 $f=2.7$ kHz, $A=2.400$ Vpp



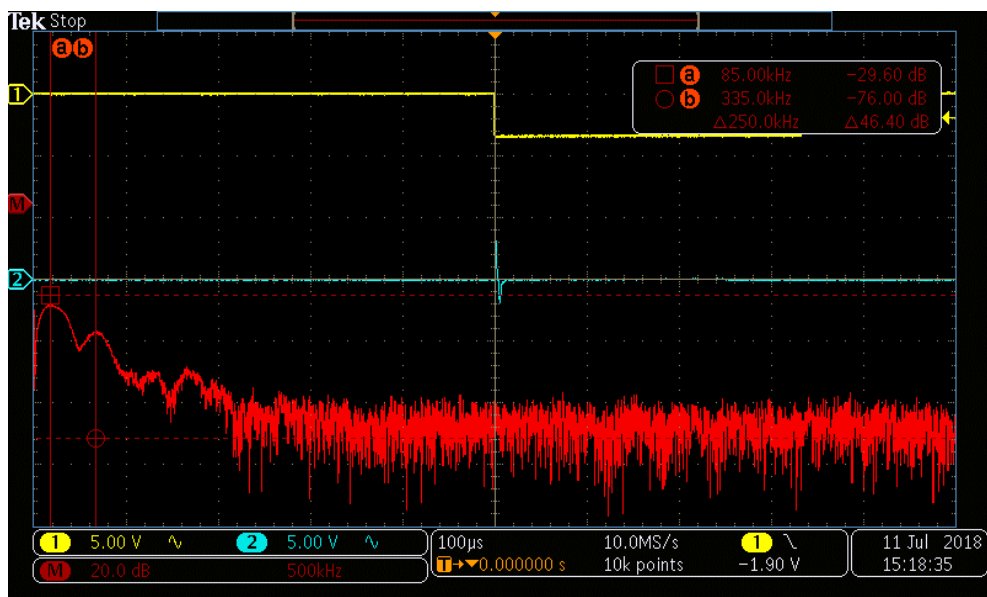
Figur 288. TEK 00352 $f=2.8$ kHz, $A=2.400$ Vpp



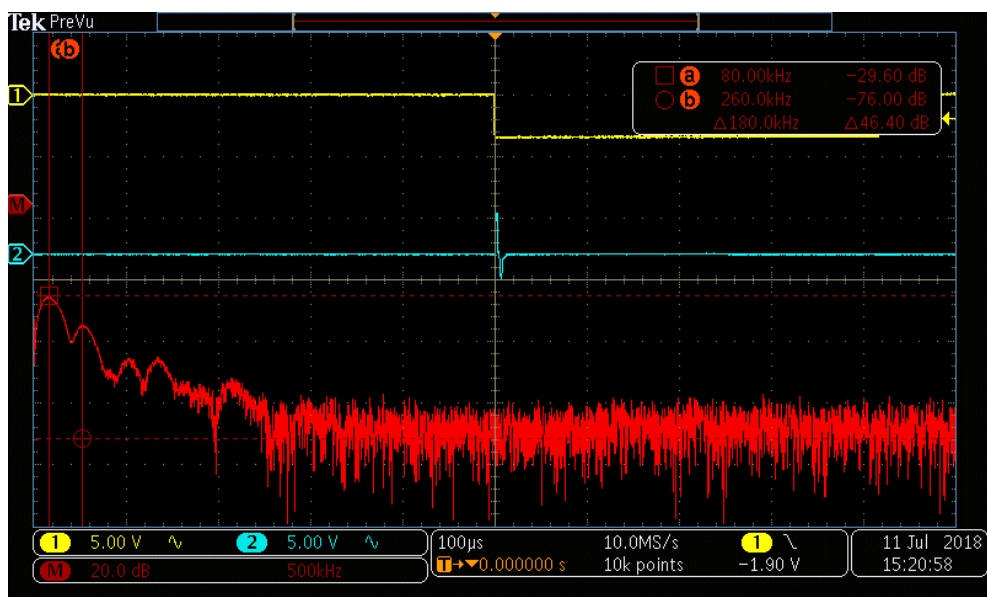
Figur 289. TEK00353 $f=2.9$ kHz, $A=2.420$ Vpp



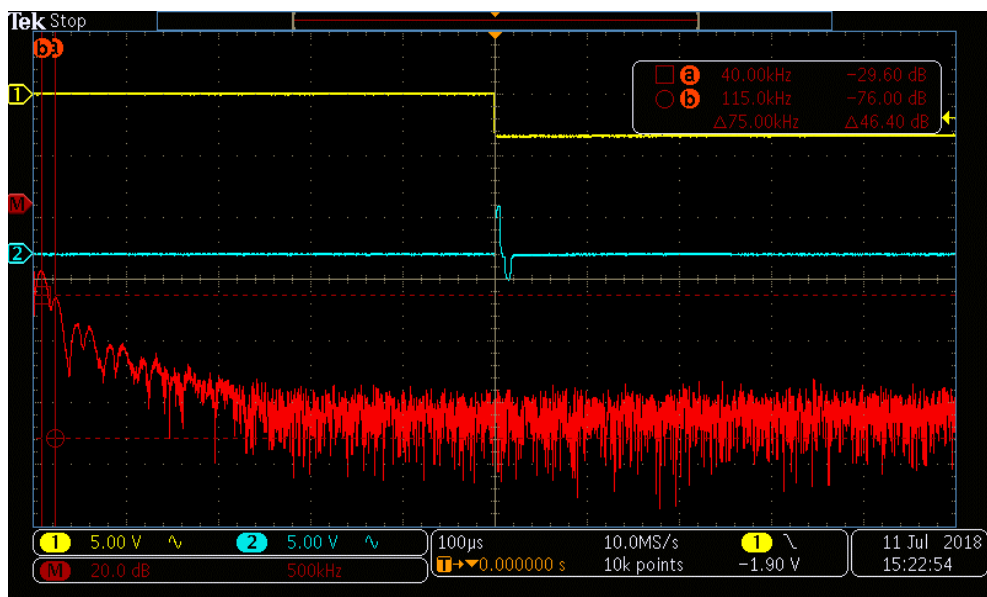
Figur 290. TEK00354 $f=3.0$ kHz, $A=2.320$ Vpp



Figur 291. TEK00355 Spektrum för signalen för AWG-frekvensen 3.0 kHz. Maximal effekt för utsända frekvensen 85 kHz.



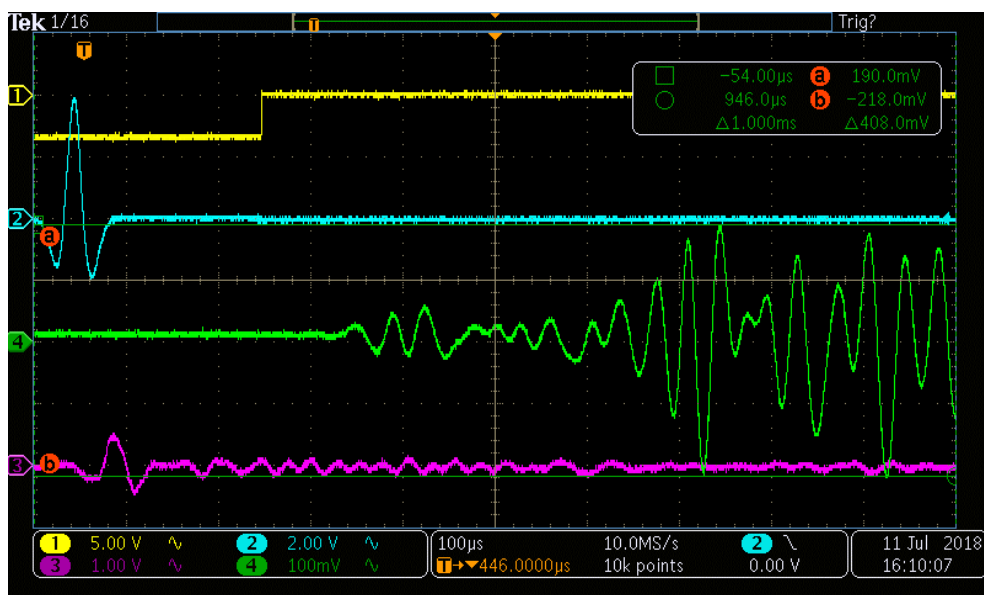
Figur 292. TEK00356 Spektrum för signalen vid AWG-frekvensen 2.4 kHz. Maximal effekt för utsända frekvensen 80 kHz



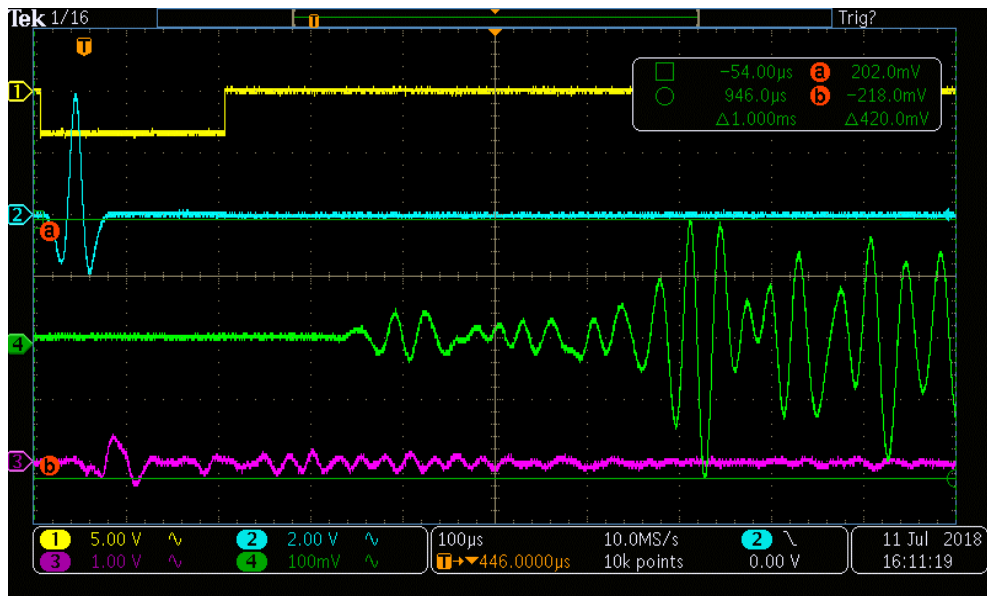
Figur 293. TEK 00357 Spektrum för signalen vid AWG-frekvensen 1.1 kHz. Maximal effekt för utsända frekvensen 40 kHz

5.20 RICKER P 180711 TEK00358-00376

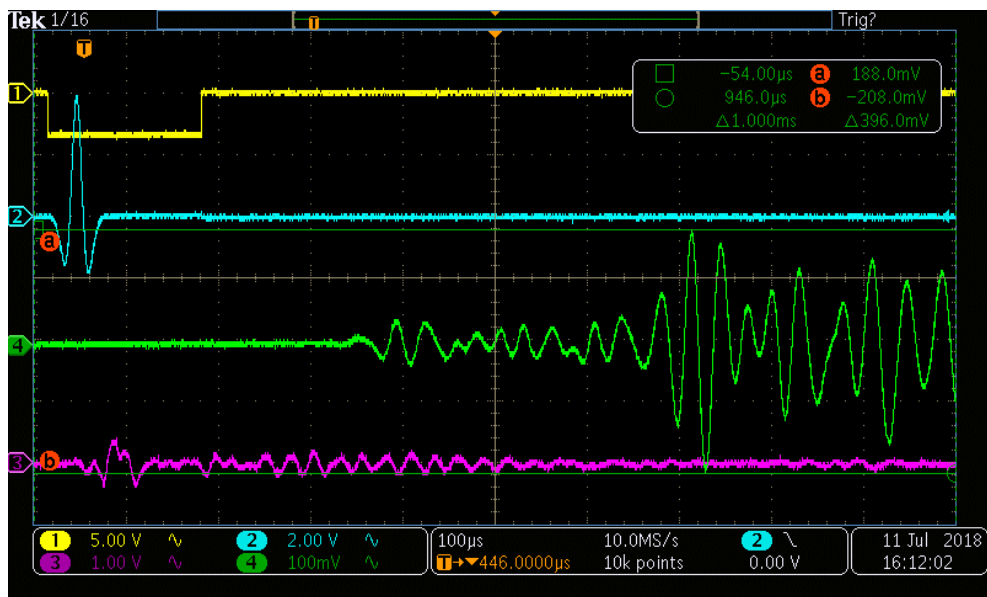
Ricker-vågformen är, som tidigare nämnts, en två gånger deriverad Gausspuls. Ricker P betyder att det är den version vars centrala del är positiv. Den är vanlig i geofysiska sammanhang, t ex inom reflektionsseismiken. Kanal 1 är gating-pulsen från vågformsgeneratoren – AWG. Kanal 2 visar RF Monitor från RITEC effektförstärkare, det är en 1/100-del av utsänd spänning. Kanal 3 visar mottagen signal bredvid sändaren i M2502P sensorn och kanal 4 är transmitterad signal mottagen på andra sidan provkroppen med de kombinerade Panametrics 50 och 00 kHz sensorerna. Mätspänningen är nu den transmitterade signalens maxamplitud (Ch 4).



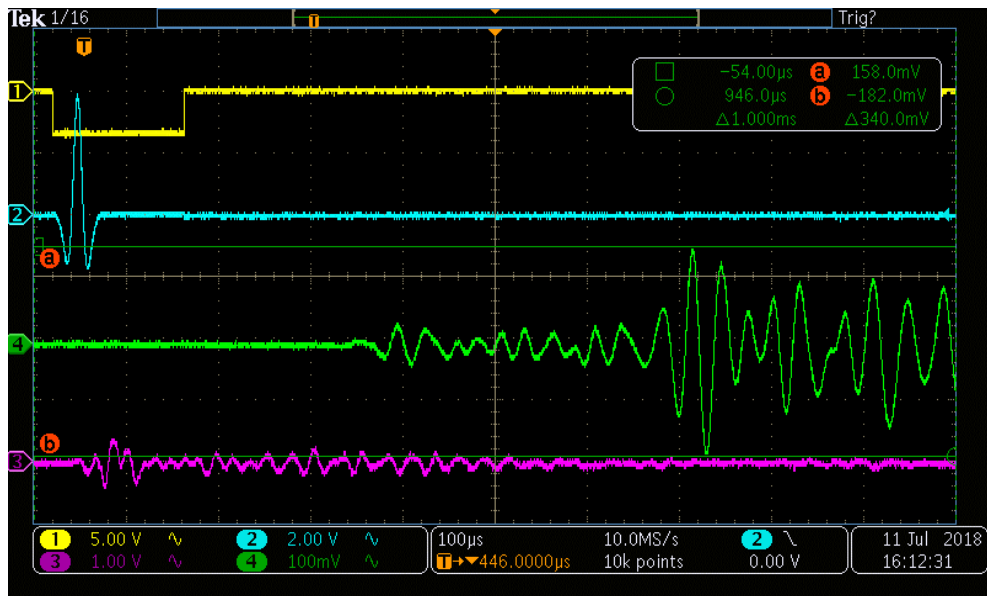
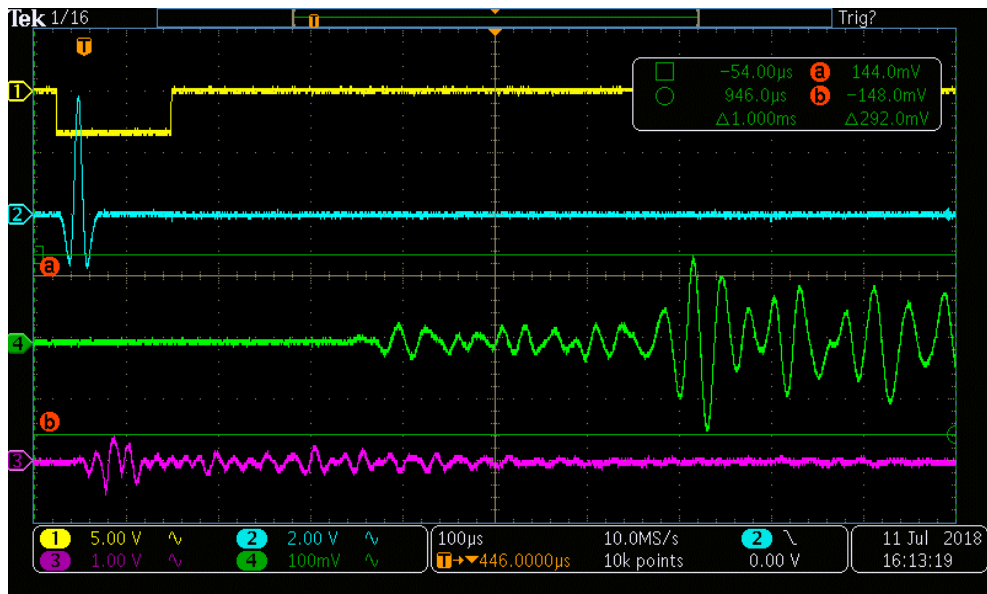
Figur 294. TEK00358 f=4 kHz, A=408 mVpp

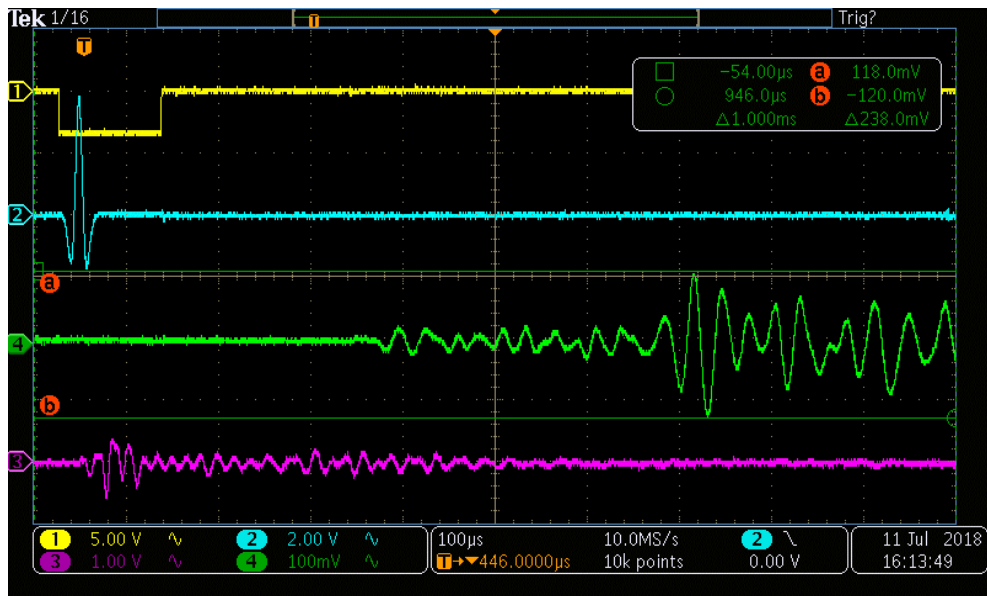


Figur 295. TEK00359 $f=5$ kHz, $A=420$ mVpp. Detta är den starkaste signalen vid transmission av en Ricker-vågform.

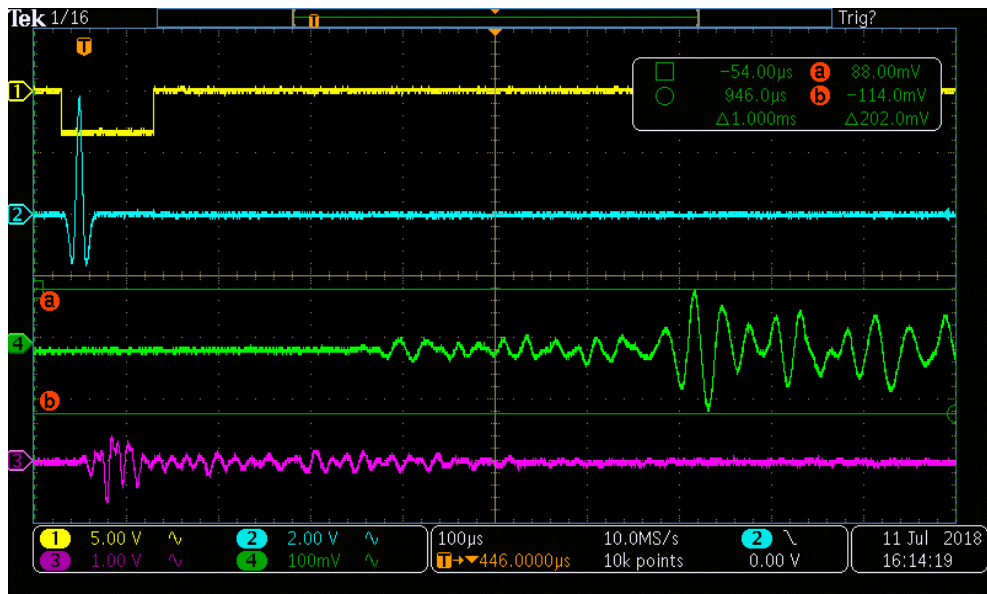


Figur 296. TEK00360 $f=6$ kHz, $A=396$ mVpp

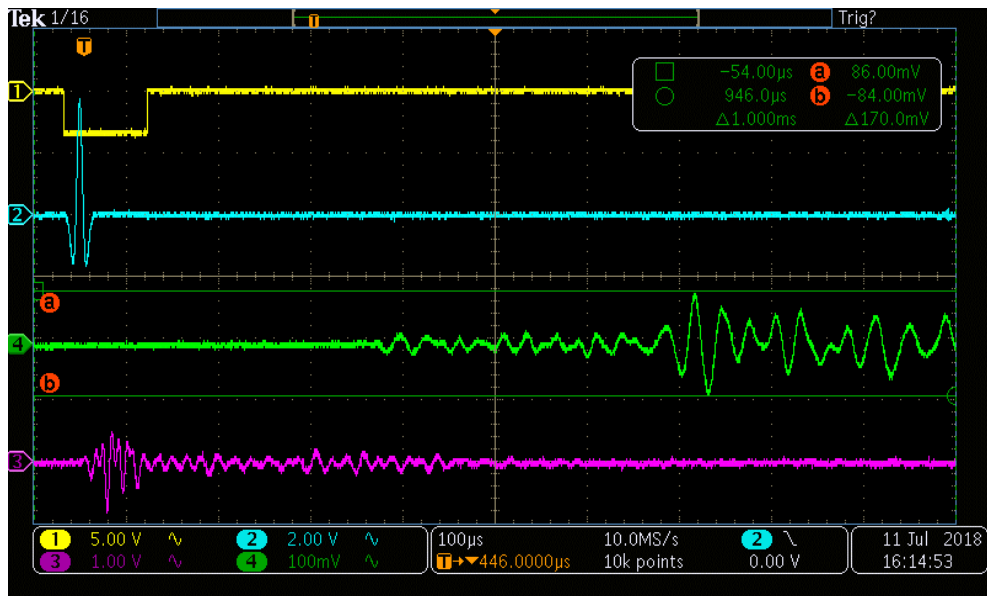
Figur 297. TEK00361 $f=7$ kHz, $A=340$ mVppFigur 298. TEK00362 $f=8$ kHz, $A=292$ mVpp



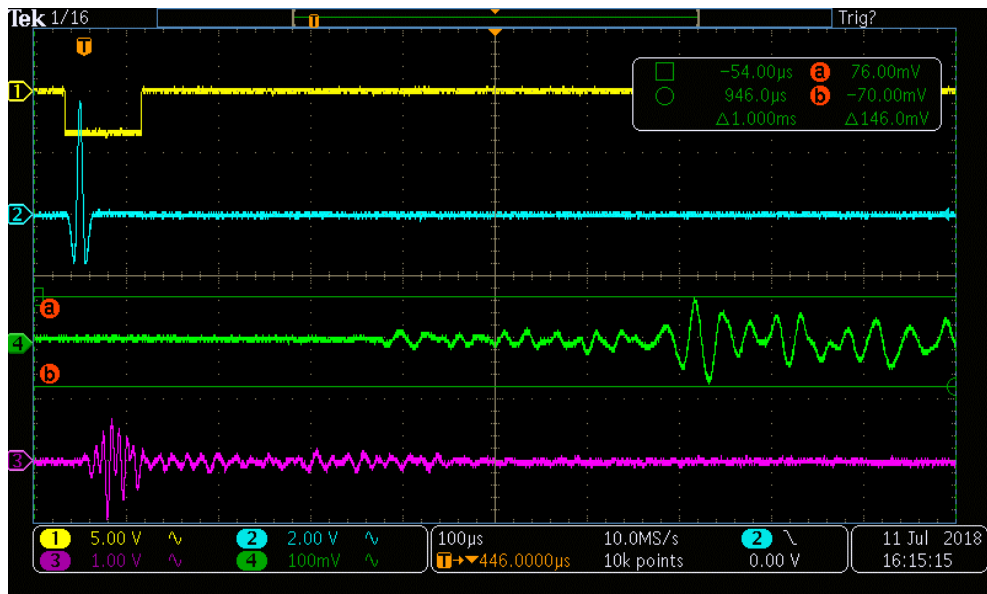
Figur 299. TEK00363 f=9kHz, A=238 mVpp



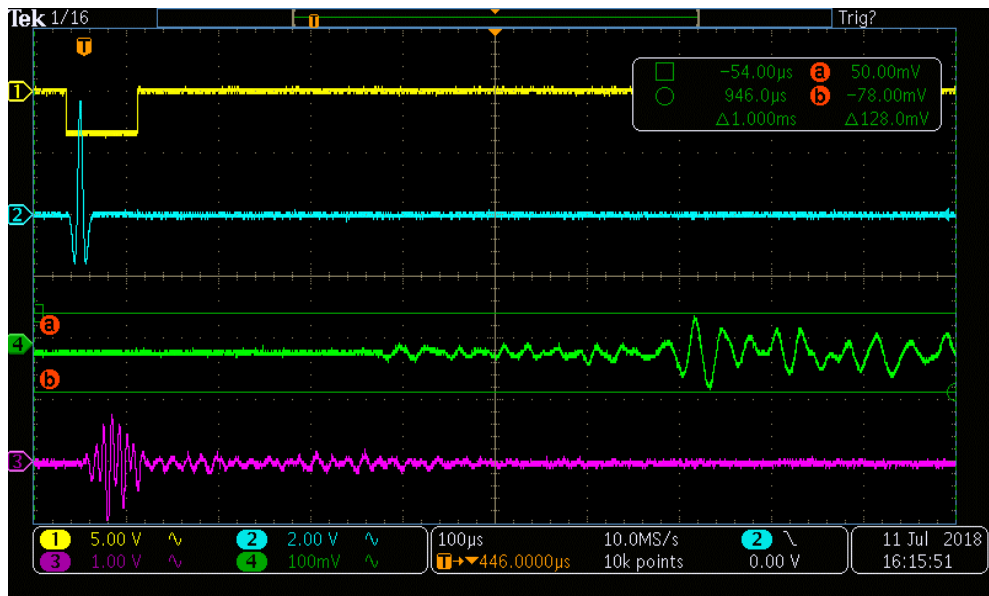
Figur 300. TEK00364 f=10 kHz, A=202 mVpp



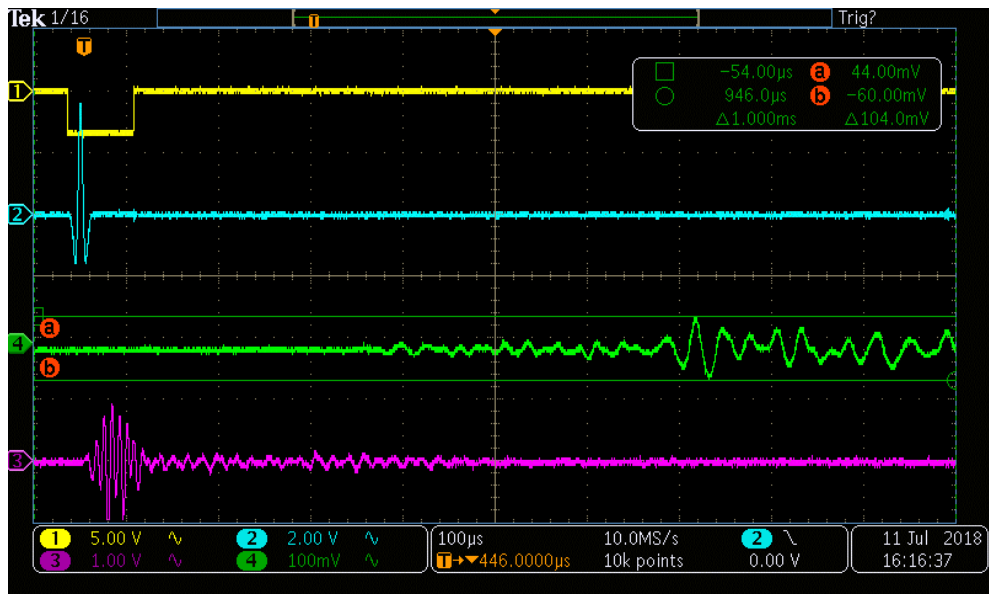
Figur 301. TEK00365 f=11 kHz, A=170 mVpp



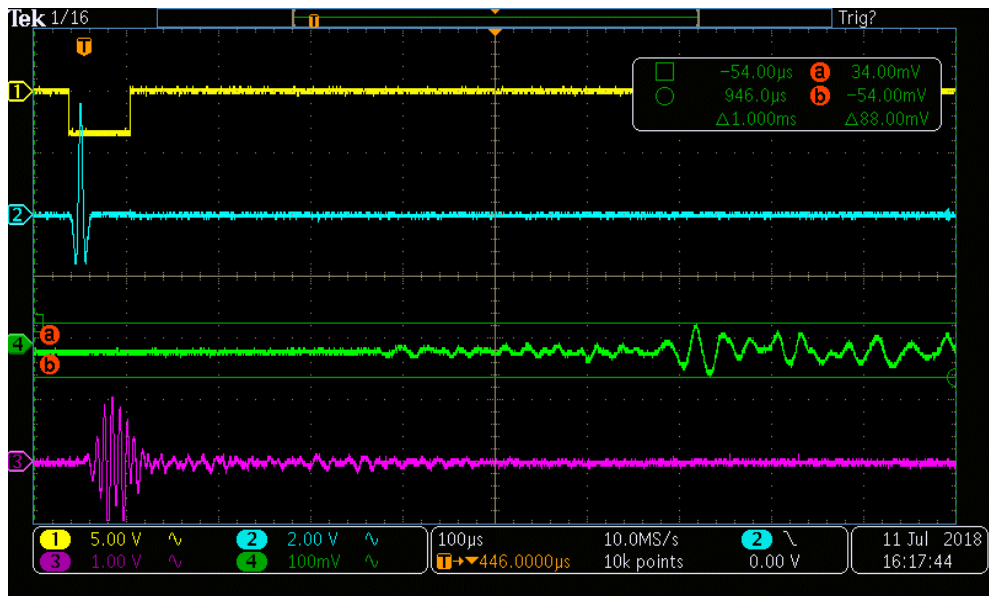
Figur 302. TEK00366 f=12 kHz, A=146 mVpp



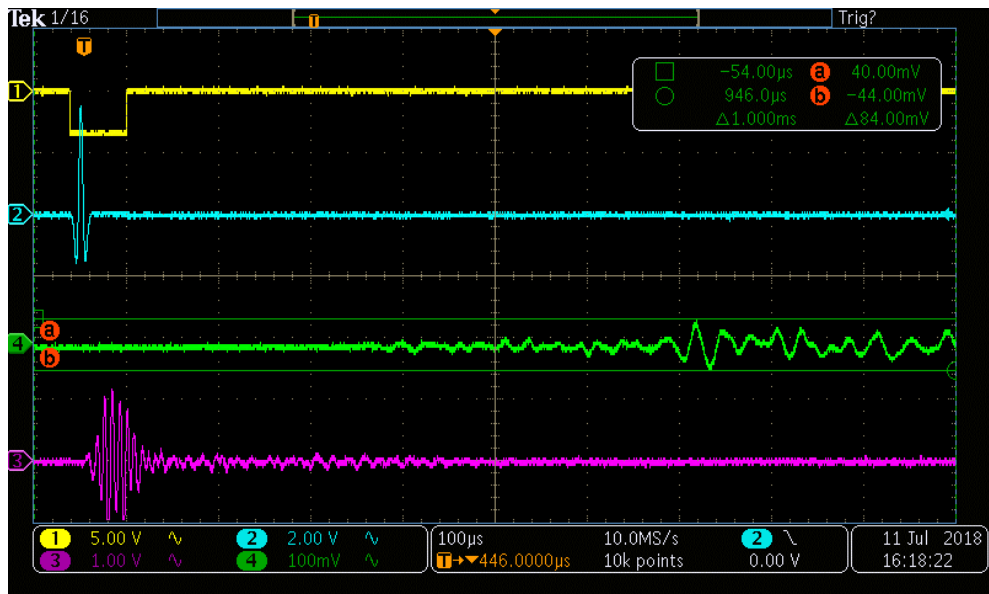
Figur 303. TEK00367 f=13 kHz, A=128 mVpp



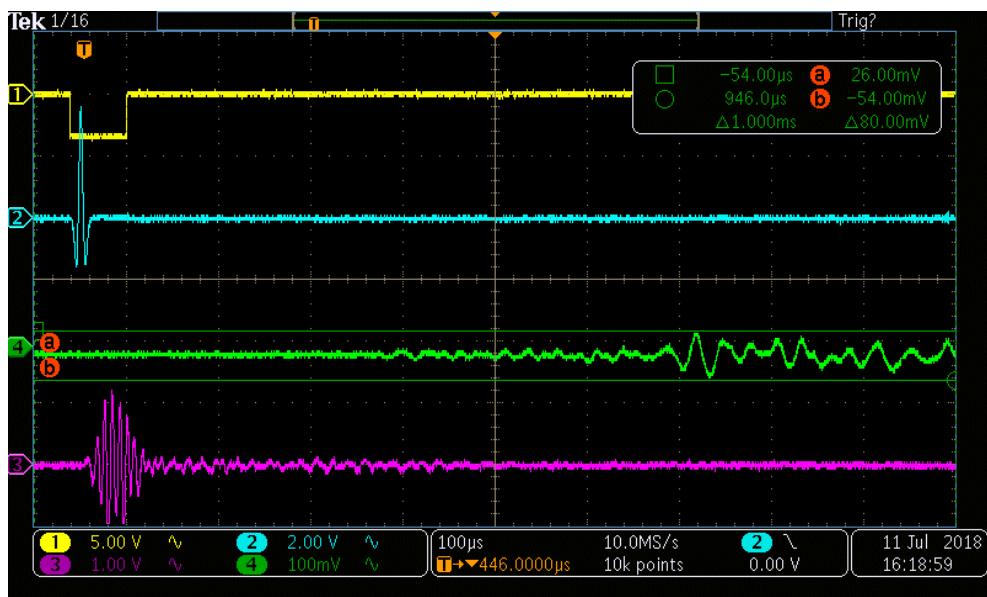
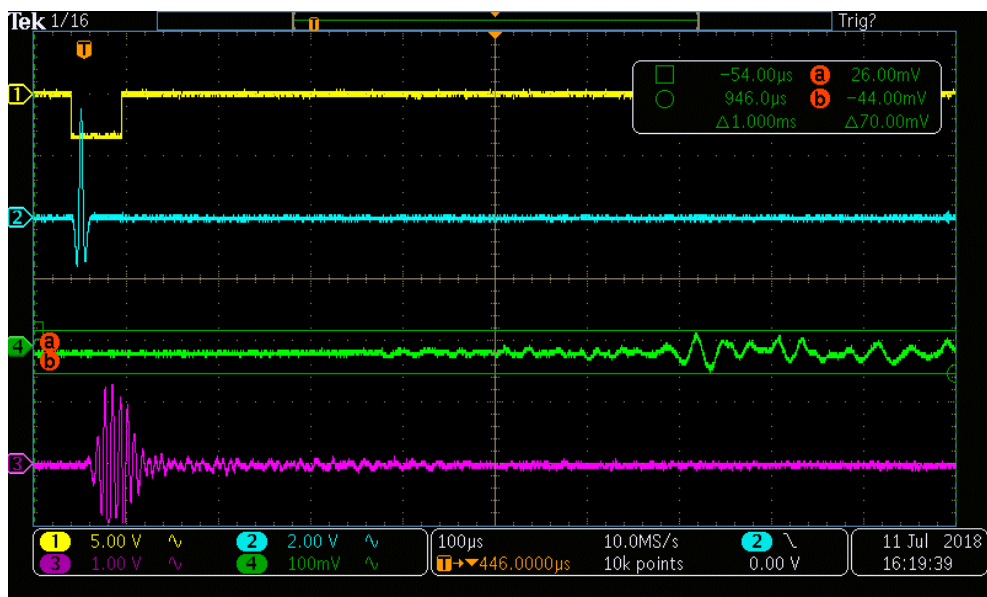
Figur 304. TEK00368 f=14 kHz, A=104 mVpp

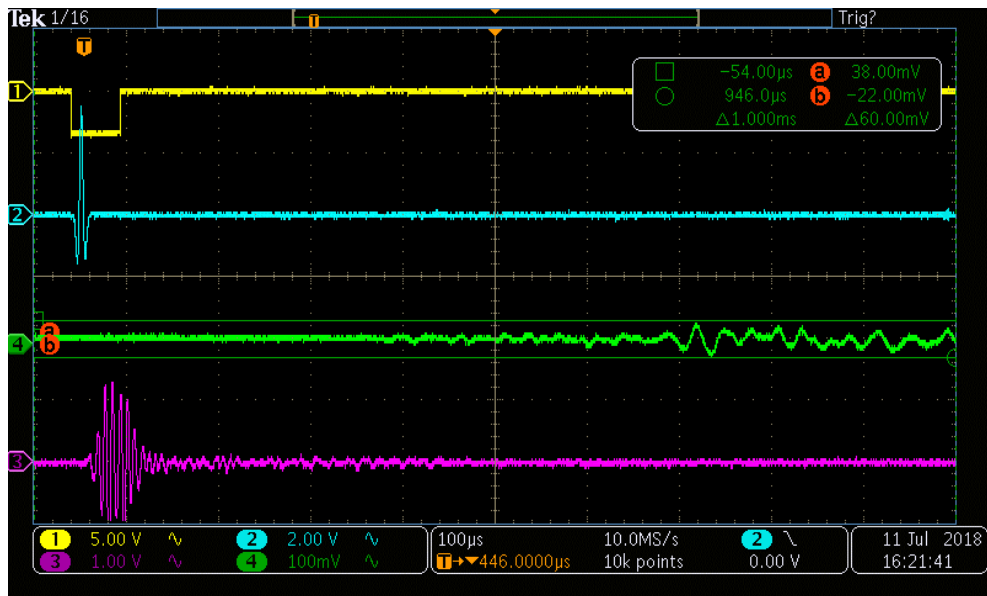
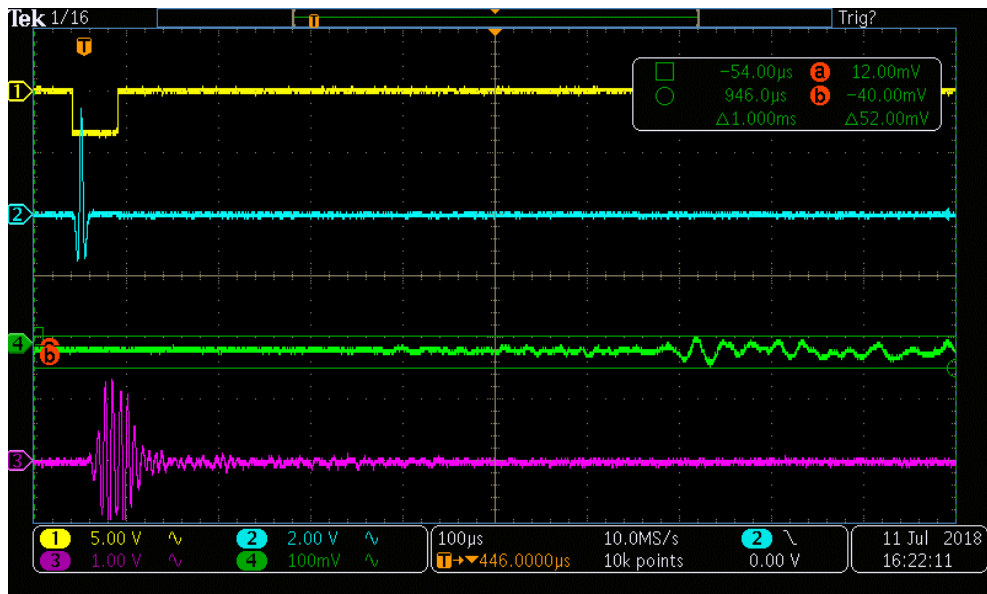


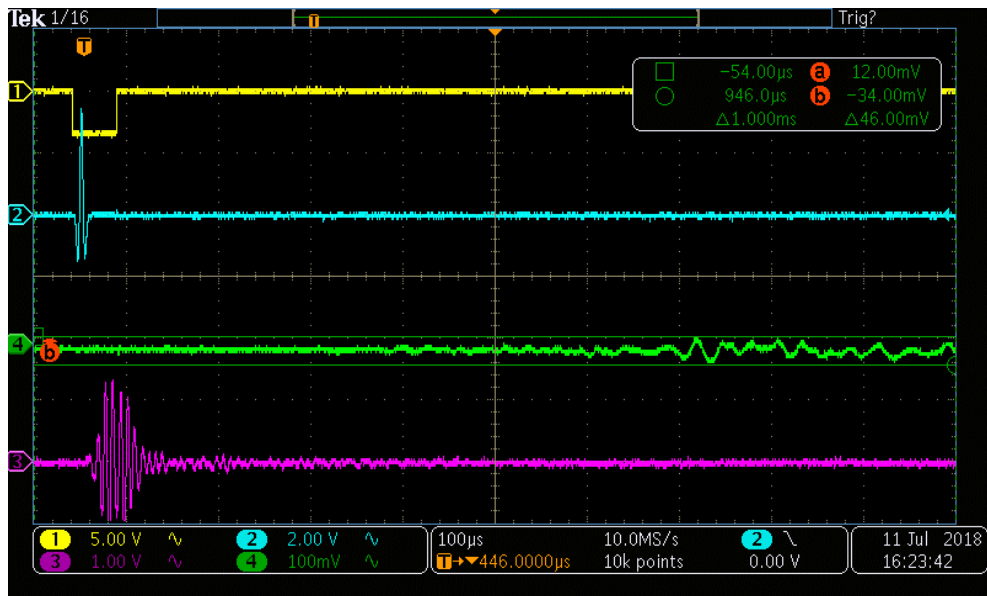
Figur 305. TEK00369 f=15 kHz, A=88 mVpp



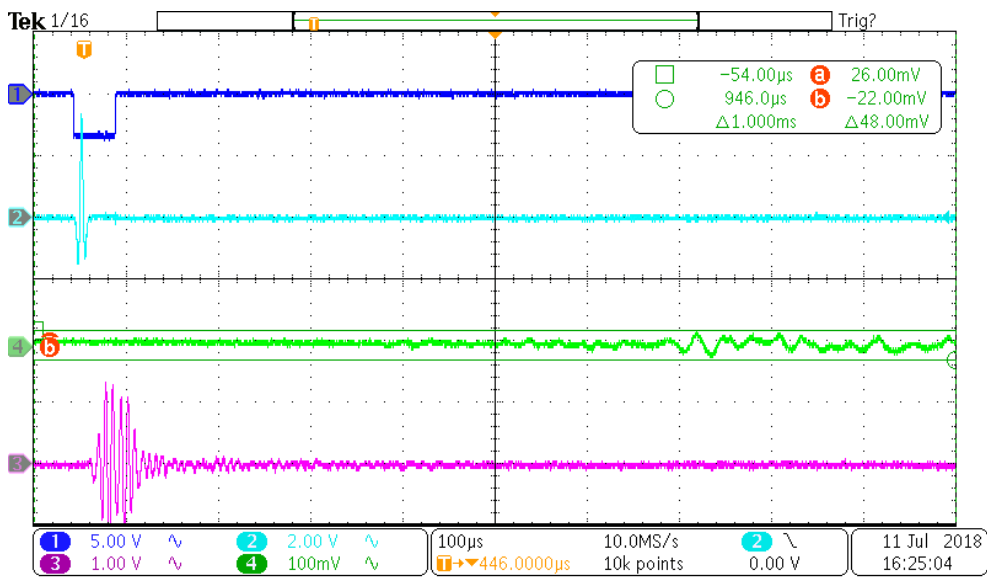
Figur 306. TEK00370 f=16 kHz, A=84mVpp

Figur 307. TEK00371 $f=17$ kHz, $A=80$ mVppFigur 308. TEK00372 $f=18$ kHz, $A=70$ mVpp

Figur 309. TEK00373 $f=19$ kHz, $A=60$ mVppFigur 310. TEK00374 $f=20$ kHz, $A=52$ mVpp. Vid denna AWG-frekvens är den utsända signalen starkast.



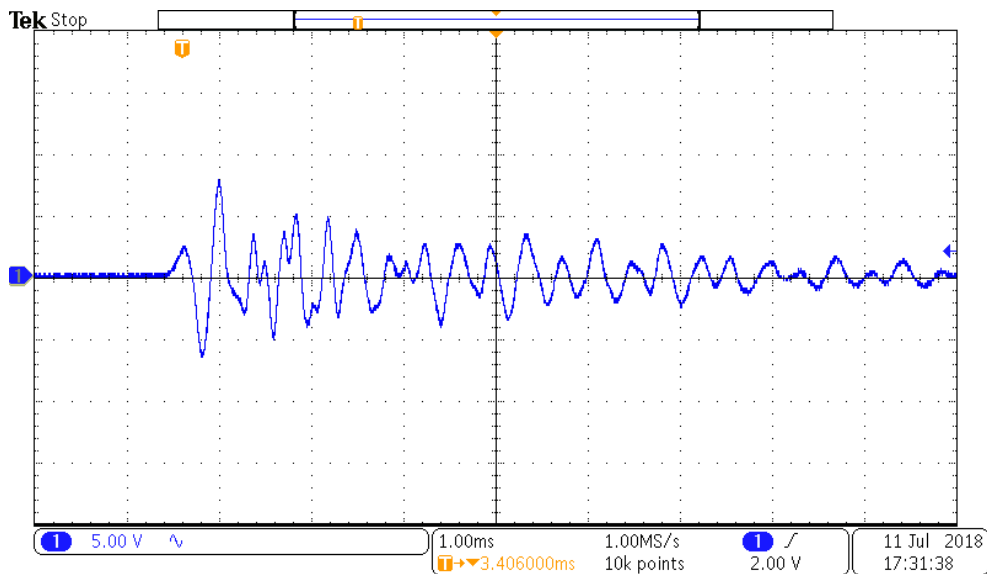
Figur 311. TEK00375 f= 21 kHz, A= 46 mVpp



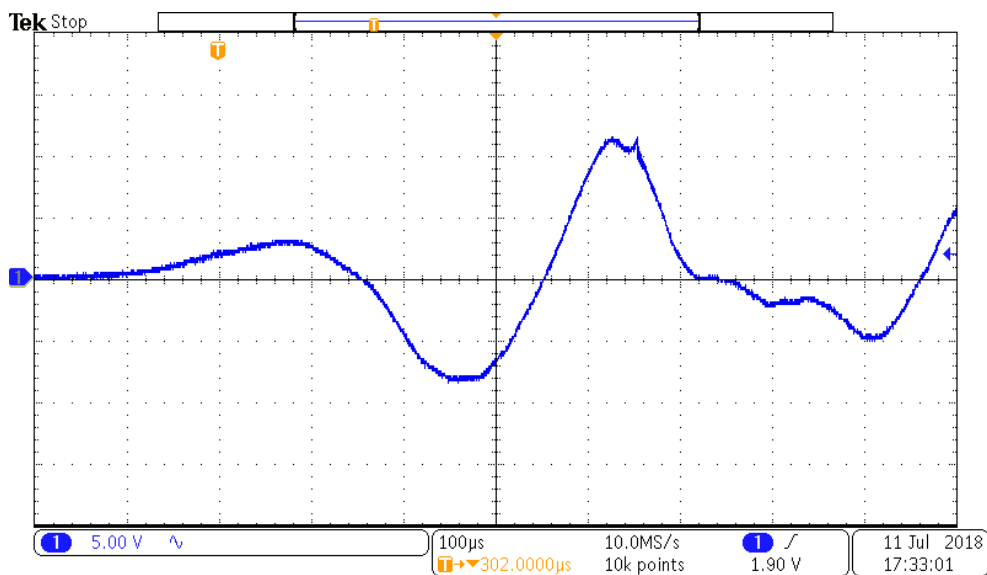
Figur 312. TEK00376 f=22 kHz, A=48 mVpp

5.21 VANLIG SNICKARHAMMARE 180710

Slag med vanlig snickarhammare där A1220 brukar sitta. Panametrics 50+100 kHz parallellkopplade som mottagare TEK00383 med 1 ms/ruta och TEK00384 med 100 μ s / ruta.



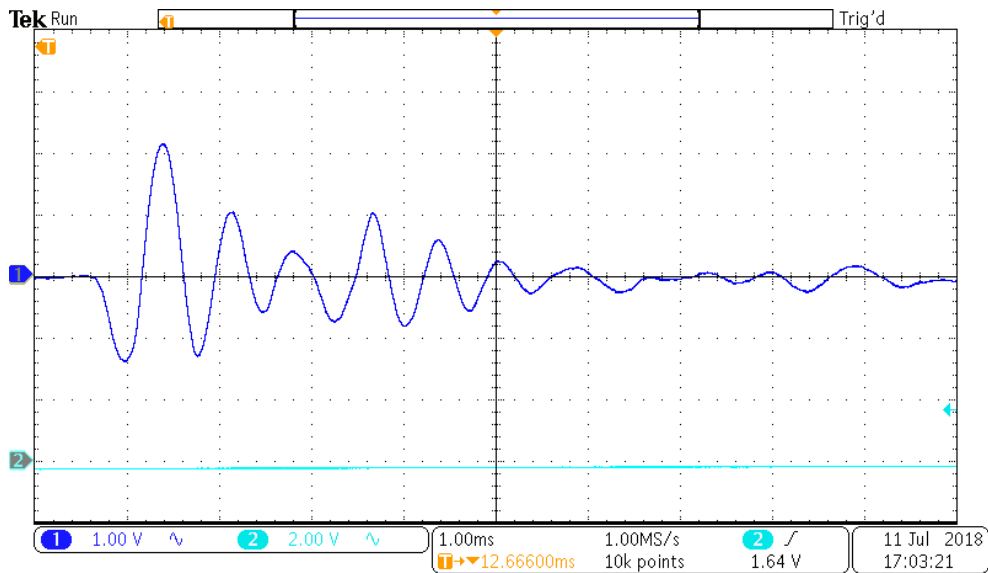
Figur 313. TEK00383 Mottagen transmitterad signal 1 ms/ruta. Denna signal har alltså gått tvärs igenom provkroppen.



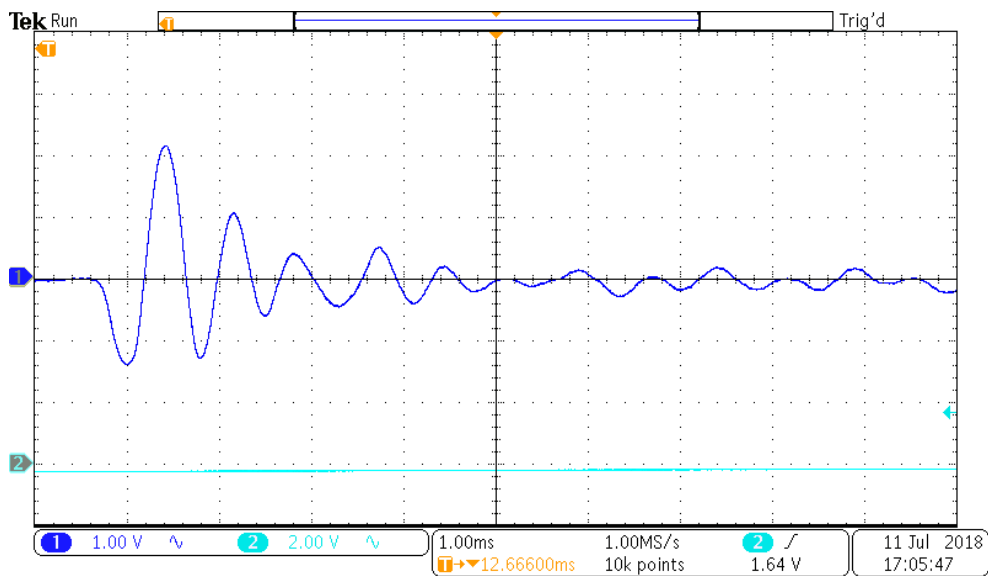
Figur 314. TEK00384 Transmitterad signal, förstoring. 100 μ s/ruta. Hammaren ger för lågt frekvensområde. Sannolikt är det vi ser en excitering av hela provkroppen som ett block. 100 μ s/ruta är den skala i vilken de flesta ultraljudplottar är gjord i.

Försöket demonstrerar att en vanlig hammare alstrar alltför låga frekvenser för att reflexer skall kunna uppstå i stålplåten. Man kan anta att de oscillationer som uppmäts är hela provkroppens oscillationer snarare än fokuserad vågutbredning.

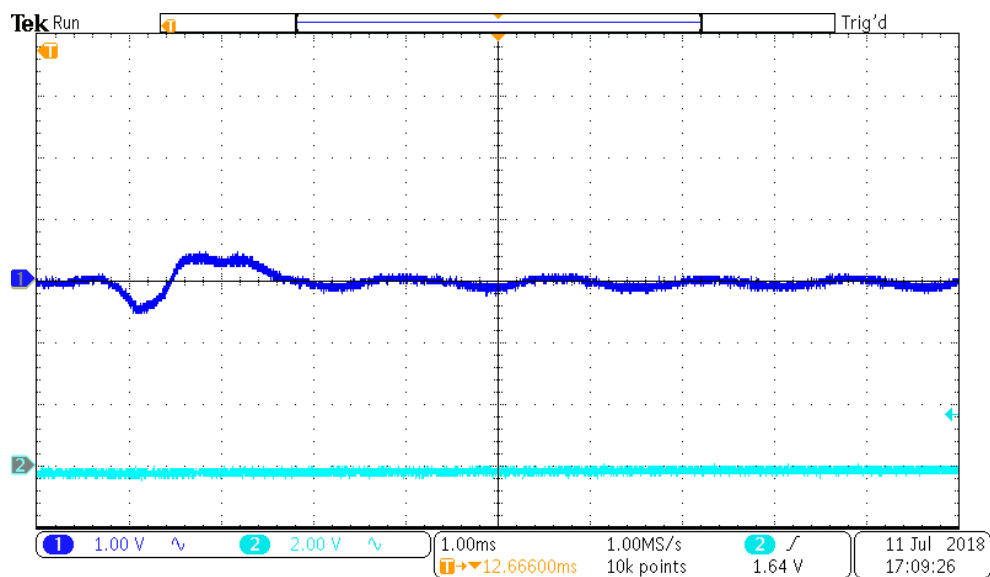
6 Försök med impulsradar



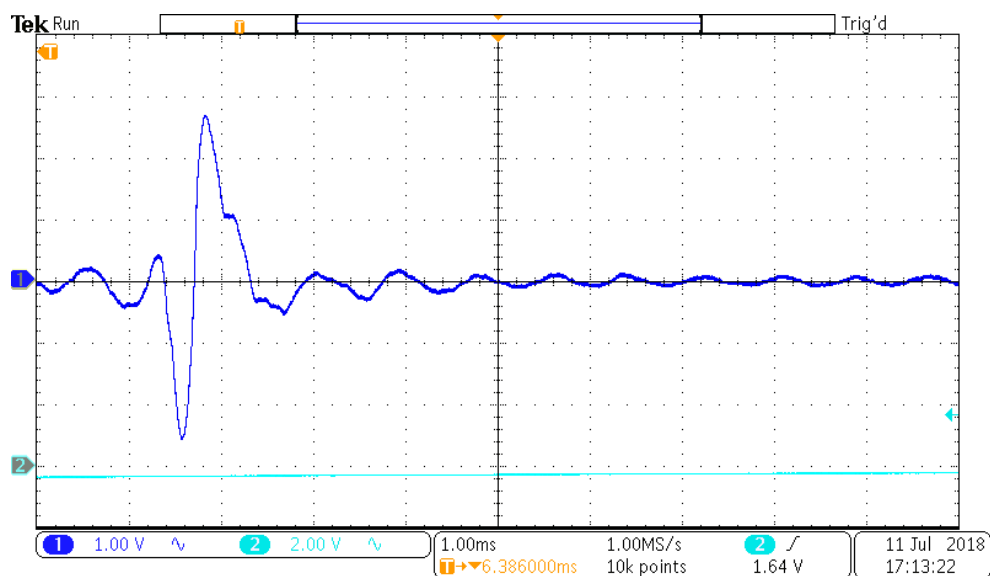
Figur 315. TEK00377 900 MHz antenn riktad mot metallplåt på golvet. Plastlåda som distanshållare 600 mm. Tiden är nedsamplad från radarområdet. Ekot från metallplåten uppträder drygt 2.2 ms efter sändpulsen. Data lagrade i TEK0020Ch1.csv.



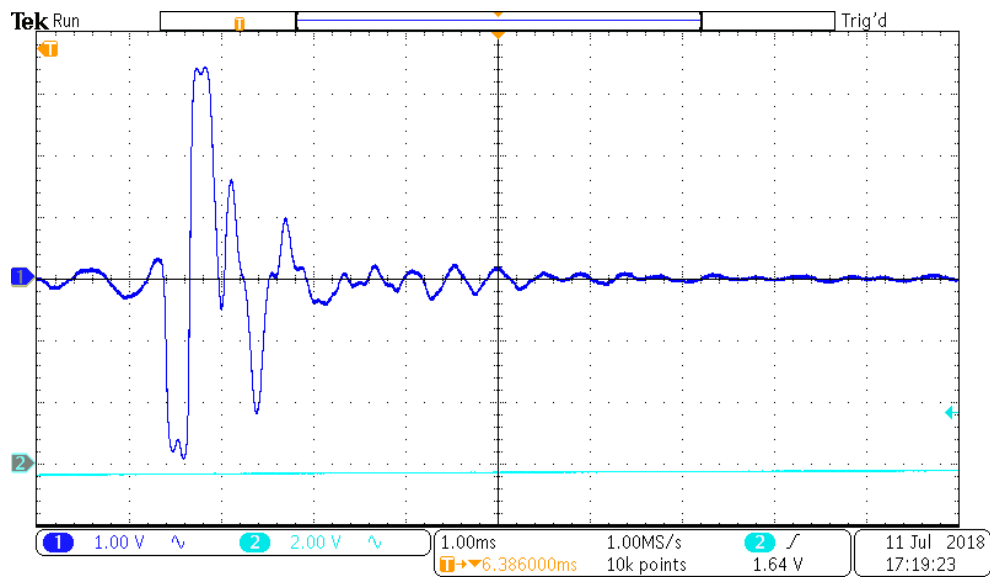
Figur 316. TEK 00378 Som ovan men plåten borttagen, reflex mot betonggolvet. Amplituden på reflexen sjunker väsentligt. Detta identifierar radarns funktion och tidsskala. Data lagrade i TEK0021Ch1.csv.



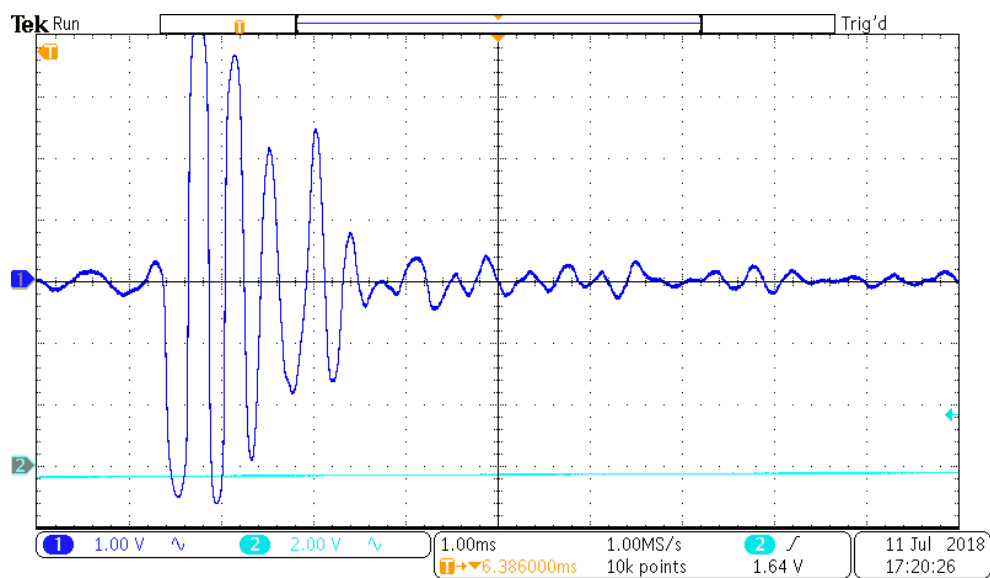
Figur 317. TEK00379 900 MHz antenn pressad mot provkroppen där A1220 brukar sitta. Dämpningen är stark i betongen jämfört med luft. Dämpningen är starkare för nygjuten betong än för gammal.



Figur 318. TEK00380 Som ovan men med ändrad förstärkningsinställning. Inget eko från stålplåten framträder. Eftersom radiovågshastigheten i betongen kan antas vara en tredjedel av den i luft borde en reflex från stålplåten inträffa 6.6 ms (3×2.2 ms) efter sändpulsens, men det sker inte.



Figur 319. TEK00381 900 MHz antenn lagd ovanpå provkroppen sändande mot dess botten, alltså bara genom betong. Ingen tydlig bottenreflex erhålles varför man kan misstänka att dämpningen är för stor i betongen.



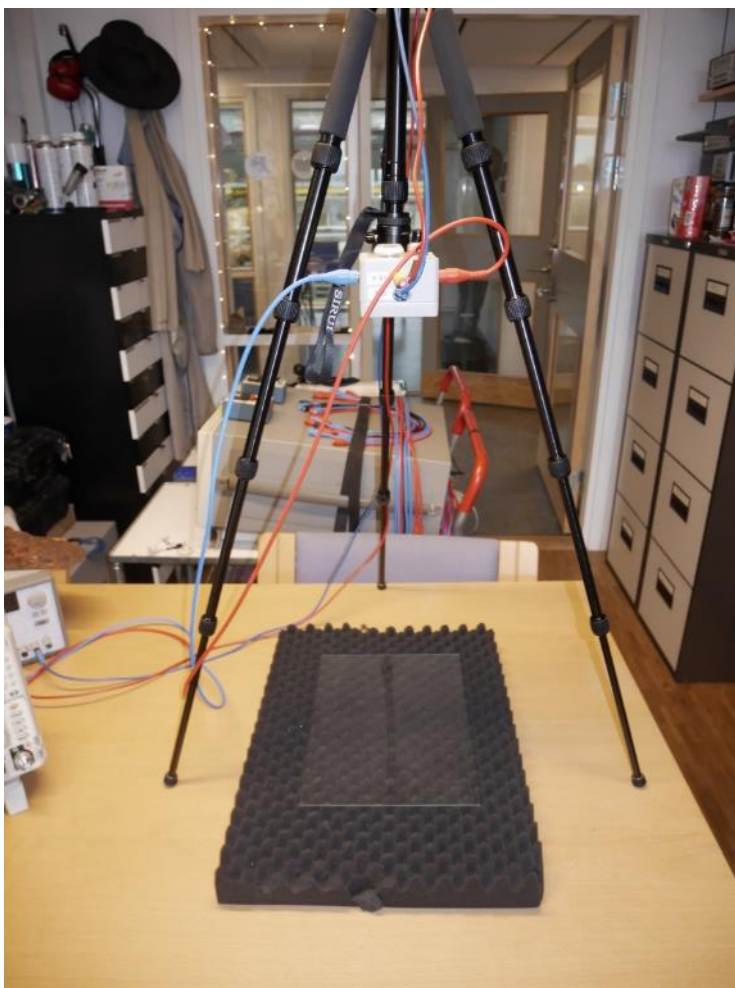
Figur 320. TEK00382 Som 378, dvs på plastlådan 600 mm ovan golvet och utan metallplåt på golvet fast med förstärkningsinställningarna som för TEK00380 och 381.

Georadar vid 900 Mhz ger ingen reflex från stålplåten i provkroppen. Sannolikt är orsaken att dämpningen av radiovågorna är för hög i betongen. Dämpningen minskar med betongens ålder och därmed minskande konduktivitet när vattnet binds kemiskt.

7 Mätningar i luft

Eftersom inga säkra reflexer erhållits från stålplåten genomfördes försök direkt mot ett avlägsnat skalrostskikt med ljudutbredning i luft. Som sändare och mottagare användes en liten avståndsmätare från Polaroid, som arbetar vid ultraljudfrekvensen 50 kHz, alltså i samma område som övriga försök genomförts. Pulsrepetitionsfrekvens har varit 10 Hz i alla försök och pulslängden 200 μ s. Försöken utfördes dels mot en glasskiva med hög reflektivitet dels mot skalrostskiktet.

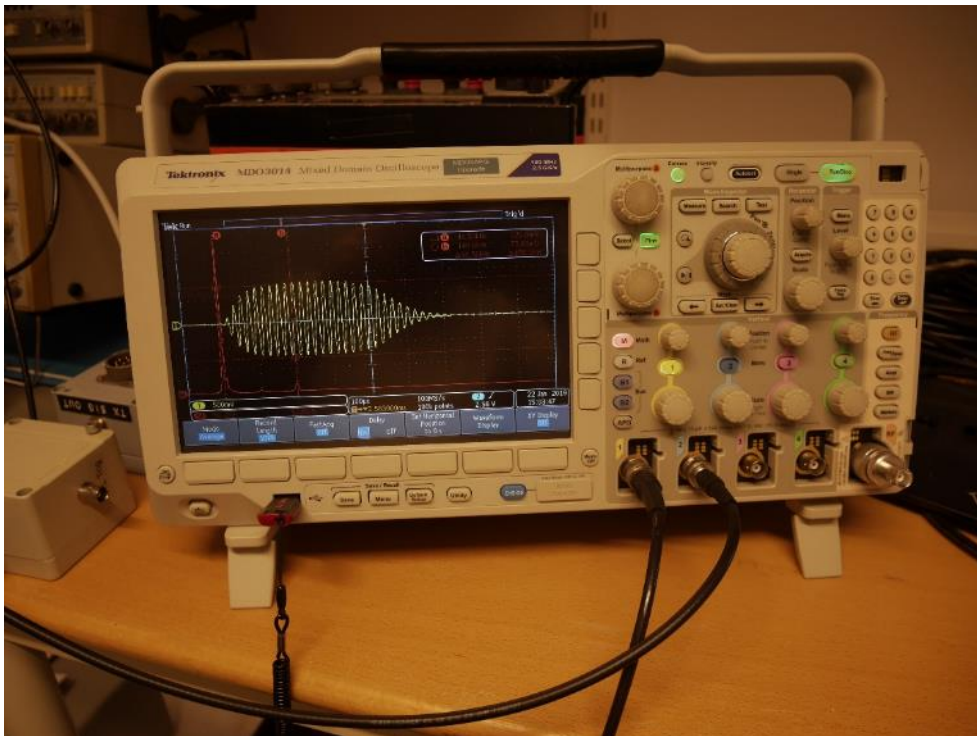
7.1 MÄTNING MOT GLASSKIVA



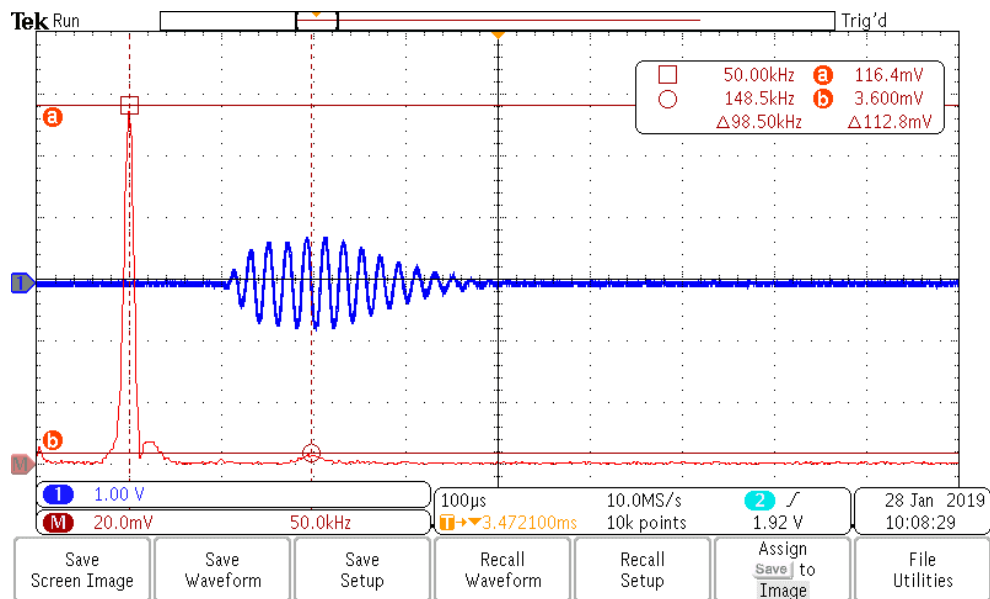
Figur 321. 50 kHz polaroid ultraljudsändare i den grå burken fastsatt på stativet. På absorbenten av skumplast en 2 mm glasskiva. Absorbenten är tänkt att minska randeffekter, men det verkar som att sensorns avtryck (footprint) håller sig inom glasplattans yta. Med avtryck menas i detta fallet den yta på glasplattan som ger upphov till reflexer.



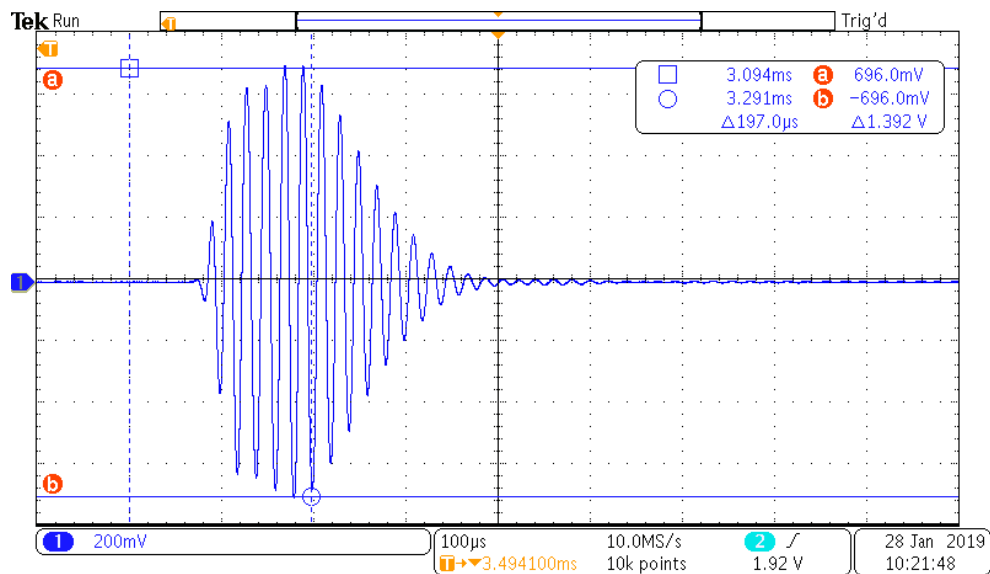
Figur 322. Polaroidsensorns avbildad underifrån



Figur 323. Oscilloskop med mätsignal.

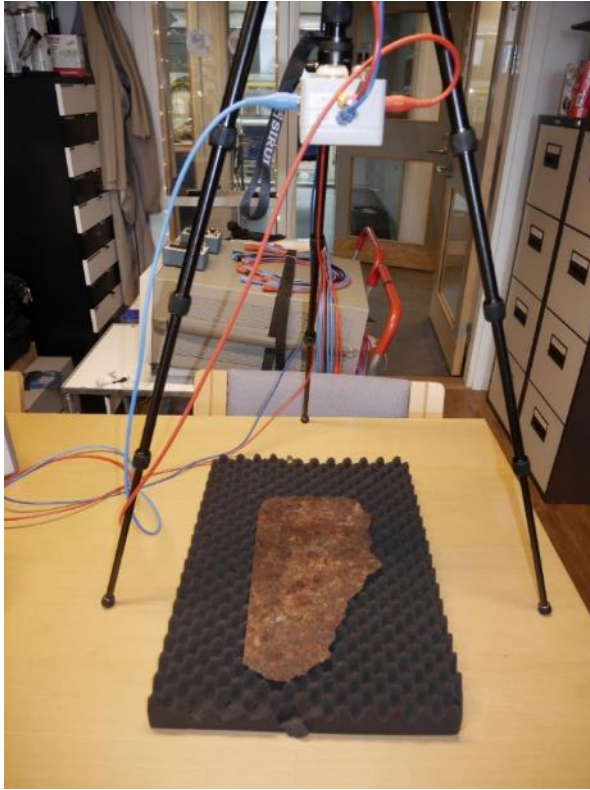


Figur 324. Reflex från glasskiva, reflektionskoefficient nära 1. Mkt svag överton (den 2:a) vid 150 kHz orsakad av viss överstyrning av mottagen signal. Röd kurva är frekvensspektrum, grundtonen är 50 kHz och dess amplitud är a=116.4 mV.

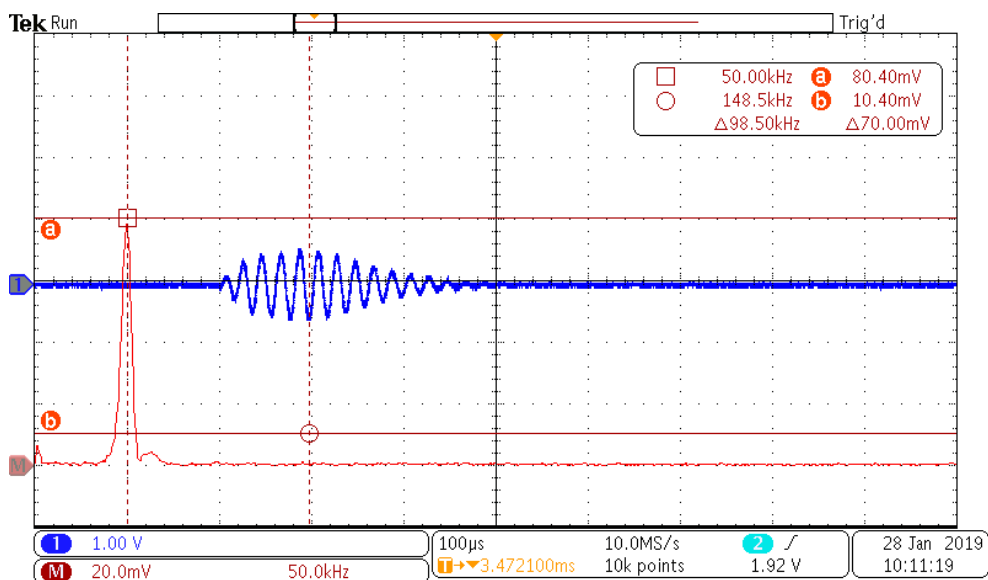


Figur 325. Uppförstorad reflex från glasskiva. Vpp=1.392 V

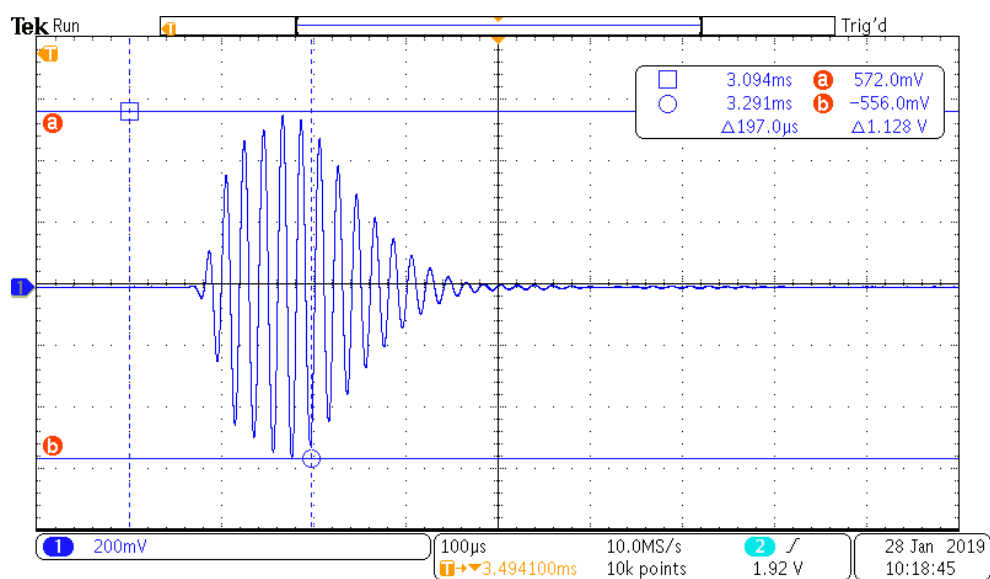
7.2 MÄTNING MOT SKALROST



Figur 326. Skalrostskiva utan bakomvarande stålplåt placerad på absorbenten



Figur 327. Reflex från skalrostskiva, något lägre reflektionskoefficient. Ingen överton synlig p.g.a. den svagare signalen. Röd kurva är frekvensspektrum, grundtonen är 50 kHz och dess amplitud a=90.8 mV. Markör b står inte vid noll, så dess värde skall adderas till värdet för markör a.



Figur 328. Uppförstorad reflex från skalrostskiva. Vpp=1.128 V

8 Diskussion av resultat

Denna rapport är mer en laborationsredogörelse än en forskningsrapport. Detta får ses mot fokusområdets brist på tidigare resultat att arbeta utifrån. Arbetet har i stor utsträckning fått vara intuitivt och någon övergripande forskningsplan har därför inte följts utan varje nytt resultat har styrt efterkommande arbete. Vissa moment kan ha upprepats med marginellt skilda förutsättningar. Det sagt kan materialet vara tills stor hjälp för planering och genomförande av ett mer systematiskt angrepp i form av ett doktorandprojekt med kvalificerad och deltagande handledning. Därav den mycket detaljerade redovisningen.

En stor del av resultaten gäller optimering av insignalen till sändarkedjan med avseende på att uppnå så stark signal som möjligt. Detta kan förstås dels som så stark signal som möjligt ut från sensorn, dels som så stark signal som möjligt efter passage genom provkroppen.

Nedan följer en genomgång av de viktigaste resultaten från mätningarna som redovisats i kapitel 4 till 7. Kapitel 4 behandlar mätningar med stegad kontinuerlig sinuston och analys med lock-in förstärkare. Kapitel 5 behandlar transienta mätningar och analys på oscilloskop. Kapitel 6 behandlar mätningar med radar och Kapitel 7 behandlar mätningar mot rostskikt i luft.

Reciprocitet är ett uttryck som används nedan och det betyder att det inte spelar någon roll vilken sensor i ett par som är sändare. Responsskurvan blir likadan i båda fallen.

Stegat Kontinuerligt ultraljud

4.2.1 ACS/ACSYS S1802 och S1803. Skjuvvågsensorn S1802 har två distinkta resonanser, nämligen vid 85 och 198 kHz. Kompressionsvågsensorn S1803 har resonanser vid 95 och 198 kHz. Detta reser tvivel om det är någon skillnad på dessa sensorer samt vad innebörden är av att de anges ha frekvenserna 50 respektive 100 kHz. Hursomhelst kan inte dessa sensorer användas då de saknar all riktverkan eftersom de bara har ett litet sensorelement.

4.2.2 ACS/ACSYS M2502S och M2502P. M2502 för skjuvvågor har en resonanstopp vid 85 kHz och en något svagare vid 198 kHz. Kompressionsvågsensorn har resonanstopp vid 80 kHz samt 198 kHz. Även i detta fall kan man ifrågasätta de angivna frekvenserna för de två sensortyperna, för skjuvvågor 55 kHz och för kompressionsvågor 100 kHz. Men dessa sensorer är de enda befintliga som går att använda i en scanner.

4.2.3 Olika filters karaktäristik. De fasta **Krohn-Hite** filterna med angivna frekvenser 47, 127 och 240 kHz dämpar halva signaleffekten under de angivna frekvenserna. Dessa filter är valda efter sensorernas nominella frekvenser och avlägsnar inte nu uppmätta övertoner i sensorkaraktäristiken. Det elliptiska filtret förmår filtrera ut ett frekvensområde omfattande 10 kHz vid 100 kHz. I samtliga fall -3dB amplitud (-6dB effekt). **RITECS** lågpassfilter 50 kHz för högeffekt börjar skära vid 42 kHz och når -6dB vid 50 kHz.

4.2.4 Panametrics 50 kHz sensorer. Den dominerande resonanstopp vid sändning sensor till sensor ligger vid 41 kHz med svagare sidotoppar vid 17 respektive 49 kHz. Sensorerna verkar vara i huvudsak reciproka.

Vid sändning tvärs igenom provkroppen – transmission uppträder en skog av resonanstoppar mellan 20 och 60 kHz vid grundtonen f . Detta kan orsakas av aluminiumplattan. Den starkaste tonen f ligger vid 32.5 kHz och den starkaste $2f$ tonen uppstår vid $f=23$ kHz ackompanjerad av en andra $2f$ ton vid grundtonen $f=27.5$ kHz. Koincidenta f och $2f$ tonmaxima uppstår vid $f=28$ kHz och 33 kHz. Inga $2f$ registrerades över $f=40$ kHz. När sändarsignalen filtrerats genom RITEC lågpassfilter för högeffekt försvinner f -komponenterna över 50 kHz, så filtret gör vad det ska.

Vid reflektionsmätningar erhålles en f -topp vid 38 kHz ackompanjerad av sidotoppar vid 32.5 respektive 45 kHz. En $2f$ topp vid $f=33$ kHz.

4.2.5 LTH tillverkade sensorer. Den dominerande frekvenstoppen vid sändning sensor till sensor ligger vid 42 kHz med nästan lika starka toppar vid 22 och 53 kHz. Det registreras $2f$ toppar vid dessa frekvenser. Sensorerna verkar vara i huvudsak reciproka.

Vid transmission uppmäts en frekvenstopp f vid 36 kHz och en $2f$ topp vid $f=37$ kHz. En annan stark $2f$ topp ligger vid $f=44$ kHz.

Vid reflektionsmätningar mot den kraftigt korroderade sidan av plåten erhålls starka frekvenstoppar både för f och $2f$ vid frekvenserna 37.5, 39.5 samt 54 kHz.

Vid reflektionsmätningar mot den måttligt korroderade sidan erhålls en stark frekvenstopp vid 38 kHz och en stark $2f$ -topp vid $f=37$ kHz.

4.2.6 Försök med geofoner. De dominerande frekvenstopparna vid sändning geofon till geofon ligger vid 200 Hz och 3200 Hz. Endast vid den lägre frekvensen uppträder några mätbara amplituder vid $2f$. Sensorerna verkar vara i huvudsak reciproka. Vid inzoomning och logaritmering ser man att det lågfrekventa området delas upp i två toppar vid 18 Hz respektive 35 Hz. Vid den lägre frekvensen syns antydning till utslag för $2f$.

Vid transmission uppmäts en stark frekvenstopp vid 20 Hz men inga $2f$ toppar.

Vid reflektion uppträder det toppar för $f=1500$ Hz respektive 2000 Hz och en stark $2f$ ton vid $f=604$ Hz.

4.2.7 ACS/ACSYS M2502 P (kompressionsvågor). Sensor till sensor mätningar redovisas ovan under avsnitt 4.2.2. Vid transmission med M2502P och mottagning med parallellkopplade Panametrics 50 och 100 kHz sensorer finner man en stark frekvenstopp vid $f=45$ kHz där även en synlig topp vid $2f$ konstateras. Inga registreringar av $3f$ iaktogs.

Vid reflektionsmätning erhålles en stark grundton vid $f=40$ kHz och ett flertal något svagare toppar över hela spektrumet från 20 till 120 kHz. Inga $2f$ toppar är associerade med f toppar. Det skall nämnas att $2f$ signalerna är så svaga att den digitala kvantifieringen tydligt framträder. Samma utsagor gäller för den andra övertonen $3f$.

Transient ultraljud

5.1 **M2502P** som sändare med Panametrics 50+100 kHz som mottagare. Mätningar tvärs genom provkroppen (transmission) visade att det tar 392 us för en kort puls av Rickertyp att gå igenom provkroppen. Det innebär att hastigheten för ljudvågor i provkroppen är 3061 m/s eftersom den är 1.2 m lång. Sänder man 10 perioder 127 kHz tar det 380 us för pulsen att gå tvärs igenom provkroppen. Med de egentillverkade sensorerna och 5 perioder 39 kHz blir passagetiden 384 us.

Vid sändning av 10 cykler vid 37 kHz sker en markant utsträckning av den signal som kan mottas på andra sidan provkroppen. Från 270 us till 8 ms. Det framträder spektralkomponenter svarande mot 3f i oscilloskopets FFT-plott. Detta kan rubriceras som **ringning** i sändarsensorn. Genom att förskjuta den utsända frekvensen från resonansfrekvensen blir ringningen dämpad.

5.2 M2502P Försök till **reflektionsmätning**. Samma sensor används som sändare och mottagare men olika element för respektive funktion. En vågform av Rickertyp användes. Två olika mätförfaranden med markörerna i oscilloskopet gav 134 respektive 192 us för den förmodade reflexen. Då tiden för en reflex måste överensstämma med tiden för passage genom provkroppen, eftersom tätplåten står i mitt i provkroppen, är dessa tider för korta och har sitt ursprung i ett annat fenomen.

5.3 M2502 Försöksserie för att bestämma **sambandet med utmatningsfrekvens från vågformsgeneratoren och en Gausspuls frekvensområde**. Försöken gjordes dels med halvperioden som parameter dels med frekvenstoppen i oscilloskopets FFT-plott som parameter. Resultaten är i tabellform. Halvperiodmetoden visade sig ge något för låga värden. Exempelvis gav inställningen 13,3713 kHz på vågformsgeneratoren vid utmatningen av den lagrade vågformen Gauss en frekvenstopp i den utsända signalen vid 115 kHz.

5.4 M2502 och tester med vågformen Gaussdiff bekräftar att mottagna signaler vid förmodad reflektion är alldeles för korta för att kunna vara reflexer från stålplåten. **Misstanke uppstår att den i betongen ingjutna aluminiumplattan kortsluter systemet på något sätt.** Plattan är ditsatt för att fästa sensorerna i. Spektralmätning konfirmerade att man med inställningen 13.3713 kHz på vågformsgeneratoren får en frekvenstopp vid 110 kHz, mycket nära de eftersträvade 115 kHz.

5.5 Försöksserie med M2502 för att bestämma den **utmatningsfrekvens från vågformsgeneratoren som ger starkast amplitud i den transmitterade signalen**, alltså den som gått rakt igenom provet. Mottagare var Panametrics 50 kHz. Vågformen var Gaussdiff. Frekvenser från 2 kHz till 15 kHz. Amplituden blev starkast för utmatningsfrekvensen 4-5 kHz.

5.6 Som ovan men med Panametrics 100 kHz som mottagare. Max amplitud erhöles för utmatningsfrekvensen 3 kHz.

5.7 Försöksserie med test av lämplig **förstärkningsnivå på effektförstärkaren** för transientsändning. Resultatet blev att förstärkningsnivån 9.0 leder till distorsion om utsignalen från vågformsgeneratoren är 500 mVpp. Därför används i fortsättningen förstärkningsnivån 8.0.

5.8 Upprepade försök med reflektionsmätningar och M2502 och RITEC förstärkning 8.0 enligt föregående resultat. Försöksserien motsvarar den under 5.5. Resultatet är att utmatningsfrekvensen 4 kHz respektive 10-14 kHz ger starkast amplitud för den mottagna signalen, men att denna, liksom tidigare, kommer alldeles för tidigt för att kunna vara en reflex från den rostiga stålplåten. Vid högre frekvenser uppstår cyklisk ringning i signalen, vilket stärker misstanken att den ingjutna aluminiumplattan ställer till bekymmer.

5.9 Kontrollmätningar för att undersöka om den ingjutna aluminiumplattan interfererar med önskade mätdata. M2502 placeras med sensorelementen i fria luften. Ingen överhörning inom M2502 kan mätas upp. M2502 ställs därefter ovanpå provkroppen på planslipad betongyta. Som väntat kommer ett starkt signalpaket in i mottagarna direkt från sändarna via betongen. Dock uppvisar detta ingen cyklisk ringning. Ingen distinkt reflex från provkroppens undersida på ett avstånd av 700 mm kan iakttas. Dessa observationer får anses fälla en hård dom över den ingjutna aluminiumplattan. **Den skall avlägsnas.**

5.10 Dessförinnan utförs en försöksserie med **M2502S** för skjuvvågor i syfte att se vid vilken utmatningsfrekvens från vågformsgeneratoren som ger starkast signal. Skjuvvågor utbreder sig med ungefär halva hastigheten jämfört med kompressionsvågor. Denna utmatningsfrekvens visar sig ligga vid 3 kHz. Förfinade mätningar bestämmer den till 2.7 kHz. **En signal anländer vid 878 us, vilket skulle ge en skjuvvågshastighet av 1367 m/s.** Detta är det mest uppmuntrande resultatet hittills vad gäller transienta reflektioner.

5.11 Tester med M2502 P och S **inför beslut att avlägsna aluminiumplattan.** Fortsättning på 5.9. Test med M2502P visar tydligt att aluminiumplattan skapar cykliskt ringande signaler. Detta är inte lika tydligt för sensorn M2502S. **Beslutas att avlägsna aluminiumplattan.**

Alla resultat hädanefter är med aluminiumplattan borttagen. Därför kommer vissa mätningar att upprepas i syfte att undvika de störningar som aluminiumplattan misstänks ha haft.

5.12 Försöksserie med **aluminiumplattan borttagen.** Starkast registrerad amplitud erhöles för utmatningsfrekvensen från vågformsgeneratoren 12-13 kHz. Men denna amplitud låg mycket nära den utsända signalen i tid och är därför med säkerhet den som gått direkt från sändaren via betongen till mottagaren. Signalen uppvisar i övrigt ett mycket lugnare beteende än när aluminiumplattan var monterad.

5.13 Transmission och reflektion med M2502P som sändare *utan aluminiumplattan* och Panametrics 50+100 kHz som mottagare på motstående sida av provkroppen. Transmissionstiden blev 302 us, vilket motsvarar en **ljudhastighet av 3973 m/s.** Det är väsentligt högre än tidigare bestämningar, men inte orimligt för betong.

Reflektionsmätningarna gav ingen tydlig signal vid förväntade 302 us. Den mottagna signalen har ett amplitudmaximum vid frekvensen $f=126$ kHz. Det finns antydningar till $2f$ och $3f$ i signalspektrum.

5.14 Inverterade signaler. Registrering av den analoga signalen från vågformsgeneratorns lagrade datafiler GAUSDIFP respektive GAUSDIFN. Gjort för att senare kunna kontrollera att summan av signalerna blir nära noll.

5.15 Mätdata TEK00255 – 00266 saknas därför att den USB-sticka som innehåller dem har förkommit.

5.16 Mätning med LTH:s **egentillverkade sensorer**. Försöksserie som syftar till att bestämma den utmatningsfrekvens från vågformsgeneratoren som ger starkast signal. Den ligger vid 5 kHz vilket svarar mot att den utsända frekvensen är 43 kHz.. Då tar det 356 us för signalen, en Rickervågform, att gå igenom provkroppen. I den bredvid sändaren monterade egentillverkade sensorn anländer den första signalen efter knappt 100 us. De egentillverkade sensorerna sitter på ett avstånd av 120 mm. **Om det tar 356 us för signalen att gå 1200 mm kan det inte ta bortåt 100 us att gå från sändarsensor till mottagarsensor.** Så vad är det då för reflex man ser vid denna tid. Övertoner registrerade vid $f_2=86$ och $f_3=129$ kHz kan bero på att senare delar av den mottagna signalen är överstyrda.

5.17 Sändning med Panametrics 50+100 kHz sensorer och individuell mottagning med två av sensorerna tillverkade vid LTH. Det noterades att utsignalen från de egentillverkade sensorerna var så stark att ingen förstärkning av signalen erfordrades. LTH-sensorerna hade dock inte samma känslighet. Passagetiden tvärs igenom provkroppen var 332 us. Amplitudmax erhöles för utmatningsfrekvensen från vågformsgeneratoren inställd på 3 kHz.

5.18 Instrumenterad **PCB testhammare**. I korthet visade testet att signalen är **alldeles för lågfrekvent** för att stålplåten skall ge upphov till reflexer. Det saknas frekvenskomponenter över 10 kHz.

5.19 Nya vågformer och M2502P som S/M och Panametrics 50+100 kHz som mottagare.

Spike är en rektangulär positiv puls utan negativa delar. Det är en vanlig exiteringspuls i ultraljudsammanhang. Resulterande frekvens beror främst av sensorns resonansegenskaper. Optimal utmatningsfrekvens från vågformsgeneratoren var 1.3 – 1.5 kHz.

Förskjuten fyrkantvåg är två förskjutna rektangulära pulser, en positiv och en negativ. Tanken är att den första rektangulärpuls skall excitera sensorn vid en resonans och därför ge en stark signal. Därefter skall den negativa pulsen göra samma sak fast tvärtom, så att ringningen släcks ut snabbt. Man skall alltså excitera vid resonans utan att få ringning. Optimal inställning av utmatningsfrekvensen för vågformsgeneratoren var 2.4 kHz. Då var den mottagna frekvensen 80 kHz. Vid utmatningsfrekvensen 3.0 kHz blev den mottagna frekvensen 85 kHz. Näst starkast blev amplituden vid utmatningsfrekvensen 1.1 kHz och då var den mottagna frekvensen 40.1 kHz.

5.20 **Optimal utmatningsfrekvens för positiv Ricker**. M2502P som S/M Panametrics 50+100 kHz som M. Optimal utmatningsfrekvens visade sig ligga vid 5 kHz för den lagrade vågformen Ricker P.

5.21 **Vanlig snickarhammare.** Panametrics 50+100 kHz som mottagare. Själva pulsen blev längre än transporttiden tvärs genom provet. Frekvenserna alltså allt för låga.

6 **Försök med impulsradar.** Georadar vid 900 Mhz ger ingen reflex från stålplåten i provkroppen. Sannolikt är orsaken att dämpningen av radiovågorna är för hög i betongen.

7 **Mätningar i luft.** Dessa görs för att undersöka effekten av en drastiskt minskad våglängd, vilket åstadkoms därför att ljudhastigheten i luft bara är en tiondel av ljudhastigheten i betong eller lägre. En polaroidsensor med arbetsfrekvens 50 kHz sinus i pulser om något tiotal perioder användes. Mätning mot en glasskiva gav maximala reflexamplituden 1.392 Vpp och mätning mot ett lager skalrost utan bakomliggande stålplåt gav maximala reflexamplituden 1.128 Vpp.

Slutsatsen från genomförda mätningar är att det förefaller vara så att avsaknaden av reflexer från skalrosten och stålplåten i tidigare försök är att våglängden varit för lång, dvs att frekvensen varit för låg. Stöd för att högre frekvenser kan användas i betong finns i [4], som nämner försök vid 330 och 680 kHz.

Nedan visas ett försök att gradera de olika sensorerna. Försöken har varit inriktade mot att få ett eko från stålplåten och konstatera olinjäritet i detta eko. Inga eko har registrerats och i den meningen är alla testade sensorer mindre bra. Iga systematiska försök har gjorts att testa högre frekvenser eftersom denna insikt inte uppnåddes förrän efter det avslutande experimentet med ultraljud i luft. Sensorn Panametrics 100 kHz finns det endast en av, varför dess karaktäristik inte kan bedömas på samma sätt som de andra sensorerna i tabellen.

Tabell X: Olika sensorers lämplighet (P=kompresionsvågor, S=Skjuvvågor)

Sensortyp	Lämpl f scanner	Intressant frekvensområde	Kommentar
Geofoner P	Nej	200, 3200 Hz	Som pumpfrekvens
ACS M2502P	Ja	80, 198 kHz	Torrkopplade
ACS M2502T	Ja	85, 198 kHz	Torrkopplade
S1802S/1803P	Nej	85, 198 kHz	Saknar riktverkan
LTH tillverkade P	Nej	22, 42, 53 kHz	För fast montage
Panametrics 50 kHz, P	Nej	41 kHz	Kräver medium

Med pumpfrekvens menas att man konstaterar olinjäritet genom att modulera högfrekvent ultraljud med en lågfrekvent pumpfrekvens. Den senare har till uppgift att öppna och stänga mikrosprickor i betongen och därigenom skapa varierande förutsättningar för utbredningen av den högre frekvensen.

För framtida försök är den högre frekvensen 198 kHz hos ACS M2502P, som den framgår i avsnit 4.2.2 Figur 31, den mest intressanta. Denna frekvens har en första överton vid nästan 400 kHz, varför den använda lock-in-förstärkaren inte kan användas som detektor, då dess övre frekvens är 250 kHz. Därför måste AD-omvandling göras och spektrum beräknas med FFT. Det kan ske i oscilloskopet.

Den noggranne läsaren undrar naturligtvis varför inga försök utförts på provkropparna 2-4. Det beror på att den stora provkroppen (1) syfte är att bestämma hur korrosion skall kunna bestämmas. Innan man vet det, är det

meningslöst, eller i varje fall äventyrligt, att börja lokalisera korrosion, vilket är syftet med provkropp 2, den med tre olika nivåer av korrosionsangrepp. Eftersom lokalisering kräver avsökning av provkroppens yta med hjälp av en scanner är detta ett annat projekt där varje avsökning tar flera timmar. Därför vill man gärna veta att det man gör är riktigt innan scannern startas upp. Det är syftet med provkropp 1.

Av detta skäl har inga provkropparna 2-4 scannats i denna projektetapp. Att mobilisera scannerutrustningen, dvs att trimma in den för dessa syfte är ett så pass omfattande arbete att det lämnats åt en senare etapp när en metod att konstatera korrosion är framtagen.

9 Fortsatt arbete

Detta projekt avses fortsätta som ett doktorandprojekt. Syftet med ett sådant doktorandprojekt är att förbättra möjligheten att detektera förekomst av korrosionsskador på reaktorinneslutningars ingjutna tätplåt. Projektet har som mål att utveckla teknikbaserad på olinjäritet/övertoner för oförstörande provning av korrosionsskadad tätplåt. I den mån andra tekniker visar sig intressanta kan de komma att användas.

Förslag till fortsatt arbete:

*4.1 Fortsatta försök med harmonic imaging **

Dessa försök bör utföras med transienta signaler, dvs korta pulser av en frekvens. Denna frekvens bör vara tillräckligt hög för att medge tidsupplösning, så att man med säkerhet kan avgöra att olinjäriteten uppstått i tätplåten och inte i betongen. Pulserna kan också vara så kallade chirpar, långa frekvenssvep, vilka kan tidskomprimeras efter mottagandet. Hur övertonsdetekteringen skall gå till i sådana fall måste då utredas.

4.2 Fortsatta försök med inverterade signaler

Dessa försök utförs lämpligen med korta impulsiva signaler som lätt kan omvandlas från tydligt positiva till negativa. En klassisk sådan är Ricker-vågformen som uppstår genom att man deriverar en normalfördelningskurva (Gausskurva) två gånger. En annan sådan vågform är fyrkantvåg där andra utslaget är fördröjt och har halva amplituden jämfört med första utslaget. Denna kurvform är konstruerad för att bromsa transducerns egensvängning, så att man kan få en kort puls nära transducerns resonansfrekvens, där den annars kommer att svänga med ett avtagande exponentialförlopp.

4.3 Scanning av provkropp med ingjutna plåtar med olika nivå av rostangrepp

Under våren tillverkades tre nya provkroppar avsedda för försök i LTH:s scanner. Den större av dessa, innehåller som nämnts tidigare, tre stålplåtar med olika nivå av rostangrepp placerade på provets botten. Scanning förutsätter att man kan använda torrkopplade sensorer och då är det endast 100 kHz P-våg och 50 kHz S-vågssensorer av typen A1220 som kan användas. Som framgår nedan skulle det vara av intresse att få tillgång till en mer högfrekvent variant av en sådan sensor.

4.4 Mätning av olinjäritet i korroderad tätplåt i vatten för renodling av problematiken

Försök i vatten har den fördelen att kopplingen mellan sensor och medium blir problemfri och att det inte uppstår några som helst reflexer i vattenvolymen då vatten är homogent. Det innebär att hela LTH:s armada av ultraljudsensorer, utom just de ovan nämnda A1220 P och S, kan användas.

4.5 Försök med högre ultraljudfrekvens

Som tidigare angetts kan bristen på reflex från stålplåten i hittillsvarande försök möjligen åtgärdas genom att sända vid en högre frekvens. Det är känt att ett tunt reflekterande skikt reflekterar starkare när signalens våglängd närmar sig skiktets tjocklek. Detta är en variant på s.k. Mie-effekten, att en sfär reflekterar ringa när

våglängden är större än sfärens radie för att bli totalreflekterande när våglängden blir ringa i förhållande till sfärens radie.

I [4], som ovan nämnts, relateras på sidan 507, att frekvenser mellan 330 och 680 kHz har använts i betong tillsammans med syntetisk aperturteknik (SAFT), se 4.8 nedan för diskussion av SAFT. Effekten av de höga frekvenserna blev skarpa avbildningar men också mer omfattande återspridning från partiklarna (aggregatet) i betongen.

4.6 Karaktärisering av ingjutna defekter med hjälp av 2-D scanning / 3-D info.

En känd imperfektion vid grova betongkonstruktioner är att det kan hamna formrester av trä i betongen, men också att arbetshandskar kan tappas och inte återfinnas. Rostangrepp på tätplåt har i något fall konstaterats bero på träbitar, vilka skapat gynnsamma förhållanden för att korrosion skall uppstå. Försöket har till syfte att ge kunskap om de signaturer sådana objekt kan ha i mätdata. Detta är försök som skall utföras genom att sensorn skannas i planet så att man med transienta signaler får den tidsupplösning som krävs för att man skall få 3-D data. Med sådana data kan objektets läge i betongen bestämmas (x,y,z). Eventuellt kan en ny provkropp tillverkas där en träbit fixeras invid en tätplåt innan pågjutningen börjar.

4.7 Undertoner. Om man exciterar vid en överton kan grundtonen också exciteras vid olinjäritet.

Stundtals läser man rapporter om att forskare utnyttjat undertoner. Ofta betyder det att man har exciterat objektet med en överton till någon grundresonans. Energi läcker då över till grundtonen om objektet företer olinjära egenskaper.

4.8 Försök med SAFT (Syntetic Aperture Focusing Technique), exempelvis med MIRA-instrumentet.

MIRA-instrumentet är en vidareutveckling av A1220 instrumentet. Antalet sensorelement har utökats från 12+12 i A1220 till 4 x 12 och mera. Dessutom har signalprocessering med s.k. backprojection införts. Det innebär att målområdet delas upp i celler och att man räknar bakåt från varje cell och summerar bidragen från alla mottagare vid den relevanta tiden. Instrumentet kan arbeta så att alla sensorelement sänder och mottar samtidigt med också så att man sänder med ett element i taget och mottar med alla de andra. Resultatet blir ekvivalent bortsett från att exciteringsnivån blir högre när alla element sänder samtidigt. Det innebär att de två varianterna på sändning/mottagning kommer att uppvisa skillnader om det finns olinjäriteter i målområdet. Olinjäritet är ju definierat som att responsen inte varierar proportionellt mot excitationen. I fortsatt arbete bör ett MIRA-instrument hyras in i samarbete med BAM. Visst sådant har redan förekommit, då vi nyligen hade en företrädare för BAM som opponent vid en disputation inom området Övervakning (Structural Health Monitoring (SHM)).

*4.1 Förklaring av frekvenssvep, s.k. chirpar och pulskompression.

En signals upplösningsförmåga är proportionell mot dess bandbredd. Stor bandbredd kan åstadkommas med en kort signal, men ju kortare en signal är desto mindre energi innehåller den och ju svårare blir den att detektera. Ett annat sätt att åstadkomma stor bandbredd är att sända ett frekvenssvep inom sensors frekvensområde. Efter mottagning av signalen genomför man en matematisk process som kallas pulskompression och då får

man en signal som är så kort som den använda bandbredden medger, men innehåller mycket mer energi än om den korta pulsen skulle sänts ut direkt. Det finns två sätt att kompensera för att sensorn har en ojämn frekvensrespons. Det ena är att anpassa sändpulsens så att den blir en slags invers av sensorns frekvenskaraktäristik – svag vid resonansfrekvensen där sensorns respons är stark och starkare vid andra frekvenser där sensorns respons är svag. Då kan man få ett nästan rektangulärt spektrum som kan omvandlas till en kort signal. Ett mycket effektivare sätt är att reglera frekvenssvephastigheten så att den blir längre för de frekvenser där sensorns karaktäristik är svag. Orsaken är att man då kan sända med full amplitud vid alla frekvenser medan man med den förra metoden måste dämpa amplituden vid sensorns resonansfrekvens om amplituden skall kunna vara starkare vid andra frekvenser.

Inom seismiken brukar man som tumregel ange att erforderlig tjocklek för ett lager för att en reflex skall uppstå är en fjärdedels våglängd (Yilmaz s 1802). Med ljudhastigheten v i betong antagen till 4000 m/s och en fjärdedels våglängd motsvarande 5 mm blir våglängden $\lambda=0.02$ m och frekvensen f måste vara i storleksordningen ($V=\lambda*f$) 200 kHz.

Bandbredden i en transient signal är ett annat mått på upplösningssförmågan. Generellt tilltar bandbredden med kortare signaler, även om grundformen är en ren sinus. Men man kan göra vågformen bredbandig genom att svepa frekvensen i den sända signalen. Man sänder då vad som kallas en chirp. Dess bandbredd är skillnaden mellan högsta och lägsta frekvens -3dB. Upplösningen U förhåller sig till bandbredden Bw och ljudhastigheten v som

$$U = \frac{v}{2*Bw}$$

Det betyder att för att få upplösningen 5 mm krävs en bandbredd av $4000/(2*0.005)=400$ kHz.

Definitionen av upplösning är att två nära liggande föremål skall kunna separeras av systemet. Upplösningssförmågan är det kortaste avståndet som medger detta. Detektion av ett lager beror också av kontrasten mot omgivningen, i detta fall avseende parametrarna densitet och ljudhastighet, dvs impedanskontrasten.

Dessa enkla beräkningar antyder att frekvensområdet upp till 500 kHz bör studeras.

10 Slutsatser

Transmission genom 1 m oarmerad betong utgör inget hinder för de frekvenser som provats i projektet 50-100 kHz. Det innebär också att dämpning inte bör bli något problem vid mätning mot en plåt belägen på halva djupet, eftersom ljudvågens gångsträcka då blir det dubbla djupet.

Reflektion från tunna rostlager eller stålplåt kräver att högre frekvenser utnyttjas. Orsaken är att dessa lager endast är några mm tjocka och att våglängden vid 50 kHz i betong är i storleksordningen 4-8 cm. Det innebär att optimal frekvens kommer att utgöra en balans mellan dämpningen av den akustiska energin och den geometriska upplösningssförmågan. Det kommer alltså att finnas en optimal frekvens att arbeta vid. Det är inte säkert att denna frekvens kan implementeras med de gynnssamma tekniker för överföring av akustisk energi från sensor till betong som utvecklats för mätningar i betong.

Mätning i luft, med 50 kHz och mycket kortare våglängd på grund av den lägre ljudhastigheten i luft, mot ett skalrostskikt visar att detta ger en stark reflex. Det är en definitiv indikation att testa högre frekvenser i kommande försök. Det kan också vara intressant att sända mycket bredbandiga signaler, även om det försvårar klassisk detektering av övertoner. Stor bandbredd innebär hög upplösning

Ju kortare en signal är desto bredbandigare är den för att slutligen bli en s.k. dirac, en teoretisk signal som har amplituden 1 och ingen varaktighet i tiden. Den har ett helt rektangulärt spektrum, i varje fall i rent matematisk mening, dvs den innehåller alla frekvenser. Nackdelen med de korta signalerna är att de innehåller lite energi och därför snabbt kan dämpas ut. Den klassiska åtgärden i sådana fall är att i stället sända en längre signal, men som ändrar frekvens, man brukar tala om en chirp. Genom en matematisk operation benämnd pulskompression kan en sådan chirp pressas ihop i tiden till en kort signal som motsvarar dess bandbredd, men får större amplitud än chirpen. Möjligen kan denna teknik vara framgångsrik för att alstra reflexer från den tunna tätplåten och rostskiktet.

Kontinuerlig sändning eller sändning med transmission, dvs att sändare och mottagare befinner sig på olika sidor av konstruktionen, medger inte att man bestämmer en skadas djup, endast dess förekomst. I stora konstruktioner är det svårt att synkronisera rörelser av sensorer på olika sidor av konstruktionen. Säkra diskriminering erhålls om man kan få konventionella reflektionsmätningar att fungera. Det innebär att sändare och mottagare är samma sensor eller två sensorer eller sensorgrupper lokaliserade intill varandra. Det är samma princip som fartygens ekolod.

Man skall vara försiktig med att ta tillverkarens angivelse av frekvens för en sensor för säkra. De mätningar som utförts visar att det kan finnas ett helt spektrum av frekvenstoppar i en sensor, inkluderande övertoner. Detta kan göra detektion av övertoner som alstrats i ett rostskikt problematiskt. *Det är inte ovanligt att man använder sensorer med en enda piezoelektrisk kristall när man studerar olinjäritet. Kanske kan det också vara en väg framåt i denna problematik.*

Även de tidiga delarna i sändarkedjan som våformsgenerator och effektförstärkare kan skapa övertoner. Det sätt vi kan mildra denna effekt är att sätta in ett högeffektfilter med lågpassfunktion i sändarkedjan strax innan sensorn, så att vi vet att den elektriska signalen inte innehåller några övertoner. *Ett sådant med passfrekvensen 50 kHz disponeras.*

11 Referenser

- [1] ULRIKSEN, "ACCEPPT WP1/G2: Non Destructive Examination", May 2014, NUGENIA ACCEPPT. (Refererad sidan 8.)
- [2] WIGGENHAUSER, HELMERICH, KRAUSE, MIELENTZ, NIEDERLEITHINGER, TAFTE och WILSCH, "Non-destructive Testing of Nuclear Power Plant Concrete Structures State of the Art Report", Prepared for Oak Ridge National Laboratory, 2013. (Refererad sidan 8.)
- [3] ULRIKSEN, WIBERG, "Automatisk avsökning av betongkonstruktioner med utrustning baserad på mekaniska vågor". Elforsk Rapport 1997:23. (Refererad sidan 8.)
- [4] SCHICKERT, KRAUSE, "Ultrasonic techniques for evaluation of reinforced concrete structures", Woodhead Publishing Limited 2010. (Refererad sidan 9)
- [5] DE JONG, BOUKAZ, TEN CATE, "Contrast harmonic imaging", Ultrasonics 40, 2002, pp567-573. (Refererad sidan 10.)
- [6] DARRELL, DUNN, PULVIRENTI och HISER, "Containment liner Corrosion Operating Experience Summary Technical Letter Report - Revision 1". US Nuclear Regulatory Commission Office of Nuclear Regulatory Research, August 2, 2011. (Refererad sidan 10.)
- [7] FRÖJD, ULRIKSEN, "Voice coils as reciprocal transducers in structural health monitoring applications." Journal of the Acoustical Society of America - JASA. (Refererad sidan 44/45.)
- [8] YILMAS, "Seismic Data Analysis", SEG Book, Set of two volumes, ISBN 1-56080-094-1, 2001. (Refererad sidan 203.)

Allmän ultraljudprimer:

<https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Physics/wavepropagation.htm>

DETEKTION AV KORROSION I INGJUTEN TÄTPLÅT I REAKTOR- INNESLUTNING MED HJÄLP AV ÖVERTONER

Rapporten redovisar resultaten från experiment med detektion av korrosionsskador i ingjuten tätplåt i reaktorinneslutningar. Metoden är ultraljud och effekten är den olinjäritet som korrosionsprodukter kan tänkas uppvisa.

Olinjäritet uppstår när ett material har olika elasticitet i dilatation och kompression. Vid kontinuerlig signal erhålles penetration genom 1,2 m betong och övertoner kan detekteras. Det är ett gott tecken, men med kontinuerlig sändning kan man inte bestämma var i konstruktionen övertonerna uppstår. För detta syfte använder man transienta signaler, vilka bör reflekteras till sändaren. Om hastigheten i betongen är känd kan man då bestämma hur djupt i konstruktionen olinjäriteten uppstår.

Resultaten visar att det inte uppstår reflexer från den ingjutna stålplåten med ett korrosionsskikt. Eftersom man får goda reflexer från korrosionsskiktet vid mätningar i luft med samma frekvens dras slutsatsen att våglängden varit för stor. För samma frekvens är våglängden i luft endast en tiondel av vad den är i betong. Frekvensen behöver därför höjas.

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