



Litteraturstudier och test av oförstörande provningmetoder (OFP) med möjliga tillämpningar på kärnkraftens betongkonstruktioner

Elforsk rapport 10:85



Peter Ulriksen

Maj 2010

ELFORSK

Litteraturstudier och test av oförstörande provningsmetoder (OFP) med möjliga tillämpningar på kärnkraftens betongkonstruktioner (BET 009)

Elforsk rapport 10:85

Peter Ulriksen

Maj 2010

Förord

Sedan 2007 pågår inom Elforsk ett forskningsprogram kring betongkonstruktioner inom kärnkraftverken. Det finns ett behov av att både bygga upp kompetens inom området och att utveckla teknikbasen för teknisk förvaltning av byggnader och konstruktioner inom kärnkraftindustrin. Det övergripande målet med det betongtekniska programmet är att säkerställa avsedd livslängd och hög tillgänglighet för svenska kärnkraftverk med bibehållen säkerhet. Programmet finansieras av Vattenfall, av kärnkraftverken i Forsmark, Ringhals samt OKG i Oskarshamn, av Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM) samt av Teollisuuden Voima Oy (TVO) i Finland. Inom ramen för detta forskningsprogram har föreliggande projekt "Litteraturstudier och test av oförstörande provningsmetoder (OFP) med möjliga tillämpningar på kärnkraftens betongkonstruktioner" beställts. Inom ramen för Elforsks Betongprogram har tidigare studien, Elforsk rapport 08:24, "Utvärdering av oförstörande provningsmetoder med möjliga tillämpningar inom kärnkrafttekniska betongkonstruktioner" också genomförts.

Projektet har utförts av Lunds Universitet med Peter Ulriksen som projektledare.

Projektet har följts av Betongprogrammets styrgrupp bestående av Jonas Bergfors EON OKG, Jan Gustavsson Vattenfall Ringhals, Christian Bernstone, Daniel Eklund och Manouchehr Hassanzadeh Vattenfall Research and Development, Kostas Xanthopoulos SSM, Lars-Erik Berglund, Marcus Edin och Philip Persson Vattenfall Forsmark samt Juha Riihimäki TVO. Elforsk tackar styrgruppen för värdefulla synpunkter och kommentarer.

Elforsk i september 2010
Lars Wrangén
Programområde Kärnkraft

Sammanfattning

Föreliggande rapport redovisar arbete med att undersöka vilka metoder som kan vara lämpliga för att lokalisera delaminering i framförallt kylvattenkanaler i kärnkraftverk. Den är också en närmare studie av instrumentet A1220 Monolith från tillverkaren ACSYS i Ryssland. Mätprincipen är att ekon från diskontinuiteter inne i betongen registreras som funktion av tid. Genom att anta en hastighet kan denna tid omvandlas till ett djup. Instrumentet har gjort sig känt för att arbeta med reflekterade skjuvvågor (S-vågor) vid 55 kHz (ultraljud) och har visat sig ge mycket goda resultat i betong vad gäller att avbilda den inre strukturen såsom armeringsjärn, hålrum, tjocklek och horisontella sprickor, dvs. delaminering. Till instrumentet kan också kopplas en sökare som arbetar med kompressionsvågor (P-vågor). Eftersom instrumentet samtidigt introducerar tre nyheter i praktiska ultraljudsammanhang, nämligen

- torrkoppling mellan sensorer och betongyta
- skjuvvågor som energibärare
- sändare och mottagare bestående av flera element

finns det skäl att försöka förstå vilken av nyheterna som är orsaken till de goda resultaten och vilka krav det ställer på metodiken. Särskilt intresse riktar därvid mot möjligheten att använda instrumentet ihop med en automatiserad scanner i syfte att genom tvådimensionell avsökning i rutnät bekvämt erhålla tredimensionella data med hög upplösning. Sådana undersökningar går att utföra manuellt med instrumentet, men så snart antalet mätpunkter överstiger några hundra blir det en tung uppgift. Det är lämpligt att utföra automatiserade mätningar med 1 cm rutnät. Det har visat sig att man till instrumentet kan koppla både sökare för S-vågor och för P-vågor.

Delaminering kan detekteras med flera metoder. Termografi skall nämnas. Bäst förutsättningar bedöms följande metoder ha:

- profilering med pulsekometod baserad på ultraljud i tömd kanal
- profilering med sonar i vattenfylld kanal
- vibrationsmätning med hjälp av vattenstråle i tömd kanal
- impedansmätning i tömd kanal

Impedansmätning är i teorin fullt utvecklad och eventuella förbättringar kan ske i metodiken, vilket förhoppningsvis kan ske i ett kommande projekt.

Försöken med A-scanmätningar (punktmätningar) i 225 mm tjocka betongprovkroppar med simulerad delaminering indikerar att frekvensvalet vid mätningar i betong skall vara 55 kHz för båda sökartyperna. Den aktuella betongen är tunn jämfört med tänkbara konstruktioner, men tjockleken är relevant vad avser förekomsten av delaminering. Resultaten är inte nödvändigtvis giltiga vid mätning i metertjock betong.

Försöken med B-scanmätningar (profilering) visar att det troligen är mest optimalt att driva både P-vågsökare och S-vågsökare med exciteringsfrekvensen 55 kHz. Instrumentets kapacitet för 100 mätningar ligger strikt i intervallet [10,15] minuter när avståndet mellan mätpunkterna är 1 cm. Det är inga

problem att lokalisera en utbredd delaminering på djupet 160 mm. Mycket små delamineringar på stort djup har inte undersökts. Ytlig delaminering förorsakar fenomenet ringning. Det är när den utsända signalen studsar fram och tillbaka mellan betongytan och delamineringen.

Under de förhållanden försöken inneburit ger S-vågsökaren en väsentligt renare bild än P-vågsökaren och man kan därför dra slutsatsen att det är S-vågorna i sig som gör A1220 instrumentet så framgångsrikt. Övriga parametrar är ju identiska för försöken.

En inledande hypotes var att det är det stora antalet element i S-vågsökaren som gör att instrumentet är så framgångsrikt. I så fall skulle man ha kunnat tillverka en P-vågsökare som skulle kunna ha släpats över betongytan. Därmed skulle en enklare scanner kunna ha använts. Det är således inte möjligt eftersom det är skjuvvågorna som ger det goda resultatet. För att utnyttja S-vågsökarens goda egenskaper måste en scanner med Z-axel användas, så att sökaren kan lyftas och sänkas mot betongytan.

Ett pneumatiskt don är det enklaste sättet att realisera en sådan Z-axel om man redan har en X-Y-scanner. Genom att förse tryckluftcylindern med en reduceringsventil kan man anpassa cylinderns kraft så att den precis balanserar fjäderkraften i de 24 elementen i sökaren till A1220 Monolith-instrumentet.

Resultaten från försöken i anslutningen till kylvattenkanalen i Ringhals 2 visar att verklig ytlig delaminering ger upphov till ringning, liksom den gjorde i laboratorieförsöken. Indexberäkningarna visar att man på ett enkelt sätt kan förenkla ringningen till en enda parameter som låter sig plottas som en funktion av position längs mätlinjen. Därmed kan de delaminerade områdena lokaliseras objektivt. I de aktuella utrymmena var betongytan täckt av ett tjockt lager "betongdamm". Ett sådant lager gör att torrkopplingen mellan sökaren och betongen kan bli bristfällig. Porös betong har samma effekt. Ju fastare yta desto mer energi går in i betongen och desto djupare delaminering kan lokaliseras.

Störst sannolikhet till framgång för mätningar i vattenfylld kanal har parametrisk sonar. Det finns en kommersiellt tillgänglig produkt som går att hyra för sådana prov. Sonaren är dock bara ena delen som är nödvändig för sådana mätningar. Den måste monteras på en farkost som ger möjlighet till navigation och positionering av mätdata.

Försöken med vattenstråle har visat att en laminär sådan alstrar ett brett frekvensspektrum i den träffade betongytan. Därigenom kan resonansfrekvenser för membranmoden i den delaminerade betongskivan exciteras. Försöken visar också att dessa resonansfrekvenser kan registreras via vattenstrålen i en mottagare i sprutmunstycket. Energi följer alltså med vattenstrålens strömningsriktning och den önskade signalen propagerar mot vattenstrålens strömningsriktning.

Summary

The present report details a survey of methods suitable for detecting delamination in nuclear power-plant cooling-water channels. It is also a close-up study of the russian instrument A1220 Monolith manufactured by ACSYS. The measuring principle is that echos from discontinuities within the concrete are recorded as a function of time. By assuming a velocity this time can be converted to a depth. The instrument is known for operating with shear-waves at 55 kHz and it has generated impressive images of structures in the concrete like rebars, voids, thickness and horizontal cracks (delamination). Since the instrument simultaneously introduces three novelties, i.e.

- Dry-point coupling between transducer and concrete
- Shear waves
- Transmitter and receiver consisting of several elements

there is reason to try and understand which of the novelties is responsible for the good results and what requirements there would be on the methodology. A special interest is directed towards the possibility to use the instrument together with an automated X-Y-scanner with the purpose to obtain high resolution 3D imagery. A such survey is possible to perform with the instrument, but as soon as the number of measuring points comes above a couple of hundreds the task becomes tiresome. It is suitable to perform automated measurements with a grid of 1 cm. It was discovered that it is possible to connect S-wave as well as P-wave transducers to the instrument.

Delamination can be detected with several methods. Thermography should be mentioned but will not be treated in this report. The best options are supposed to be:

- Profiling with the A1220 instrument in dry channels
- Profiling with a sonar in a waterfilled channel
- Vibration measurements using a water-jet in a dry channel
- Impedance measurements in a dry channel

Impedance measurements are well developed regarding theory and improvements can take place in the methodology. This can hopefully be performed in a future project.

The experiments with A-scan measurements in manufactured 225 mm concrete test-specimens with simulated delamination indicates that the frequency of choice is 55 kHz for both transducer types. The specimens are thin compared to real construction elements, but they are relevant with respect to the depths that delamination normally occur, no deeper than 70-80 mm. The frequency may not be optimum for measurements in concrete thickness towards a meter or more.

The B-scan measurements also show that it appears optimum to use the frequency 55 kHz for both transducer types. In profiling, at 1 cm spacing, the capacity of the instrument is 100 measurements in the interval [10, 15] min-

utes. There is no problem detecting delamination at a depth of 160 mm. Delamination close to the surface generates ringing, i.e. multiple bounces of the transmitted energy between the surface and the delamination.

In the tests the results of the S-wave transducer are consistently showing a much clearer picture than the P-wave transducer and from that it is possible to draw the conclusion that it is the shear-waves that are responsible for generating the good results. All other parameters are similar in the experiments with the two transducer types.

A starting hypothesis was that it could be the use of several elements for transmission and receiving that caused the good results. In case of that it would have been possible to manufacture a P-wave array with hard metal contact tips that could be dragged over the concrete surface. That would have allowed a simpler scanner type and the elements would be easier to manufacture. The results show that this is not possible. The shear-wave transducer requires that it be lifted for transport between the measuring points. Because of that a scanner with a third axis (Z) must be used.

A pneumatic cylinder is the simplest way of creating a Z-axis if there is already an X-Y-scanner available. A manifold could be adjusted so that the cylinder exerts the necessary 25 N on the transducer at measurement. This force balances the force created by the 24 small dry-point contact elements that are all spring-loaded to improve contact with a rough concrete surface.

Field tests in the nuclear power-plant Ringhals 2 close to the cooling-water release channel also showed that delamination at small depth creates ringing. The instrument was capable of correctly identifying known areas of delamination as well as indicating unknown areas, that were later identified as delaminated by conventional means (hammer). A simple index calculated from the signal facilitated the objective estimation of the severity of the delamination along the scan line. At the site the floors were covered by a layer of "concrete dust". A such layer reduces the energy penetrating into the concrete and thus the depth to which delamination can be detected. The same goes for porous concrete.

It is assumed that a parametric sonar will be the best candidate for locating delamination in waterfilled channels. Suitable instruments are possible to rent. However such experiments also require a vehicle that provides navigation and accurate positioning of the measured signals.

The experiments with a water-jet has showed that it is possible to excite the concrete surface with a water-jet and that the vibrations of the surface can be picked-up by the water-jet and recorded in the nozzle with a suitable hydrophone.

Innehåll

1 Bakgrund	2
2 Inledning	4
3 Grundläggande principer för OFP-metoder	8
4 Ultraljudinstrumentet A1220	17
5 Impedansmätning	43
6 Avsökning med vattenstråle i luft	46
7 Avsökning med ljudstråle i vatten – sonar	58
8 Samlade slutsatser	63

BILAGOR

B1 A-scanmätningar med A1220 instrumentet	66
B2 B-scanmätningar med A1220 instrumentet	85
B3 C-scanmätningar med A1220 sökare	99
B4 Undersökningar med A1220 i Ringhals2	121
B5 Avsökning med vattenstråle	127
B6 Litteraturstudie och referenser	148

1. Bakgrund

Det har under de senaste 10 åren genomförts en rad projekt där oförstörande provning (OFP) av betong har ingått. Det kan förmodas att resultaten i de olika projekten är snarlika. Innan fortsatta projekt inom området initieras har tidigare utförts en genomgång av de projektrapporter som branschen har tillgång till. Läsaren måste vara medveten om att OFP i betong är ett svagt utvecklat område i Sverige och att det pågår intensiv verksamhet utomlands avseende utveckling av OFP med inriktning mot betongproblematiken. Insikten om att OFP är ekonomiskt nödvändig om vi skall kunna underhålla åldrande betongkonstruktioner har knappt fått fotfäste hos oss. Någon möjlighet att göra konstruktionsberäkningar med en generellt nedsatt hållfasthet i betongen synes inte finnas, då man t ex funnit en 100-procentig spridning i tryckhållfasthetsvärden på kärnor uttagna ur finska reaktorinneslutningar. I stället är det lokala fel eller förändringar man måste räkna med och för att inhämta denna information är det svårt att se andra möjligheter än att använda OFP-metoder. Tillståndskontroll innebär att man i ett utvalt område, vid ett valt tillfälle på tidslinjen, tillämpar olika tekniker, t ex OFP, för att skaffa sig tillräcklig information för att kunna göra en bedömning av konstruktionsdetaljens funktion relativt ursprunglig design. Övervakning innebär däremot att man observerar kontinuerligt längs tidslinjen och alltså kan observera händelser. Genom att införa kontinuerlig övervakning höjs säkerhetsnivån och då bör man kunna tillåta reducerade säkerhetsfaktorer eller variationsbredd i antagna parametrar. De tidsserier som därvid skapas är av mycket stort värde för kommande generationers möjligheter att bedöma åldrande konstruktioner och för att konstruera automatiserade larmtrösklar.

Syftet med den föreliggande rapporten är att följa upp några av de metoder som ansågs mest lovande i den tidigare genomgången och som har störst värde att gå vidare med vad avser *praktisk användning* och *utveckling*, under förutsättning att metoderna skall ge tillförlitliga indata till konstruktionsberäkningar, vilka syftar till att förlänga drifttiden för kärnkraftverken. Utöver att fastställa konstruktionens överensstämmelse med ursprungsritningarna (geometrin), tillkommer då att bedöma betongens lokala hållfasthet, sprickighet, armeringskorrosion, spjälkning/delaminering och kraftförluster i spännkablar genom krypning och reduktion av tvärsnitt orsakad av korrosion.

Det är tydligt att man då i *praktisk användning* behöver en hel arsenal med metoder, i huvudsak de som redan tillämpats i genomgånga rapporter: Radar (Konstruktionens geometri), Stående vågor (Konstruktionens geometri), Högenergiröntgen (Konstruktionens geometri, Hållrum, Spännkablar), Ytvågsseismik (Konstruktionens geometri, Hållfasthet), Skjuvvågsreflektion (Konstruktionens geometri, Hållrum), Täcksiktmetare (Konstruktionens geometri), Refraktionsseismik (Hållfasthet), Galvanostatik (Korrosion) och Frekvensrespons (Spjälkning/delaminering). Det är emellertid bara de metoder som baseras på seismiska vågutbredningsfenomen som har en fysikalisk grund som kopplar resultaten till hållfasthetsparametrar. Därför och i vissa fall på grund av lovande inledande resultat, rekommenderades i den tidigare rapporten att *utveckling* av följande seismiska metoder genomförs: Skjuvvågsreflektion (Konstruktionens geometri, Hållrum), Kontaktlösa ytvågsmätningar (Hållfasthet),

Detektor för olinjäritet (Sprickor, även mikro-), Impedansmätning (Spjälkning/delaminering) och Spännkablar som vågledare (Spännkablar).
För övervakning rekommenderas undersökningar avseende Akustisk emission, Aktiva/passiva seismiska nätverk och Modanalys.

Föreliggande rapport behandlar Skjuvvågsreflektion, Impedansmätning, Avsökning med vattenstråle i luft samt Avsökning med ljudstråle i vatten. Intresset fokuseras mot att detektera delaminering i betong, framförallt i kylvattenkanaler.

Kapitel 2: Inledning

Föreliggande rapport redovisar arbete med att undersöka vilka metoder som kan vara lämpliga för att lokalisera delaminering i framförallt kylvattenkanaler i kärnkraftverk. Den är också en närmare studie av det ryska instrumentet A1220 Monolith från tillverkaren ACSYS i Ryssland. Mätprincipen är att ekon från diskontinuiteter inne i betongen registreras som funktion av tid. Genom att anta en hastighet kan denna tid omvandlas till ett djup. Instrumentet arbetar med reflekterade skjuvvågor (S-vågor) vid 55 kHz (ultraljud) och har visat sig ge mycket goda resultat i betong vad gäller att avbilda den inre strukturen såsom armeringsjärn, hålrum, tjocklek och horisontella sprickor, dvs delaminering. Under projektets gång har det visat sig att till instrumentet kan också kopplas en sökare som arbetar med kompressionsvågor (P-vågor). Skjuvvågor karaktäriseras av att partikelrörelsen är ortogonal mot vågutbredningsriktningen medan den för kompressionsvågor är parallell med utbredningsriktningen. Eftersom instrumentet samtidigt introducerar tre nyheter i praktiska ultraljudsammanhang, nämligen

- torrkoppling
- skjuvvågor som energibärare
- sändare och mottagare bestående av flera element

finns det skäl att försöka förstå vilken av nyheterna som är orsaken till de goda resultaten och vilka krav det ställer på metodiken. Särskilt intresse riktar därvid mot möjligheten att använda instrumentet ihop med en automatiserad scanner, i syfte att genom tvådimensionell avsökning i rutnät bekvämt erhålla tredimensionella data med hög upplösning. Sådana undersökningar går att utföra manuellt med instrumentet, men så snart antalet mätpunkter överstiger några hundra blir det en tung uppgift. Det är lämpligt att utföra automatiserade mätningar med 1 cm rutnät.

Ultraljudundersökningar sker ofta med en ganska stor sökare som fungerar både som sändare och mottagare och den erfordrar ett kopplingsmedium mellan sökare och det undersökta föremålet, vars syfte är att eliminera all luft mellan sökaren och objektet eftersom redan ett mycket tunt lager hindrar ljudvågorna att tränga in i betongen. Ofta är kopplingsmediet vatten eller tapetklister. Appliceringen av detta medium kan vara problematisk för vertikala eller komplicerade ytor. Dessutom måste den undersökta ytan vara förhållandevis slät. Den aktuella apparaten löser detta problem med torrkoppling. Det går till så att 24 små plaststift individuellt pressas mot betongytan och därefter överför energi till betongen. Genom att alla stiften fjädrar individuellt kommer de att kunna anpassa sig till en ojämn yta. Dessa små stift tål inte att släpas längs betongytan eftersom de då snabbt blir nedslitna. Den kraft som måste anbringas för att de 24 stiften skall få god kontakt med betongytan är c:a 25 N.

De två första parametrarna kan båda vara orsaken till instrumentets goda funktion. Skulle orsaken främst vara att instrumentet använder sändare och mottagare spridda över en relativt stor yta finns det skäl att tro att även en sådan sökare byggd för undersökning med kompressionsvågor skulle ha en liknande god funktion. Kompressionsvågor överförs genom en rörelse hos

sändarna längs normalen till betongytan. Det har då den fördelen att man kan släpa sökaren över betongytan om man förser sändar- och mottagarelement med hårdmetallspetsar. Därmed kan scannern göras enklare. Dessutom är sändar- och mottagarelement för kompressionsvågor enklare att framställa.

En ideal form för gruppering av sändar- och mottagarelement för kompressionsvågor är en cirkel, så som visas i Figur 1.1. En sådan utvecklades vid LTH 1999 och nämns här för att illustrera arrangemanget. Sökaren är avsedd för mätningar med tekniken akustisk impulsrespons (ej ultraljud) och analysen sker i tids- eller frekvensdomän. Sökaren består av ett sändarelement i centrum och åtta parallellkopplade mottagarelement i en cirkel. Alla element är avfjädrade och sökaren pressas statiskt mot betongytan, över vilken den släpas. Den fjädrade längden är 20 mm avsedd att absorbera betongytans alla ojämnheter.



Figur 2.1 Sensor för impulsresponsmätningar, sändare i centrum. LTH 1999

Då de alstrade signalerna har en frekvens som ligger i det akustiska området erhålles ingen profilering genom betongen, som man kan få med instrumentet A1220 Monolith. Det beror på att vågorna som sänds ut är i samma storleksordning som den undersökta betongen eller större medan A1220 sänder våglängder som är några cm.

Skulle det vara skjuvvågor som är den främsta anledningen till den goda funktionen måste scannern förses med en mekanism som kan lyfta sökaren från betongytan när sökaren skall förflyttas. Överföringen av skjuvvågor till betongen kan nämligen antas vara beroende av den höga friktionen mellan de små plastspetsarna och betongen och kan därför inte ersättas av hårdmetallspetsar. Spetsarna rör sig nämligen i betongytans plan när de överför skjuvvågor.

Arbetet har också omfattat en litteratursökning och konferensbesök. Resultatet av dessa redovisas detaljerat i bilagor. Under ett konferensbesök erhöles information om att ACSYS tillverkar en identisk sökare avsedd för kompressionsvågor. Denna information gjorde att projektet genomförande underlättades väsentligt genom att två sökare anskaffades, en för skjuvvågor och en för kompressionsvågor.

För att utvärdera olika metoders förmåga att lokalisera delaminering har två provkroppar av betong tillverkats. Dessa har ingjutna skumplastskikt vars akustiska funktion är likartad en horisontell spricka. Genom att dessa är placerade på olika djup i de båda provkropparna och mätningar kan ske från båda sidorna av provkropparna erhålles en serie om åtta olika djup till delaminering i intervallet 40 till 180 mm i steg om 20 mm. I verkliga konstruktioner inträffar delaminering oftast på djup som är mindre än 70-80 mm.

I syfte att fastställa bästa inställningar av parametrar i A1220 har en lång rad försök utförts på de konstruerade provkropparna. Dessa försök omfattar frekvensinställning och antalet cykler i sändpuls, den elektriska signal som skickas till sändarelementen i sökaren och får dessa att utföra en mekanisk rörelse. Detta moment var nödvändigt då det bl a förekommit olika uppgifter om bästa frekvens för den sökare som är avsedd för kompressionsvågor.

Eftersom det redan på ett tidigt stadium föreföll klart att det är skjuvvågorna som ger det goda resultatet genomfördes också en modifiering av en befintlig X-Y-scanner. Denna modifiering består av en Z-axel, vilken manövreras med tryckluft. Modifieringen utfördes i demonstrationssyfte för att visa att sökaren för skjuvvågor kan kombineras med en automatiserad scanner.



Figur 2.2 Scanner för automatiserad avsökning i rutnät.

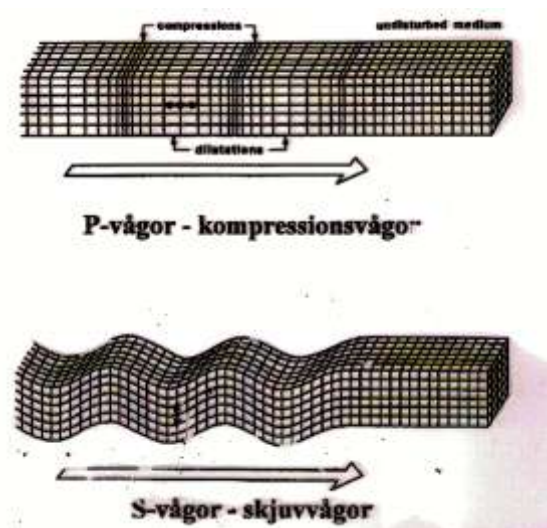
I samband med översyn i Ringhals 2 gavs möjlighet att göra mätningar i anslutning till utsläppskanalen för kylvatten där delaminering konstaterats genom bomknackning. Det visade sig då att de med bomknackning funna områdena också identifierades av A1220 instrumentet. Ytterligare ett par områden

identifierades av instrumentet och kunde genom bomknackning konstateras innehålla delaminerad betong.

I vattenfyllda kanaler kan man tänka sig att använda sonar för att lokalisera delaminering. En sådan sonar måste på bästa sätt kombinera två svärförenliga egenskaper. Den måste ha en smal ljudstråle och den måste ha en tillräckligt låg frekvens för att ljudvågorna skall kunna penetrera betongen. Detta dilemma löser man vanligen med en sk parametrisk sonar. Exempel på en kommersiellt tillgänglig sådan ges. Ett system för undersökning av vattenfyllda kanaler måste också bestå av en farkost för navigering och positionering i kylvattenkanalerna.

I litteraturstudien upptäcktes en metod att undersöka stora laminat med hjälp av två vattenstrålar som rör sig synkroniserat. Dessa laminat användes i flygplansindustrin. De två strålarna träffar laminatet från vars en sida. Genom den ena strålen skickas en ultraljudpuls och genom den andra fångas ultraljudpuls upp när den passerat laminatet. Eftersom rensningen av tillloppskanalerna i kärnkraftverk ofta sker med hjälp av en kraftig vattenstråle föddes tanken att använda denna stråle för lokalisering av delaminering. Strålen tänkes då excitera vibrationer i den delaminerade betongen, vilka kan registreras med en mottagare i det munstycke varigenom strålen skickas ut. Utrustning för sådana försök har tillverkats och försök har utförts.

P-vågor är en förkortning av "Primärvågor" och de kallas så för att de utbreder sig snabbast av alla vågtyper. De är av kompressionstyp, dvs partikelrörelsen sker i samma riktning som vågutbredningen. Därför kan P-vågor inte vara polariserade. S-vågor är en förkortning av "Sekundärvågor" och de kallas så därför att de är långsammare än P-vågorna. De är skjuvvågor. Partikelrörelsen i en skjuvvåg är ortogonal mot utbredningsriktningen. Skjuvvågor kan därför vara polariserade i två olika riktningar. Alla element i sökaren till A1220 är monterade så att polarisationsriktningen är gemensam.



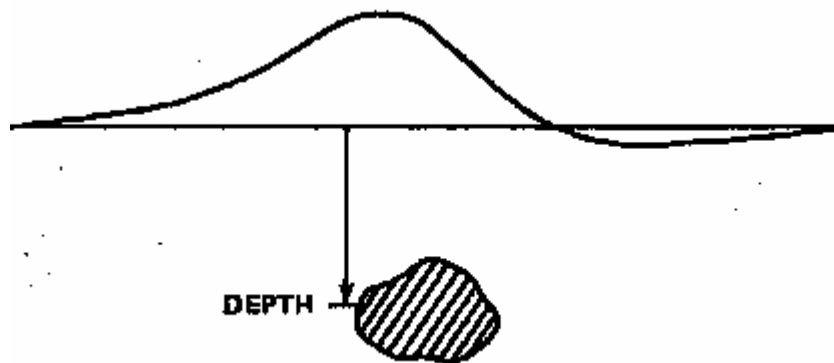
Figur 2.3 Partikelrörelsen för P- respektive S-vågor

Kapitel 3: Grundläggande principer för OFP-metoder

3.1 Fysikaliska fenomen som utnyttjas

Oförstörande provningsmetoder utnyttjar en lång rad olika fysikaliska fenomen i syfte att upptäcka avvikelser från det normala i en konstruktion. Till de viktigare hör utbredning av mekaniska vågor (ljudvågor), elektromagnetiska vågor (radar och röntgen) samt materialets elektriska och magnetiska egenskaper.

Vissa metoder baseras på reflektion av utsänd energi (radar, ultraljud) medan andra baseras på uppmätning av statiska fält (magnetometri, resistivitet, galvanostatik). De metoder som baseras på reflektion har förmågan att ge tredimensionella data om ett tredimensionellt objekt undersöks och sökaren flyttas runt i ett rutnät på objektets yta. Sökarens förflyttning ger då två koordinater medan ekots ankomsttid omräknas till den tredje dimensionen (djup) via en känd, antagen eller uppmätt hastighet för den använda vågtypen. Metoder som mäter ett fält har inte denna förmåga och de är i allmänhet sådana att upplösningen minskar med avståndet från sökaren (djupet).



Figur 3.1 Signal från en magnetometer då ett ferromagnetisk objekt passeras.

Vissa metoder kräver inte direkt fysisk kontakt mellan sökaren och objektet (radar, sonar, magnetometer) vilket naturligtvis medger stor frihet i hur avsökningen utförs. Andra metoder kräver att sökarna fixeras mot objektet (ultraljud, resistivitet, impact echo). Det senare medför naturligtvis en komplikation avseende sökarens manövrering.

3.2 Våglängd

Om man skickar in en signal i en halv meter tjock betongskiva kommer den resulterande vågutbredningen att vara beroende av våglängden. Är våglängden i samma storleksordning som betongskivan kommer hela skivan att bringas i svängning, det uppstår ett resonansfenomen. Dessa resonansfenomen baseras på hela skivans svängningsmoder. En mod är det mönster en skiva

böjer sig i under svängningen. Dessa mönster är enkla för grundmoden, men blir allt mer komplicerade för högre moder. Den här typen av fenomen utnyttjas vid t ex impact echo-mätningar.

Är däremot våglängden mycket liten i förhållande till betongskivans tjocklek och pulsen kortare än skivan är tjock uppstår ett reflektionsfenomen inuti betongen, utan att hela skivan kommer i rörelse. I det senare fallet kan man använda ekots ankomsttid för att beräkna skivans tjocklek om hastigheten är känd. Det här fenomenet utnyttjas av radar, ultraljud och sonar.

Det finns ett grundläggande samband mellan hastighet v , våglängd λ och frekvens f

$$v = \lambda * f$$

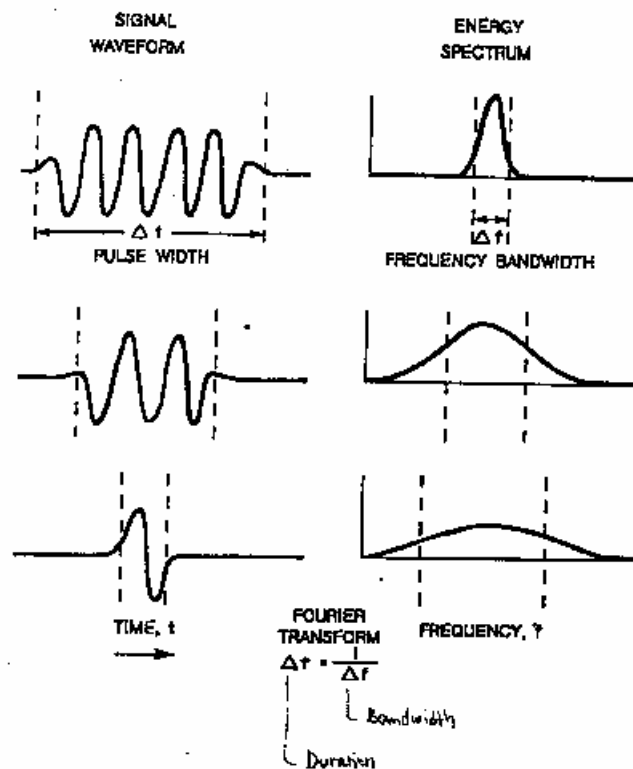
med vars hjälp man kan beräkna vilka fenomen man kan vänta sig.

Vid ännu högre frekvenser uppträder vågrörelsen som ljus. Detta blir i betongsammanhang endast aktuellt för de metoder som baseras på röntgenstrålning och termografi.

3.3 Bandbredd

Bandbredd talar man om när man har en signal som har annan varaktighet och sammansättning än en kontinuerlig sinus. Endast för en sådan kontinuerlig sinus anger frekvensen och amplituden fullständigt signalen, den har ingen bandbredd. För en kort puls, som t ex ett hammarslag, uppstår ett helt spektrum av frekvenser med olika amplitud och fas för olika frekvenser. En oändligt kort puls, en impuls, innehåller alla frekvenser. Detta är svårt att ta till sig, men kan förstås genom att man jämför med att böja ut en gitarrsträng och sedan släppa den. Oavsett vilken sträng man gör så med kommer den att svänga vid sin resonansfrekvens.

Om man har en kontinuerlig sinus och bara släpper fram ett visst antal cykler av den, kommer man att få ett bredare spektrum än den rena sinustonens frekvenslinje. Om man kortar ner signalen ytterligare, blir frekvensspektrumet ännu bredare.



Figur 3.2 Tidsdomän till vänster frekvensdomän till höger

Man kan flytta information mellan tidsdomän och frekvensdomän med fouriertransformen. Ett annat sätt att uttrycka det är att man kan analysera frekvensinnehållet i en signal i tidsdomän med hjälp av fouriertransformen.

3.4 Koppling till hållfasthet

Som ovan nämnts är det bara de metoder som baseras på utbredningen av mekaniska vågor som direkt kan kopplas till betongs hållfasthet. Denna koppling sker via elasticitetsmodulen E , vilken ingår i det uttryck som används för att beräkna utbredningshastigheten för t ex kompressionsvågor i en stav.

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Som framgår ingår även densiteten ρ i uttrycket. Men om man beräknar E kommer hastigheten att ingå kvadratisk och därmed få mycket större betydelse än densiteten, vilken man ofta kan uppskatta med tillräcklig noggrannhet.

$$E = \rho \cdot v^2$$

För andra geometriska figurer än en stav och för andra vågtyper finns det mer komplicerade uttryck som kan användas för att beräkna elasticitetsmodulen från uppmätta utbredningshastigheter.

Den metod som bäst utnyttjar denna koppling mellan elasticitetsmodul och våghastighet är ytvågsseismik. Metoden har nämligen förmåga att bestämma våghastighetens och därmed elasticitetsmodulens fördelning som funktion av djupet under betongytan.

3.5 Avsökningsprinciper

De flesta OFP-metoderna baseras på en sökare som måste flyttas runt på det undersökta objektets yta. Endast termografi och röntgen kan sägas direkt ge en bild i en exponering. Men även andra metoder kan användas för att göra bilder men då krävs att alla bildpunkter mäts upp av sökaren, en i sänder. Det senare blir naturligtvis mycket enformigt att göra manuellt och därför använder man i sådana fall en sk scanner, vilken styrs av en dator och för runt sökaren till de önskade bildpunkterna.

Det finns vissa konventioner i hur avsökningen benämns. Följande benämningar är lånade från radarmätningar och förutsätter att sökaren är av reflektionstyp (radar, sonar eller ultraljud). Om sökaren är t ex en magnetometer fås endast ett värde per mätpunkt och då reduceras dimensionen av mätdata med en.

-A-scan innebär att sökaren placeras i en punkt och att flera mätvärden utgörande en radarsignal registreras. Ett eko i denna signal kan avståndsbedömas om man vet hastigheten för den utsända vågrörelsen i det undersökta materialet. Har man en helt homogen betong med tjockleken 1 m och upptäcker ett ultraljudeko vid tiden $t=100$ mikrosekunder och det är frågan om kompressionsvågor, kan man beräkna att det finns en oförmodad avvikelse på avståndet $s=225$ mm eftersom mekaniska vågor utbreder sig med hastigheten 4500 m/s i god betong. A-scan görs vanligen manuellt.

$$s = v \times t/2 = 4500 \times 0.000100 / 2$$

Divisionen med 2 orsakas av att signalen först måste gå från sökaren ner till målet och sedan upp till sökaren igen.

B-scan innebär att sökaren flyttas längs en linje och gör registreringar i många punkter längs linjen. Fördelen med denna metod är att det uppstår ett geometriskt sammanhang i den resulterande tvådimensionella bilden, vars koordinater är reflextid och längd längs mätobjektets yta. Den bild som därvid uppstår är en vertikal skiva genom det undersökta objektet. För de flesta betraktare är detta ett ovant perspektiv, men efter en del träning går det att utläsa mycket ur dessa profiler. Då det finns möjligheter att jämföra med omgivningen kan man i varje punkt i en sådan profil se om det finns en avvikelse

från det normala i profilen. En B-scanprofil med måttligt antal mätpunkter kan utföras manuellt.

C-scan slutligen innebär att man rör runt sökaren i ett tvådimensionellt rutnät på mätobjektets yta. Mätdata kommer då att utgöra en tredimensionell bild. Denna kan visualiseras som ett genomskinligt block vilket kan vridas på en datorskärm, men för praktiskt arbete är det lämpligare att visa något av de tre bildplan som kan konstrueras. Två av dessa plan motsvarar de vertikala profiler man får fram vid en B-scanmätning medan det tredje planet, ett horisontalplan, kan sägas utgöra en karta över mätobjektet. En C-scanmätning ger upphov till stora datavolymer. Antag att 1 m² avsöks med 1 cm mellan mätpunkterna och att t ex en radarsignal digitaliseras med 100 samples i varje mätpunkt. Det blir 1 miljon datavärden. Det kommer att finnas 100 profiler i ena riktningen, 100 profiler i andra riktningen och 100 horisontella skikt att redovisa. Det finns datorprogram som medger att man presenterar sådana sekvenser som en videofilm. Sker detta med t ex horisontalplanen blir effekten att man sjunker ner genom mätobjektet efterhand som bilderna projiceras. C-scanmätningar med upp till 10 x 10 mätpunkter är möjliga att göra manuellt men vid större mängd datapunkter krävs att avsökningen sker med automatik, med en scanner som nämnts ovan. Orsaken är att bildkvaliteten är helt beroende av att inga misstag görs vid datainsamlingen och att operatören inte har förmåga att arbeta koncentrerat när stora datamängder blir aktuella. Det repetitiva arbetet lämpar sig bättre för en robot. Ett system som utvecklades vid LTH i början av 90-talet kunde samla in mätdata från 256 x 256 = 65536 punkter på 4 timmar. Då var sökmetoden radar, vilken inte kräver att avsökningen står stilla när mätning sker, antennen befann sig i kontinuerlig rörelse. För ultraljudmätning måste scannern stå stilla när mätning sker.

3.6 Riktverkan

En viktig egenskap när det gäller sökaren är riktverkan. En trumpet åstadkommer starkt ljud genom två mekanismer. Dels uppstår förstärkande resonans inne i trumpetens kaviteter, dels sprids ljudtrycket ut över en stor yta (tratten) innan det lämnar instrumentet. Eftersom alla ljudvågor ligger parallellt i trattens plan kommer de att samverka i riktning rakt framåt. Åt sidorna kommer endast en mindre del av ljudet att gå. Det är detta som är riktverkan. Ju större trattens mynning är i förhållande till våglängden, desto bättre blir riktverkan. Av samma skäl måste en lågfrekvent/långvågig bastuba ha en större tratt än en mer högfrekvent/kortvågig trumpet. För att åstadkomma god riktverkan med lågfrekventa vågor krävs alltså en stor öppning – apertur. Den i Figurur 1.1 visade sökaren har åtta mottagare arrangerade i en cirkel. Den kommer att vara känsligast för signaler som kommer från mål vilka ligger på axeln genom sensorns mitt. Dessa ekon kommer nämligen att anlända samtidigt till de åtta mottagarna och då signalen från dessa adderas kommer man att få en åttafaldig förstärkning. Signaler som kommer från mål vid sidan om denna axel anländer vid olika tidpunkter till de åtta mottagarna. Därför kommer de inte att uppnå åttafaldig förstärkning. Tvärtom kommer det i vissa fall vara så att hälften av signalerna är förskjutna en halv våglängd i förhållande till den andra hälften. Då kommer summeringen att resultera i värdet

noll, i den riktningen säger man att sökaren har ett nollställe. Genom sådan fokusering kan upplösningen på visst djup i betongen vara väsentligt mindre än sökarens yta. En sökare med element fördelade på en yta av 10 x 15 cm kan således ha en upplösningförmåga på några cm nere i betongen.

Hög riktverkan kan man både eftersträva och vilja undvika. Har man en automatiserad avsökningsmetod vill man ha hög riktverkan eftersom kostnaden för extra mätpunkter är liten. Skall undersökningen ske helt manuellt vill man ha sämre riktverkan, eftersom man då kan upptäcka en skada med ett mindre antal mätpunkter. Idealiskt torde vara att använda en metod med måttlig riktverkan för att lokalisera misstänkta partier i en konstruktion med ett måttligt antal mätpunkter och därefter göra en detaljundersökning med en metod med hög riktverkan, då bara i de misstänkta partierna.

3.7 Tillvägagångssätt vid upphandling

Det kan ofta vara fördelaktigt att tillämpa ett successivt förfarande vid användning av oförstörande provningsmetoder. Det innebär att man börjar med enkla och billiga metoder i stora ytor och successivt övergår till mer komplicerade och dyrare metoder när man har isolerat intressanta områden. Genom att kombinera flera metoder kan man ofta utesluta vissa möjliga förklaringar till de registrerade avvikelserna och isolera de mest sannolika.

Ofta anlitas konsulter för att utföra provningen. Det är av stor vikt att problematiken klargörs tillsammans med konsulten. Detta innebär att beställare och konsult ska ha samma uppfattning om vad beställaren förväntar sig för resultat av undersökningen och hur resultatet skall användas av beställaren. Om denna fråga inte är kargjord på ett tillfredställande sätt kan det lätt hända att konsulten genomför en, enligt honom god undersökning, vilken ändå utmynnar i att beställaren inte kan använda resultatet.

För att undersökningen skall ge önskat resultat krävs det att beställaren är orienterad om metodernas förmåga och att konsulten har insikt i beställarens problematik. En kompetenshöjning på båda sidor i den andras specialområde skulle vara av stort värde för den oförstörande provningens rykte.

En annan viktig regel är att man aldrig skall genomföra en undersökning utan att ha en klar målsättning med den, detta för att resultatet inte skall bli svävande.

Slutligen är all oförstörande provning indirekt och bör i slutskedet verifieras med konventionell provning genom t ex kontrollborring innan åtgärdsprogram startas. Efter ett väl utfört undersökningsprogram skall denna provning kunna begränsas till ett fåtal punkter.

3.8 Att lokalisera delaminering

Termografi lämnas tills vidare därhän, då metoden fordrar komplicerade uppställningar för uppvärmning och dyrbar apparatur, men tveklöst kan den un-

der rätt förutsättningar vara mycket yteffektiv, dvs man får mycket snabbt information om en stor yta. Mätprincipen är att områden med delaminering visar lägre förmåga att avleda värme, eftersom det delaminerade skiktet, i synnerhet om det är luftfyllt, fungerar som isolering. Därmed kommer ytor, under vilka betongen är delaminerad, att värmas upp fortare. För att få bättre signal utförs uppvärmningen ofta cykliskt.

Man kan i övrigt tänka sig tre mätmetoder:

att registrera impedansen eller reflektionskoefficientens styrka i betongytan
att försöka mäta betongytans vibrationsspektrum efter excitering
att profilera betongen, dvs. att registrera ekon från lagergränser under betongytan.

I samtliga fall letar man efter anomalier, dvs områden där mätparametern avviker från det normala. Nedan diskuteras de tre tillvägagångssätten kortfattat.

3.8.1 Impedansen

Impedansmätning är en mätning i en punkt. För att täcka in en yta måste flera punkter undersökas. Man exciterar betongytan med ett slag eller en kontinuerlig vibration och registrerar kraftförloppet med en kraftgivare F mellan exciteringsmekanismen (hammare, vibrator) och betongytan. Samtidigt registreras betongytans rörelsehastighet v . Det sker enklast med en geofon, vilken ger en utsignal proportionell mot hastigheten. Geofonen pressas mot betongytan nära den punkt där kraften angriper. Punktimpedansen, som funktion av frekvensen f , räknas fram som

$$Z(f) = F(f) / v(f)$$

och kan presenteras som ett impedansspektrum, alltså impedansens variation med frekvensen. Ibland används impedansens invers, vilken kallas mobilitet. Medan impedansen då är ett mått på betongytans ovilja att låta sig förflyttas är mobiliteten ett mått på dess lätrörlighet. Som framgår är metoden starkt relaterad till bomknackning, med den skillnaden att den senare metoden inte medger någon objektiv registrering av mätdata. Av uttrycket ser man att om man med en vibrator åstadkommer en ythastighet av 1 m/s så kommer impedansen att visa hur stor kraft man överfört till betongytan med hjälp av vibratorn.

Vid impedansmätningar kommer man också att excitera delamineringens resonansfrekvenser förutsatt att exciteringen sker med en impuls, t ex ett hammarslag, se 3.6.3 nedan.

3.8.2 Reflektionskoefficientens styrka

Reflektionskoefficienten i en gränsyta är direkt beroende av impedansskillnaden i gränsytan

$$R = (Z_2 - Z_1) / (Z_2 + Z_1)$$

Gränsytan kan vara belägen mellan olika betonglager, mellan betong och luft eller mellan betong och vatten, uttrycket är generellt giltigt. Storheten skulle kunna mätas med en sonar, i vilket fall det rör sig om en gränsyta mellan vatten och betong. Man kan tänka sig att skicka en ljudvåg mot en betongyta i luft eller vatten. Eftersom impedansskillnaden är mycket större mellan luft och betong än mellan vatten och betong får man en relativt svagare mätsignal från en delaminering om man mäter i luft och därigenom blir felen större, se D10. Fördelen med dessa metoder är att sökaren inte behöver vara i kontakt med betongytan, den kan befinna sig på lämpligt avstånd. Den kan t ex sitta på en frisisimmande undervattensrobot och verka i en fylld kylvattenkanal. Samtidigt får man två problem, nämligen att den reflekterade signalen, med vars hjälp man skall beräkna reflektionskoefficienten, också blir beroende av infallsvinkeln, avståndet och målytans reflekterande egenskaper. Avståndet kan beräknas med hjälp av ankomsttiden för ekot från betongytan, men infallsvinkeln och målytans egenskaper är svårare att komma åt. Av den orsaken bedöms denna teknik inte vara den lämpligaste vid undersökning av kylvattenkanaler.

3.8.3 Betongytans vibrationer

Om man på något sätt kan excitera ett brett frekvensspektrum i betongytan kommer eventuell delaminering att förstärka den reflekterade signalen vid den delaminerade betongytans resonansfrekvens (membranmoden enligt litteratursökningen). Eftersom frekvensen som förstärks är oberoende av avståndet mellan sensor och betongyta är detta en robustare mätprincip än amplitudmätningar. Orsaken är att amplitudmätning är känslig för dämpning i utbredningsmediet medan en utsänd frekvens inte kan ändras av mediet. Excitationen kan ske genom att man skickar en kort bredbandig puls mot betongytan. Om då den delaminerade betongytan har en resonansfrekvens som ligger inom pulsens bandbredd, kommer den frekvenskomponenten att förstärkas i den reflekterade signalen. En innovation i detta projekt är att använda en vattenstråle för att excitera betongytans eventuella resonanstopp. Samma vattenstråle skulle då kunna användas som ett kopplingsmedium för att registrera det frekvensspektrum som uppstår då vattenstrålen träffar betongytan. Man kan ju naturligtvis också använda en mikrofon, men den är också känslig för andra ljud som kan tänkas förekomma på arbetsplatsen.

3.8.4 Profilerings

Profilerings innebär att man driver reflektionskoefficientmätningar ett steg längre och registrerar ekots tidsförlopp efter det att pulsen träffat betongytan. På så sätt får man en profil in genom betongen när man flyttar sensorn längs

betongens yta. Eftersom reflektionskoefficienten mellan vatten och betong är lägre än den mellan luft och betong kommer mer energi att tränga in i betongen om man gör mätningarna genom vatten än genom luft. Då profileringen ger ett resultat som starkt påminner om ett vertikalt snitt genom betongen är tolkningen mer robust än om man bara detekterar styrkan av ekot från ytan.

Skulle den insända pulsen ha ett frekvensband som täcker den eventuellt delaminerade betongens resonansfrekvens får man ett ringningsfenomen i registreringen. Ringning innebär att det uppstår ett stående vågförhållande mellan ytan och delamineringen. Det kan uttryckas som att pulsen studsar fram och tillbaka mellan sökare och delaminering. Eftersom denna svängning kan pågå ett tag kommer den att dölja eventuella ekon under delamineringen. Sådana ekon kan förekomma om delamineringen är vattenfylld men knappast om den är fylld med luft, i vilket fall ingen energi går över luftgapet. Det innebär att resonansfrekvensen helt dominerar den mottagna signalen. Detta omöjliggör profilering under delamineringen men är å andra sidan en stark indikation att betongen är delaminerad.

Profilerande mätningar kan ske med sonar i vattenfylld kanal eller med UPE/A1220-instrumentet i tömd kanal.

3.9 Slutsatser

Delaminering kan detekteras med flera metoder. Bäst förutsättningar bedöms följande metoder ha:

- profilering med UPE/A1220 i tömd kanal
- profilering med sonar i vattenfylld kanal
- vibrationsmätning med hjälp av vattenstråle i tömd kanal
- impedansmätning i tömd kanal

I det följande diskuteras metoderna. Impedansmätning är på teorisidan fullt utvecklad och eventuella förbättringar kan endast ske i metodiken, vilket förhoppningsvis kan ske i ett kommande projekt.

Huvudarbetet i projektet avser undersökning av och med A1220 instrumentet och avsökning med vattenstråle i luft.

Kapitel 4: Ultraljudinstrumentet A1220 från ACSYS

4.1 Inledning

Denna inledning är en upprepning av vad som skrivits under 3.8.4 ovan i syfte att teckna bakgrund för de som börjar läsa här. Profilerings innebär att man driver reflektionskoefficientmätningar ett steg längre och registrerar ekots tidsförlopp efter det att pulsen träffat betongytan. På så sätt får man en profil in genom betongen när man flyttar sensorn längs betongens yta. Eftersom reflektionskoefficienten mellan vatten och betong är lägre än den mellan luft och betong kommer mer energi att tränga in i betongen om man gör mätningarna genom vatten än genom luft. Då profileringen ger ett resultat som starkt påminner om ett vertikalt snitt genom betongen är tolkningen mer robust än om man bara detekterar styrkan av ekot från ytan.

Skulle den insända pulsen ha ett frekvensband som täcker den eventuellt delaminerade betongens resonansfrekvens får man ett ringningsfenomen i registreringen. Ringning innebär att det uppstår ett stående vågförhållande mellan ytan och delamineringen. Det kan uttryckas som att pulsen studsar fram och tillbaka mellan sökare och delaminering. Eftersom denna svängning kan pågå ett tag kommer den att dölja eventuella ekon under delamineringen. Sådana ekon kan förekomma om delamineringen är vattenfylld men knappast om den är fylld med luft, i vilket fall ingen energi går över luftgapet. Det innebär att resonansfrekvensen helt dominerar den mottagna signalen. Detta omöjliggör profilering under delamineringen men är å andra sidan en stark indikation att betongen är delaminerad.

4.2 Ultraljudmätning med A1220 instrumentet

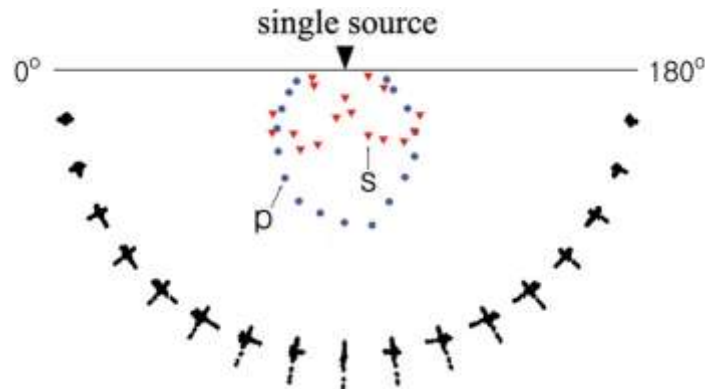
4.2.1 Uppbyggnad och bakomliggande principer

Som nämnts inledningsvis innebär ultraljudinstrumentet A1220 introduktion av flera olika nya begrepp, vilka det kan finnas skäl att lära sig förstå närmare. Dessa är

- torrkoppling mellan sensorer och betongyta
- skjuvvågor som energibärare
- sändare och mottagare bestående av flera element

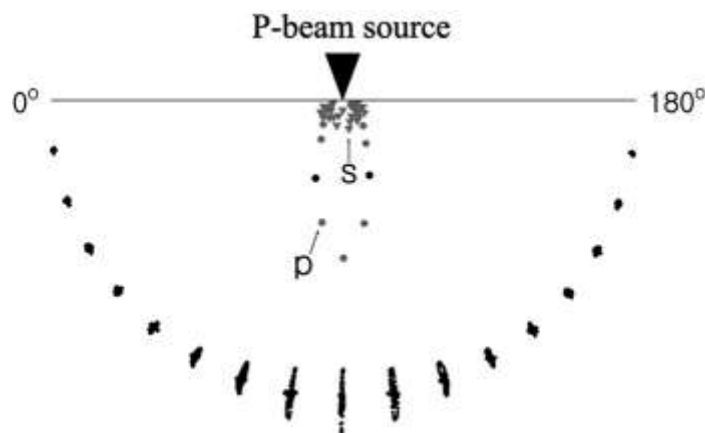
Jämfört med att ha endast ett element som arbetar både som sändare och mottagare eller två element som arbetar som sändare respektive mottagare erbjuder en större grupp av element fördelar för både sändning och mottagning. En enda sändare av P-vågskaraktär kommer också att alstra en betydande mängd S-vågor. Medan P-vågorna huvudsakligen rör sig vertikalt strålar S-vågorna ut i 35 graders riktning nedåt. Strålningsdiagrammet nedan visar vågutbredningens amplitud i olika riktningar i form av de färgade punkternas avstånd från källpunkten. Hodogrammet (de svarta prickarna i kors-

form) visar partikelrörelsen i radiell (kompressionsvågor) respektive tangentiell (skjuvvågor) led.



Figur 4.1 Strålningsdiagram och hodogram för punktkälla (S21)

Genom att använda flera sändarelement, som täcker en yta i stället för bara en punkt, kan man undertrycka S-vågalstringen och fokusera P-vågen ytterligare i riktning rakt nedåt, vilket demonstreras i nedanstående diagram. Samma fokuseringseffekt uppstår för en grupp av sändarelement för S-vågor.

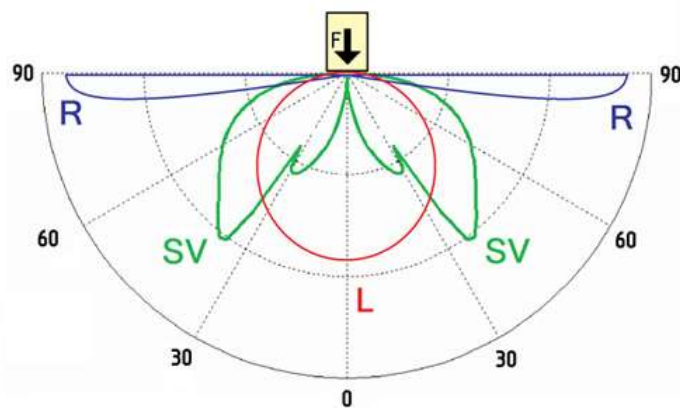


Figur 4.2 Strålningsdiagram och hodogram, källan består av en grupp av element (S21)

Utöver fokuseringen och undertryckningen av S-vågor medför flera element att sannolikheten för god kontakt mellan betongen och sändar- respektive mottagarelement ökar. Man får alltid räkna med att något element hamnar ovanpå en luftpor eller annan diskontinuitet i betongen.

Utöver P- och S-vågor alstras vid ett vertikalt slag mot en punkt på en yta också ytvågor / Rayleighvågor betecknade med (R) i Figuren nedan. Dessa utbreder sig som vågor på havet och som namnet anger i betongens yta. Dessa vågor kommer att vara bland de första som registreras i mottagarelementen på grund av det korta avståndet. Eftersom vågutbredning i horisontell

riktning sker från och till flera element på olika avstånd kommer den registrerade vågen i varje element att bli mycket komplex. Det beror på att vågfronterna från de olika elementen registreras med olika fas. De signaler som har gått rakt ned i betongen ligger däremot i fas vid sändning och kommer att ligga i fas vid mottagning. Det är det som gör att man får en ökad känslighet i vertikal riktning med flera element. Som framgick av litteraturstudien åstadkommes detta bäst för P-vågor med elementen i en cirkel. På grund av S-vågornas polarisation kan elementen för dessa inte arrangeras i en cirkel, då man för det fallet skulle åstadkomma motverkande faser. P-vågsökaren skulle alltså kunna förbättras i fokuseringshänseende. I Figuren nedan återges Rayleighvågorna (R), de vertikalt polariserade skjuvvågorna (SV) och P-vågen, vilken även kallas kompressionsvåg eller longitudinell våg (L). Med longitudinell våg menas att partikelrörelsen sker i samma riktning som vågutbredningen. Rayleighvågen har ungefär samma hastighet som S-vågen.



Figur 4.3 Ett vertikalt slag ger upphov till P(L)-, S- och R-vågor [<http://acsys.ru/eng/>]

Sökaren för skjuvvågor till A1220 alstrar horisontellt polariserade skjuvvågor, vilka i analogi med Figur 4.3 betecknas SH.

4.2.1.1 Systemets beståndsdelar

Litteraturstudien visade att det sannolikt finns även P-vågsökare till A1220-instrumentet (S5), men detta marknadsförs inte. Detta bekräftades vid samtal med företrädare för BAM vid en konferens. Efter förfrågan till den danske importören, Germann Instruments, meddelades att en sådan sökare går att köpa. Därmed förenklades detta projekt avsevärt, då jämförelsen mellan P- och S-vågmätning kan utföras i samma instrument med likformade sökare. Importören GI benämner instrumentet Eye-Con. Information från tillverkaren finns på [<http://acsys.ru/eng/>] .

Systemet levereras i en lätttransporterad pelikan-väska och omfattar mätinstrumentet, sökaren och laddningsutrustning. Utöver dessa komponenter medföljer diverse kablar bl a för anslutning till dator. Det medföljer också en programvara som kan redovisa mätningar i A-scan, B-scan och C-scan.



Figur 4.4 Huvudkomponenterna i A1220 systemet - Instrument och sökare. Kabel tillkommer.

4.2.1.2 Instrumentet

Monolith-instrumentet innehåller allt som behövs för sändning, mottagning och presentation av ultraljudsignalerna. Det kommunicerar med omvärlden genom tre elektriska LEMO-kontakter, en manöverpanel och en LCD-display. Kontakterna är för anslutning till dator/laddare (flerledare) samt för sändpuls och mottagen signal (båda koaxial). Det finns således ingen möjlighet att koppla instrumentet till en scanner, då det inte kan manövreras annat än genom knapptryckningar. Den manual som medföljde instrumentet visar bristande överensstämmelse med det levererade instrumentet och är skriven på dålig engelska. Efter en tids arbete med instrumentet lär man sig dock genom "trial and error" hur det fungerar. Systemet är menybaserat och det är hoppen upp och ner i dessa menyer som tar tid att lära sig. Det förefaller vara så att Monolith-instrumentet digitaliserar signalerna med 1 MSa/s.

Registrering kan ske i tre moder:

- Enstaka signal (A-scan)
- Signaler samlade längs en linje (B-scan eller "band")
- Signaler samlade tvådimensionellt i ett rutnät (C-scan eller "map")

Ett stort antal mätkonfigurationer kan lagras i instrumentet och enkelt tas fram igen. Detta är värdefullt när man vill upprepa mätningar på given plats med samma inställningar som vid föregående tillfälle. De parametrar som man kan konfigurera instrumentet med är ljudvåghastighet, dämpning, nollpunkt, tidsberoende förstärkning (TVG), pulsrepetitionsfrekvens, medelvärdesbildning, sändarfrekvens 15-270 kHz, mätområde mm. Alla dessa parametrar optimeras för att få en så tydlig och representativ registrering som möjligt. Dessa parametrar väljs genom stegning genom menyer och inknappning av mätvärden på manöverpanelen. Det faktum att man kan välja frekvens inom ett så stort område innebär inte att man har tillgång till ett lika

stort frekvensområde när signalen passerat sökarnas sändarelement. Dessa har nämligen sin egen resonansfrekvens. Den elektriskt alstrade pulsen är en fyrkantvåg och dess transienta flanker är mycket bredbandiga. Sökarnas sändarelement kommer att fungera som ett lågpassfilter för dessa flanker och sända huvudsakligen vid sin egen resonansfrekvens. Detta innebär att även om en högfrekvent puls med t ex 3 cykler teoretiskt ger bättre upplösning än en lågfrekvent signal, kommer den lägre effektiviteten kanske att göra den högfrekventa signalen svagare och därmed svårare att detektera.

4.2.1.3 P-vågsökare

Sökaren har dimensionerna $l \times b \times h = 14 \times 10 \times 9$ cm och vikten 1.1 kg. 24 st fjädrade element sitter i en ram, grupperade som 6×4 element med samma avstånd, 20 mm. Det finns två LEMO-kontakter på sökaren, den ena är kopplad till de 4×3 elementen i ena halvan av sökaren och den andra kontakten till de andra 4×3 elementen. Sändar- respektive mottagarkabeln kan kopplas till viken som helst av de två kontakterna. Genom reciprocitetsprincipen har det i de flesta fall ingen betydelse vilken grupp som är kopplad som sändare respektive mottagare. Eftersom kompressionsvågor inte är polariserade spelar det ingen väsentlig roll vilken riktning man håller sökaren i. Av detta skäl vore det inga problem med att tillverka en sökare med cirkulärt anordnade element. Eftersom elementen sitter rektangelformat orienterade i sökaren blir det en liten skillnad när man vrider sökaren t ex 90 grader.

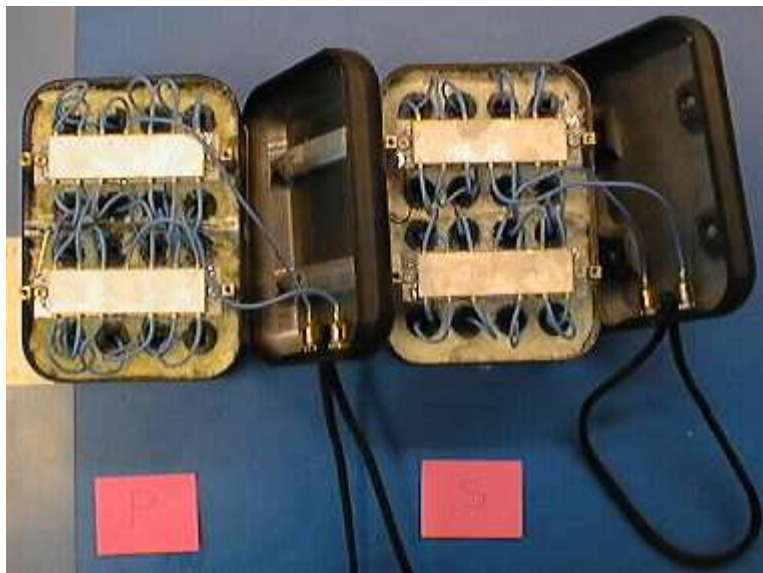


Figur 4.5 Sökare med 12 sändar- och 12 mottagarelement

4.2.1.4 S-vågsökare

Sökaren har dimensionerna $l \times b \times h = 14 \times 10 \times 9$ cm och vikten 1.1 kg. 24 st fjädrade element sitter i en ram, grupperade som 6×4 element med samma avstånd, 20 mm. Det finns två LEMO-kontakter på sökaren, den ena är

kopplad till 4 x 3 element i ena halvan av sökaren och den andra kontakten till de andra 12 elementen. Genom reciprocitetsprincipen har det i de flesta fall ingen betydelse vilken grupp som är kopplad som sändare respektive mottagare. Reciprocitetsprincipen innebär i detta fall att det inte spelar någon roll om signalen går från A till B eller tvärtom. Elementen är polariserade. Kontaktpunkternas svängningsriktning är vinkelrät mot sökarens längsta dimension. Normalt för man sökaren med en sådan orientering att kontakterna och den vidhängande sladden sitter på den sida som är orienterad från rörelseriktningen, så att sladden släpar efter sökaren. Då är polarisationen tvärs rörelseriktningen. Visuellt kan S-vågsökaren inte skiljas från P-vågsökaren. Nedan visas hur vardera kontakten på sökarhuset grenar ut till de olika elementen i två parallellkopplade grupper, en för sändning och en för mottagning.



Figur 4.6 Signalerna kopplas parallellt till sändar- respektive mottagarelement

4.2.2 Utförande och mätning

4.2.2.1 Handhavande vid mätning

Innan mätning börjar bör man ha gjort beräkningar av hur djupt ner i betongen man har behov av att inhämta data. Man måste också bestämma sig för vilket avstånd man vill ha mellan mätpunkterna. Generellt blir profileringen bättre ju tätare det är mellan mätpunkterna, men om man bara är intresserad av mätdata från stort djup kan man ha glesare mellan mätpunkterna. För ytliga mätningar, ner till några decimeter är det relevant att ha så litet mätpunktsavstånd som 1-2 cm. Detta verkar vara den ungefärliga horisontella upplösningen på sådana djup. Instrumentet medger att man presenterar mätdata som funktion av tiden eller djupet. I det senare fallet måste man ange hastigheten för mekaniska vågor i materialet. Vilken hastighet man anger beror på om man har kopplat en sökare för kompressionsvågor (4500

m/s) eller en sökare för skjuvvågor (2700 m/s) till instrumentet. Dessa värden på hastigheten avser god betong. Har man möjlighet att verifiera hastigheten, t ex genom att mäta mot en konstruktionsdetalj med känd tjocklek, gör man det.

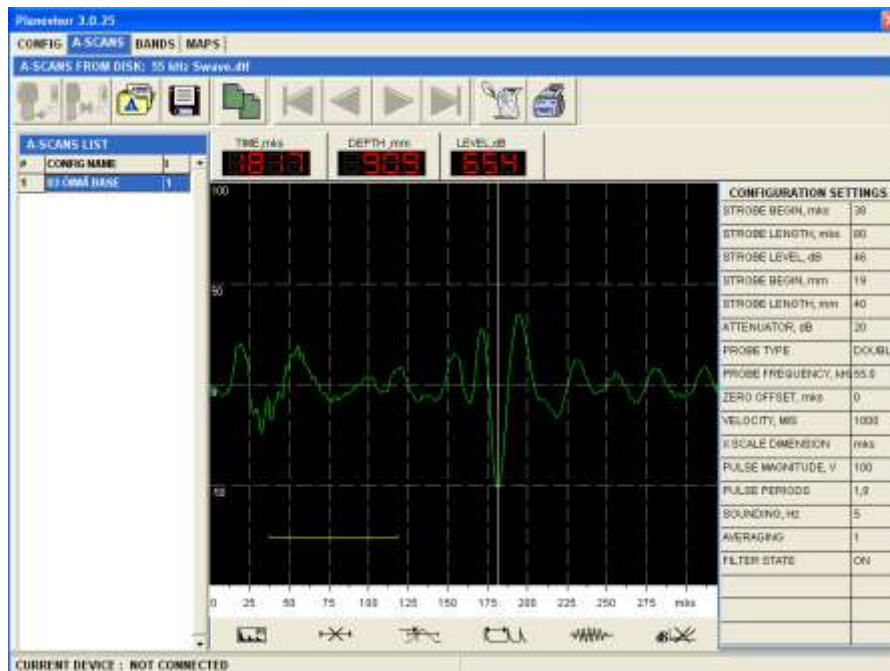
Man måste vidare ställa in förstärkningen och det sker genom att pressa sökaren mot betongytan och justera signalen tills den ser tydlig ut. Instrumentet sänder kontinuerligt ut pulser, men inte förrän man trycker på datalagringsknappen sker en lagring av mätdata i instrumentets minne. Man kan ställa in instrumentet så att det medelvärdesbildar flera signaler och då måste man vara observant på att instrumentet hunnit samla in alla signalerna i medelvärdet innan man släpper trycket på sökaren. Erforderligt tryck uppgår till c:a 25 N (motsvarande en massa av 2.5 kg) för att alla sökarelementen skall få god kontakt med betongytan. När man tryckt på datalagringsknappen och alla data är lagrade kommer instrumentet att räkna upp avståndsmätaren och tala om i vilken punkt nästa mätning skall ske. Det är av den orsaken man måste ange punkttätheten innan mätningen startar. Man kan göra c:a 100 mätningar innan man känner behov av att vila handen som används för att trycka sökaren mot betongen. Det är mycket arbetsamt att utföra mätningar i tak. Knäskydd är till mycket stor hjälp vid mätningar på golv.

4.2.2.2 Datorprogram som medföljer för redovisning

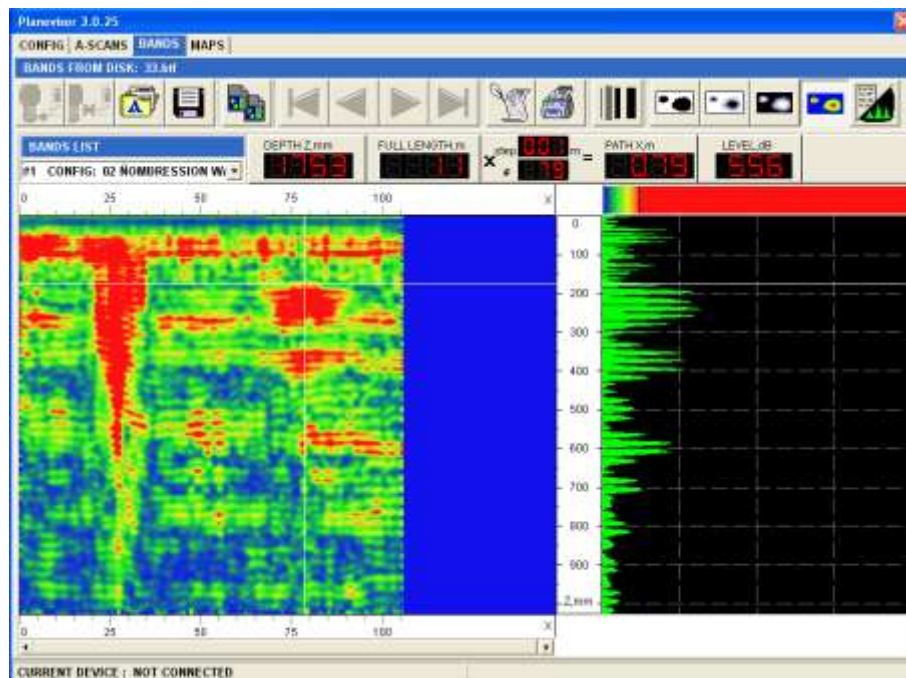
Programmet Planevisor kan via datorns USB-kontakt anslutas till Monolith-instrumentet via USB. Det har betydelse vilken typ av USB anslutning man använder. Författaren hade problem med den typ av USB anslutning som ofta sitter i bildskärmar, medan kontakt i själva datorskåpet fungerade problemfritt. Installationen av programmet är enkel. Men som tidigare påpekats ger inte manualen alltid korrekt information. Planevisor används för att hämta data från Monolith-instrumentet men kan också användas för att ladda ner konfigurationer till instrumentet. Man kan således ha ett större antal sparade konfigurationer än de som ryms i själva instrumentet.

Programmet kan också användas för att göra mätningar i signalerna. I nedanstående bild har de två vita linjernas läge bestämt vilken signal som skall visas till höger samt vilka parametrar som skall visas i rutorna upptill. I rutorna framgår den valda punktens läge i profilen och djup i betongen för den valda ljudvåghastigheten. Även signalstyrkan presenteras i en separat ruta. Gränsvärdena för färgskalan ställs in med färgskalan ovanför den högra bilden.

Vill man använda systemet datafiler med annan programvara, t ex MATLAB, kan man öppna .dtx-filerna med ett program som NOTEPAD och trunkera bort inledande och avslutande teckensträngar som innehåller administrativ information, så att bara rena mätdata återstår. Därefter går det lätt att läsa in data till önskat program.



Figur 4.7 Gränssnittet för Planevisör med A-scan till vänster och instrument-data till höger



Figur 4.8 Gränssnittet för Planevisör med B-scan till vänster och signalamplituden till höger, vid läget för den vertikala vita linjen i vänstra delen.

4.2.3 Förväntade resultat och tolkning av resultat

En skada av delamineringstyp förväntas ge upphov till en stark reflex, på det sätt som indikeras i Figur 4.7 A-scan respektive Figur 4.8 B-scan. Det kan ha betydelse om en delamineringsspricka är fylld med luft eller om den är fylld med vatten. Medan skjuvvågor inte passerar vatten gör kompressionsvågor det. Därför kan man förmoda att en luftfylld spricka ger upphov till lika stark signal för kompressionsvågor som för skjuvvågor, medan en vattenfylld spricka bör ge en starkare reflex för skjuvvågor än för kompressionsvågor.

Tolkningen av en B-scanbild bygger på att ländaxeln, den horisontella, anger var skadan är belägen längs profilen, medan den andra axeln, djupskalan, anger på vilket djup skadan ligger. Betongytan är upptill i diagrammet.

4.2.4 Metodens utvecklingsmöjligheter, prestanda mm

A1120 instrumentet får sägas fungera mycket bra, medan manualen kan förbättras åtskilligt. Utvecklingsmöjligheterna ligger för närvarande främst i avsökningstekniken, t ex att använda en scanner.

Försöken har visat att apparaten klarar att detektera delaminering ner till 180 mm djup, vilket torde vara tillräckligt för de flesta tillämpningar i vilka delamineringsskador är syftet. Det förekommer uppgifter om att apparaten kan detektera skador på djup ner mot en meter, men något försök att verifiera det har inte gjorts i detta projekt, eftersom det inte har någon betydelse för delamineringsstudier.

4.3 Tillämpning (labb / fältförsök)

4.3.1 Inledning

I syfte att få tillgång till kända skador med dynamik i parametrarna, är det lämpligast att arbeta med egentillverkade provkroppar snarare än att applicera en metod på verkliga förhållanden. Naturligtvis är det nödvändigt att göra försök i verklig miljö, men man bör då vara så bekant med metoden att handhavandet inte medför någon osäkerhet. Nedan redovisas de främsta resultaten vid försök på tillverkade provkroppar. Försöken skall klargöra skillnader mellan mätningar med skjuvvågor respektive kompressionsvågor, hur djupet till delaminering inverkar och vad man erhåller för riktverkan med de olika sökarna.

I projektet har också utförts ett fälttest i Ringhals, vilket redovisas i Bilaga 5.

4.3.2 Utförande

I syfte att jämföra resultaten för de två signaltyperna P- och S-vågor tillverkades 2 st provkroppar med ingjutna simulerade delamineringar. Provkropparnas dimensioner är av hanteringsskäl anpassade till standardlastpall - 800 x 1200 mm. Deras tjocklek är 225 mm.

Provkropparna undersöks dels med det speciella instrumentet A1220, dels med endast sökarna till detta instrument kopplade till ett automatiserat datainsamlingssystem kopplat till treaxlig scanner.

4.3.3 Uppbyggnad och tillverkning av provkropp

4.3.3.1 Betongblandning

Provkropparna tillverkades i Materialläras betonglab i V-huset. De har vct = 0.50 och ingen lufttillsats. Ballast är 8-12 samt 12-16 mm.

4.3.3.2 Simulering av delaminering på olika djup

För att simulera delaminering sågades triangulära skivor med 7 mm tjocklek ut av markisolering. Provkropparna göts i tre omgångar vardera, med olika gjuttjocklekar i varje omgång. Varje lagers tjocklek var så beräknat att det uppstår en serie djup till delaminering från 40 mm till 180 mm i steg om 20 mm trots att endast 4 skivor gjutits in. När ett lager gjutits och härdat klistrades de triangulära skivorna fast mot betongytan med bygglim. Därefter göts nästa lager.



Figur 4.9 Skiva 7 mm av markisolering fastlimmad på härdad betongyta

Den triangulära formen på skivorna är vald för att i någon mån kunna studera effekten av olika utbredning av en delaminering samt sökarnas riktverkan. Ju bättre formen återges i ultraljudbilderna desto bättre är den horisontella upplösningen, vilket innebär att riktverkan är hög. Om bilden är suddig och konturerna avrundade är riktverkan låg.

4.3.3.3 Armering av provkropparna

Någon egentlig armering finns inte i provkropparna. Däremot fem vertikala armeringsjärn som binder ihop de tre lagren. Dessa är placerade 50 mm in från hörnen samt nära provkropparnas centrum. Dessutom är ett stålrör inlagt på halva provkroppens höjd och går från långsida till långsida. Röret är åtkomligt på båda sidor. Syftet med detta rör är att underlätta vändning av provkropparna. Det är så man åstadkommer 8 olika djup med endast 4 ilagda skivor. Dessa stålrör fungerar också som mål och kan simulera ofyllda spännkabelrör eller armering. Röret hjälper också till att hålla ihop formen under gjutningsarbetet.



Figur 4.10 Det genomgående röret används vid vändning av provkropparna

4.3.3.4 Säkerställning av orientering

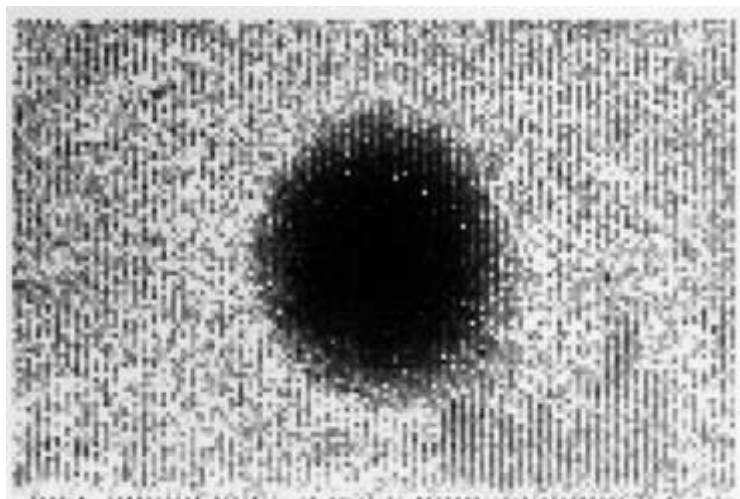
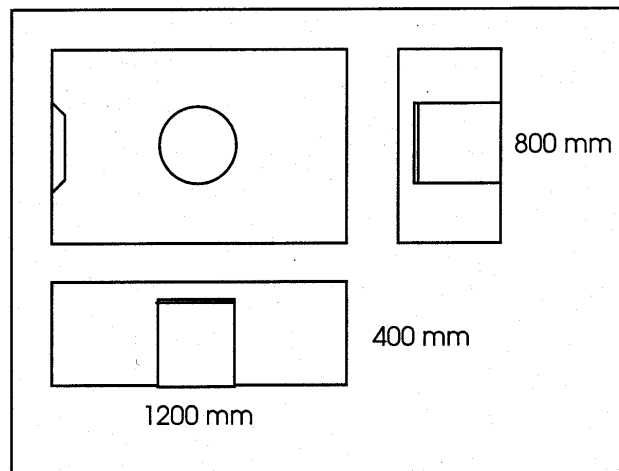
En metallmarkör placerades i kortsidan på provkroppen på det betonglager och vid den kortsida där markisoleringskivan ligger. Dessa markeringar är synliga när formen avlägsnats och gör att man aldrig behöver sväva i ovisshet om var skivorna är placerade.

Det finns fyra stora ytor på provkropparna och de har betecknats P1S1 och P1S2 för den första provkroppen och P2S1 och P2S2 för den andra provkroppen.

4.3.3.5 Komplettering av befintlig scanner med Z-axel

Då automatisk scanning med A1220 instrumentet kräver att sökarna lyfts upp från betongytan under förflyttning och pressas mot den under mätning, beslöts att utveckla ett komplement till en befintlig X-Y-scanner, en Z-axel.

Med denna scanner har tidigare gjorts försök med radar och akustisk impulsrespons (Ö2). Nedan visas resultatet av en tidigare ytscanning av ett 1200 x 800 x 400 mm betongblock med en 300 mm delaminering på 50 mm djup i centrum.



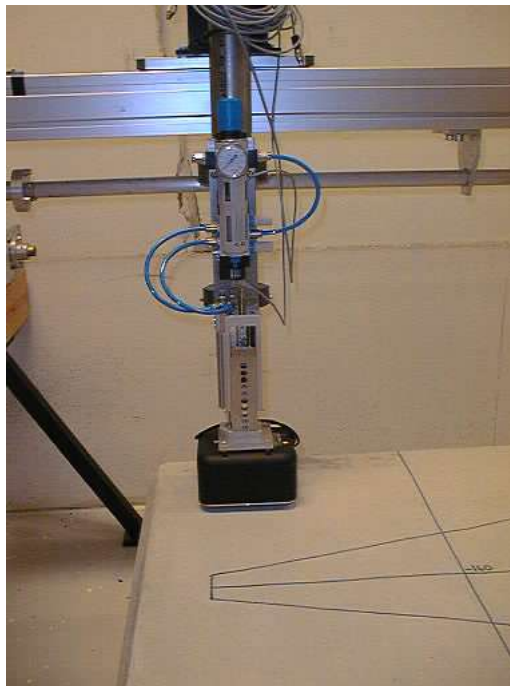
Figur 4.11 Avbildning av ett delaminerat område på 50 mm djup med akustisk impulsrespons (Ö2)

En Z-axel kan mycket elegant lösas med ett kommersiellt tillgängligt elektriskt don som utför två oberoende rörelser: -Dels upp och ner, dels rotation runt vertikalaxeln. Det senare är intressant därför att S-vågsökaren använder polariserade mekaniska vågor - skjuvvågor - och att man därför i princip kan få två olika bilder beroende på sökarens orientering. P-vågsökaren använder kompressionsvågor och de saknar polarisation. Men eftersom sökaren är konstruerad så att de tolv elementen som sänder inte är samma som de tolv elementen som tar emot signalen, kan det tänkas spela roll vilken orientering P-vågsökaren har relativt t ex armeringsjärn.

För att få rätt kraft när sökaren pressas mot betongytan kan ett fjäderpaket användas. Denna lösning har dock den nackdelen att kontaktrycket blir beroende av betongytans topografi. Den elektriska lösningen är också dyr, c:a 50 kkr.

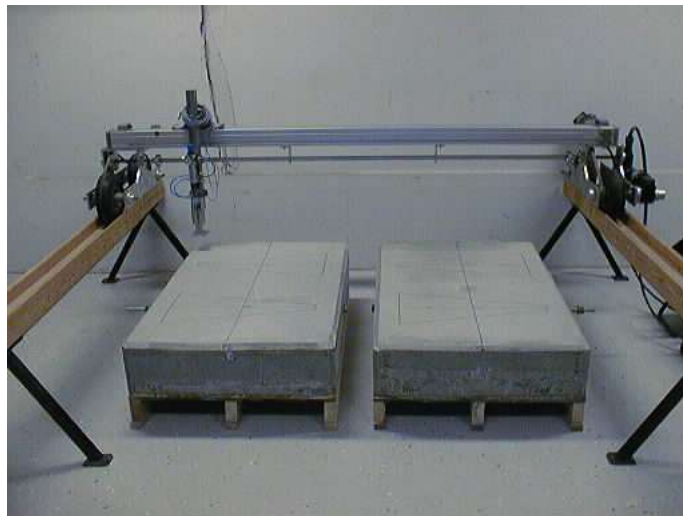
En enklare och billigare variant är att sätta en liten pneumatisk cylinder på scannern. Denna kan bara röra sig i vertikal riktning, men lufttrycket avgör

med hur stor kraft sökaren kommer att pressas mot betongytan. Därför blir kontaktkraften oberoende av betongytans topografi. Det enda man behöver göra är att ställa in lufttrycket så att kontaktkraften blir erforderliga 25 N. När cylinderns expansion stoppas stiger trycket till det inställda och den erforderliga kraften mobiliseras. Denna lösning kostar c:a 10 kkr och valdes för Z-axeln. Vill man då mäta i annan polarisationsriktning med S-vågsökaren kan man lossa fyra skruvar och vrida sökaren ett kvarts varv. Eftersom skruvfästena i sökaren sitter i en kvadrat är det därefter bara att skruva fast sökaren igen i den nya orienteringen.



Figur 4.12 Z-axel i form av en liten pneumatisk cylinder

Sökaren är fäst i den pneumatiska cylinderns rörliga del. Denna är lagrad så att den inte kan rotera. Ovanför cylindern sitter ventilpaketet och ett luftfilter. Ventilpaketet manövreras med elektriska signaler från en dator. Den blå knoppen längst upp, ovanför manometern, är en reduceringsventil som medger att man ställer in precis det kontakttryck som erfordras. När de fjädrande elementens stift kommer i kontakt med betongytan bromsas rörelsen neråt men den upphör inte förrän fjädrarnas kompression precis balanserar lufttrycket i cylindern. Därigenom sker en relativt mjuk inbromsning av sökaren. Med denna teknik undviker man att installera ett sk force-feedback-system som annars är vanligt i robotsammanhang.



Figur 4.13 Den nyutvecklade Z-axeln monterad på X-Y-scannern

Figururen ovan visar den nyutvecklade Z-axeln monterad på en befintlig X-Y scanner. Scannern står på bockar för att underlätta manövrering av provkropparna. Scannern är annars avsedd att rulla direkt på det golv som skall undersökas. De båda provkropparna som tillverkats i projektet står på plats. De ingjutna cellplastskivornas läge är inritat på provkropparnas ytor, för att mätprofiler skal bli rätt orienterade.

Vid LTH finns flera andra provkroppar av betong med ingjutna objekt av olika typ. Dessa kommer att avsökas med den modifierade scannern vid ett senare tillfälle.

En lämplig inställning av scannern är att avsöka ett område som är 700 x 1100 mm. Provkropparna är 800 x 1200 mm men sökarens dimensioner är sådana att man måste minska området för att hela sökaren skall kunna anbringas mot betongytan. Denna har dessutom en 20 mm fasad kant runt hela omkretsen. Avsökes en sådan yta med 1 cm mellan mätpunkterna erhålles $71 \times 111 = 7881$ mätpunkter. Det kan vara lämpligt att registrera 256 samples av ekosignalen i varje mätpunkt om samplingsfrekvensen är 1 MSa/s och då varje sample återges av 2 bytes blir datamängden $7881 \times 256 \times 2 = 4$ MB. Scannern har en sveplängd av 256 cm. Om den utnyttjas fullt ut för att söka av ett kvadratisk område ökar datamängden till $256 \times 256 \times 256 \times 2 = 33$ MB.

Instrumentet A1220 Monolith kan tyvärr inte användas tillsammans med scannern. Detta är av två orsaker. Dels kan inte instrumentet fås att göra en mätning på annat sätt än genom en knapptryckning, dels kan det inte lagra den stora mängd data som en scanning alstrar. Därför måste speciell elektronik under dator kontroll användas för att alstra sändpuls och registrera ekona.

4.3.4 Provningsresultat

Provningsresultaten hänför sig till tre kategorier experiment, nämligen A-scanmätningar (punkt), B-scanmätningar (linje) och C-scanmätningar (rutnät). Dessa mätningar har haft delvis olika syften. Så utfördes A-scanmätningarna för att optimera inställningarna i instrumentet A1220 medan B-scanmätningar utfördes för att undersöka skillnaderna mellan P-vågsökaren (kompressionsvåg) och S-vågsökaren (skjuvvåg) när man använder instrumentet A1220. C-scanmätningarna utfördes för att demonstrera den mest allsidiga datainsamlingsmetoden. Med mätdata från denna metod kan data från de andra två mätsätten framställas, dessutom kan plankartor representerande betongens egenskaper på olika djup genereras. C-scanmätningarna har utförts utan instrumentet som följer med A1220. Orsaken till det är att instrumentet inte kan integreras i ett helautomatiserat scannersystem, då dess datainsamling inte kan kontrolleras av en dator.

4.3.4.1 A-scanmätningar

Mätning i en punkt på en yta, i vilken informationen fås som funktion av tiden efter den utsända signalen kallas A-scan.

Frekvensen är valbar i instrumentet A1220 Monolith. Intervallet är 15 - 250 kHz i ojämna steg. Frekvensen 15 kHz motsvarar i betong med kompressionsvågshastigheten 4500 m/s en våglängd om 30 cm medan 250 kHz motsvarar våglängden 1.8 cm. 55 kHz motsvarar våglängden 8.2 cm.

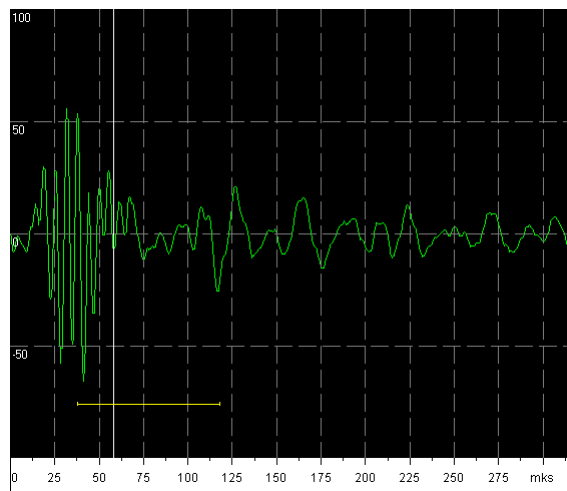
För skjuvvågor med hastigheten 2700 m/s i betong motsvarar 15 kHz våglängden 18 cm medan 250 kHz motsvarar våglängden 1.1 cm. 55 kHz motsvarar våglängden 5 cm.

Vi ser alltså att för samma frekvens ger skjuvvågor kortare våglängd, vilket kan översättas till bättre förmåga att avbilda små detaljer.

Det bör noteras att, som tidigare nämnts, den betong som försöken gjorts i har en ballast bestående av fraktionerna 8-12 resp 12-16 mm. När våglängden kommer i paritet med ballastkornens storlek kan man vänta sig att vågfronten störs. När våglängden är väsentligt större än ballastkornen försvinner denna effekt och ljudvågorna uppträder som om betongen vore homogen.

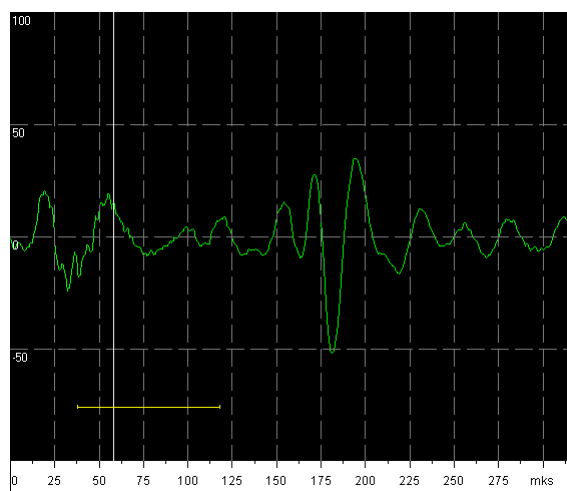
Det fullständiga testmaterialet finns i Bilaga 1.

P- och S-vågsökare med olika frekvensval. Ekot från provkroppens undersida skall ligga vid c:a 125 mikrosekunder för P-vågregistreringen. Eftersom avståndet är 225 mm och hastigheten ungefär 4500 m/s tar det 100 mikrosekunder för signalen att gå fram och tillbaka, men registreringen startar en stund innan signalen sänds ut. Denna tid kan justeras av operatören. På vertikala axeln anges signalamplitud (Volt) och på horisontella axeln tid. Siffrorna är i mikrosekunder (mks enligt programvaran). Vi söker den "frekvens" som ger det tydligaste ekot från betongprovkroppens undersida. Vald frekvens anges under respektive bild.



Figur 4.14 P-våg 55 kHz

För skjuvvågorna erhålles nedanstående resultat. Man ser att S-vågeket ligger väsentligt senare än P-vågeket, vilket beror på att S-våghastigheten endast är 2700 m/s. Det framgår också tydligt att ekosignalen är starkare för S-våg än för P-våg vid 55 kHz.



Figur 4.15 S-våg 55 kHz

Resultatet visade att både P-våg och S-våg skall sändas med 55 kHz för den aktuella konfigurationen. Detta avviker från instruktionerna från Germann Instruments. Ekons läge är beroende av vilken frekvens man väljer, ju högre frekvens desto tidigare kommer ekot.

Som framgått kan antalet perioder i den alstrade fyrkantvågen väljas. Det tillgängliga området är 0.5 - 5 perioder i steg om 0.5 perioder och hela området testades för båda sökarna.

Resultatet visade att bäst resultat vid A-scanmätningar erhålles med en halvperiod. Det gäller för båda sökartyperna. Halvperiod ger markant lägre signalnivå, högre antal perioder ger upphov till sammansmältning av sändpuls och tidiga reflexer.

4.3.4.2 B-scanmätningar

Mätning i en punkt på en yta, i vilken informationen fås som funktion av tiden efter den utsända signalen kallas A-scan. Flera sådana mätningar bredvid varandra kallas B-scan och ger upphov till data utefter en tids- och en längd-axel, som vi vanligtvis kallar en profil.

Dessa tester har alla utförts manuellt. Sökaren manövreras med en hand och inlagringen av mätdata i instrumentet triggas med andra handen. Sökaren måste pressas mot betongytan med en kraft uppgående till c:a 25 N ("2.5 kg") för att elementens piggar skall komma i god kontakt med betongytan. Tidåtgången för att registrera 100 signaler med 1 cm mellanrum är 10-15 minuter om man medelvärdesbildar 4 signaler i varje punkt och instrumentet är inställt att sända 5 signaler per sekund.

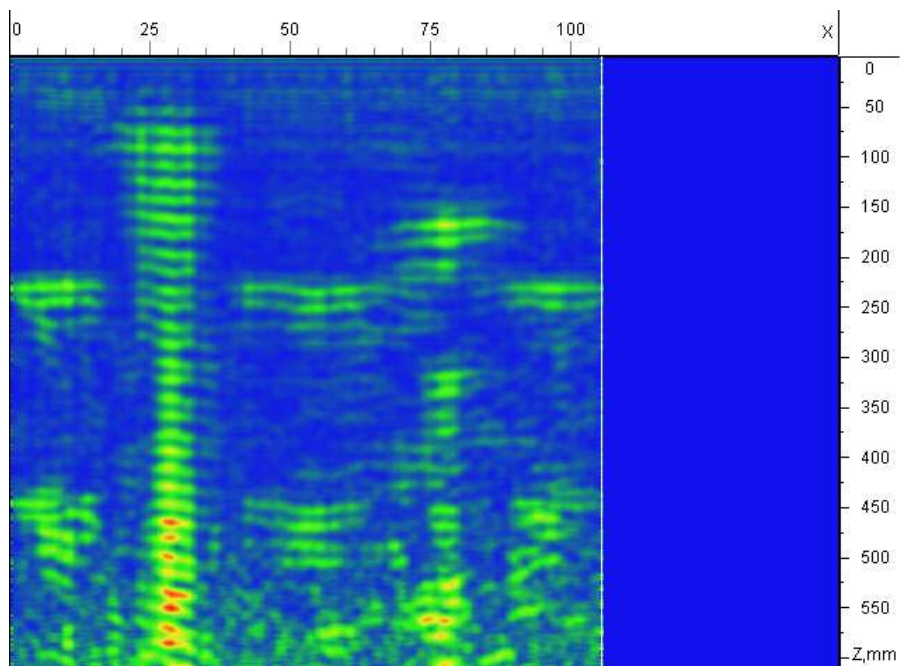
Då A-scanmätningarna i föregående kapitel skedde efter en del av B-scanmätningarna i detta kapitel har de förra inte kunnat ligga till grund för de mätningar som redovisas här. Det har också visat sig vara skillnad på en lyckad inställning för A-scanmätning och B-scanmätning. Dessa mätningar gjordes för att snabbt undersöka skillnaden mellan sökare för kompressionsvågor jämfört med skjuvvågor.

50 olika mätprofiler ingår i den redovisade serien. Huvudsakligen har varje konfiguration av mätinstrumentet provats i tre profiler på varje block. En profil går i blockets långa mittlinje över de båda ingjutna cellplastskivorna och två profiler går tvärs provkropparnas långa riktning och är belägna rakt ovanför respektive ingjuten cellplastskiva, alltså i dessas längdriktning. Ljudhastighet för P-våg = 4500 m/s och för S-våg = 2700 m/s har antagits.

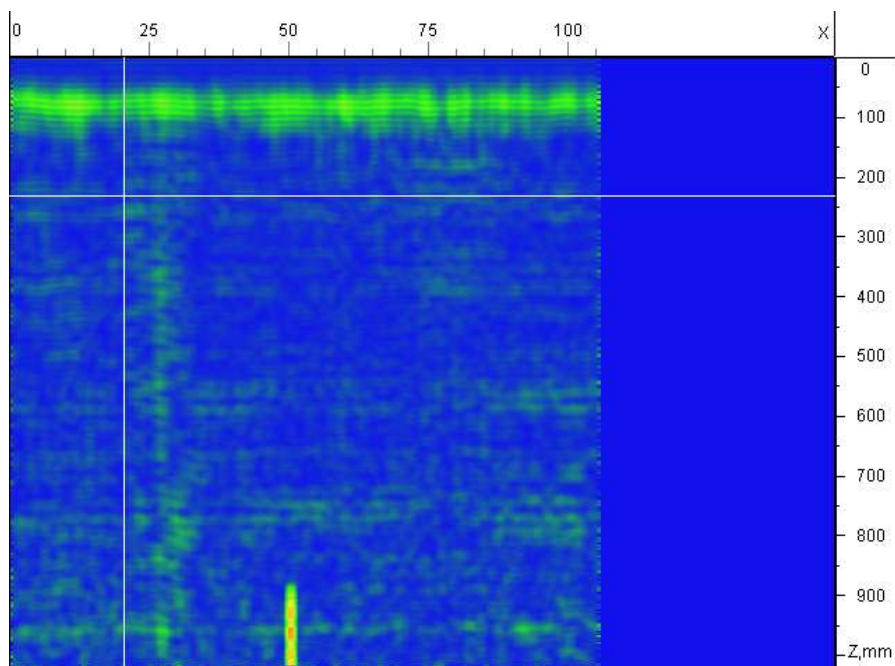
Nedan redovisas endast den längsgående mätlinjen i provkropp 1 sidan 1 (P1s1) för testmätningarna. Den avslutande serien med vad som tros vara optimal inställning av instrumentet redovisas fullt, fast bara för sidan 1 på de två provkropparna. Figurerna är kopierade från Planevisor-gränssnittet. Resten av mätdata redovisas i Bilaga 2.

Då A-scanmätningarna givit lite olika indikationer utfördes tester med B-scan med olika periodtal och frekvens.

Först testas frekvensen 100 kHz, 0.5 perioder för både S- och P-våg.



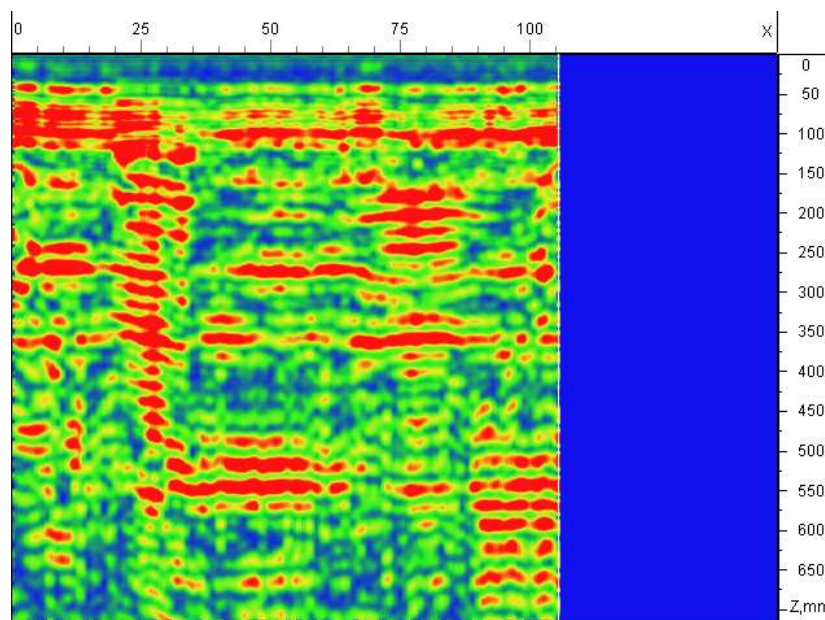
Figur 4.16 S-vågmätning 100 kHz, 0.5 perioder, 100 V, P1s1



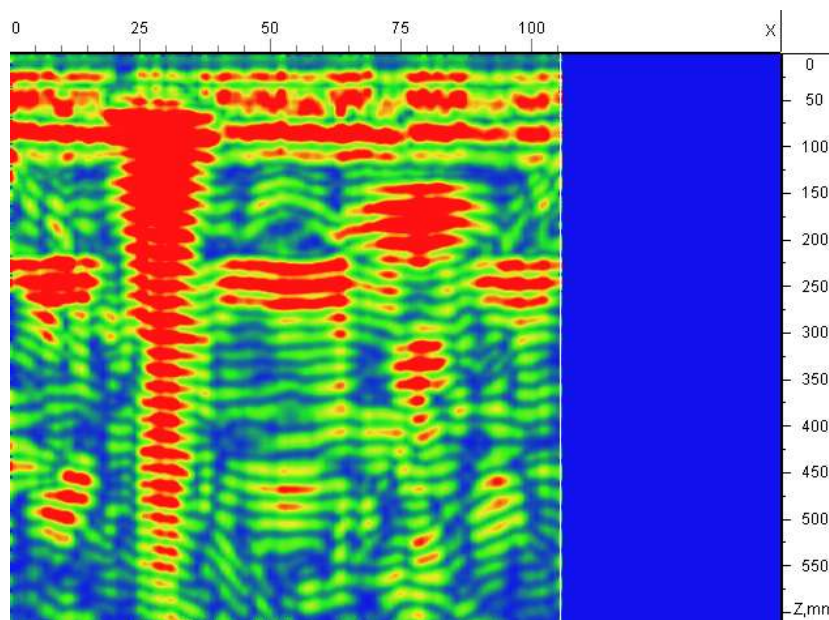
Figur 4.17 P-vågmätning 100 kHz, 0.5 perioder, 100 V, P1s1

Ekona från de ingjutna cellplastskivorna är knappt skönjbara i P-vågdiagrammet, ej heller ekon från betongprovkroppens undersida.

Efter försök med A-scanmätningar mot betonblocket undersida för olika frekvensinställningar i Monolith-instrumentet drogs slutsatsen att 40 kHz nog var den optimala frekvensen för båda sökartyperna. B-scanprofilerna för denna inställning redovisas nedan.



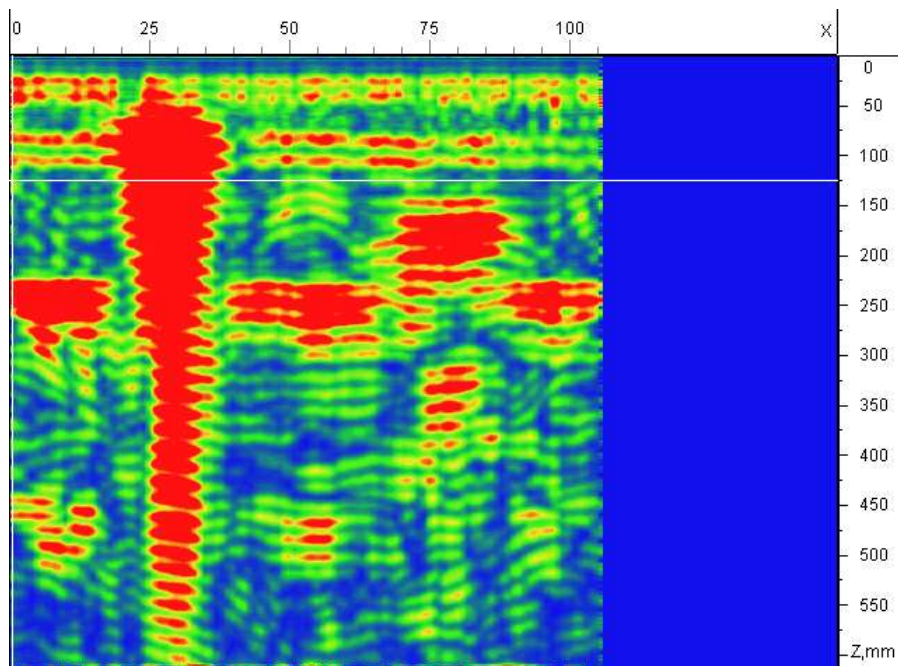
Figur 4.18 P-vågmätning 40 kHz, helperiod, 100 V, P1s1



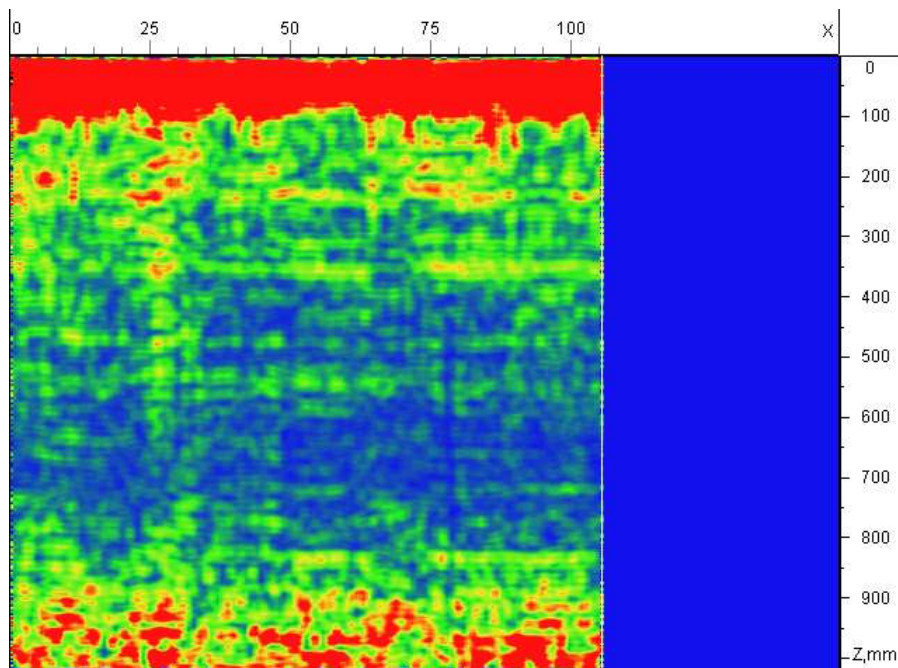
Figur 4.19 S-vågmätning 40 kHz, helperiod, 100 V, P1s1

P-vågmätningen vid 40 kHz ger ett splittrat intryck och ett svagt eko från betongprovkroppens underside. Röret syns inte.

Försök med helperperiod S-våg 55 resp P-våg 100 kHz, 100 V utfördes därefter.



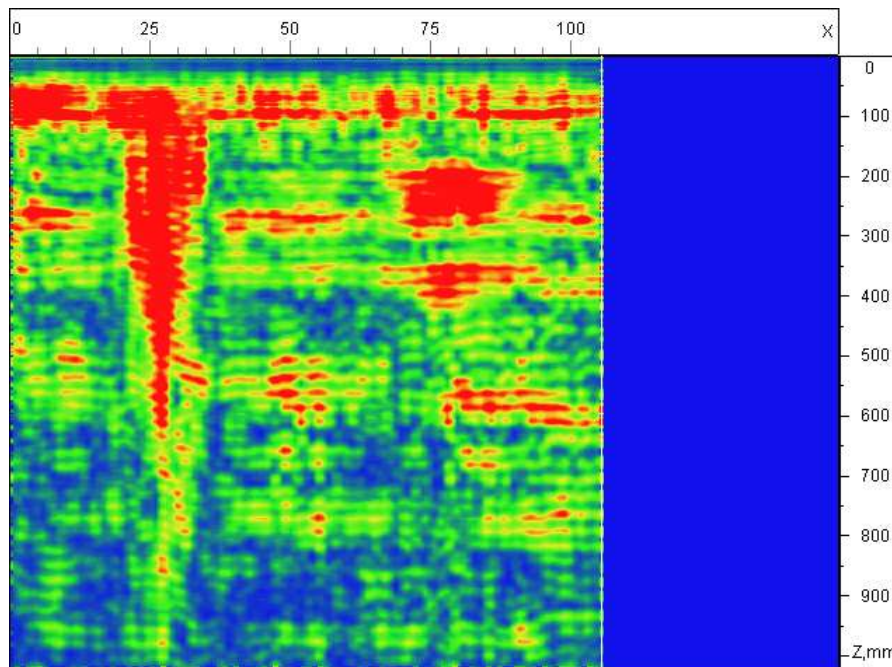
Figur 4.20 S-våg 55 kHz, helperperiod, 100 V, P1s1



Figur 4.21 P-våg 100 kHz, helperperiod, 100 V, P1s1

Det är uppenbart att A-scanmätningarna inte var representativa för B-scanmätningar. 100 kHz ger inga tydbara ekon från de ingjutna cellplastski-

vorna. Av detta skäl provades att använda samma frekvens för P-vågmätning som för S-vågmätning, dvs 55 kHz.



Figur 4.22 P-våg 55 kHz,elperiod, 100 V, P1s1

Resultatet visar att mätning med P-vågssökare och frekvensen 55 kHz,elperiod och 100 V ger bra resultat. Inte riktigt i klass med S-vågssökarens, t ex syns inget eko från det ingjutna röret i provkroppens mitt, mellan de ingjutna cellplastskivorna. Detta eko är däremot tydligt i S-vågbilden.

4.3.4.3 C-scanmätningar

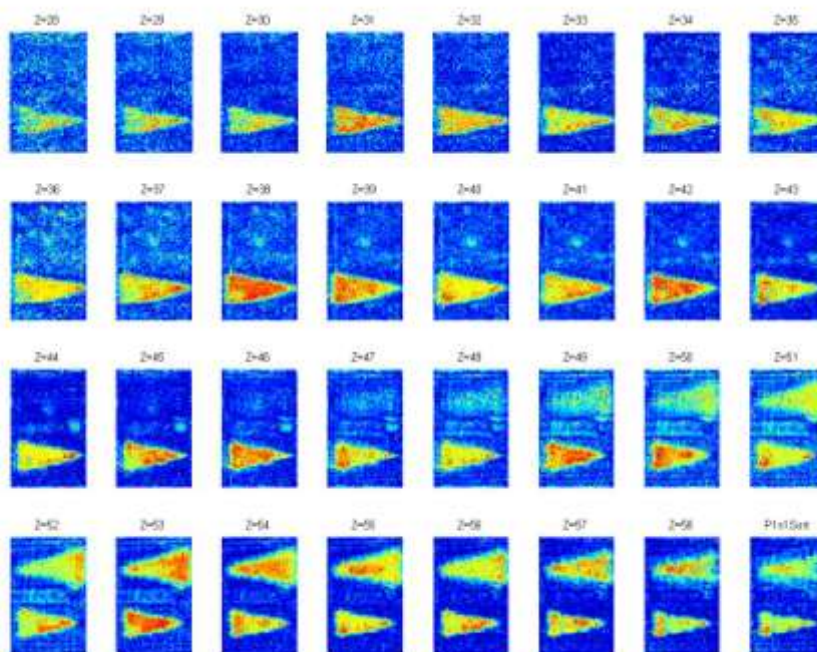
Nedan redovisas och diskuteras resultaten från de olika mätfallen. Det finns två provkroppar med två ingjutna delamineringssimuleringar i varje. Dessa simuleringar är så anordnade att man genom att mäta från båda sidorna på provkropparna får tillgång till en serie delamineringsdjup mellan 40 mm och 180 mm, dvs åtta olika djup. Eftersom undersökningen utför med P-vågs respektive S-vågssökare och dessa använtsi två ortogonal orienteringar parallell med sökriktningen och ortogonal med denna erhålles 32 olika mätfall. Emellertid avsöks ju två delamineringsdjup i varje realisering, så resultatet blir 16 olika datatagningar enligt nedanstående tabell. Som tidigare nämnts är bara skjuvvågorna polariserade, men eftersom sökarna har sändar- och mottagar-element orienterade i två grupper, kan det även för kompressionsvågmätningarna ha betydelse hur sökaren orienteras. Därför finns det fyra orienteringsfall Sort, Spar, Port och Ppar. Ytan S1 var den översta ytan efter gjutningen, vilket innebär att ytan s2 har härdnat under större tryck och därför kan antas ha bättre ytjämnhet och lägre porositet.

Tabell 4.1 Utförda 2-D avsökningar med datum för mätning

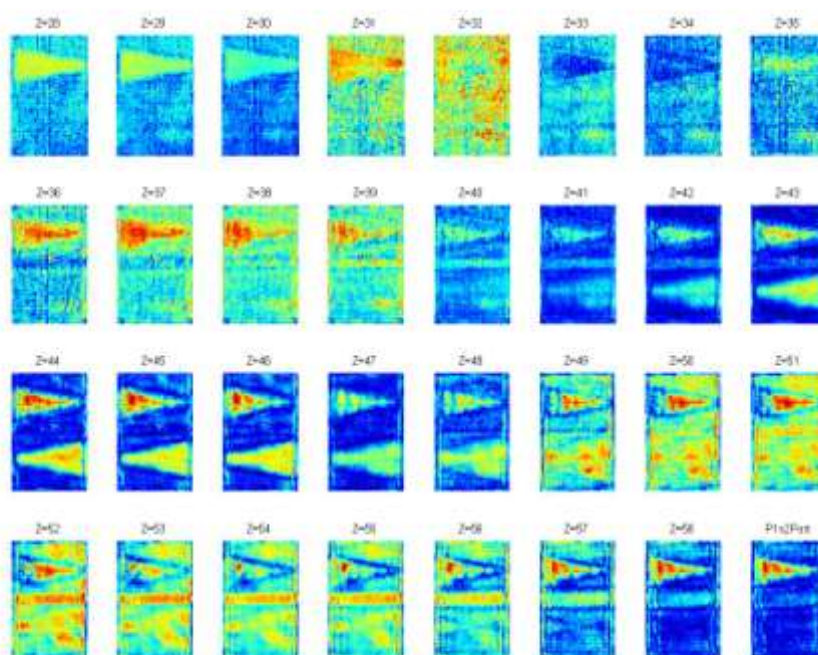
Delyta	Djup(mm)	Ppar	Port	Spar	Sort
P1s1	(40,160)	100411	100416	100407	<i>100410</i>
P1s2	(180,60)	091215	<i>091121</i>	091215	091205
P2s1	(100,140)	100412	100413	100408	<i>100409</i>
P2s2	(120,80)	091216	091207	091212	<i>091206</i>

I ovanstående tabell har de subjektivt bästa horisontalplanbilderna av de simulerade delamineringarna markerats med datum för scanningen i kursiv stil. Det framgår att Sort, skjuvvågssökare orienterad så att rörelseriktningen för sökaren sker ortogonalt mot dess längsaxel, ger de bästa bilderna. Men för delytan P1s2 var P-vågmätningen Port den bästa bilden.

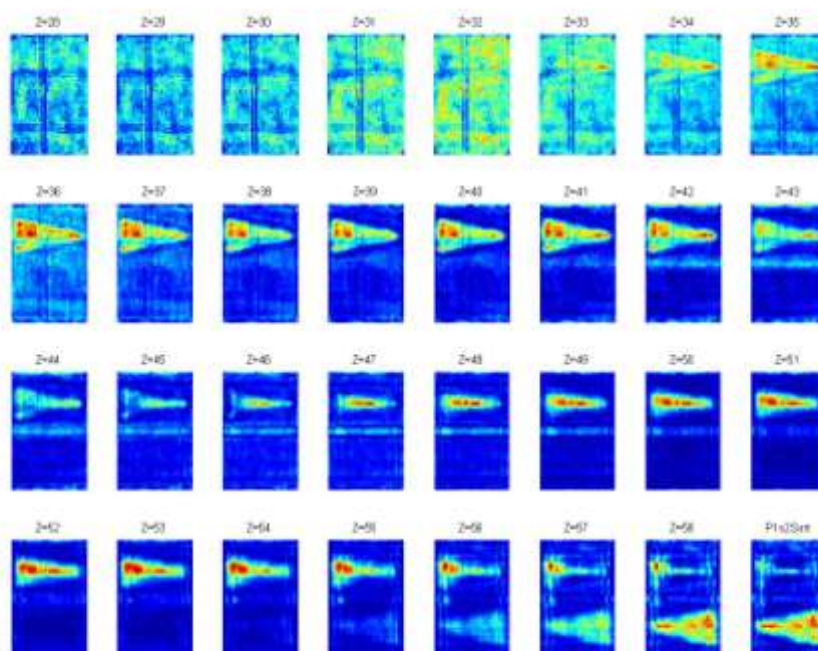
Vad gäller detektering av det ingjutna röret hade skjuvvågsmätningarna bäst kvalitet, men med lika fördelning mellan Spar och Sort. Detta är överraskande. Man skulle tro att Sort skulle ge det bästa resultatet då den orienteringen innebär att skjuvvågornas polarisationsriktning är parallell med röret.



Figur 4.23 P1s1Sort Den bästa registreringen av de delaminerade områdena erhöles med skjuvvågssökaren



Figur 4.24 P1s2Port bästa registrering i delytan P1s2, kompression bättre än skjuv



Figur 4.25 P1s2Sort, bästa registrering av det ingjutna röret.

4.3.5 Utvecklingsmöjligheter för provningsmetoden

Scannern som utvecklats tidigare och kompletterats med Z-axel är ett utmärkt sätt att hämta in data avsökta i ett finmaskigt rutnät för framställning av tredimensionella datavolymer. Då det har visat sig att det finns viss känslighet för sökarens orientering i data, skulle en automatiserad rotation vara en fördel. Därigenom skulle garanteras att de två datatyperna parallell och ortogonal orientering inhämtas i samma punkt. Den metod som använts vid försöken innebär att mätobjektet först avsöks med den ena orienteringen och därefter med den andra. Eftersom scannern inte är mekaniskt låst till mätobjektet kan det därför uppstå skillnader.

Tidåtgången för att söka av 70 x 110 mätpunkter med scannern är nästan 7 timmar. För att korta ner denna tid krävs att scannerutvecklingen övertas av fackmän. En betydande nackdel med styrsystemet till den aktuella scannern är att kommando mellan dator och styrsystem är envägs, styrsystemet bekräftar inte att ett kommando är utfört. Därför måste man lägga in fördröjningsfunktioner som tar hänsyn till hur lång tid det tar för systemet att utföra kommandot.

Ett annat fenomen som begränsar snabbheten är att den förstärkare som använts i försöken bottenar när tryckluftcylindern trycker ner sökaren mot betongytan. Att förstärkaren bottenar innebär att den blir överstyrd. Denna överstyrning förorsakar att ingen meningsfull signal kan digitaliseras. Därför måste systemet vänta tills överstyrningen klingat av innan det kan göra en mätning. Problemet orsakas av att de i sökaren ingående elementen har mycket hög impedans och svag utsignal. Därför måste en sk laddningsförstärkare användas och dessa har de beskrivna egenskaperna.

Slutligen har mätningarna plågats av att de ofta, synbarligen utan anledning, har avbrutits innan alla mätpunkter har gåtts igenom. Justering av programvaran har minskat problemet. Misstanke finns att felet orsakas av serieporten och dess drivkretsar i den dator som styr scannern och digitaliserar mätdata.

4.3.6 Slutsatser

De tillverkade provkropparna har fungerat väl. De kommer att användas i ett efterföljande projekt avseende hur djupt man kan detektera delaminering med impedansmetoden / bomknackning.

Ett pneumatiskt don är det enklaste sättet att realisera en Z-axel. Genom att förse tryckluftcylindern med en reduceringsventil kan man anpassa cylinderns kraft så att den precis balanserar fjäderkraften i de 24 elementen i sökaren till A1220 Monolith-instrumentet.

En scanner som skall användas industriellt bör tillverkas av fackmän, enligt de principer som demonstrerats i detta projekt. Den bör kompletteras med utrustning för att vrida sökaren ett kvarts varv.

Instrumentets kapacitet för 100 mätningar ligger strikt i intervallet [10,15] minuter när avståndet mellan mätpunkterna är 1 cm. Det är inga problem att lokalisera en delaminering på djupet 160 mm.

Försöken visar att det troligen är mest optimalt att driva både P-vågsökare och S-vågsökare med exciteringsfrekvensen 55 kHz. Detta resultat sammanfaller med resultatet från Kapitel 6: A-scanmätningar. Under dessa förhållanden ger S-vågsökaren en väsentligt renare bild än P-vågsökaren och man kan därför dra slutsatsen att det är S-vågorna i sig som gör A1220 instrumentet så framgångsrikt.

Övriga parametrar är ju identiska för försöken.

En inledande hypotes var att det är det stora antalet element i S-vågsökaren som gör att instrumentet är så framgångsrikt. I så fall skulle man ha kunnat tillverka en P-vågsökare med liknande konfiguration, vilken skulle kunna ha släpats över betongytan. Därmed skulle en enklare scanner kunna ha använts. Det är således inte möjligt eftersom det är skjuvvågorna som ger det goda resultatet. För att utnyttja S-vågsökarens goda egenskaper måste en scanner med Z-axel användas, så att sökaren kan lyftas och sänkas mot betongytan.

Kapitel 5: Impedansmätning

5.1 Inledning

Impedansmätning är en mätning i en punkt. För att täcka in en yta måste flera punkter undersökas. Man exciterar betongytan med ett slag eller en kontinuerlig vibration och registrerar kraftförloppet med en kraftgivare F mellan exciteringsmekanismen (hammare, vibrator) och betongytan. Samtidigt registreras betongytans rörelsehastighet v . Det sker enklast med en geofon, vilken ger en utsignal proportionell mot hastigheten. Geofonen pressas mot betongytan nära den punkt där kraften angriper. Punktimpedansen, som funktion av frekvensen f , räknas fram som

$$Z(f) = F(f) / v(f)$$

och kan presenteras som ett impedansspektrum, alltså impedansens variation med frekvensen. Ibland används impedansens invers, vilken kallas mobilitet. Medan impedansen då är ett mått på betongytans ovilja att låta sig förflyttas är mobiliteten ett mått på dess lättrorlighet. Som framgår är metoden starkt relaterad till bomknackning, med den skillnaden att den senare metoden inte medger någon objektiv registrering av mätdata. Av uttrycket ser man att om man med en vibrator åstadkommer en ythastighet av 1 m/s så kommer impedansen att visa hur stor kraft man överfört till betongytan med hjälp av vibratoren.

Vid impedansmätningar kommer man också att excitera delamineringens resonansfrekvenser förutsatt att exciteringen sker med en impuls, t ex ett hammarslag.

5.2 Praktisk Impedansmätning

Vanligtvis utförs impedansmätning med en vibrator ansluten via en sk stinger till en kraftgivare monterad på mätobjektet. Stingern är en flexibel metallstång som skall frikoppla mätobjektet från eventuella böjande moment från vibratorns vikt. Vibratoren är i princip samma konstruktionselement som spolen i en högtalare, vilken omger en magnet. På objektet är också en accelerometer eller hastighetsgivare anbringad. Ofta använder man en dynamisk signalanalysator för mätningarna. Denna innehåller en signalkälla som styr vibratoren via en effektförstärkare. Analysatorn innehåller också två ingångskanaler. Vid impedansmätningar ansluter man signalen från kraftgivaren till den ena ingången och signalen från hastighetsgivaren till den andra kanalen. Därefter stegar analysatorn automatiskt igenom det valda frekvensområdet och man får ett komplext värde på impedansen för varje frekvens. Fördelen med detta system är att analysatorn alltid vet vilken frekvens den skall kontrollera och att man därför kan filtrera bort ovidkommande frekvensband, vilka kan innehålla störningar. Nackdelen är att frekvensstegningen tar tid. Det spelar ingen roll vid enstaka mätningar men om man skall göra många för att framställa en bild av objektet är tekniken inte lämplig.

Det finns även så kallade impedanshuvud vilka i ett paket kombinerar kraftgivare och en accelerometer. Nackdelen med detta är att accelerometers signal måste integreras för att man skall få fram hastigheten. Praktisk erfarenhet visar att även om detta är en matematiskt enkel operation så kan DC-komponenter och lågperiodig drift i den registrerade signalen skapa betydande problem vid integreringen. Den integrerade signalen har en tendens att driva iväg från nollinjen efterhand som integrationen framskrider. En DC-accelerationskomponent kommer ju att integreras till en linjärt ökande eller minskande hastighetskomponent.

5.2.1 Uppbyggnad och bakomliggande principer

I stället för att använda en vibrator och dynamisk signalanalysator föreslås därför att man vid undersökningar med impedansmetoden använder impulsexcitering. Signalteoretiskt innehåller en kort impuls (t ex hammarslag) ett stort frekvensområde och man kan med en matematisk metod som kallas fouriertransform omvandla den korta signalen uppmätt i tidsdomän till ett spektrum i frekvensdomän. Med detta vinner man då att mättiden i varje punkt nedbringas till att utföra ett hammarslag och registrera de två signalerna från kraft- och hastighetsgivare. Därefter kan datorn utföra omvandlingen till frekvensdomän när själva mätningen är avslutad. Dagens datorer är så snabba att det också är möjligt att göra denna omvandling direkt i varje mätning. Eftersom man alltså gör mätningar vid alla frekvenser på en gång kan man inte använda den filterteknik som gör de stegade mätningarna med dynamisk signalanalysator så störningsökänsliga. Man blir helt enkelt känslig för högfrekventa störningar i form av stomljud.

Skulle impulsexciteringens (hammarslag) frekvensomfång täcka in ett cirkulärt delamineringsskiktets fundamentala resonansfrekvens f_0

$$f_0 = \frac{10.2}{2\pi} \sqrt{\frac{E}{\rho \cdot 12(1-\nu)}} \cdot \frac{h}{d^2}$$

E = elasticitetsmodulen

ρ = densiteten

ν = tvärkontraktionstalet, Poissons tal

h = delamineringens tjocklek

d = delaminerade lagrets diameter

kommer denna frekvens att exciteras och bli en dominerande frekvenstopp i hastighetsspektrat. Resonansfrekvensen kommer däremot inte att uppträda i kraftspektrum. Denna resonansfrekvens skall alltså ses som en kompletterande information man erhåller vid impedansmätningen. Det är tänkbart att man genom att kombinera denna information med impedansen kan uttala sig om delamineringens detaljer som t ex det delaminerade lagrets tjocklek och utsträckning.

Ett kommersiellt tillgängligt paket, som marknadsförs av Germann Instruments i Danmark, innehåller en hammare försedd med kraftgivare och en accelerometer. Denna konfiguration uppfattas inte som optimal, då det är förenat med viss svårighet att manövrera kabeln till hammaren samtidigt som man skall fokusera på att träffa rätt punkt på betongytan.

5.2.3 Utförande och mätning

I en tänkt metodik utrustar sig operatören med en hammare och ett handtag kopplat till en dator. I handtaget sitter en kraftgivare och en hastighetsgivare. På kraftgivaren sitter en slagdyna. Mätningen går till så att handtaget placeras mot mätpunkten med vänster hand, varefter man med höger hand slår ett hammarslag mot slagdynan på kraftgivaren. Utvecklingsarbetet går ut på att man reducerar hastighetsgivarens respons på det direkta hammarslaget, så att den hastighet som mäts är betongytans hastighet som respons på hammarslagets kraftverkan.

Den vanligaste hastighetsgivaren i dessa sammanhang är den s.k. geofonen, vilken används vid seismiska undersökningar av jordlagren. Denna är uppbyggd enligt samma princip som vibratorn, en spole och en magnet.

5.2.4 Metodens utvecklingsmöjligheter, prestanda mm

Metoden kan utvecklas genom att man konstruerar ett system som visar var nästa mätpunkt skall placeras och som automatiskt sparar mätdata efter varje hammarslag när resultatet godkänts av operatören.

5.3 Tillämpning (labb / fältförsök)

I föreliggande projekt har inte utförts några praktiska försök med impedansmätning eftersom lämplig utrustning saknats. I två planerade projekt kommer metodens förmåga att lokalisera delaminering som funktion av djup studeras samt apparatur och metodik för systematiska mätningar, enligt ovan, att utvecklas.

Kapitel 6: Avsökning med Vattenstråle i luft

6.1 Inledning

Om man på något sätt kan excitera ett brett frekvensspektrum i betongytan kommer eventuell delaminering att förstärka den reflekterade signalen vid den delaminerade betongytans resonansfrekvens (membranmoden enligt litteratursökningen). Eftersom frekvensen som förstärks är oberoende av avståndet mellan sensor och betongyta är detta en robustare mätprincip än amplitudmätningar. Orsaken är att amplitudmätning är känslig för dämpning i utbredningsmediet medan en utsänd frekvens inte kan ändras av mediet. Excitationen kan ske genom att man skickar en kort bredbandig puls mot betongytan. Om då den delaminerade betongytan har en resonansfrekvens som ligger inom pulsens bandbredd, kommer den frekvenskomponenten att förstärkas i den reflekterade signalen. En innovation i detta projekt är att använda en vattenstråle för att excitera betongytans eventuella resonanstopp. Samma vattenstråle skulle då kunna användas som ett kopplingsmedium för att registrera det frekvensspektrum som uppstår då vattenstrålen träffar betongytan. Man kan ju naturligtvis också använda en mikrofon, men den är också känslig för andra ljud som kan tänkas förekomma på arbetsplatsen.

Transmissionsmetoden som redovisats i litteraturstudien (D2) kan inte användas vid undersökning av betongytor med vattenstråle eftersom endast en sida av betongen är åtkomlig. Transmissionsmetoden går ut på att stora laminat undersöks med hjälp av två vattenstrålar som träffar laminatet från vardera sidan av laminatet. I den ena strålen injekteras ultraljud, via den andra registreras det. Amplituden på den passerande signalen kan kopplas till delaminering i laminatet. Den teknik som undersökts i detta projekt går ut på att man vid vattenstrålens anslag mot betongytan exciterar en svängningsrörelse och att denna rörelse ger upphov till ljudvågor som fortplantar sig upp längs strålen. Ljudvågorna kan därefter detekteras med en mottagare i munstycket.

6.2 Avsökning med vattenstråle

6.2.1 Uppbyggnad med och bakomliggande principer

För att ljudvågorna skall kunna röra sig upp längs strålen och kunna detekteras fordras det att strålen är sammanhängande. Enligt tillgänglig litteratur är det turbulens som gör att en vattenstråle bryts sönder. Vattnets rörelse måste alltså bli så laminär som möjligt när det lämnar munstycket. Kan vattenströmmen göras laminär redan inne i munstycket underlättas dessutom att registrera ljudvågorna som kommer upp längs strålen, då laminär strömning i munstycket alstrar mindre störande ljud i mottagaren.



Figur 6.1 Sprutmunstycke med sensor i form av en 200 kHz transducer

Munstycket är sammansatt av standardiserade rördelar i rostfritt. Inuti vattenvägen har anordningar gjorts för att åstadkomma så laminärt flöde som möjligt samt för att mottagaren, en 200 kHz transducer, inte skall störa vattenflödet och skapa egenbrus. Även en standardhydrofon, Brüel&Kjaer 8104, har använts i försöken.

6.2.3 Utförande och mätning

Metodens tänkta utförande är att man i samband med rensning av kylvattenkanalerna, vilken sker med starka vattenstrålar, skulle kunna inhämta information om eventuell delaminering. Det är inte lämpligt att kombinera denna avsökning med själva rengöringsarbetet i samma moment, eftersom väggarna är belagda med sjögräs, musslor och liknande vid rengöringsarbetet. Denna beläggning påverkar signalen på ett helt oförutsebart sätt. Men när ytorna är rengjorda kan man, med i stort sett samma utrustning som används vid rengöringen, tillämpa den metod som här beskrivs. Det enda man behöver göra är att byta munstycke.

6.2.4 Metodens utvecklingsmöjligheter, prestanda mm

Eftersom metoden är helt ny och inte provats utanför laboratoriet är det svårt att i det aktuella skedet peka på förbättringsmöjligheter.

6.3 Tillämpning (labb / fältförsök)

6.3.1 Inledning

Tre försöksuppställningar har använts: Stråle mot betongplatta för att studera av vattenstrålen alstrat frekvensspektrum i betongplattan, stråle mot vibrerande plexiglasskiva för att studera transporten av ljudvågor upp längs vattenstrålen samt stråle mot ett litet stålstöd i samma syfte som stråle mot be-

tongplattan, men ett försök att undvika de resonansfrekvenser betongplattan visade.

Hypotesen som skall provas är att vattenstrålen dels alstrar ett användbart vibrationsspektrum i den yta som träffas av strålen, dels kan föra tillbaka de frekvenser i den träffade ytans vibrationsspektrum, som förstärkts av ytans resonanser, till en mottagare i det munstycke som skickar ut strålen.

6.3.2 Utförande

Registreringarna har antingen gjorts genom att spela in givarsignaler med hjälp av ljudkortet i en laptop eller genom att använda en Dynamisk Signal-Analysator - DSA. Detta är ett instrument som innehåller en styrbar oscillator och två inkanaler. Syftet med instrumentet är att jämföra två signaler och beskriva deras samspel. En typisk mätning görs så att flera hundra diskreta frekvenser stegas igenom. För varje frekvens plottas relationen mellan de två signalerna. I det här fallet har oscillatoren kopplats till kanal 1 och den studerade signalen till kanal 2 i nästan alla försök.

I huvudsak används DSA-mätningarna för att presentera spektrum där amplitud plottas mot frekvens. Registreringarna med ljudkortet används främst för att plotta spektrogram i vilka frekvensinnehållet presenteras som funktion av tid. Samplingsfrekvensen har varit ljudkortets högsta - 44100 Sa/s.



Figur 6.2 I försöken använd mätutrustning. DSA till vänster under oscilloskopet.

Flödet genom munstycket har i dessa experiment varit 1.0 l/s. Vattentrycket har varit 4.2 bar, vilket är det vattentryck som fanns i ledningarna i V-husets källare vid försökstillfällena. Strålens diameter är 15 mm och vattenpartiklarnas hastighet vid anslaget således 4.5 m/s.

Avståndet mellan munstycket och träffområdet har varit 5 - 10 cm i försöken. I syfte att begränsa vattensprut har försöken gjorts inuti en upp och nedvänd murbruksbalja av plast. I dess botten har ett hål gjorts genom vilket vattenstrålen leds in mot testobjektet.

6.3.3 Uppbyggnad och tillverkning av försöksuppställning

Strålmunstycke riktat mot 400 mm cirkulär betongplatta med tjocklek 60 mm. På betongplattans undersida är en fästeanordning för en accelerometer fastklistrad. Accelerometern kommer från PCB, har frekvensområdet 1-2000 Hz och har en stark utsignal jämfört med vanliga accelerometrar. Accelerometerns känslighet ligger bättre än -3dB under korrekt nivå i det angivna intervallet. Den blir inte okänslig utanför intervallet men signalnivån blir felaktig



Figur 6.3 400 mm betongplattor med tjockleken 60 mm.

Vid försöken har betongplattan varit upphängd i tre snören inuti en upp och nedvänd murbruksbalja. Baljan är till för att begränsa vattenstänk vid försöken. Baljan har ett 8 cm hål i botten genom vilket strålen riktas.



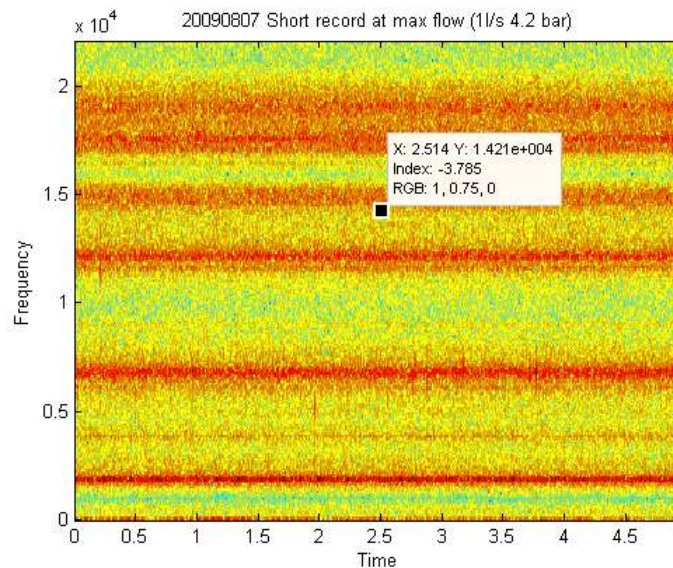
Figur 6.4 Försöksuppställning med stänkskydd

6.3.4 Provningsresultat

6.3.4.1 Provningsresultat mot betongplatta

I detta försök träffas betongplattan av vattenstrålen med full kraft. Flödet är 1 liter/s och det statiska vattentrycket i ledningen är 4.2 bar. Vattnets hastighet kan beräknas genom att man dividerar flödet Q i m^3/s med munstyckets tvärsnittsytan A i m^2 . Då erhålls vattenhastigheten v i m/s . Vattenstrålen är 15 mm i diameter så en vattenpartikel träffar betongytan med hastigheten

$$v = Q/A = 1000 \text{ cm}^3/s / 2.25 \text{ cm}^2 = 444 \text{ cm/s} = 4.5 \text{ m/s}$$



Figur 6.5 Vibrationsspektrum i betongplattan när den träffas av den laminära vattenstrålen. Tid i s.

Vi ser nu att vattenstrålen alstrar frekvenser i hela frekvensområdet, men att det finns frekvensband som är särskilt starka. Naturligtvis återfinner vi 1809 Hz som är en av plattans resonansfrekvenser men också andra band (de röda / mörka linjerna) vid 7 kHz, 12 kHz, 15 kHz och mellan 17 och 20 kHz. Dessa frekvensband får antas representera högre svängningsmoder i betongplattan. Grundmoden 1809 Hz får då antas vara membranresonansen eller den sk trumskinnsmoden (D7) dvs att plattan har en enda utböjning som är helt symmetrisk. Nästa mod innebär att plattans ena sida böjer upp när den andra böjer ner. Högre moder kan t ex innebära att plattans yta delas i fyra fält som svänger ömsom upp ömsom ner osv.

Detta är en första gynnsam indikation på att metoden kan fungera. Den infallande vattenstrålen skapar verkligen ett vibrationsspektrum i betongplattan, vilket är beroende på betongens resonanta egenskaper.

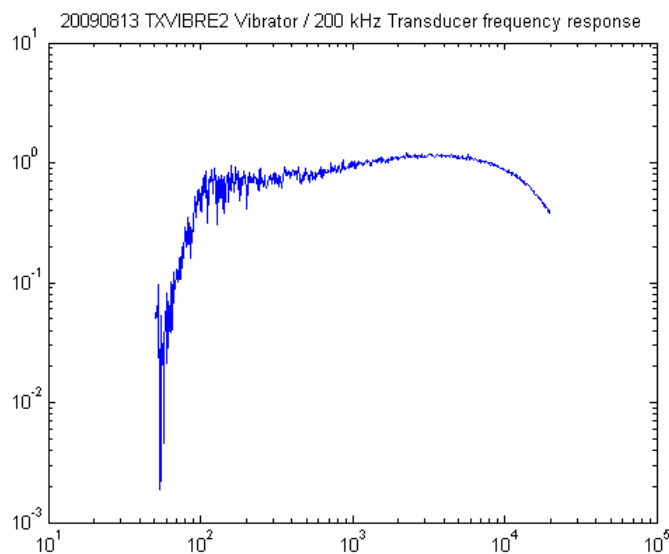
6.3.4.2 Provningsresultat mot vibrerande platta

Målet är en cirkulär plexiglasplatta med diametern 200 mm som är anbringad på en vibrator. Strålen träffar i plexiglasskivans centrum som är en nod för de flesta resonansfrekvenser i plexiglasplattan. Därigenom eftersträvas att excitera så lite vibrationer som möjligt i plexiglasskivan med vattenstrålen. Skivans syfte är att leda bort vattnet från den elektriska vibratoren under skivan. Vibratoren är inte vattentät. Den är en typ av högtalare benämnd DWARF som skall fästas mot en bordskiva eller dylikt för att kunna återge ljud.



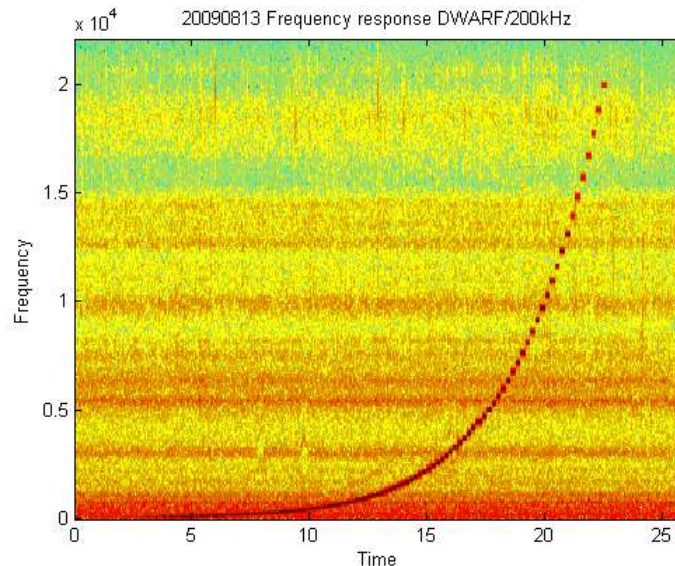
Figur 6.6 Försöksuppställning vibrator med plexiglasplatta

I detta försök har en specialgjord hydrofon använts. Den består av en 200 kHz sonartransducer från Radarsonic. Med 200 kHz avses att dess resonansfrekvens är 200 kHz. Det innebär att man bör vara försiktig med mätningar vid frekvenser som närmar sig 200 kHz, därför att nivåerna kommer att bli för höga. Vid de frekvenser vi studerar är detta inget problem. För att undvika att hydrofonen ger upphov till turbulens i munstycket har transducern gjutits in i epoxi, så att vattenvägen är helt fri och cirkulär, liksom omgivande rördelar. Epoxin är utformad så att den omsluter den ena halvan av vattenvägen.



Figur 6.7 Signal registrerad i munstycket med 200 kHz transducer när strålen träffar vibratorplattan

Vi ser här att det är möjligt att på ett trovärdigt sätt registrera vibrationer i frekvensområdet 100 Hz - 20 kHz via vattenstrålen. Denna mätning har också skett i form av ett spektrogram, vilket presenteras nedan.



Figur 6.8 Spektrogram som visar uppmätt signal i munstycket vid frekvenssvep 0-20 kHz i vibratoren. Enheten för tid är s, för frekvensen Hz.

Spektrogrammet bekräftar att mottagningskedjan i systemet fungerar ypperligt. Att frekvenserna inte faller på en rät linje beror på att svepet är logaritmiskt i så måtto att det uppehåller sig under längre tid vid låga frekvenser.

6.3.4.3 Provningsresultat mot stålstd

Då resonanser i betongplattan påverkade mätningarna i det första försöket eftersträvas att låta vattenstrålen träffa en så styv kropp att alla resonansfrekvenser ligger bortom det frekvensområde som vattenstrålen kan excitera eller accelerometern registrera. Därför tillverkades ett stålstd som lades upp på ett skumplaströr och försågs med en monteringsanordning för en accelerometer på undersidan. Skumplaströret stabiliseras av ett yttre stålrör. Accelerometern är av industrityp SNAP och har ett frekvensområde 10 Hz till 10 kHz. Liksom tidigare gäller dessa siffror -3dB gränserna. Det alstras signal även utanför detta frekvensområde. Syftet med försöket är att förfinas beskrivningen av vilka frekvenser strålen kan excitera.

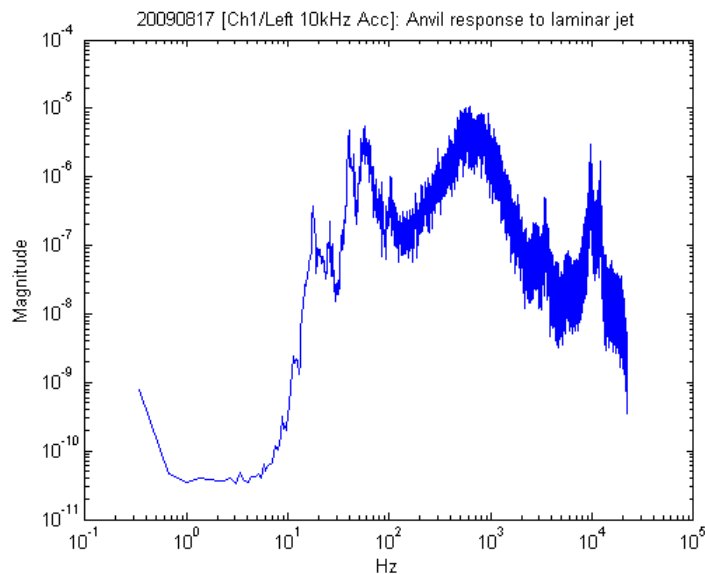


Figur 6.9 Stålstd attangerat för mätning



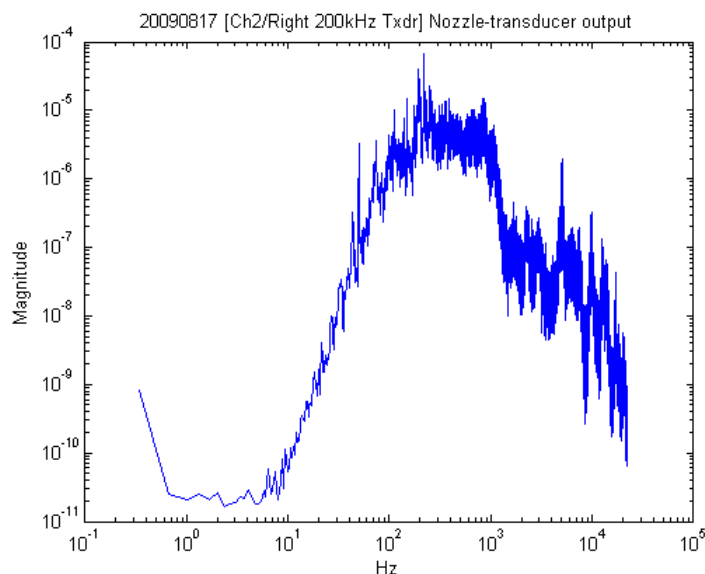
Figur 6.10 Accelerometer under stdet som vänts upp och ner jämfört med Figururen ovan. Accelerometern överst.

Skumplastcylindern har till syfte att hålla upp städet utan att alstra några resonansfrekvenser i det intressanta området. Skumplastcylindern stöds av ett yttre stålrör som ej är i mekanisk kontakt med det av vattenstrålen träffade städet. I detta försök har signalerna också registrerats med hjälp av datorns ljudkort och inspelningen har skett i stereo. På vänster kanal spelades signalen från accelerometern under stålstädet in och på höger kanal spelades signalen från hydrofonen i munstycket in. Detta innebär att inspelningarna är helt synkrona och att man kan parallellanalysera signalerna.



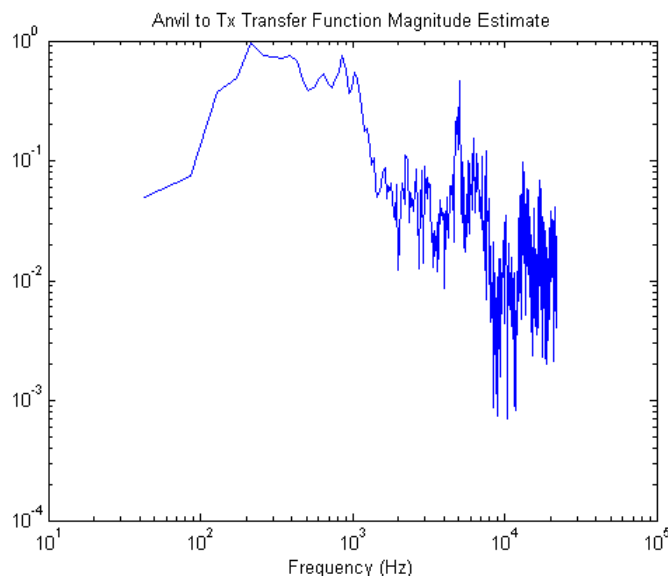
Figur 6.11 Frekvensspektrum registrerat med accelerometern i stålstädet

Det verkar som att vattenstrålen alstrar ett spektrum med tyngdpunkten vid 600 Hz och en bandbredd som sträcker sig mellan 100 Hz och 2 kHz.



Figur 6.12 Frekvensspektrum registrerat med hydrofonen i munstycket

Har man signalen från både stålstedet och hydrofonen kan man beräkna hur överförings- eller transferfunktionen ser ut. Denna funktion är ett spektrum som visar hur bra den ena signalen motsvarar den andra. Nedan presenteras transferfunktionen för de båda signalerna presenterade ovan. Perfekt matchning motsvaras av värdet 1 (10^0).



Figur 6.13 Transferfunktion mellan stålstedet och munstyckets hydrofon

Av transferfunktionen framgår det att återgivningen av städets vibrationer är mycket god i intervallet 100 Hz till knappt 2 kHz.

6.3.5 Utvecklingsmöjligheter för provningsmetoden

I kommande försöksupställning skall det vara möjligt att göra automatiserade mätningar med stegvis varierat avstånd mellan munstycket och det undersökta objektet. Det kommer också att göras ett tillförlitlighetstest genom att en stålkula får falla på en betongyta och vattenstrålen används för att registrera det svängningsförlopp som då uppstår. Det senare försöket görs för att eliminera varje möjlighet till elektrisk överhöring mellan vibrator och hydrofonkretsar.

6.3.6 Slutsatser

Försöken med vattenstrålen har visat att den alstrar ett brett frekvensspektrum i den träffade betongytan. Därigenom kan resonansfrekvenser för membranmoden i den delaminerade betongskivan exciteras. Försöken visar också att dessa resonansfrekvenser kan registreras i en mottagare i sprutmunstyck-

et. Detta innebär att man via en sammanhållen, laminär vattenstråle, dels kan excitera vibrationer i en betongyta kontaktlöst, dels registrera vibrationernas frekvensinnehåll kontaktlöst. Förutsatt att delaminerad betong har andra svängningsegenskaper än solid/homogen betong kan man därmed lokalisera delaminering genom att svepa en lämplig vattenstråle över betongytan. Frekvenserna som skapas påverkas inte av passagen genom vattenstrålen, varför strålens längd inte bör spela någon roll, så länge den håller ihop.

Metoden bedöms ha stor potential, eftersom den i princip inte skiljer sig från den redan av personalen accepterade proceduren att rengöra kylvattenkanaler med en kraftig vattenstråle.

För mätmetoden tillämpad i fält återstår att utveckla en metod som kan fastställa var mätningen har utförts.

Kapitel 7: Avsökning med Sonar i vatten

7.1 Inledning

Profilerings innebär att man driver reflektionskoefficientmätningar ett steg längre och registrerar ekots tidsförlopp efter det att pulsen träffat betongytan. På så sätt får man en profil in genom betongen när man flyttar sensorn längs betongens yta. Eftersom reflektionskoefficienten mellan vatten och betong är lägre än den mellan luft och betong kommer mer energi att tränga in i betongen om man gör mätningarna genom vatten än genom luft. Då profileringen ger ett resultat som starkt påminner om ett vertikalt snitt genom betongen är tolkningen mer robust än om man bara detekterar styrkan av ekot från ytan.

Skulle den insända pulsen ha ett frekvensband som täcker den eventuellt delaminerade betongens resonansfrekvens får man ett ringningsfenomen i registreringen. Ringning innebär att det uppstår ett stående vågförhållande mellan ytan och delamineringen. Det kan uttryckas som att pulsen studsar fram och tillbaka mellan sökare och delaminering. Eftersom denna svängning kan pågå ett tag kommer den att dölja eventuella ekon under delamineringen. Sådana ekon kan förekomma om delamineringen är vattenfylld men knappast om den är fylld med luft, i vilket fall ingen energi går över luftgapet. Det innebär att resonansfrekvensen helt dominerar den mottagna signalen. Detta omöjliggör profilering under delamineringen men är å andra sidan en stark indikation att betongen är delaminerad.

Profilerande mätningar kan ske med sonar i vattenfylld kanal eller med UPE/A1220-instrumentet i tömd kanal.

7.2 Mätning med parametrisk sonar

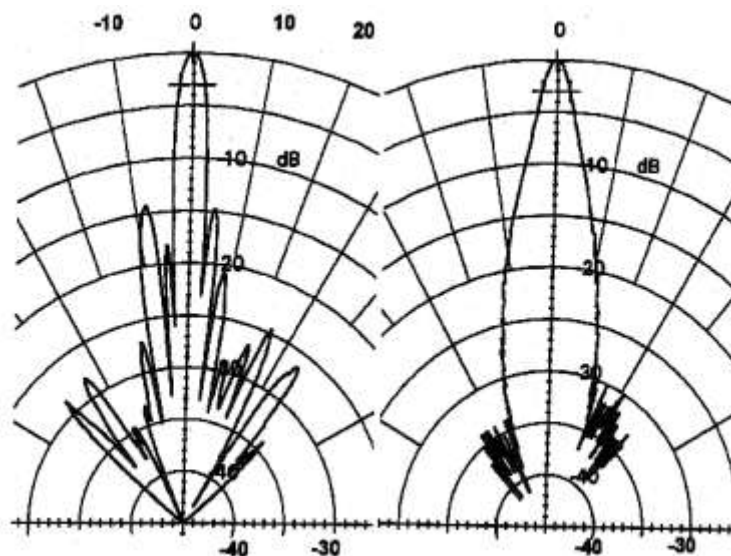
Sonar är en intressant undersökningsmetod då den medger att man mäter i fyllda kylvattenkanaler från en rörlig farkost. Som nämnts i föregående kapitel verkar det vara så att c:a 55 kHz är en bra frekvens vid undersökning av betong med ultraljud av kompressionsvågtyp. Högre frekvenser refrakteras och reflekteras ofördelaktigt vid passage av ballastkorn i betongen och vågfronterna bryts upp. Samtidigt tilltar dämpningen med stigande frekvens. Lägre frekvenser ger sämre detaljrikedom i profilerna men större penetration.

En vanlig sonar som arbetar vid 55 kHz måste ha en mycket stor sändare för att åstadkomma riktverkan. Vill man ha en hanterlig sändare kan man i gengäld placera den närmare den undersökta ytan. Det kräver att man har en scanner som kan föra runt sökaren i ett förutbestämt mönster.

En gynnsammare typ av sonar för dessa mätningar är den parametriska sonaren, vilken kombinerar den högfrekventa sonarens riktverkan med den lågfrekventa sonarens penetrationsförmåga.

7.2.1 Uppbyggnad och bakomliggande principer

En parametrisk sonar utnyttjar vattnets olinjäritet vid höga ljudtryck. Om man sänder en stark högfrekvent signal kommer olinjäriteten att medföra att en mer lågfrekvent signal uppstår. Den klassiska förklaringen till hur tekniken fungerar är att man har två frekvenser f_1 och f_2 vilka genom olinjäritet i vattnet fås att producera sidbanden f_1-f_2 respektive f_1+f_2 . Den högre frekvensen f_1+f_2 antas dämpas ut snabbt. Priset man betalar är att omvandlingen från primär- till sekundärfrekvens har låg effektivitet. Den lågfrekventa signalen har samma riktverkan som den högfrekventa, men den är alltså svagare. Denna typ av sonar karaktäriseras av att man kan få en smal lobvidd trots att man utnyttjar en låg frekvens. Förklaringen är att den olinjära omvandlingen endast kan ske inom den högfrekventa ljudstrålen. På grund av riktverkan kan man öka avståndet mellan sökaren och det undersökta objektet och söka av objektet genom att svepa strålen. Då kan man tänka sig att sonaren placeras på en undervattensrobot som simmar fritt i kanalen. Dessutom uppstår inga sidlobber för en parametrisk sonar, vilka skulle kunna ge upphov till störningar från objekt vid sidan om mätområdet, se Figur 7.1.



Figur 7.1 Parametrisk sonar Primärlob 120 kHz tv, sekundärlob 10 kHz th.

En tumregel för konstruktion av parametriska sonarer är att primärfrekvensen skall vara tio gånger högre än sekundärfrekvensen. Det betyder att för lyckat resultat i betong krävs att primärfrekvensen är i storleksordningen 500 kHz och sekundärfrekvensen därigenom c:a 50 kHz. En sådan sändare ryms utan problem i en handflata.

Tyvärr är kommersiellt tillgängliga parametriska sonarer betydligt lågfrekventare, eftersom man vill kunna undersöka havsbotten på större djup. Vid 500 kHz är dämpningen av ljudvågor i vatten relativt stark. På de korta avstånd

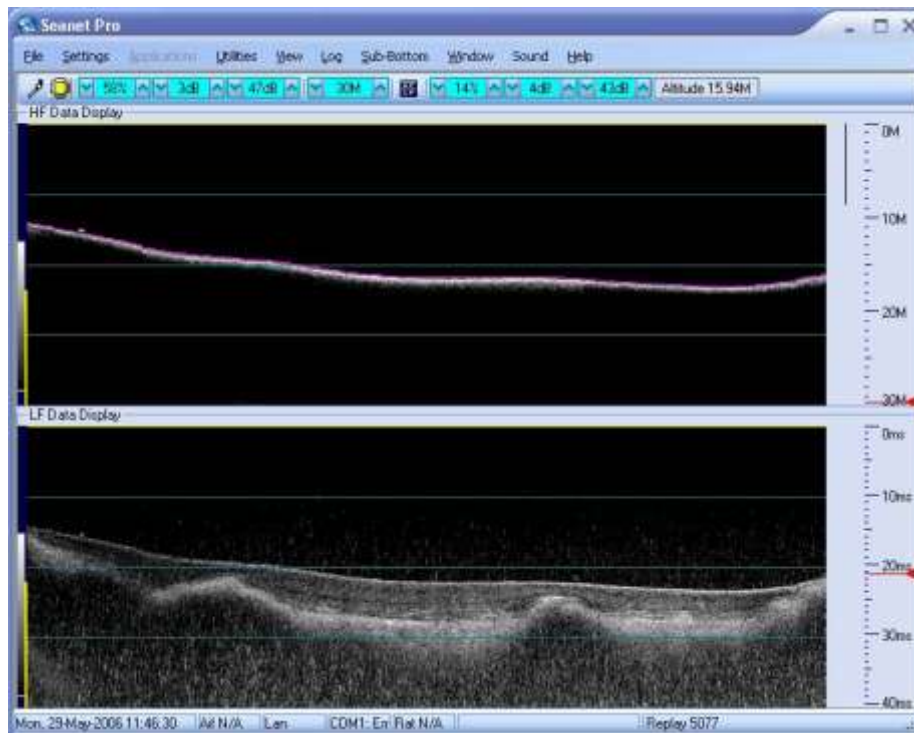
det kan bli tal om i en kylvattentunnel utgör dämpningen i vattnet inget problem. Nedan visas en av de få kommersiellt tillgängliga och lätthanterliga parametriska sonarerna, Seaking Trittech. Dess primärfrekvens är 200 kHz och primärpulslängden är 100 us motsvarande en upplösning i betong av 225 mm för hastigheten 4500 m/s.



Figur 7.2 Sea-King Trittech 200/10-30 kHz Parametrisk sonar Längd 330 mm, diameter 200 mm

Sekundärpulsen är en 10-30 kHz chirp, vilken pulskomprimeras till en längd av 60 us. Det motsvarar i betong med kompressionsvåghastighet 4500 m/s en pulslängd av 0.27 m. Det går alltså knappast att se en spricka på 50 mm djup som en enskild företeelse, däremot kan den ge upphov till ringning, vilken kan detekteras i sonaren. Det kan också vara så att ekotr från betongytan påverkas på ett karaktäristiskt sätt, vilket man lär sig utvärdera när praktiska försök har utförts.

Sea-king Trittech medger att man betraktar både primärfrekvensens och sekundärfrekvensens eko i skilda diagram. Det kan man använda för att få tydliga ekon av kanalväggen med hjälp av 200 kHz signalen och för att få profiler in i betongen med hjälp av lågfrekvensbandet. Lobvidden är 4 grader och minsta avståndet till objektet som skall undersökas måste vara större än 1 meter för att den parametriska omvandlingen till lågfrekvens skall börja utbilda. Optimalt resultat erhålles för ett mätavstånd uppgående till 5 m.



Figur 7.3 Sea-King Trittech presentation. Överst 200 kHz data, underst 10-30 kHz data.

7.2.3 Utförande och mätning

Som redan har berörts kan sonaren monteras på en i kylvattenkanalen frisimmande undervattensrobot av typen sjöuggla. Det stora problemet med avsökning i vattenfylld kylvattenkanal är positioneringen. Denna blir särskilt besvärlig för en frisimmande sonarbärare. Om man i stället monterar sonaren på en farkost som tar sig fram på hjul eller larvband kan längdmätningen ske via hjulen. Därefter återstår bara att bestämma sonarstrålens riktning för att inmätningen skall vara komplett. Det går också att använda sumpbrunnarna, regelbundna fördjupningar i kylvattenkanalernas golv, som uppdatering för den döda räkningen baserat på antalet hjulvarv.

7.2.4 Metodens utvecklingsmöjligheter, prestanda mm

Man kan föreställa sig att praktiska försök leder till att man finner optimala signaltyper och avsökningsmetoder.

7.2.5 Slutsats

Störst sannolikhet till framgång för mätningar i vattenfylld kanal har parametrisk sonar. Det finns en kommersiellt tillgänglig produkt som går att hyra för sådana prov. Sonaren är dock bara ena delen som är nödvändig för sådana

mätningar. Den måste monteras på en farkost som ger möjlighet till navigation och positionering av mätdata.

7.3 Tillämpning (labb / fältförsök)

Några fältförsök har ännu inte kunnat göras med denna typ av sonar. Sonartypen går att hyra och det krävs att man kan integrera den med någon typ av undervattensrobot om man skall kunna utföra praktiska experiment. Det är också möjligt att utföra semistationära mätningar mot någon befintlig betongkonstruktion, t ex i ett badhus. Med semistationär avses då att man har en linjärenhet liknande den som använts i scannern, som kan föra sensorn längs en begränsad sträcka, så att profilering åstadkommes. Självklart kan man inte veta om det finns någon delamineringsskada på just den platsen, men man kan dra slutsatser om penetration in i betongen från sådana mätningar. Kanske kan man också optimera signaltypen.

Kapitel 8: Samlade slutsatser

De utförda försöken med ultraljudapparaten A1220 demonstrerar entydigt att instrumentet A1220 fungerar bättre med S-vågsökare än med P-vågsökare. Detta kan man fastställa eftersom mätningar kunnat göras med helt lika förutsättningar för P-vågsökare och S-vågsökare. Det måste dock påpekas att även med P-vågmätning erhålles goda resultat. Det är alltså huvudsakligen S-vågorna som sådana som ger instrumentet dess framgång, inte det faktum att man utnyttjar många sändare och mottagare, även om detta naturligtvis förbättrar resultaten i för både S-vågor och P-vågor jämfört med ett enda element som fungerar både som sändare och mottagare. Mätningarna i provkroppar visade att såväl P-vågor som S-vågor fungerar bra i betong av 225 mm tjocklek när instrumentet är inställt på frekvensen 55 kHz. För tjockare betong kan andra parametervärden vara bättre men det har inte undersökts eftersom delaminering sällan förekommer på större djup än 225 mm.

Därför krävs det att automatiserad scanning av S-vågsökaren ger möjlighet att lyfta sökaren mellan mätpunkterna. Utformningen av sökarnas spetsar, vilka är lika för P- och S-vågsökare, medger inte att de släpas längs betongytan, därför att de då kommer att slitas ner på kort tid. Dessutom skall sökarna pressas mot betongytan med en kraft motsvarande 25 N för att kontakten mellan stiften och betongen skall bli god. Detta kan enklast och billigast lösas med en pneumatisk cylinder. Eftersom S-vågorna är polariserade är det intressant att mäta i två ortogonala riktningar. En alternativ lösning med ett elektriskt don skulle medge att detta automatiseras, fast till en högre kostnad. Det finns pneumatiska rotationsdon som kan implementeras för i storleksordningen 5 kkr.

Ytlig delaminering ger upphov till ringning orsakad av att den utsända signalen reflekteras fram och åter i det tunna betongskiktet. Denna ringning kan genom enkla beräkningar omvandlas till ett index, som visar var längs mätsträckan delamineringen är allvarligast. S-vågorna kan inte överbrygga en luft- eller vattenfylld spricka, men P-vågorna kan passera en vattenfylld spricka, däremot inte en luftfylld.

Mötet i Ringhals 17 mars visade att man troligen får stor acceptans från berörd personal för impedansmätningar med hammare/slägga, eftersom dessa personer är vana vid bomknackning med hammare. Det bör påpekas att det idag finns elektroniska Schmitt-hammare som mäter betongytans hastighet efter ett automatiserat slag med en uppspänd fjäder och lagrar mätvärdet så att det kan överföras till en dator. Även Schmitt-hammaren är bekant för många i personalen. Det återstående problemet är att på ett effektivt sätt söka av en yta i ett rutnät. Att mäta upp och markera sådana rutnät är ofta lika tidsödande som själva undersökningen.

Litteraturstudien påvisade möjligheten att mäta genom vattenstråle och det ledde till tanken att det kan vara möjligt att också excitera vibrationer i delaminerad betong. Av denna anledning ändrades fokus från sonarmätningar till mätningar med vattenstråle. Försöken har visat att sådana mätningar bör kunna vara framgångsrika.

Försöken med vattenstrålen har visat att den alstrar ett brett frekvensspektrum i den träffade betongytan. Därigenom kan resonansfrekvenser för membranmoden i den delaminerade betongskivan exciteras. Försöken har också visat att vibrationerna i betongytan kan registreras via vattenstrålen i en mottagare i sprutmunstycket. Förutsatt att delaminerad betong har andra svängningsegenskaper än solid/homogen betong kan man därmed lokalisera delaminering genom att svepa en lämplig vattenstråle över betongytan. Frekvenserna som skapas påverkas inte av passagen genom vattenstrålen och är därmed, i motsats till amplitudmätningar, oberoende av avståndet mellan munstycke och betongyta.

En av de få kommersiellt tillgängliga parametriska sonarerna har ett sekundärfrekvensområde som ligger mellan 10 och 30 kHz. Även om detta ligger lite under det önskvärda frekvensområdet, kan det vara värt att testa en sådan sonar mot betongytor. Det är möjligt att hyra en sådan sonar. Sonarer kan endast utnyttja P-vågor då vatten saknar förmåga att leda skjuvvågor.

Bilagor

B1: A-scanmätningar med A1220 instrumentet

B2: B-scanmätningar med A1220 instrumentet

B3: C-scanmätningar med A1220 sökare

B4: Undersökningar i Ringhals2

B5: Avsökning med vattenstråle

B6: Litteraturstudie och referenslista

Bilaga 1: Punktmätningar (A-scan) med A1220

Mätning i en punkt på en yta, i vilken informationen fås som funktion av tiden efter den utsända signalen kallas A-scan.

Frekvensen är valbar i instrumentet A1220 Monolith. Intervallet är 15 - 250 kHz i ojämna steg. Den utsända signalen är emellertid en fyrkantvåg, i vilken varje cykel kan sägas bestå av två transienter. Sådana transienter är mycket bredbandiga och de kan excitera ett brett spektrum av frekvenser. När fyrkantvågen kommer till sökarens sändarelement kommer den att filtreras av sändarelementets bandbredd. Därvid övergår pulsen till att se ut som en mer sinusformad vågrörelse. Så länge fyrkantvågens bandbredd ligger inom sändarelementets bandbredd kan man i viss mån påverka vilken frekvens som skall få starkast amplitud i den från sändarelementet utgående signalen. Skulle fyrkantvågen ha en frekvens som ligger långt under sändarelementets resonansfrekvens kommer varje transient i fyrkantpulsen att alstra en sinusformad puls, dvs en cykel fyrkantvåg ger två cykler utsänd sinusliknande puls. Detta eftersträvas inte. Vad man vill åstadkomma är tvärtom en utgående signal som är så kort och stark som möjligt. Detta är motstridiga önskemål då signalen blir starkast vid sändarelementets resonansfrekvens, men samtidigt blir signalen lång just därför att sändarelementet befinner sig i resonans. Vid en lycklig kombination av fyrkantvågfrekvens och sändarelementets resonansfrekvens kan det uppstå det förhållandet att en första utsänd puls släcks ut av den puls som alstrats av den andra transienten i fyrkantvågen.

För att studera dessa fenomen gjordes en serie mätningar genom 225 mm betong, där ekot från provkroppens undersida studerades med avseende på styrka och tydlighet mot sin närmaste signalomgivning.

Frekvensen 15 kHz motsvarar i betong med kompressionsvågshastigheten 4500 m/s en våglängd om 30 cm medan 250 kHz motsvarar våglängden 1.8 cm. 55 kHz motsvarar våglängden 8.2 cm.

För skjuvvågor med hastigheten 2700 m/s i betong motsvarar 15 kHz våglängden 18 cm medan 250 kHz motsvarar våglängden 1.1 cm. 55 kHz motsvarar våglängden 5 cm.

Vi ser alltså att för samma frekvens ger skjuvvågor kortare våglängd, vilket kan översättas till bättre förmåga att avbilda små detaljer.

Det bör noteras att, som tidigare nämnts, den betong som försöken gjorts i har en ballast bestående av fraktionerna 8-12 resp 12-16 mm. När våglängden kommer i paritet med ballastkornens storlek kan man vänta sig att vågfronten störs. När våglängden är väsentligt större än ballastkornen försvinner denna effekt och ljudvågorna uppträder som om betongen vore homogen.

B1.1 Ultraljuds frekvensberoende i betong

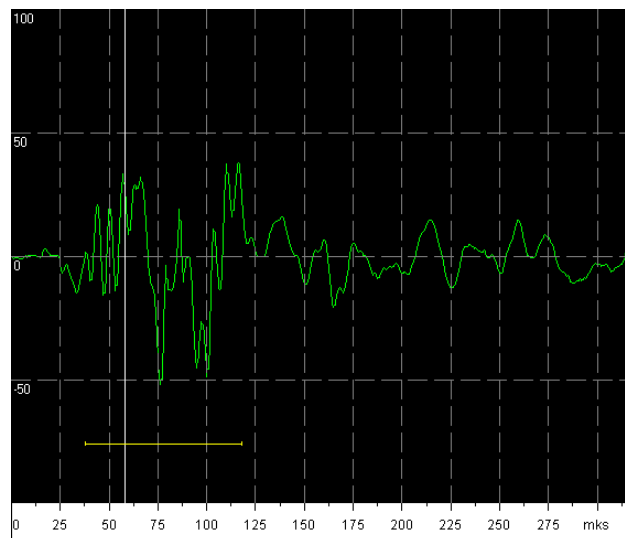
För närvarande råder viss osäkerhet om vilken resonansfrekvens sökarelementen i P-vågsökaren har. Germann Instruments uppger 100 kHz och en vetenskaplig artikel 140 kHz (S5). S-vågsökaren är däremot mer väldefinierad och har en resonansfrekvens av 55 kHz. Resonansfrekvensen är den frekvens vid vilken sökarna sänder den starkaste amplituden av den mekaniska vågformen för en given amplitud på den elektriska signalen.

Nedan, i avsnitt 6.2 presenteras sk A-scan registrerade då sökarna placerats på en homogen betong med 225 mm tjocklek och därunder en lastpall. Det innebär att reflexen från bottenytan blir stark.

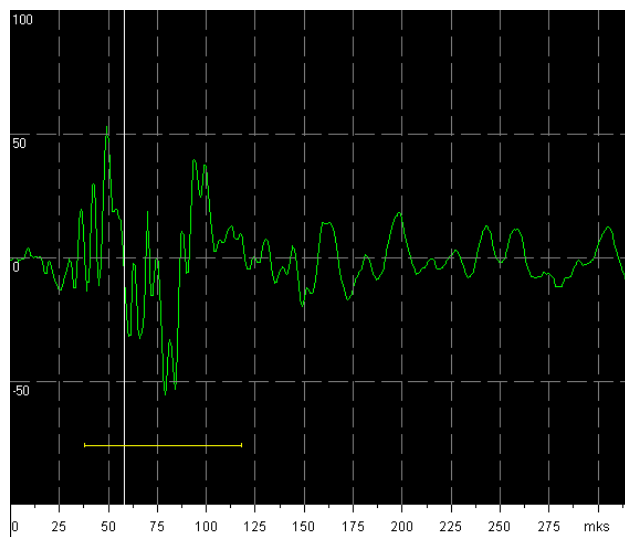
Eftersom sändpulsens längd ju lägre den valda frekvensen är, kommer ekot från betongens undersida att flytta sig åt vänster allteftersom frekvensen ökar och sändpulsens längd blir kortare. Mätningen sker relativt nära kanten av betongblocket för att undvika träff på de ingjutna delamineringsanvisningarna. Det gör att en del kanteffekter uppstår i form av extraekon, vilka gått lite längre sträcka därigenom att de reflekterats mot provkroppens sida på väg ned mot bottenytan i stället för att gå rakt ner till bottenytan från sökaren.

B1.2 P-vågsökare med olika frekvensval

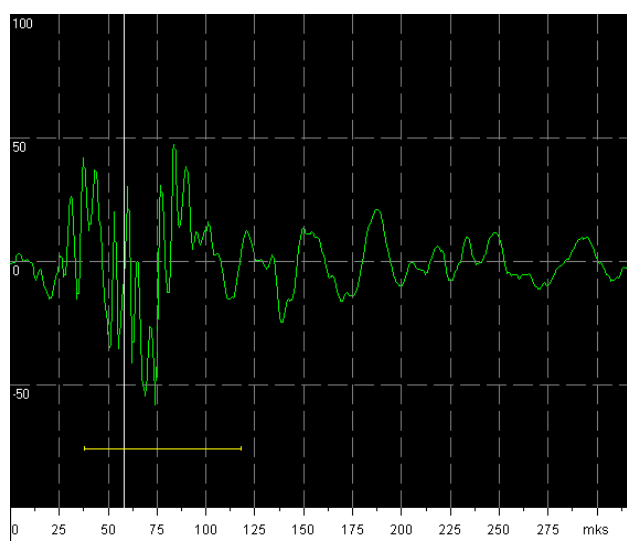
Först presenteras P-vågssignalerna. Ekot från provkroppens undersida skall ligga vid c:a 125 mikrosekunder. Eftersom avståndet är 225 mm och hastigheten ungefär 4500 m/s tar det 100 mikrosekunder för signalen att gå fram och tillbaka, men registreringen startar en stund innan signalen sänds ut. Denna tid kan justeras av operatören. På vertikala axeln anges signalamplitud (Volt) och på horisontella axeln tid. Siffrorna är i mikrosekunder (mks enligt programvaran). Vi söker den "frekvens" som ger det tydligaste ekot från betongprovkroppens undersida. Vald frekvens anges under respektive bild.



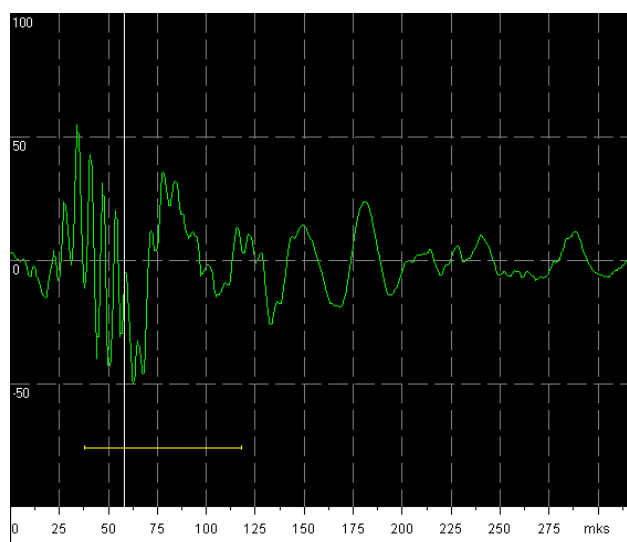
Figur B1.1 15 kHz P-våg



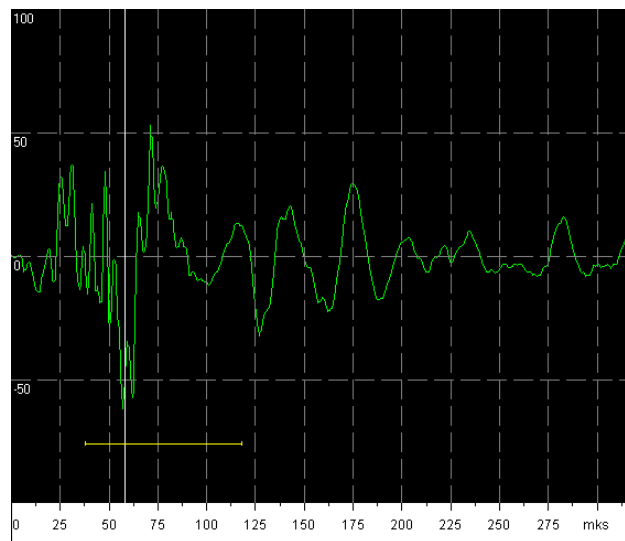
Figur B1.2 20 kHz P-våg



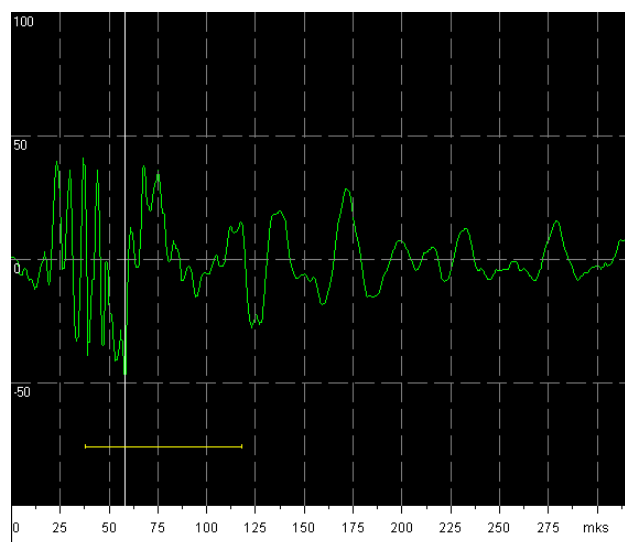
Figur B1.3 25 kHz P-våg



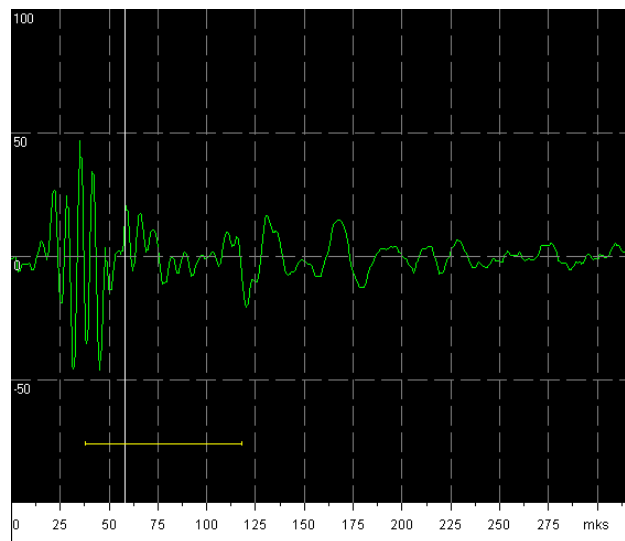
Figur B1.4 30 kHz P-våg. Ekot framträder svagt



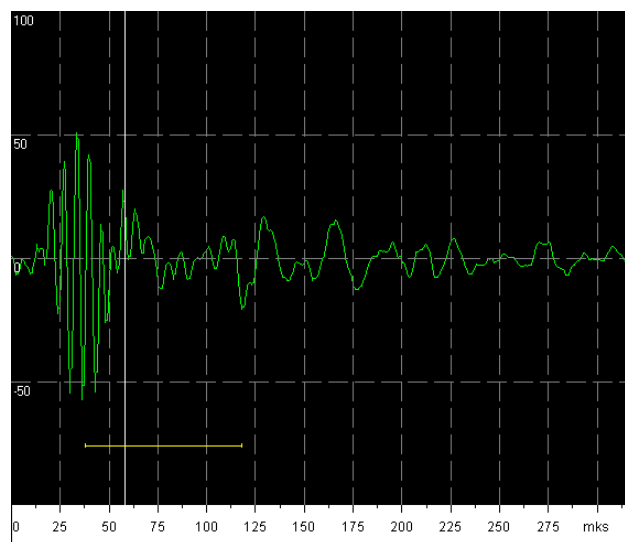
Figur B1.5 35 kHz P-våg



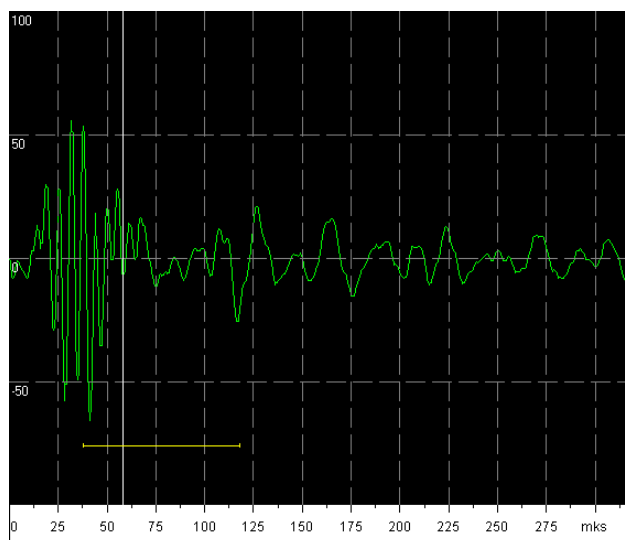
Figur B1.6 40 kHz P-våg



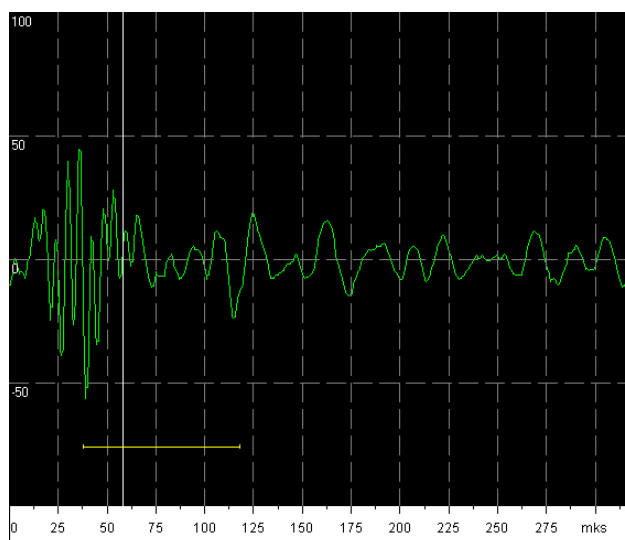
Figur B1.7 45 kHz P-våg



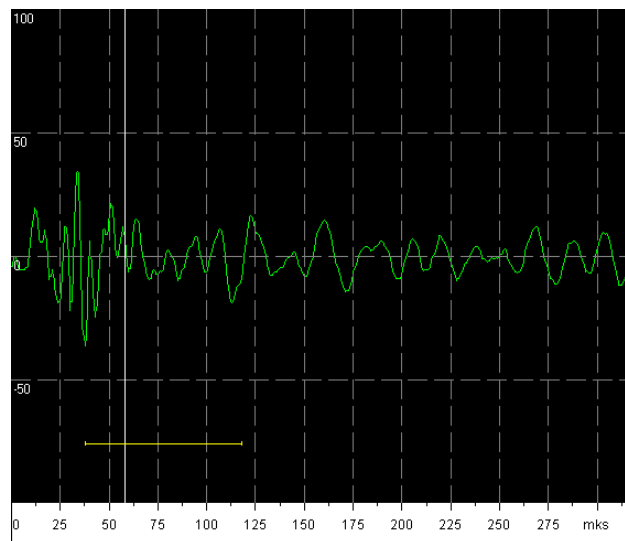
Figur B1.8 50 kHz P-våg



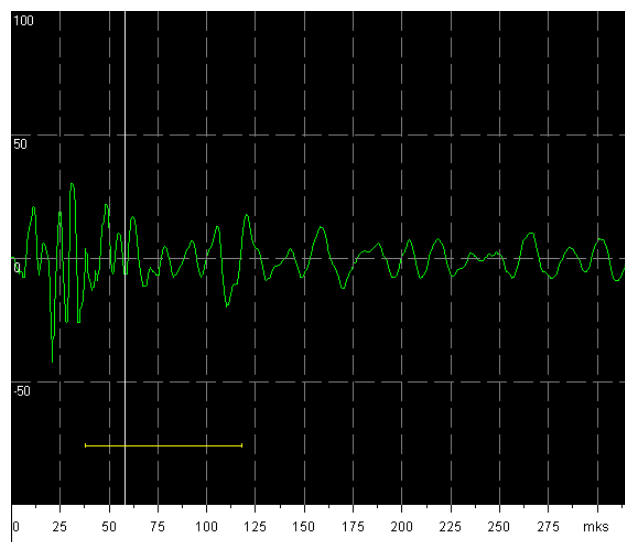
Figur B1.9 55 kHz P-våg. Tydligast eko (mellan 100/125 mks)



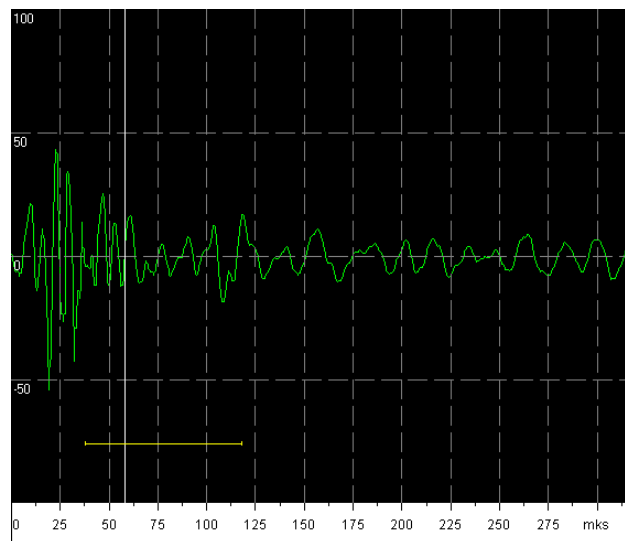
Figur B1.10 60 kHz P-våg



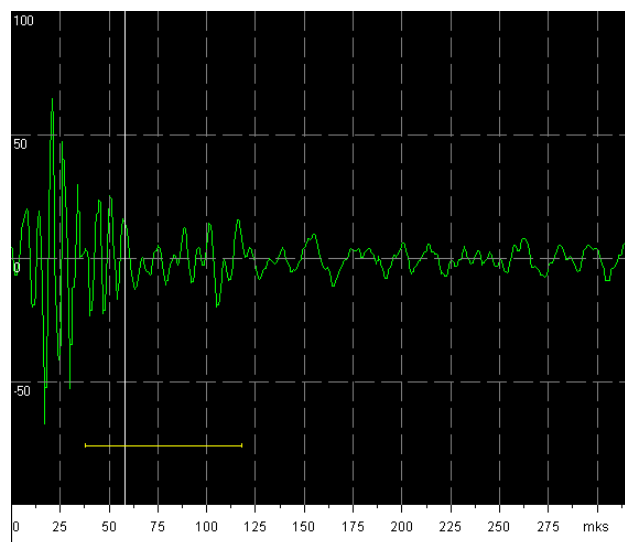
Figur B1.11 70 kHz P-våg



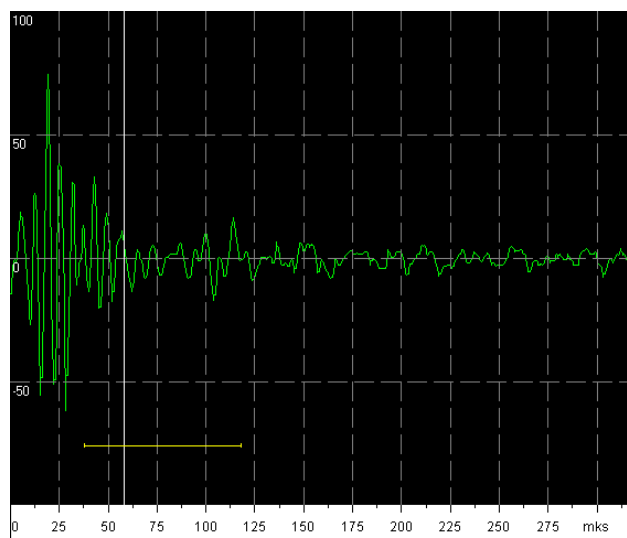
Figur B1.12 85 kHz P-våg



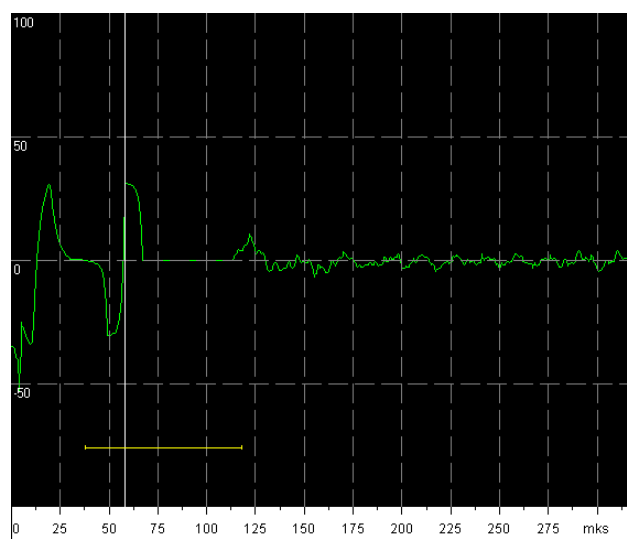
Figur B1.13 100 kHz P-våg



Figur B1.14 125 kHz P-våg



Figur B1.15 170 kHz P-våg



Figur B1.16 250 kHz P-våg. Misstänkt funktion.

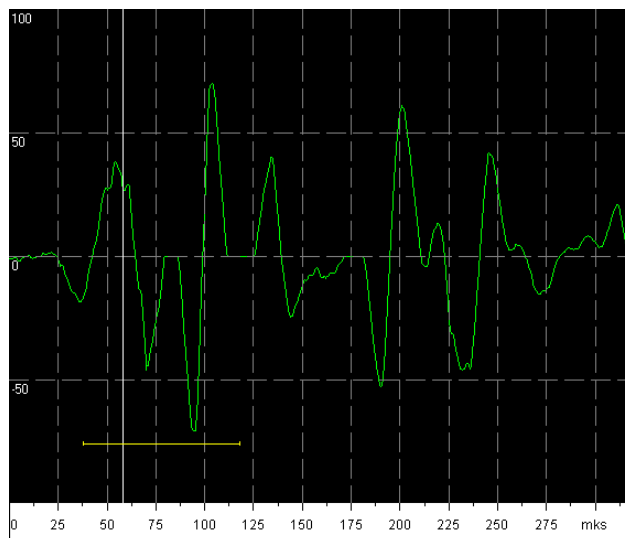
Det framgår av P-vågsekvensen att ekot från betongprovkroppens undersida är tydligast mot omgivande signal när frekvensen är inställd på 55 kHz.

En enkel analys baserad på periodtiden för ekot, vid vald frekvens 70 respektive 35 kHz, som är 20-25 mikrosekunder visar att det utsända frekvensinnehållet kan ligga centrerat kring 40-50 kHz oavsett vald frekvens. När den valda frekvensen motsvarar denna periodtid erhålles det bästa resultatet.

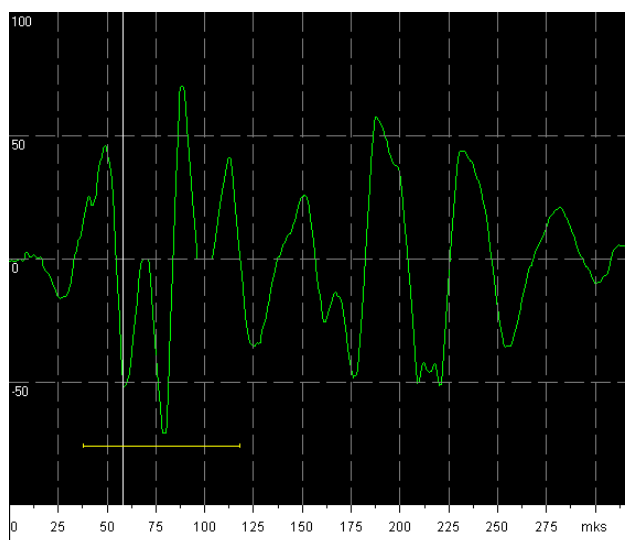
Av detta följer att 55 kHz, samma frekvens som anges för S-vågsökaren, med framgång bör kunna användas med P-vågsökaren. Detta är ett väsentligt resultat, då det avviker från givna data för P-vågsökaren.

B1.3 S-vågsökare med olika frekvensval

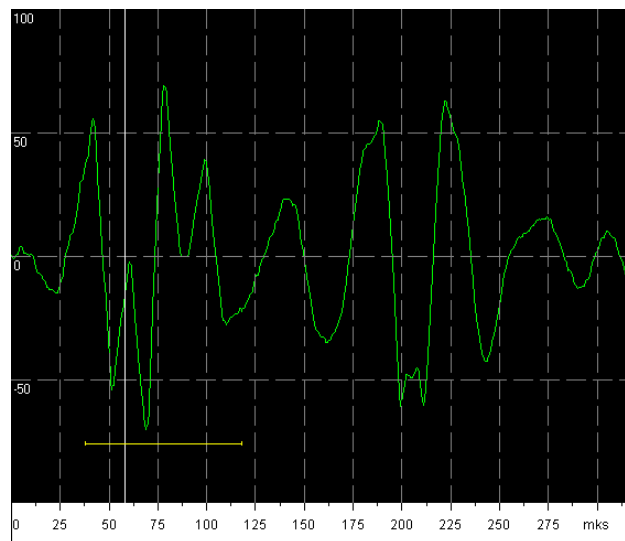
Nedan följer motsvarande sekvens för S-vågor. Ekot skall ligga vid c:a 175 mikrosekunder. Ekot kommer senare än kompressionsvågeket eftersom skjuvvåghastigheten endast uppgår till ungefär 2500 m/s. Vi söker det frekvensval som ger det tydligaste ekot från provkroppens undersida. Frekvensen anges under respektive bild.



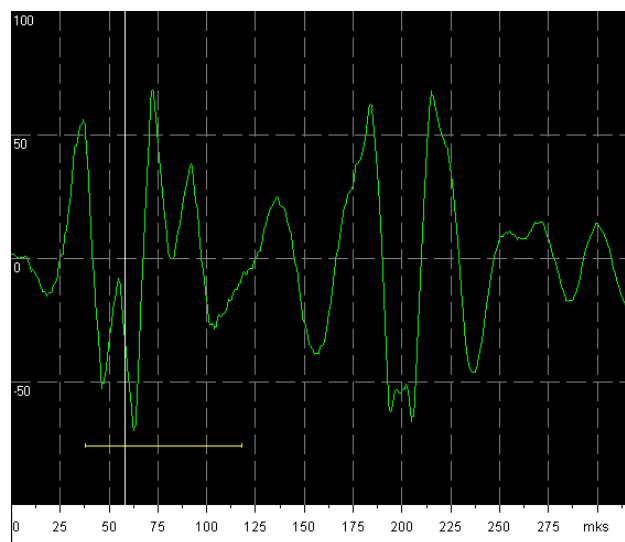
Figur B1.17 15 kHz S-våg. Ekot vid c:a 175 mikrosekunder



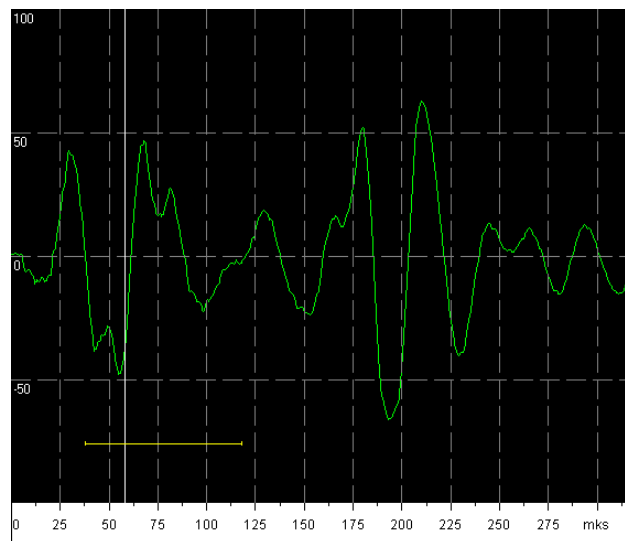
Figur B1.18 20 kHz S-våg



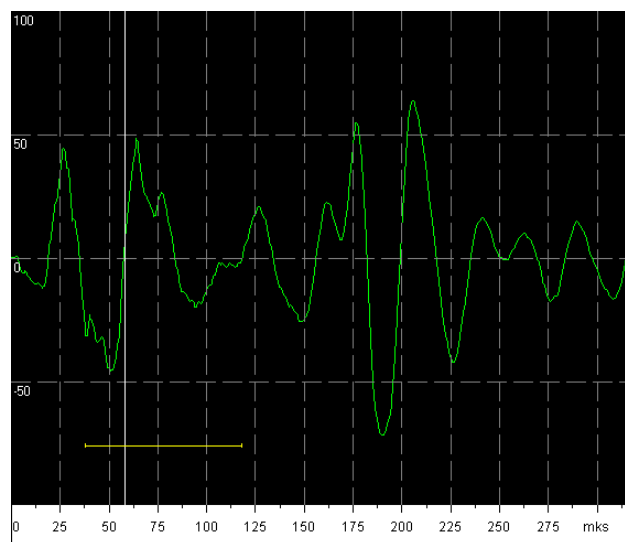
Figur B1.19 25 kHz S-våg



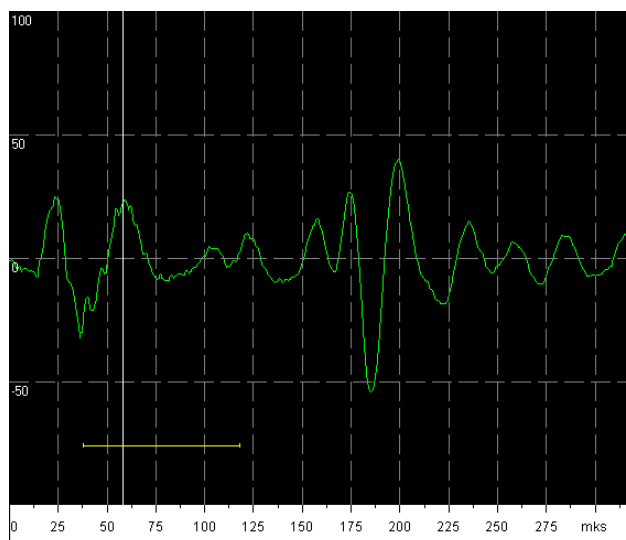
Figur B1.20 30 kHz S-våg



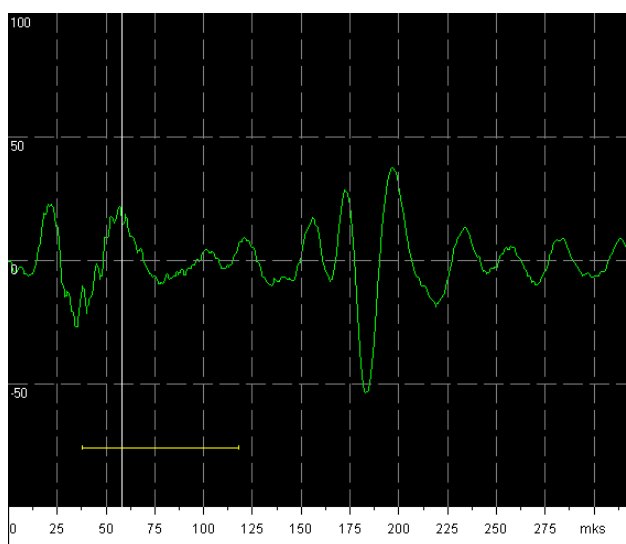
Figur B1.21 35 kHz S-våg



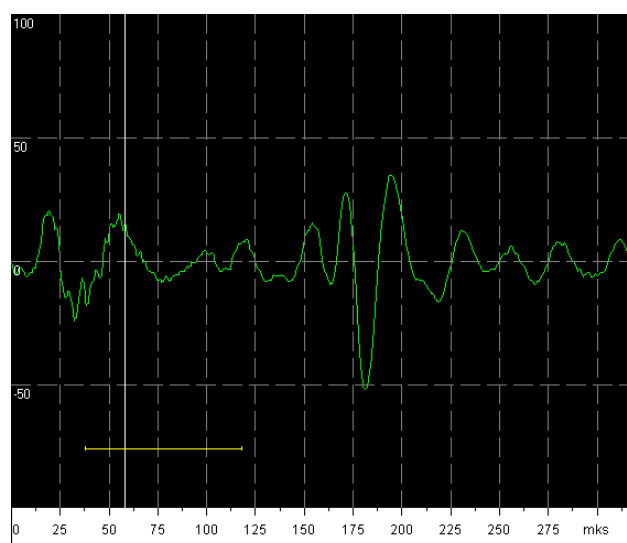
Figur B1.22 40 kHz S-våg



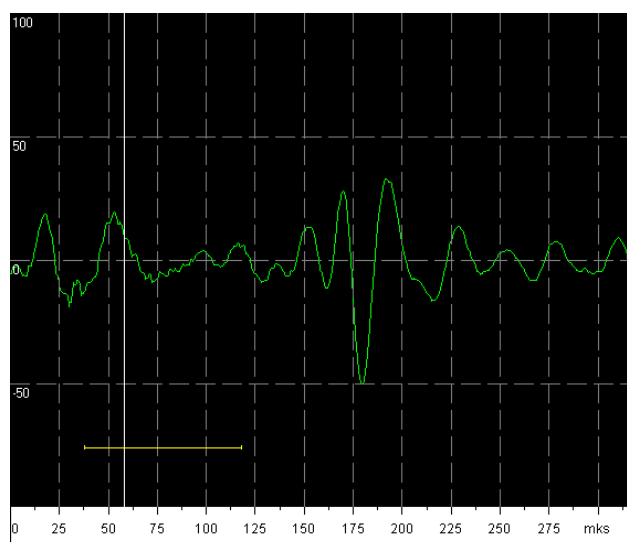
Figur B1.23 45 kHz S-våg. Tydligt eko



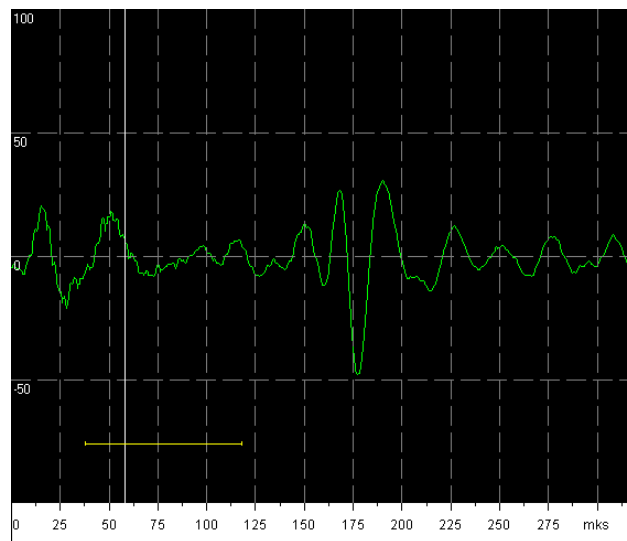
Figur B1.24 50 kHz S-våg. Tydligt eko.



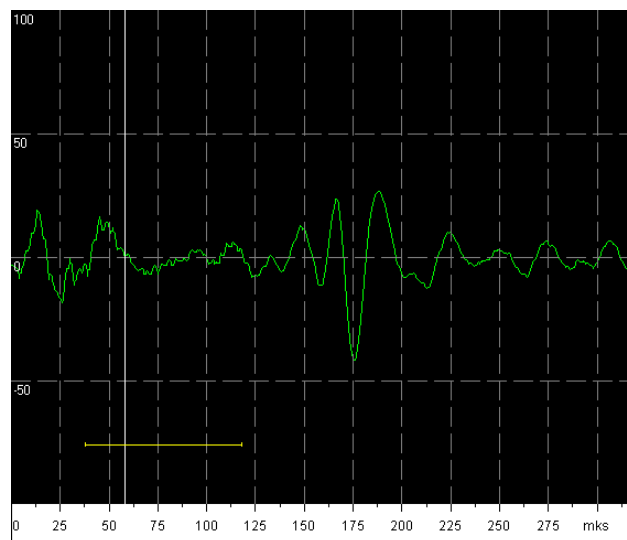
Figur B1.25 55 kHz S-våg. Tydligt eko.



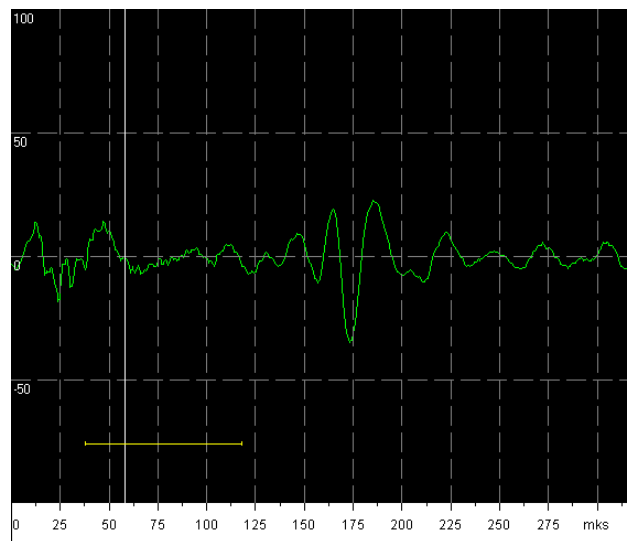
Figur B1.26 60 kHz S-våg. Tydligt eko.



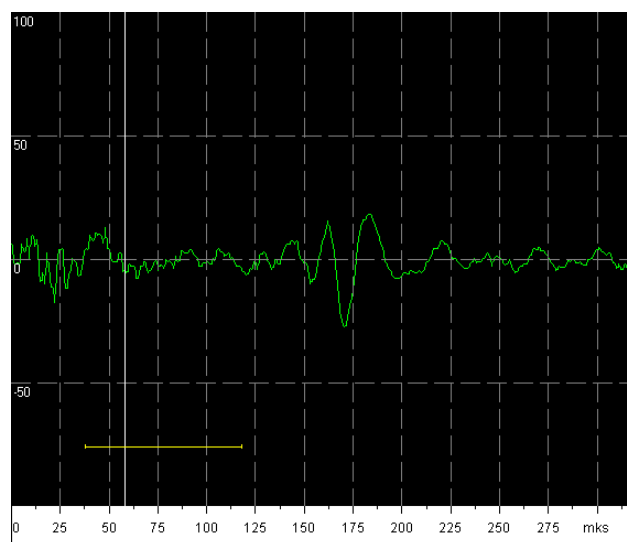
Figur B1.27 70 kHz S-våg. Tydligt eko



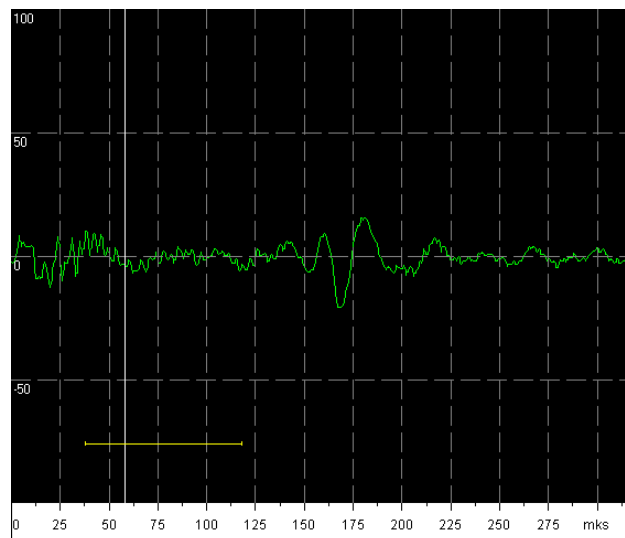
Figur B1.28 85 kHz S-våg



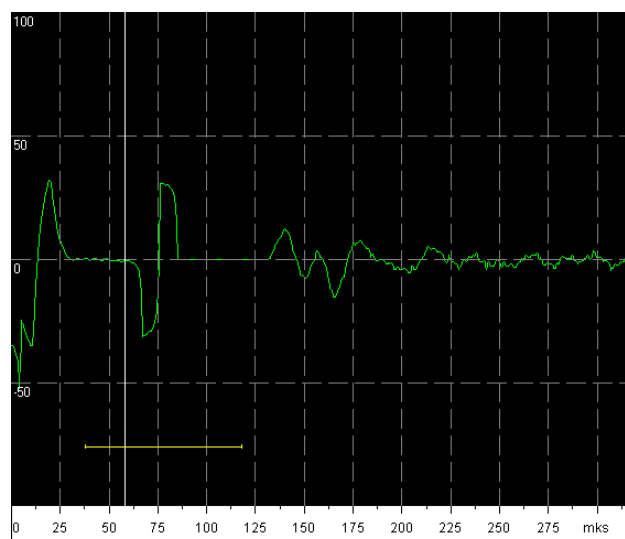
Figur B1.29 100 kHz S-våg



Figur B1.30 125 kHz S-våg



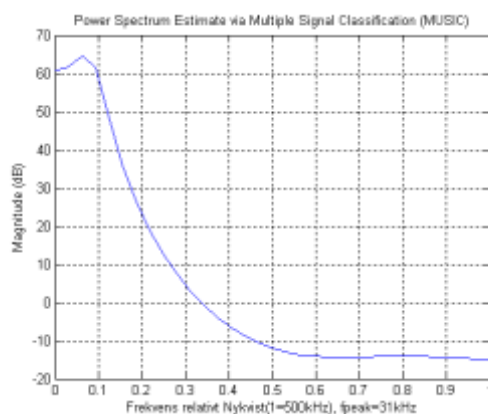
Figur B1.31 170 kHz S-våg



Figur B1.32 250 kHz S-våg

För S-vågor visar det sig också att tydligaste ekot uppstår vid 55 kHz. Det är dock inte det starkaste ekot, vilket erhålles för frekvensen 40 kHz. Ekots frekvensinnehåll har studerats speciellt för fallet S-våg och inställd frekvens 55 kHz och presenteras nedan. Det är intressant att se att den mottagna frekvensen ligger vid 31 kHz, maxfrekvensen i Figurur 6.33 på följande sida. Det indikerar att antingen är sökarelementens verkliga resonansfrekvens lägre än 55 kHz eller också har de högre frekvenskomponenterna dämpats ut i betongen.

Detta resultat bekräftar att det kan vara oklokt att excitera ett sändarelement vid resonansfrekvensen, eftersom man då får en lång puls, exponentiellt avtagande i styrka. Ligger man lite vid sidan om erhålles starkare dämpning och en svagare, men kortare puls. Den svagare signalen kan eventuellt kompenseras genom att förstärkningen i mottagaren höjs.



Figur B1.33 Beräkning av spektrum för extraherat eko för 55 kHz S-våg

250 kHz signalerna ser helt annorlunda ut än signalerna för de andra frekvenserna för både P- och S-vågor. Inga ordentliga ekon är synliga. Det bedöms att denna frekvens ligger alltför långt utanför sändarelementens bandbredd.

B1.4 Slutsats

Försöken med A-scanmätningar indikerar att frekvensvalet vid mätningar i betong skall vara 55 kHz för båda sökartyperna. Den aktuella betongen är tunn jämfört med tänkbara konstruktioner, men tjockleken är relevant vad avser förekomsten av delaminering. Resultaten är inte nödvändigtvis giltiga vid mätning i metertjock betong.

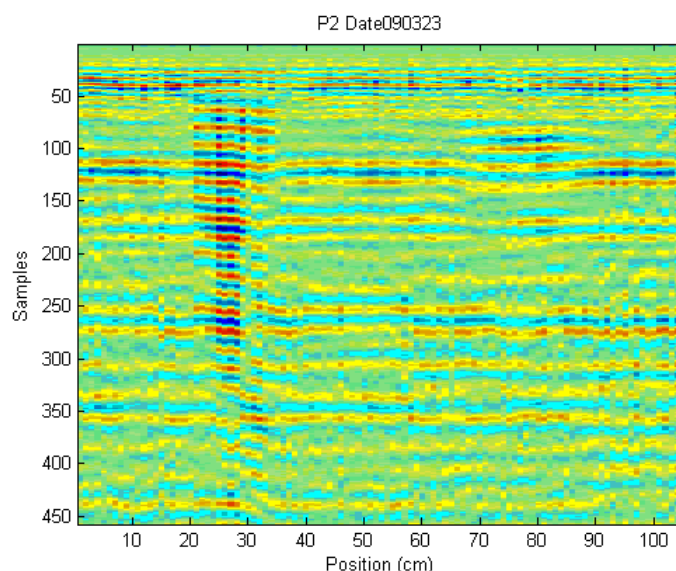
Bilaga 2: Profilering (B-scan) med A1220

Mätning i en punkt på en yta, i vilken informationen fås som funktion av tiden efter den utsända signalen kallas A-scan. Flera sådana mätningar bredvid varandra kallas B-scan och ger upphov till data utefter en tids- och en längd-axel, som vi vanligtvis kallar en profil. Dessa tester har alla utförts manuellt. Sökaren manövreras med en hand och inlagringen av mätdata i instrumentet triggas med andra handen. Sökaren måste pressas mot betongytan med en kraft uppgående till c:a 25 N ("2.5 kg") för att elementens piggar skall komma i god kontakt med betongytan. Tidåtgången för att registrera 100 signaler med 1 cm mellanrum är 10-15 minuter om man medelvärdesbildar 4 signaler i varje punkt och instrumentet är inställt att sända 5 signaler per sekund.

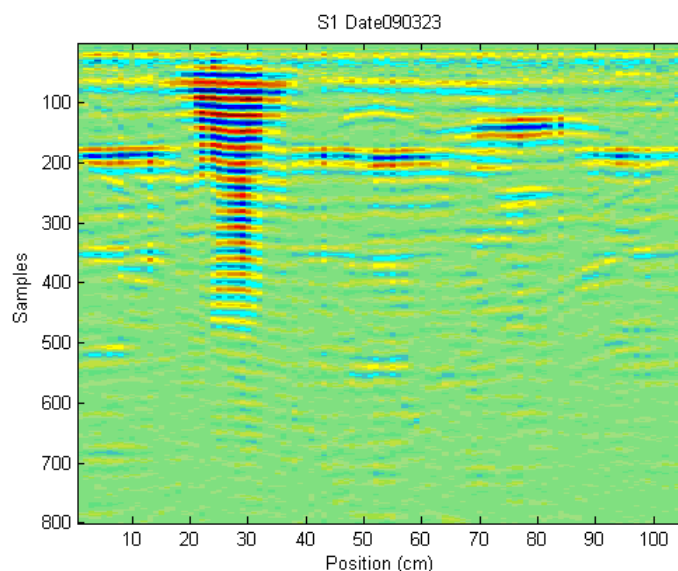
Då A-scanmätningarna i föregående kapitel skedde efter en del av B-scanmätningarna i detta kapitel har de förra inte kunnat ligga till grund för de mätningar som redovisas här. Det har också visat sig vara skillnad på en lyckad inställning för A-scanmätning och B-scanmätning.

B2.1 Mätserie 1

Denna mätserie utfördes under våren 2009 alldeles efter att instrumentet anlönt till LTH. De gav en första indikation om de olika sökarnas egenskaper. Profilerna går mitt på provkropparna som beskrivits i kapitel 5 och tvärs över de båda ingjutna cellplastskivorna. Nedan visas resultat från provkropp 1, sida 1 (P1s1) med delamineringar belägna på 40 respektive 160 mm djup. Genom detta markeringssystem uppstår fyra mätfall på provkropparna, nämligen P1s1, P1s2, P2s1 och P2s2. Alla bilder är plottade i MATLAB efter editering av Monolith-instrumentets .dtx-filer. I originaldokumentet är Figururerna i färg.



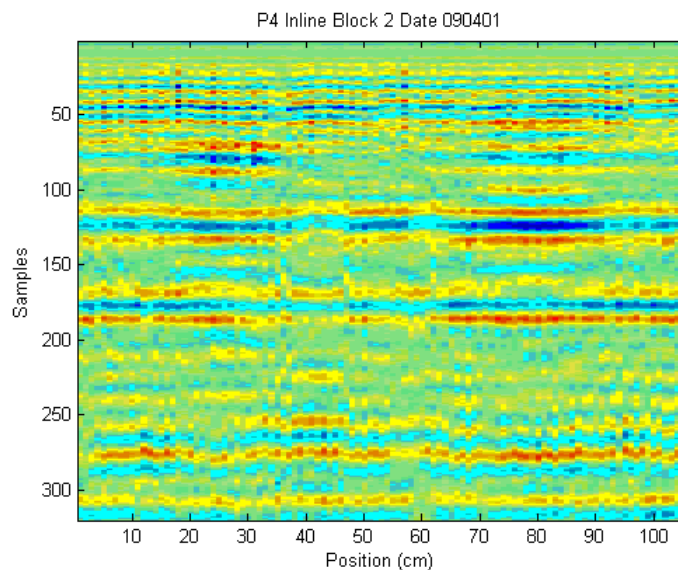
Figur B2.1 Mätning med P-vågsökare för mätfall P1s1. Delaminering vid Position 25/50 och 80/90 cm/sample



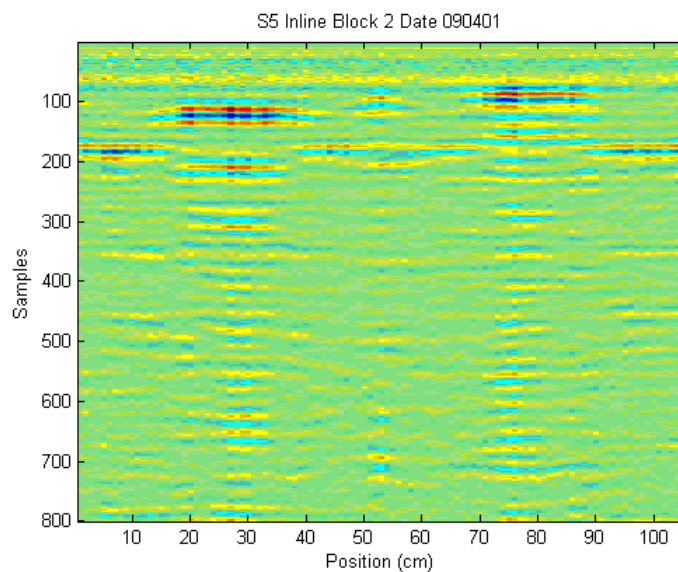
Figur B2.2 Mätning med S-vågsökare P1s1. Tydlig reflex från röret vid 55/110 cm/sample.

Reflex från provkroppens undersida ligger i ovanstående P-vågregistrering vid sample 105. De båda cellplastskivorna återfinns vid längderna 25 och 80 cm. Ingen reflex från röret i mitten syns. I S-vågmätningen ligger undersidan vid sample 180. Reflexer från röret syns. Brusnivån är lägre för S-vågmätningen än för P-vågmätningen. Ringning uppstår både vid P- och S-vågmätningar vid den ytligast belägna cellplastskivan -40 mm. Ringning innebär att ljudenergin studsar mellan ytan och delamineringen och därför får ett utdraget förlopp som döljer senare ekon.

Nedan visas resultat från provkropp 2, sidan 1 (P2s1) med delamineringar på 100 resp 140 mm djup. Eftersom P-vågorna saknar polarisation spelar orienteringen av sökaren ingen roll. S-vågsökaren är däremot polariserad och därför blir resultaten olika beroende på vilken orientering sökaren har. Skjuvvågor parallellt orienterade med ett rör bör t ex ge bättre reflexer från röret än om de är ortogonalt orienterade.

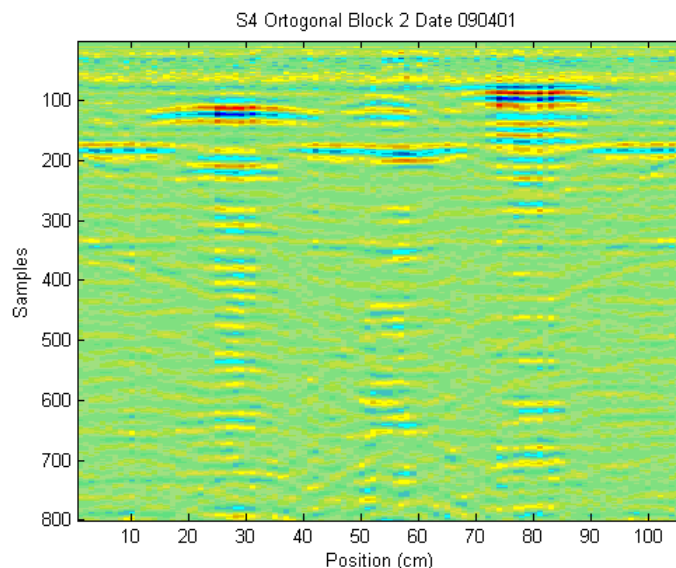


Figur B2.3 Mätning med P-vågsökare P2s1



Figurur B2.4 Mätning med S-vågsökare med sökarens långa sida parallell med sökriktningen P2s1

Eftersom operatören var obekant med instrumentet blev antalet mätvärden olika för de olika registreringarna. P-vågmätningarna i block2 är också mer brusiga än S-vågmätningarna.



Figur B2.5 Mätning med S-vågsökare med sökarens långa sida ortogonal mot sökriktningen P2s1

Någon uppenbar skillnad mellan de två S-vågmätningarna med olika polarisationsriktning framgår inte. En svag reflex från röret framträder för båda polarisationerna.

Vissa kanteffekter förekommer i S-vågmätningarna. De är lutande linjer som möts mitt i profilen.

Konfigureringen vid dessa mätningar är tyvärr ej fullständigt bevarad men den valda frekvensen på den elektriska sändpulsen har varit densamma för både P-våg- och S-vågmätningar.

Multipla eko förekommer i S-vågmätningarna men inte i P-vågmätningarna bortsett från ringningen vid den ytligt belägna cellplastskivan.

Ett ytligt objekt kan alltså skymma en djupare reflex. Cellplastskivorna blockerar reflexerna från provkropparnas undersida i S-vågmätningarna men inte i lika stor omfattning i P-vågmätningarna. Även om det skymmande objektet inte själv ger upphov till reflexer kan effekten uppstå och objektet lokaliseras genom att ett bakomliggande eko försvagas. Detta fenomen används i viss radarutrustning för att identifiera flygplan med mycket låg radarsignatur (STEALTH). Ett område med porös betong skulle kunna ge denna effekt.

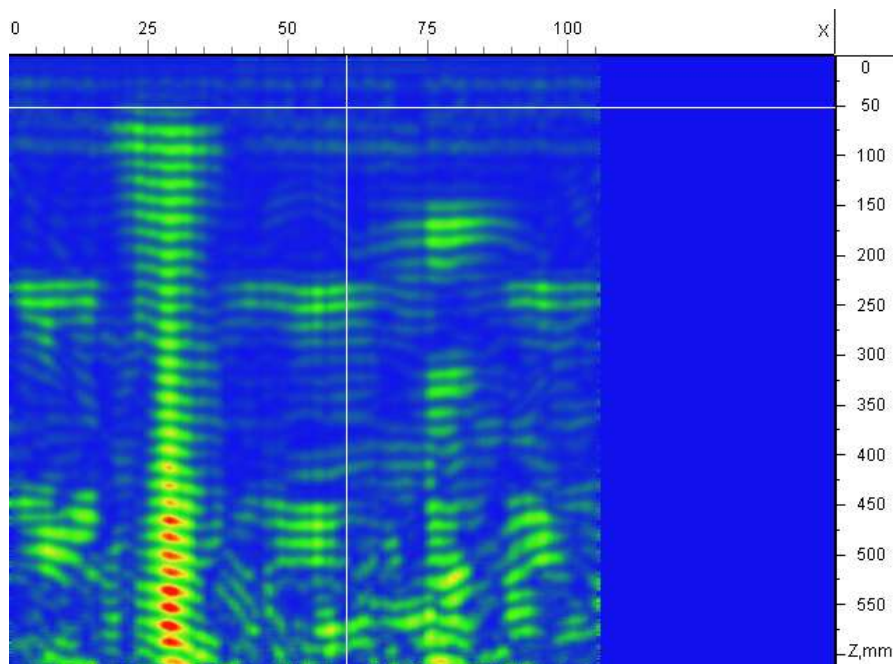
Ringningen kan förväntas vara ett säkert kännetecken på ytlig delaminering.

B2.2 Mätserie 2

50 olika mätprofiler ingår i denna serie. Huvudsakligen har varje konfiguration av mätinstrumentet provats i tre profiler på varje block. En profil går i blockets långa mittlinje över de båda ingjutna cellplastskivorna och två profiler går tvärs provkropparnas långa riktning och är belägna rakt ovanför respektive ingjuten cellplastskiva, alltså i dessas längdriktning. Ljudhastighet för P-våg = 4500 m/s och för S-våg = 2700 m/s har antagits.

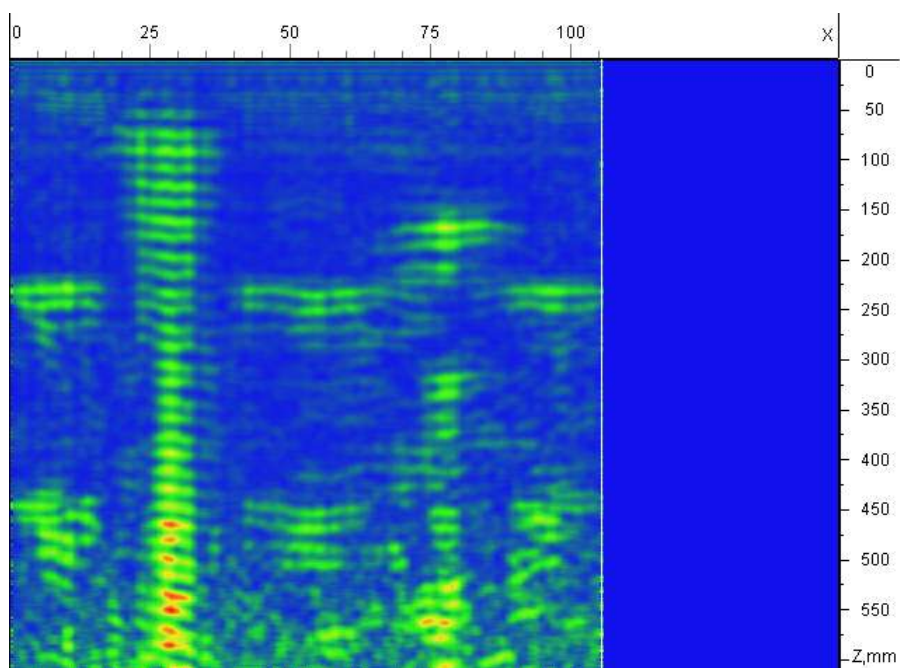
Nedan redovisas endast den längsgående mätlinjen i provkropp 1 sidan 1 (P1s1) för testmätningarna. Den avslutande serien med vad som tros vara optimal inställning av instrumentet redovisas fullt, fast bara för sidan 1 på de två provkropparna. Figurerna är kopierade från Planevisor-gränssnittet.

B2.2.1 Försök med puls 0.5 perioder, 100 V, 55 kHz, P1s1

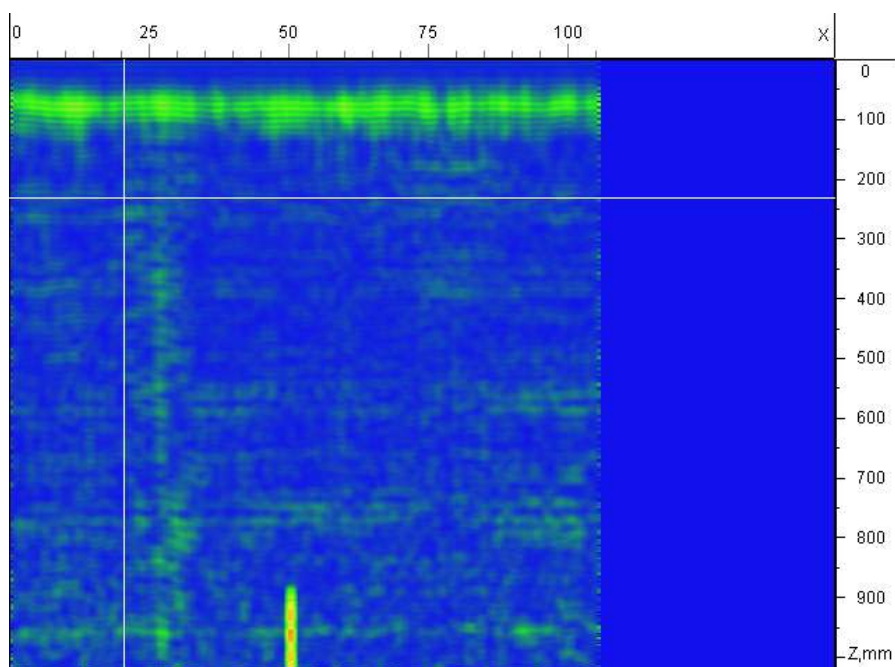


Figur B2.6 S-vågmätning 55 kHz, 0.5 perioder 100 V, P1s1

Tyvärr är motsvarande datafil för P-vågmätning med 0.5 perioder 55 kHz felaktig. Felet rubriceras "Range Check Error" och har med valt mätavstånd att göra. Man kan undvika det genom att inte använda omvandlingen till djup i meter utan presentera data mot tiden i stället. Mätningen kommer att upprepas vid tillfälle.

B2.2.1 Försök med puls 0.5 perioder, 100 V, 100 kHz

Figur B2.7 S-vågmätning 100 kHz, 0.5 perioder, 100 V, P1s1



Figur B2.8 P-vågmätning 100 kHz, 0.5 perioder, 100 V, P1s1

Ekona från de ingjutna cellplastskivorna är knappt skönjbara i P-vågdiagrammet.

B2.2.3 A-scanmätningar med olika frekvenser för P- och S-vågsökare

Då osäkerhet om lämpligaste frekvensval infann sig genomfördes en serie mätningar med sökarna stående på betongprovkroppen i en punkt där ingen cellplast fanns ingjuten. Ekostyrkan från provkroppens undersida antecknades för varje vald frekvens för var och en av de två sökarna. Det bör påpekas att den angivna frekvensen är den som bäst svarar mot den fyrkantvåg Monolith-instrumentet sänder ut till sökarens sändelement. Denna frekvens är inte nödvändigtvis samma som sändarelementen avger i form av mekaniska vågor. Avläsningar har gjorts på Monolith-instrumentets bildskärm. Resultatet återges i nedanstående tabell, siffrorna skall tolkas enligt kHz/Ampl. Maxvärdet indikerat med fetstil:

P: 15/1.5, 20/4.0, **25/4.5**, 30/4.0, 35/4.0, 40/4.0, 45/3.0, 50/3.0, 55/3.0, 60/2.5, 70/2.5, 85/2.5, 100/2.5, 125/2.5, 170/2.0, 250/1.0

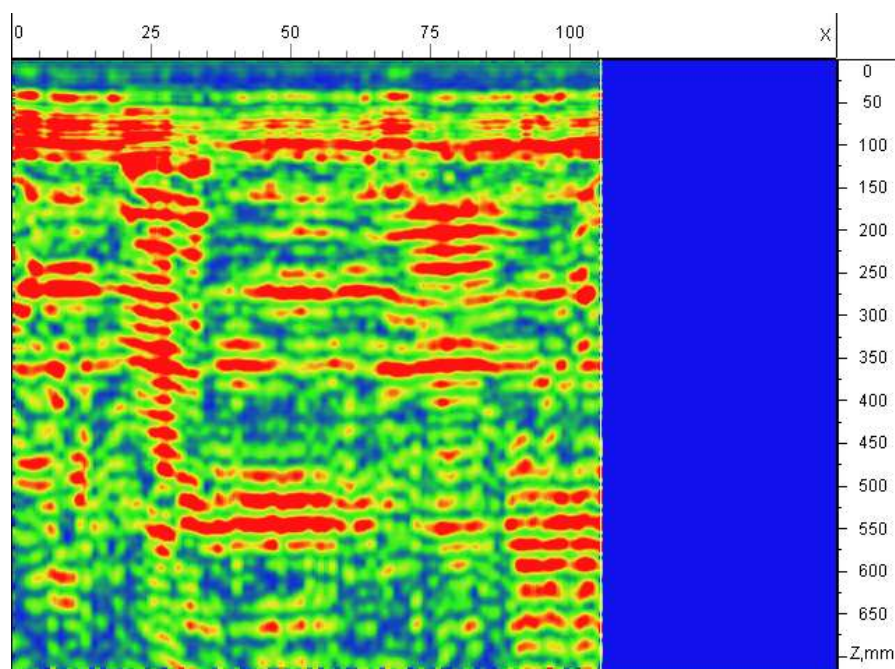
S: 15/0, 20/0, 25/3.0, 30/3.0, 35/3.0, **40/5.0**, 45/4.0, 50/4.0, 55/3.5, 60/3.5, 70/3.0, 85/2.5, 100/2.0, 125/1.5, 170/1.0, 250/0.5

Maxamplitud för P-arrayen erhålles för 25 kHz, men den signalen är lite distorderad. Vid 40 kHz har amplituden fallit men signalen ser bättre ut. S-arrayen presterar bäst för 40 kHz. Det verkar som att båda arrayerna presterar bäst för en 40 kHz puls med enelperiod.

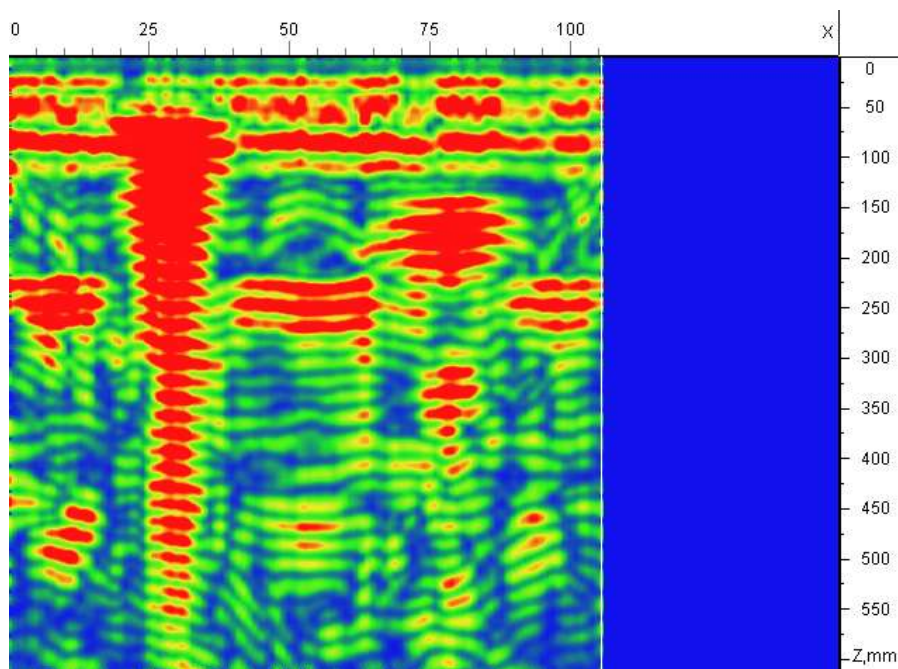
Efter detta försök mättes Block 1 Sida 1 med S- resp P-vågsarray, båda med frekvensen 40 kHz och enelperiod puls vid 100 Volt.

B2.2.3 Försök med puls helperperiod, 100 V, 40 kHz

Efter försök med A-scanmätningar mot betonblocket undersida för olika frekvensinställningar i Monolith-instrumentet drogs slutsatsen att 40 kHz nog var den optimala frekvensen för båda sökartyperna.



Figur B2.9 P-vågmätning 40 kHz, helperperiod, 100 V, P1s1



Figur B2.10 S-vågmätning 40 kHz, helperperiod, 100 V, P1s1

B2.2.4 Systematiska A-scanmätningar avseende frekvens och periodtal

Frekvens i sändpulsen

Då osäkerheten om bästa frekvensval inte minskat genomfördes förnyade A-scanmätningar i provkropp 2 (P2s1) i den punkt som utgör tyngdpunkt för den ingjutna cellplastskivan på djupet 140 mm. Instrumentet kan ställas in på 16 olika frekvenser och för var och en har registrerats ett A-scan, dels för P-vågsökaren, dels för S-vågsökaren.

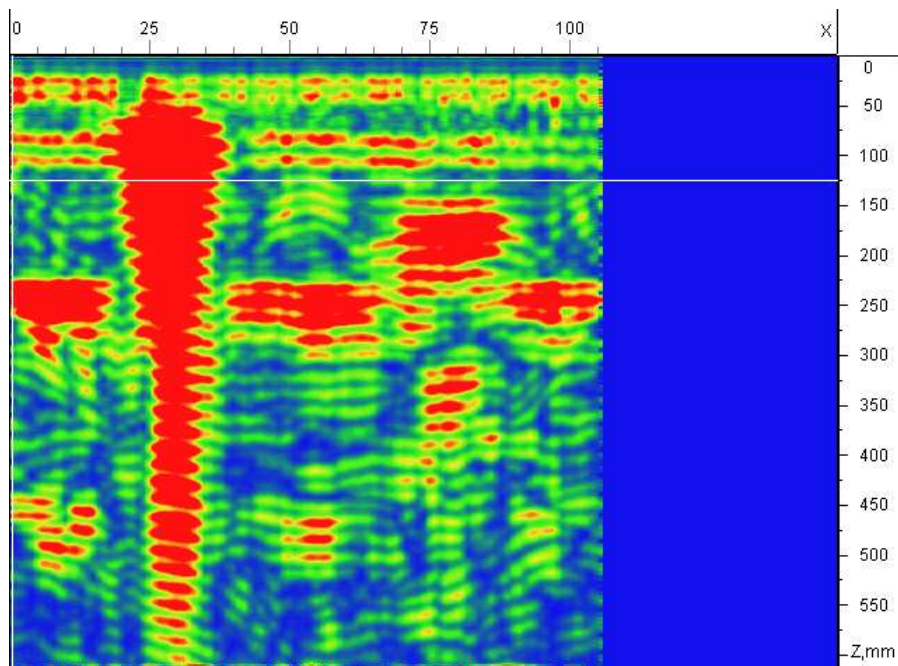
Resultatet visade att P-våg skall sändas med 100 kHz och S-våg med 55 kHz, vilket överensstämmer med instruktionerna från Germann Instruments. Ekonas läge är beroende av vilken frekvens man väljer, ju högre frekvens desto tidigare kommer ekot.

Periodtal i sändpulsen

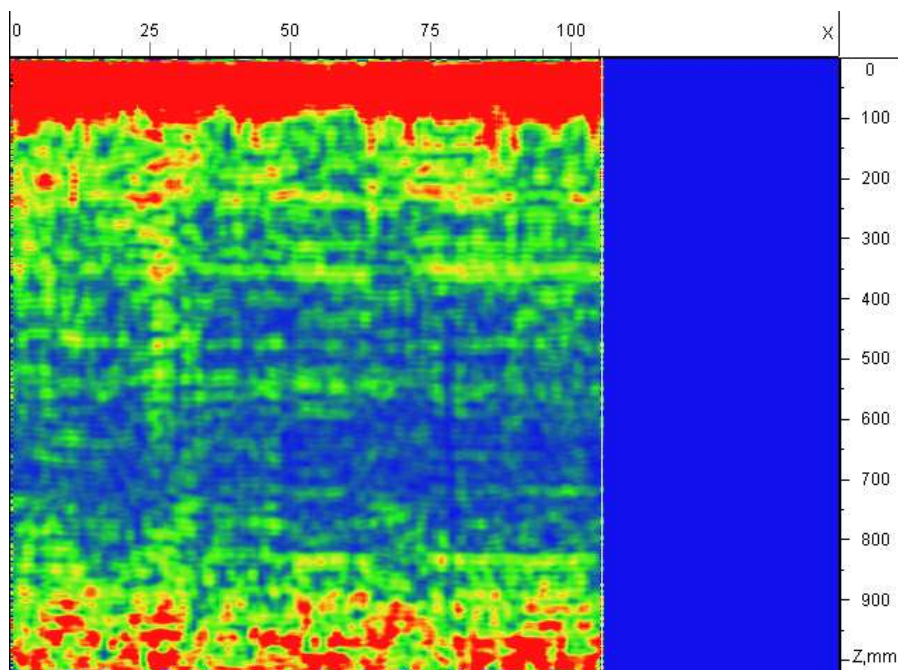
Som framgått kan antalet perioder i den alstrade fyrkantvågen väljas. Det tillgängliga området är 0.5 - 5 perioder i steg om 0.5 perioder och hela området testades för båda sökarna.

Resultatet visade att bäst resultat vid A-scanmätningar erhålles med en halvperiod. Det gäller för båda sökartyperna. Halvperiod ger markant lägre signalnivå, högre antal perioder ger upphov till sammansmältning av sändpuls och tidiga reflexer.

Optimal dämpning är 20 dB, ingen förstärkning ökande med tiden (TVG) behövs på de korta mätavstånden.

B2.2.5 Försök med helperperiod S-våg 55 resp P-våg 100 kHz, 100 V

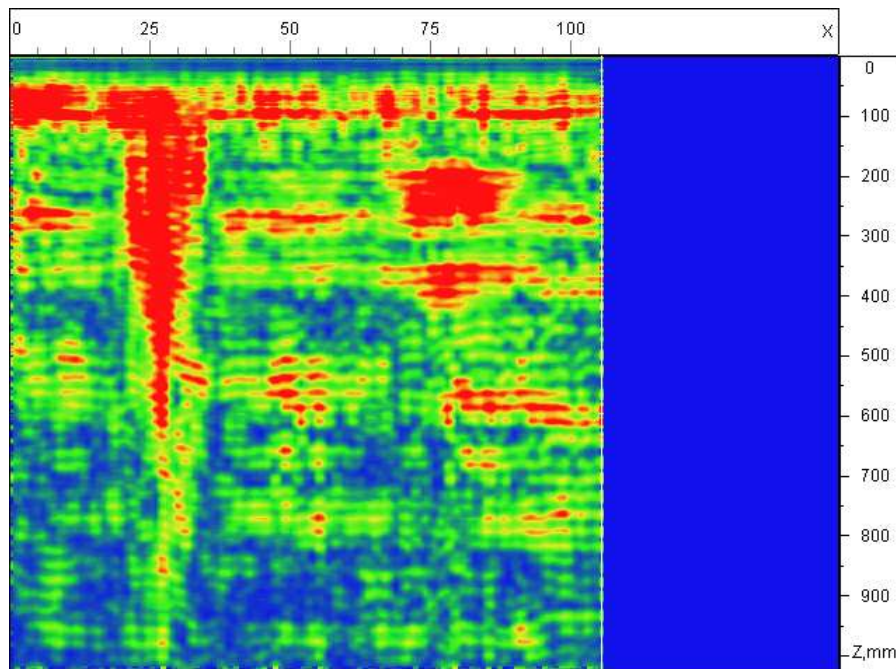
Figur B2.11 S-våg 55 kHz, helperperiod, 100 V, P1s1



Figur B2.12 P-våg 100 kHz, helperperiod, 100 V, P1s1

Det är uppenbart att A-scanmätningarna inte var representativa för B-scanmätningar. 100 kHz ger inga tydbara ekan från de ingjutna cellplastski-

vorna. Av detta skäl provades att använda samma frekvens för P-vågmätning som för S-vågmätning, dvs 55 kHz.



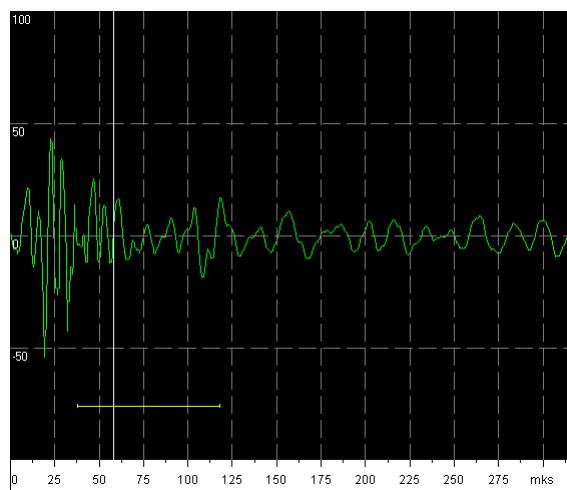
Figur B2.13 P-våg 55 kHz,elperiod, 100 V, P1s1

Resultatet visar att mätning med P-vågsökare och frekvensen 55 kHz,elperiod och 100 V ger bra resultat. Inte riktigt i klass med S-vågsökarens, t ex syns inget eko från det ingjutna röret i provkroppens mitt, mellan de ingjutna cellplastskivorna. Detta eko är däremot tydligt i S-vågbilden.

B2.2.6 Kontrollmätningar med A-scan mot provkroppens undersida

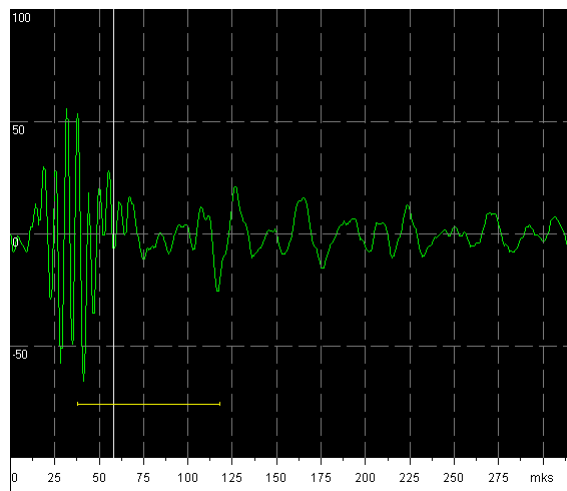
I denna upprepade A-scanmätning användes minsta möjliga mätområde, något som tidigare givit upphov till "Range Check Error", vilket förhindrar att datafilen öppnas av programmet Planevisor. Genom att skapa en konfiguration där hastigheten för de mekaniska vågorna inte utnyttjas, utan mätdata presenteras mot tid, kan man minska mätområdet till 320 us, vilket ger bättre upplösning av signalernas tidiga förlopp. Det visar sig att mätområdet 320 us svarar mot 320 samples, varför man kan dra slutsatsen att Monolith-instrumentet digitaliserar med 1 MSa/s. Detta har ännu inte undersökts systematiskt, dvs för andra mätområden.

Med denna konfiguration erhålles nedanstående A-scan



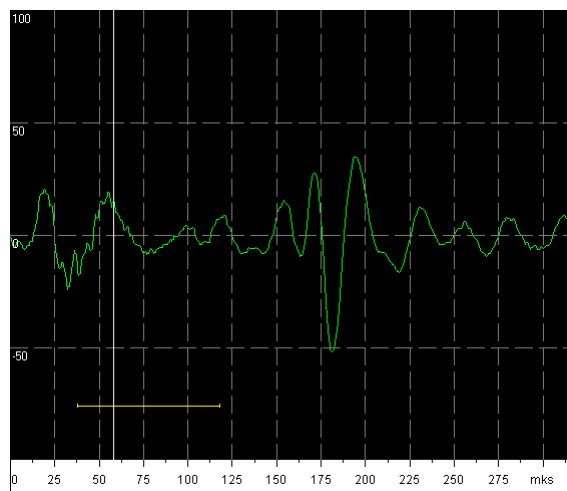
Figur B2.14 P-våg 100 kHz, helperiod, 100 V, P1s1

Reflexen från provkroppens undersida ligger vid 100 us (mks). Observera skillnaden i frekvensinnehåll mellan sändpuls och ekot från provets undersida. Sändpulsen kommer från ett fält med 3 x 4 sändarelement med 20 mm delning och mottas sidledes med ett mottagarfält med samma egenskaper. Därför blir den av mottagarfältet registrerade sändpulsens längd i förhållanden till den elektriska signal som samtidigt når alla sändarelement och därefter sänds ut. I den ortogonala riktningen, dvs ner i betongen, kommer alla pulser att löpa i fas, vilket är finessen med att ha fält av element.



Figur B2.15 P-våg 55 kHz

Det framgår tydligt att för denna uppställning är 55 kHz en bättre frekvens för P-vågsökaren än 100 kHz. Eftersom sändpulsen är längre kommer ekot att förskjutas mot senare tid och ligger nu vid 105 μ s.



Figur B2.16 S-våg 55 kHz

En intressant iakttagelse i S-vågdiagrammet ovan är att sändpulsen har lägre amplitud än det mottagna ekot vid 175 mikrosekunder. Man ser också att ekot ligger väsentligt senare än P-vågekot, vilket beror på att S-våghastigheten endast är 2700 m/s medan P-våghastigheten är 4500 m/s. Det framgår också tydligt att ekosignalen är starkare för S-våg än för P-våg vid 55 kHz.

B2.2.7 Slutsatser

Instrumentets kapacitet för 100 mätningar ligger strikt i intervallet [10,15] minuter när avståndet mellan mätpunkterna är 1 cm. Det är inga problem att lokalisera en delaminering på djupet 160 mm.

Försöken visar att det troligen är mest optimalt att driva både P-vågsökare och S-vågsökare med exciteringsfrekvensen 55 kHz. Detta resultat sammanfaller med resultatet från Kapitel 6: A-scanmätningar. Under dessa förhållanden ger S-vågsökaren en väsentligt renare bild än P-vågsökaren och man kan därför dra slutsatsen att det är S-vågorna i sig som gör A1220 instrumentet så framgångsrikt.

Övriga parametrar är ju identiska för försöken.

En inledande hypotes var att det är det stora antalet element i S-vågsökaren som gör att instrumentet är så framgångsrikt. I så fall skulle man ha kunnat tillverka en P-vågsökare med liknande konfiguration, vilken skulle kunna ha släpats över betongytan. Därmed skulle en enklare scanner kunna ha använts. Det är således inte möjligt eftersom det är skjuvvågorna som ger det goda resultatet. För att utnyttja S-vågsökarens goda egenskaper måste en scanner med Z-axel användas, så att sökaren kan lyftas och sänkas mot betongytan.

Bilaga 3: C-scan mätningar med treaxlig scanner

B3.1 Tillvägagångssätt vid datainsamling

Endast sökarna till instrumentet A1220 Monolith har använts i detta försök. Dessa har varit kopplade till ett datoriserat mät- och styrsystem som flyttat sökarna över provytorna.

Sökarna har exciterats av en 400 V haversine-funktion. Det är en halvperiod sinus av frekvensen 55 kHz med en sådan startfas och DC-komponent att signalen ser ut som en gaussfunktion. Denna signal har alstrats i en vågformsgenerator kopplad till styrdatorn. Utsignalen från vågformsgeneratoren har gått till en effektförstärkare för ultraljud innan den kopplats till sökarens sändarelement.

Mottagarelementens utsignal her letts till en laddningsförstärkare och därefter genom ett bandpassfilter centrerat kring 55 kHz till en AD-omvandlare som med samplingshastigheten 300 kSa/s digitaliserat signalen.

Sökaren har placerats i provkroppens övre vänstra hörn och därefter har mätcykeln startat. Denna går ut på att sökaren pressas ner mot betongytan av den pneumatiska cylindern, varefter pulsen sänds ut och ekona registreras. Därefter lyfts sökaren upp och styrsystemet flyttar sökaren till nästa mätposition. Sökområdet är uppdelat i 70 x 110 mätpunkter. När 70 mätpunkter i en rad har mätts upp byter systemet sökdiriktning efter att sökaren flyttats till nästa rad.

På båda provkropparna satt det tejpremsor med cm-markeringar på sidan 2 när scanner-mätningarna genomfördes, dvs delytorna P1s2 respektive P2s2. Remsorna användes vid de manuella B-scan-mätningarna för att få jämförbara mätsträckor. Dessa tejpremsor påverkar främst mätningarna med skjuvvåg-sökare. Det kan förklaras med att den erforderliga tangentiella friktionen minskar och skjuvvågssensorernas förmåga att överföra energi till betongen, liksom deras känslighet därför blir lägre. Kompressionsvågmätningarna har inte påverkats i samma utsträckning.

B3.2 Datahantering

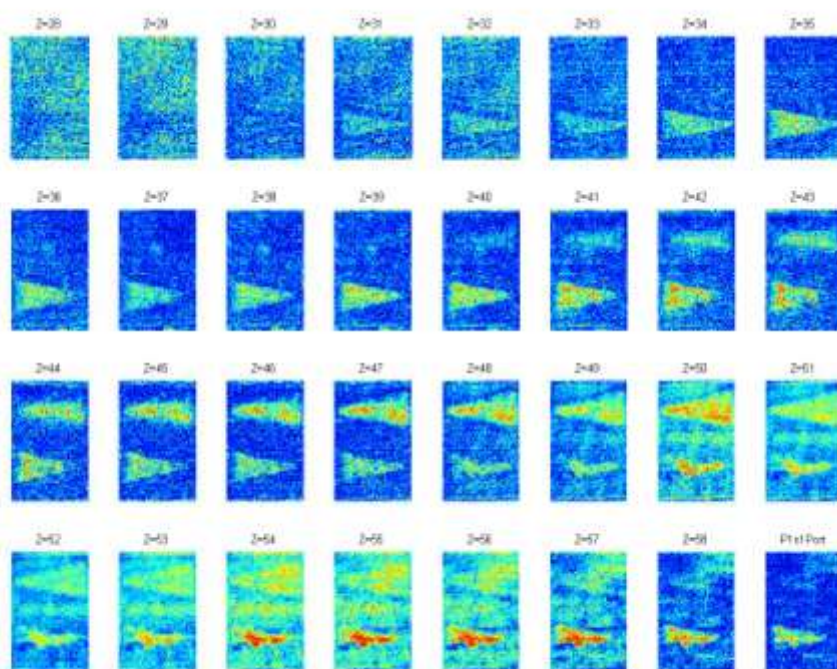
Data lagras i den dator som styr systemet. Därefter överförs data till en kontorsdator. Den första åtgärden avser editering av mätdata så att alla raders data kommer på samma håll, dvs så att data ordnas i en konventionell matris.

B3.3 Datapresentation

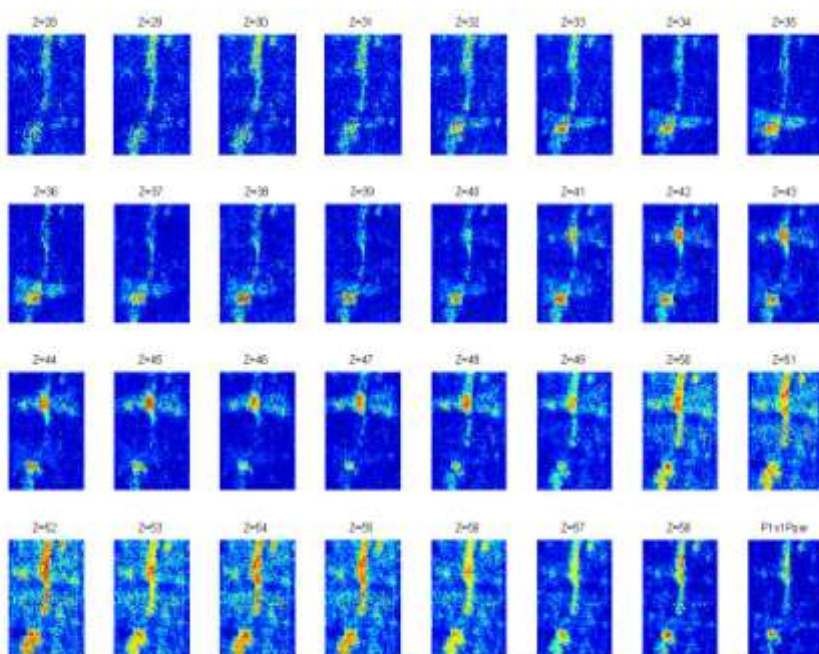
Därefter kan data presenteras, vilket sker med hjälp av enkla programavsnitt skrivna i MATLAB-kod. Dessa programavsnitt omfattar presentation av mosaiker med olika horisontalplan genom den tredimensionella datakuben. Även vertikalplan kan framställas, vilket precis motsvarar de profiler man får vid en

B-scanprofilering. Horisontalplanen är de mest illustrativa och en serie sådana för varje testfall presenteras nedan. Dessa plan representerar ett sample i var och en av de 70 x 110 mätsignalerna. Inga meningsfulla data förekommer före sample 28 eller efter sample 59, varför de 32 horisontalplanen däremellan valts ut för presentation i form av mosaikkartor, se Figurur 3.1 – 3.16.

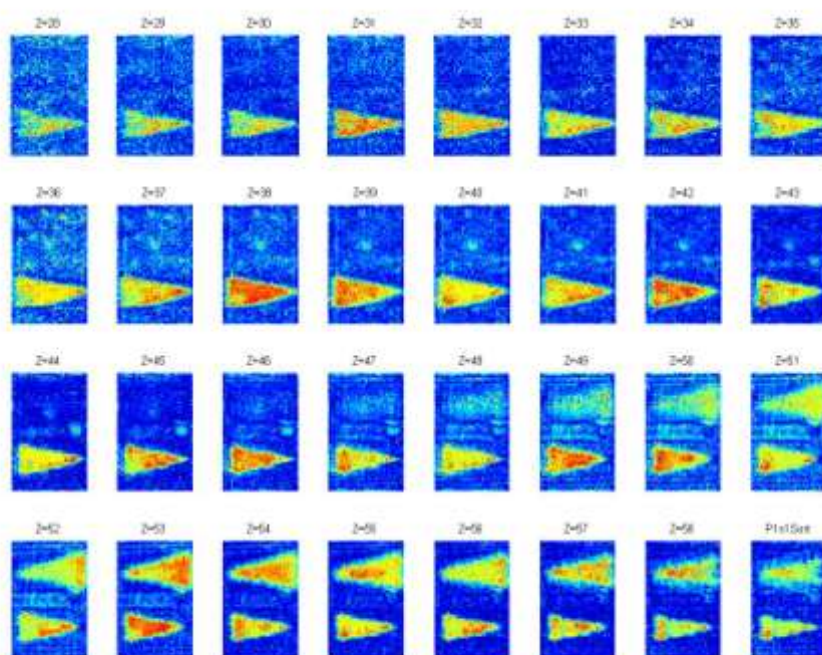
Utöver dessa mosaikkartor har också enskilda mosaiker valts ut för presentation i större skala för att detaljer skall framträda. Det finns tre sådana bilder för var och en av de fyra delytorna P1s1, P1s2, P2s1 och P2s2, se Figurur 3.17 – 3.27. Från varje delyta visas avbildningen av de två cellplastskivorna som simulerar delaminering samt det ingjutna stålröret.



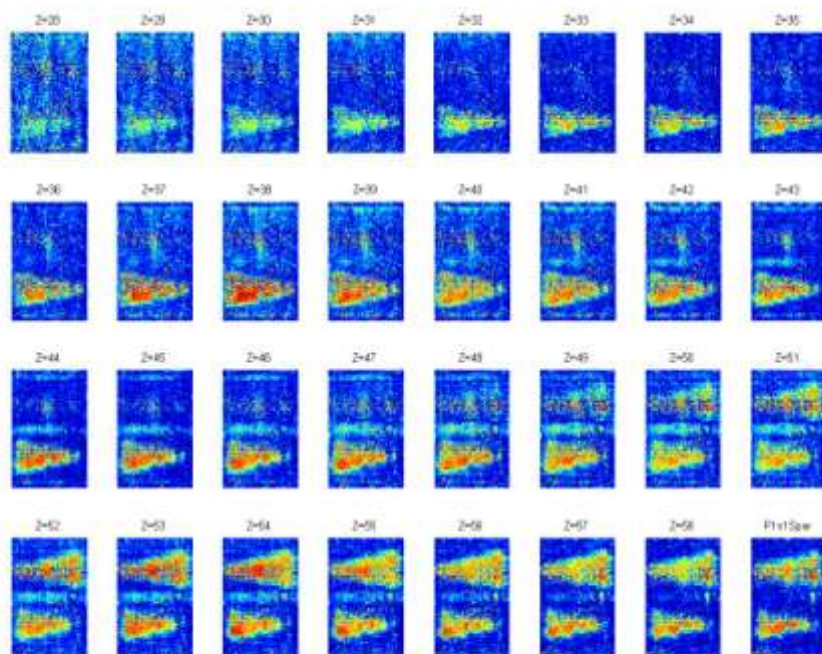
Figur B3.1 Horisontella utsnitt på nivåerna 28 – 59 samples för testfall P1s1Port



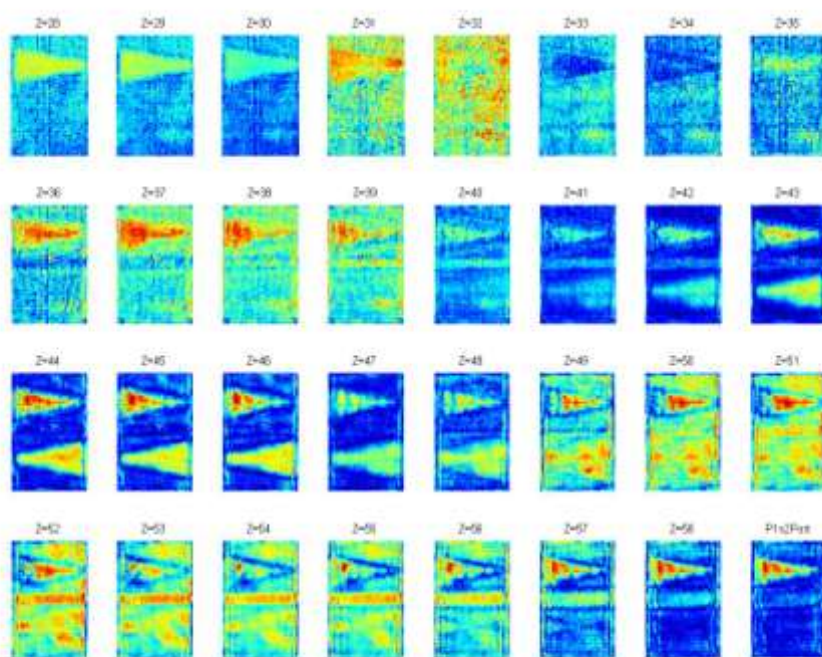
Figur B3.2 Horisontella utsnitt på nivåerna 28 – 59 samples för testfall P1s1Ppar



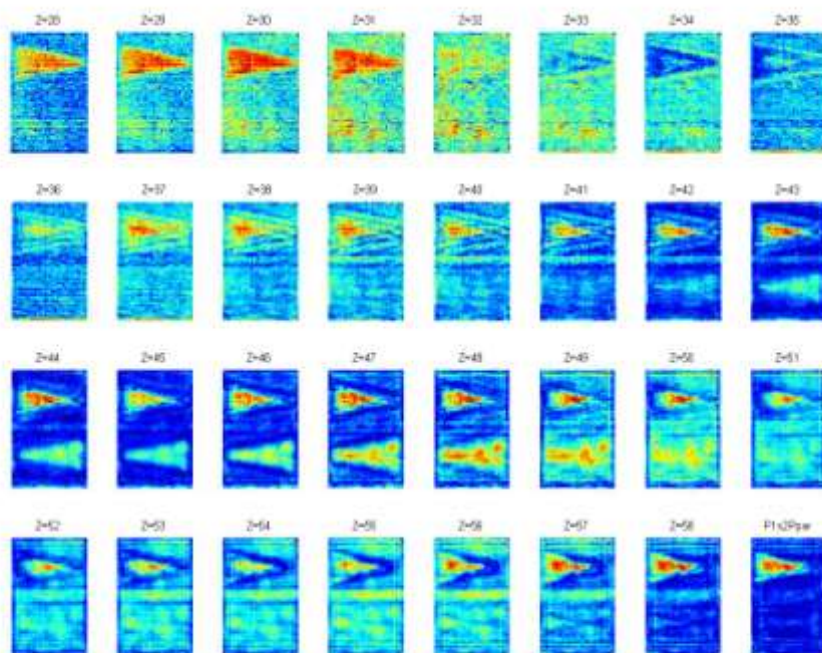
Figur B3.3 Horisontella utsnitt på nivåerna 28 – 59 samples för testfall P1s1Sort



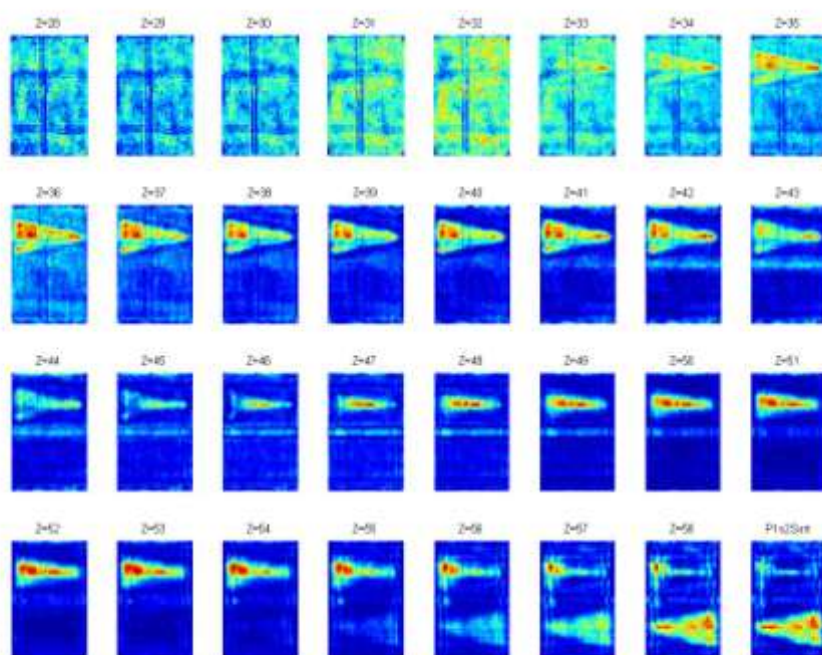
Figur B3.4 Horisontella utsnitt på nivåerna 28 – 59 samples för testfall P1s1Spar



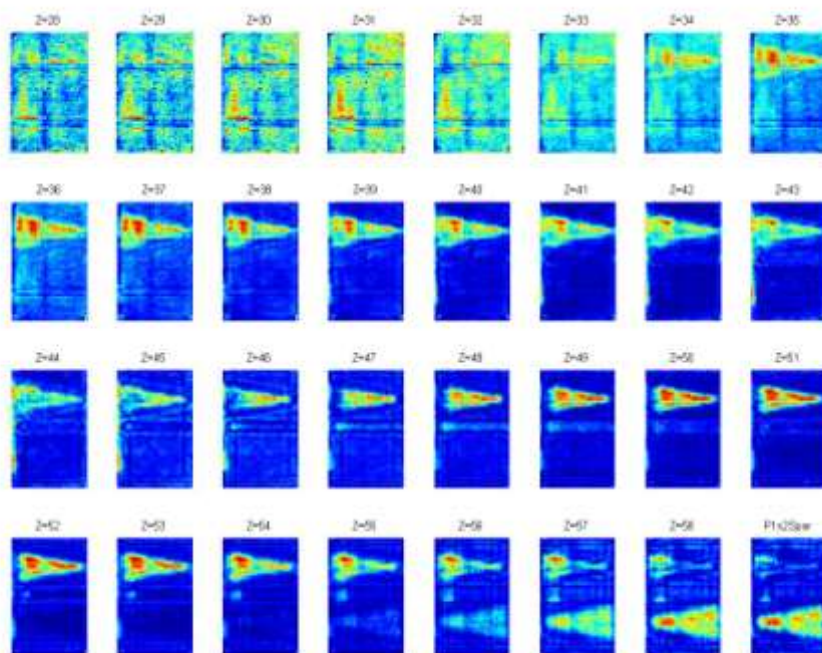
Figur B3.5 Horisontella utsnitt på nivåerna 28 – 59 samples för testfall P1s2Port



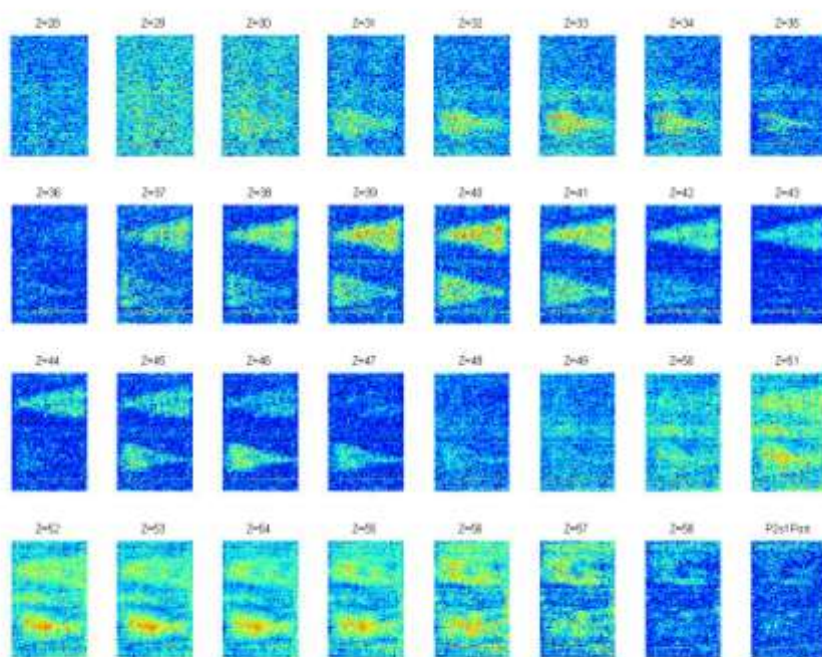
Figur B3.6 Horisontella utsnitt på nivåerna 28 – 59 samples för testfall P1s2Ppar



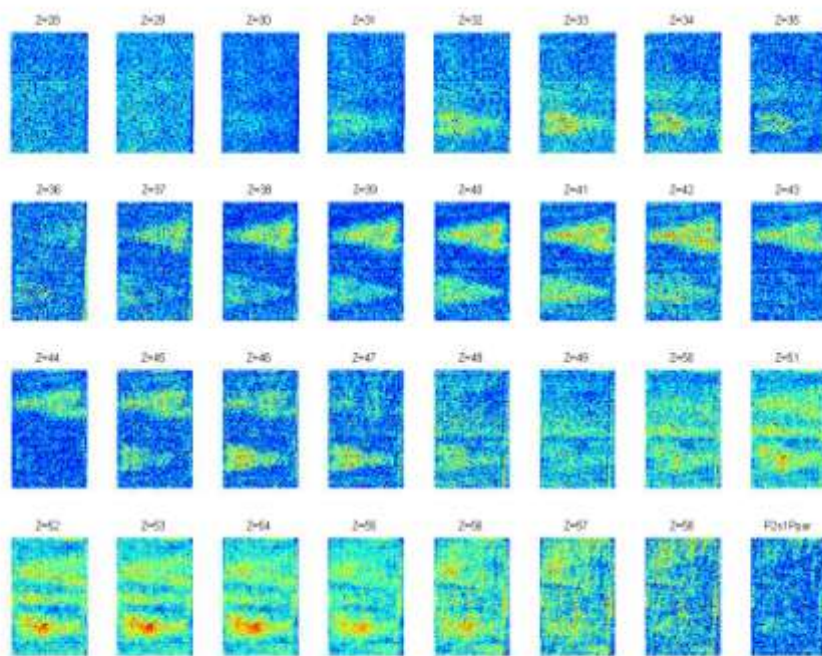
Figur B3.7 Horisontella utsnitt på nivåerna 28 – 59 samples för testfall P1s2Sort



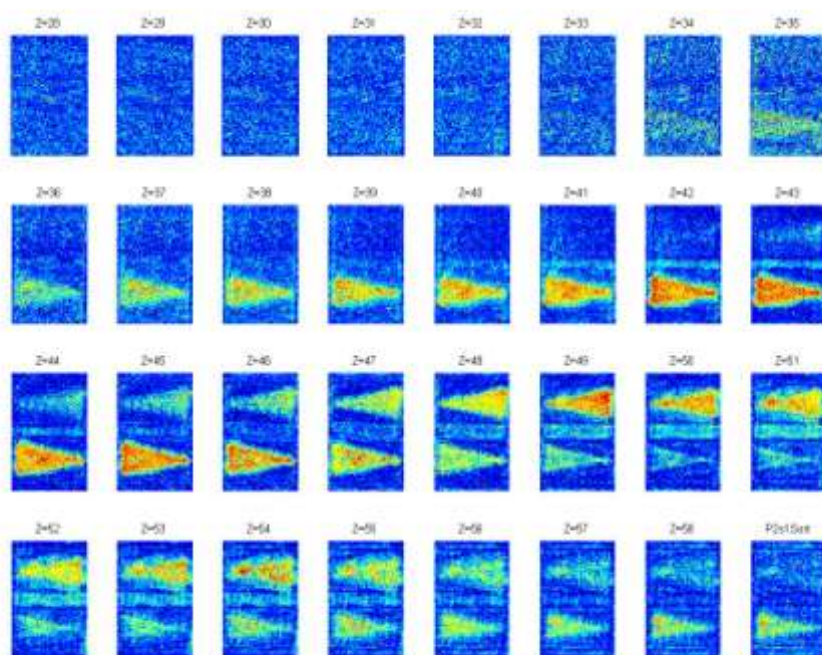
Figur B3.8 Horisontella utsnitt på nivåerna 28 – 59 samples för testfall P1s2Spar



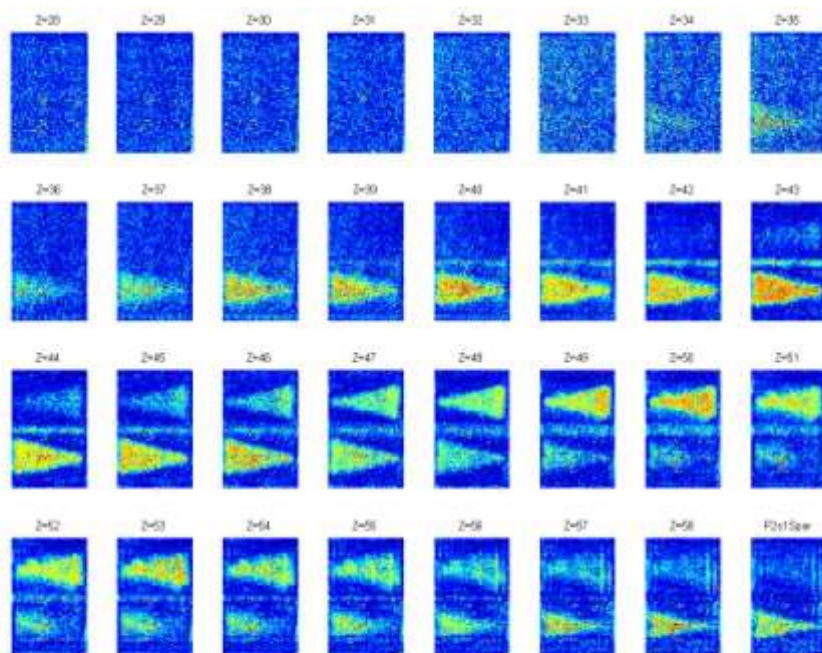
Figur B3.9 Horisontella utsnitt på nivåerna 28 – 59 samples för testfall P2s1Port



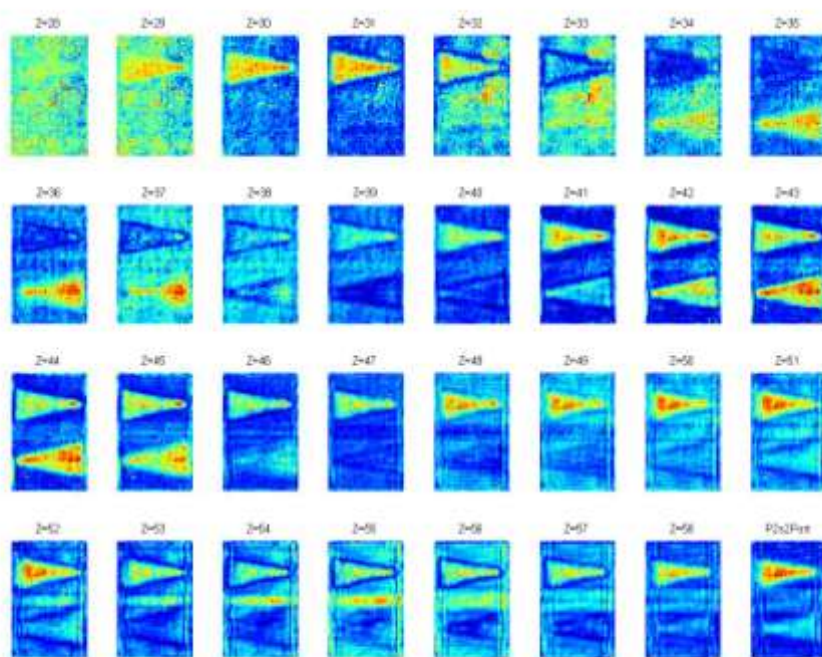
Figur B3.10 Horisontella utsnitt på nivåerna 28 – 59 samples för testfall P2s1Ppar



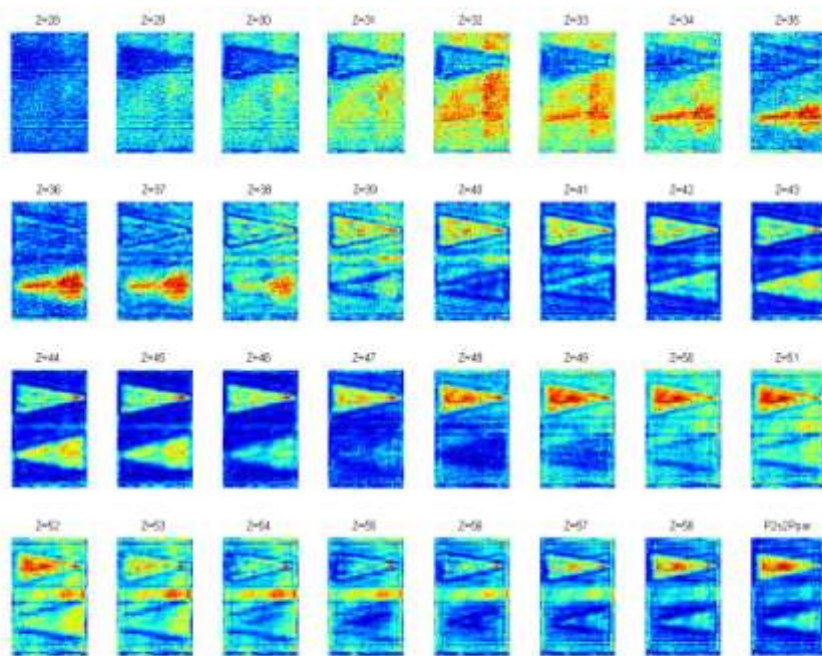
Figur B3.11 Horisontella utsnitt på nivåerna 28 – 59 samples för testfall P2s1Sort



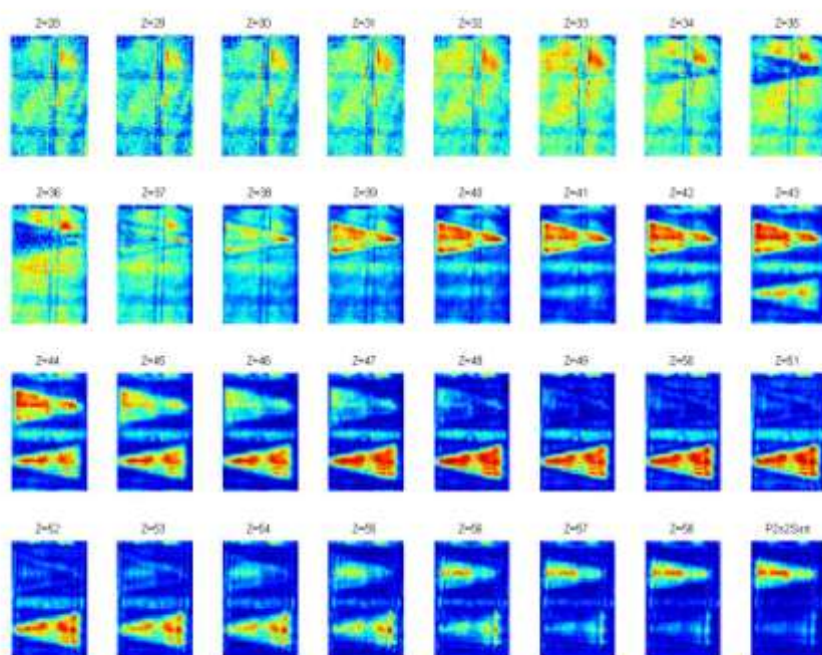
Figur B3.12 Horisontella utsnitt på nivåerna 28 – 59 samples för testfall P2s1Saw



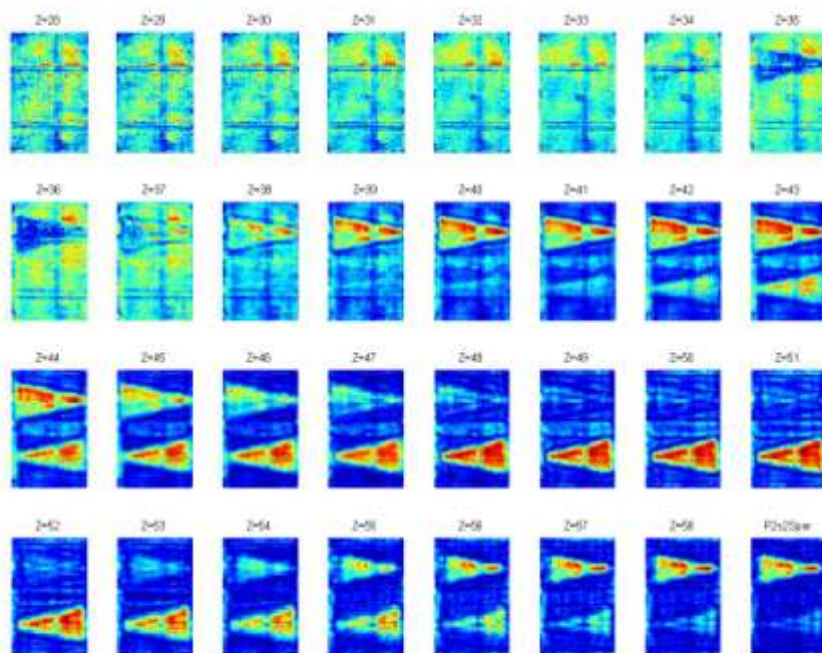
Figur B3.13 Horisontella utsnitt på nivåerna 28 – 59 samples för testfall P2s2Port



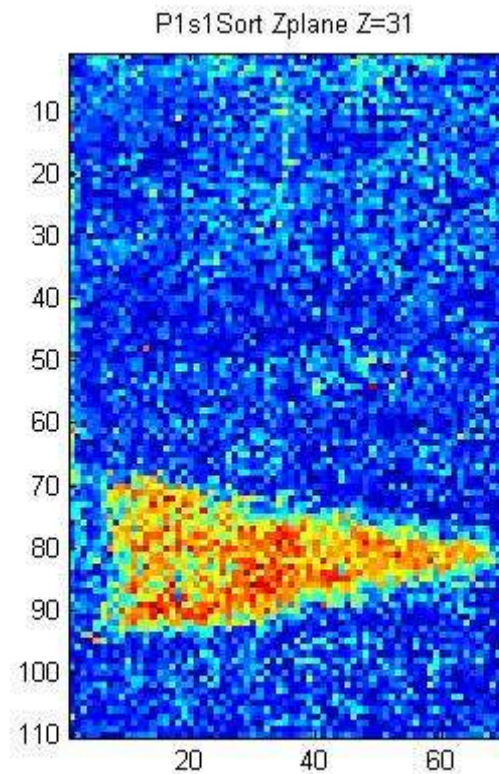
Figur B3.14 Horisontella utsnitt på nivåerna 28 – 59 samples för testfall P2s2Ppar



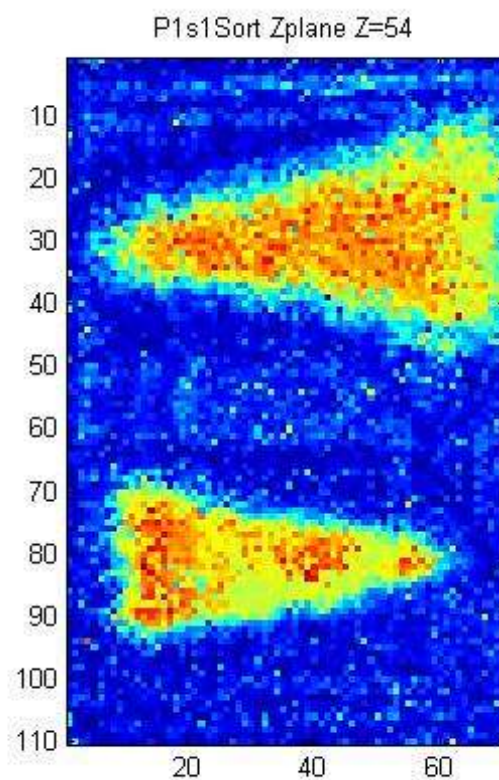
Figur B3.15 Horisontella utsnitt på nivåerna 28 – 59 samples för testfall P2s2Sort



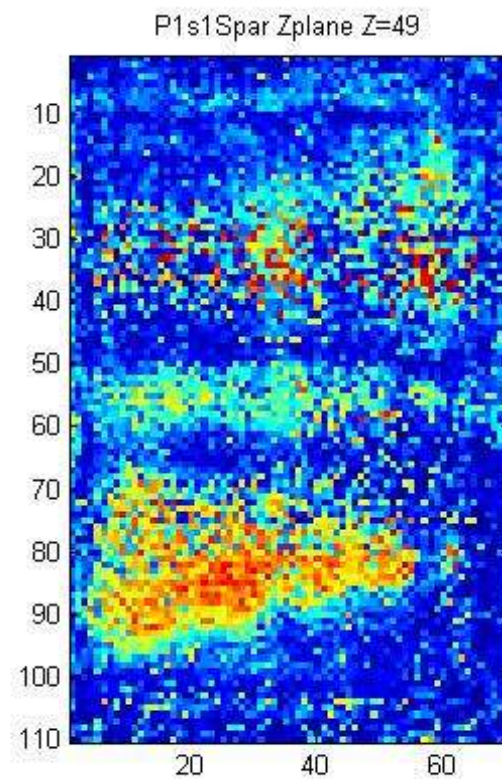
Figur B3.16 Horisontella utsnitt på nivåerna 28 – 59 samples för testfall P2s2Saw



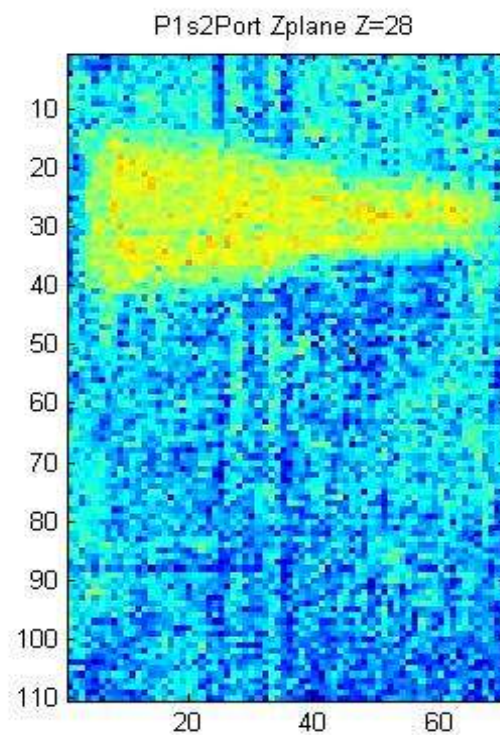
Figur B3.17 Delyta P1s1: Den bästa avbildningen av den simulerade delamineringen på 40 mm djup (nedre objektet) finns i horisontalplan 31 och är gjord med ortogonal orientering av skjuvvågsökaren.



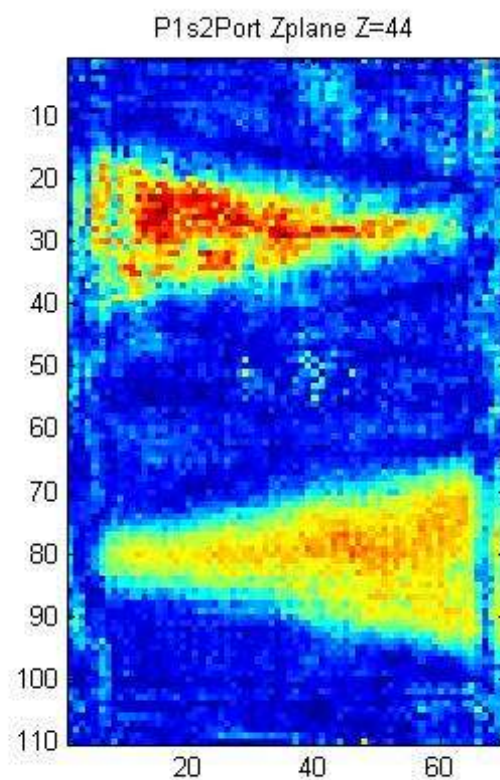
Figur B3.18 Delyta P1s1: Den bästa avbildningen av den simulerade delamineringen på 160 mm djup (övre objektet) finns i horisontalplan 54 och är gjord med ortogonal orientering av skjuvvågsökaren.



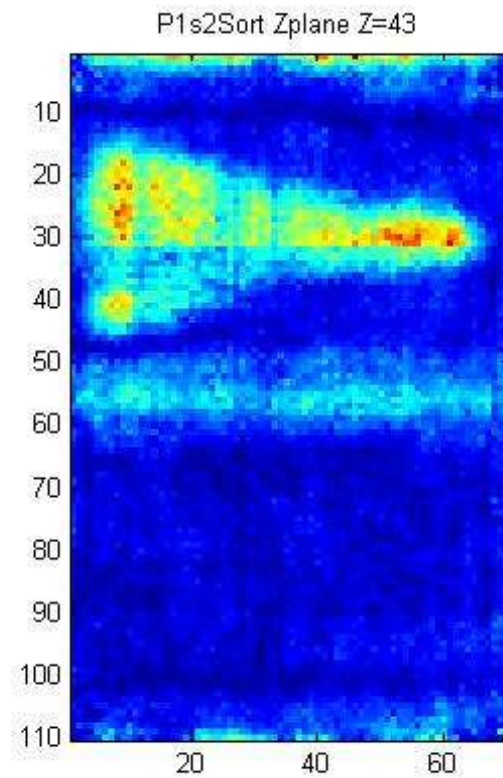
Figur B3.19 Delyta P1s1: Den bästa avbildningen av det ingjutna röret (mit-
ten) signalplan 49 med parallell orientering av skjuvvågsöka-
ren.



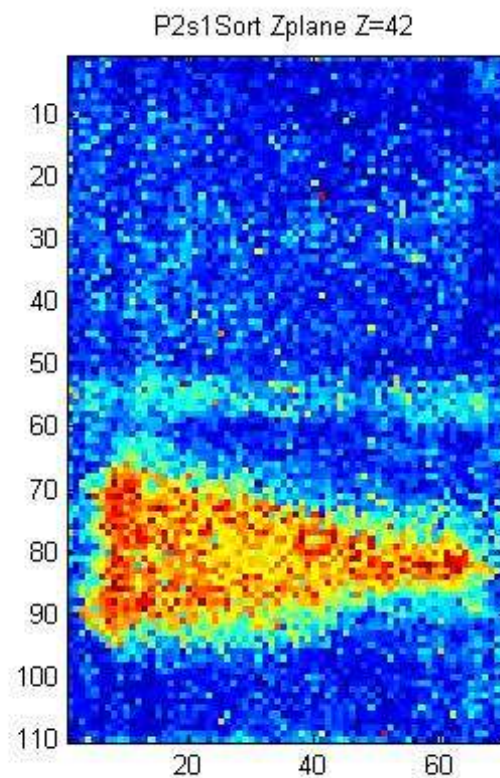
Figur B3.20 Delyta P1s2: Den bästa avbildningen av den simulerade delamineringen på 60 mm djup (övre objektet) finns i horisontalplan 28 och är gjord med ortogonal orientering av kompressionsvågssökaren.



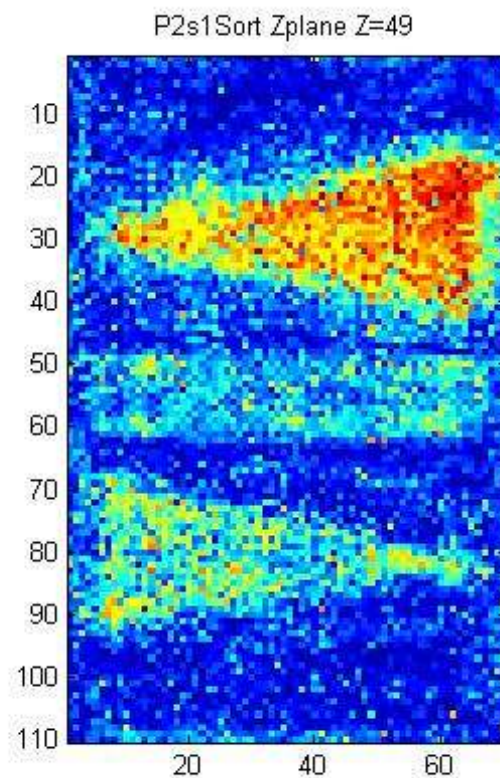
Figurur B3.21 Delyta P1s2: Den bästa avbildningen av den simulerade delamineringen på 180 mm djup (nedre objektet) finns i horisontalplan 44 och är gjord med ortogonal orientering av kompressionsvågsökaren.



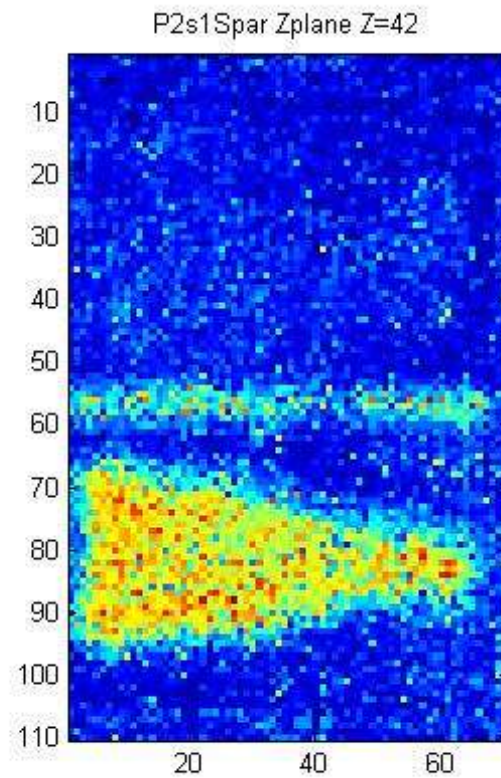
Figurur B3.22 Delyta P1s2: Den bästa avbildningen av det ingjutna röret (mitten) finns i horisontalplan 43 med ortogonal orientering av skjuvvågsökaren.



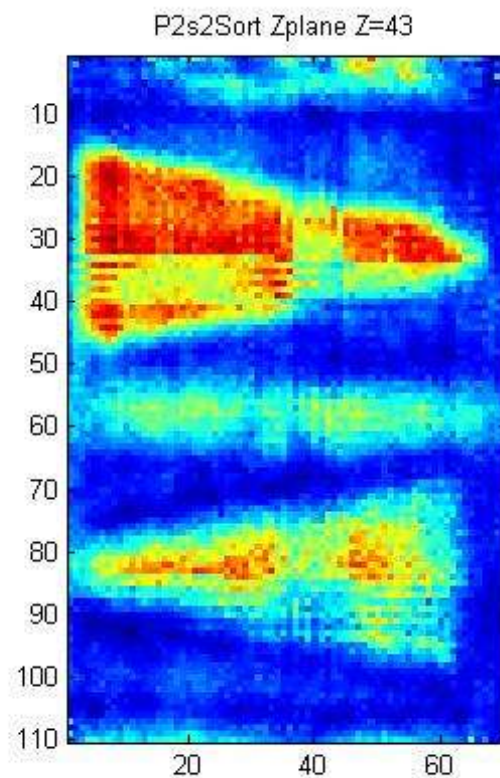
Figurur B3.23 Delyta P2s1: Den bästa avbildningen av den simulerade delamineringen på 100 mm djup (nedre objektet) finns i horisontalplan 42 och är gjord med ortogonal orientering av skjuvvågsökaren. Även det ingjutna röret är skarpt avbildat i detta horisontalplan.



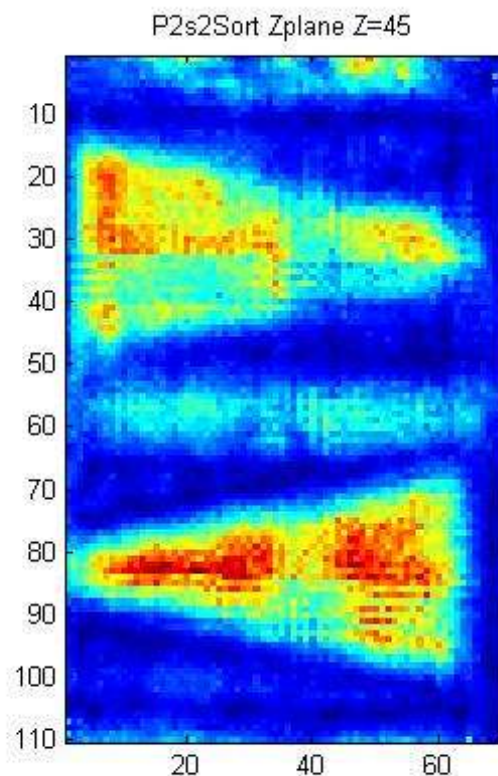
Figurur B3.24 Delyta P2s1: Den bästa avbildningen av den simulerade delamineringen på 140 mm djup (övre objektet) finns i horisontalplan 49 och är gjord med ortogonal orientering av skjuvståsöaren.



Figurur B3.25 Delyta P2s1: Den bästa avbildningen av det ingjutna röret (mitten) finns i horisontalplan 42 med parallell orientering av skjuvvågsökaren.



Figurur B3.26 Delyta P2s2: Den bästa avbildningen av den simulerade delamineringen på 80 mm djup (övre objektet) finns i horisontalplan 43 och är gjord med ortogonal orientering av skjuvstångsökaren. Denna bild är också den bästa av det ingjutna röret (mitten).



Figurur B3.27 Delyta P2s2: Den bästa avbildningen av den simulerade delamineringen på 180 mm djup (nedre objektet) finns i horisontalplan 45 och är gjord med ortogonal orientering av skjuvvågsökaren. Det är intressant att se med vilken skärpa konturen tecknas trots att objektet är beläget på ett djup av 180 mm.

B3.4 Animering

Det finns också rutiner som ger möjlighet att långsamt sjunka ner genom betongprovkroppen i en animering, eller glida genom matrisen i vertikalplan.

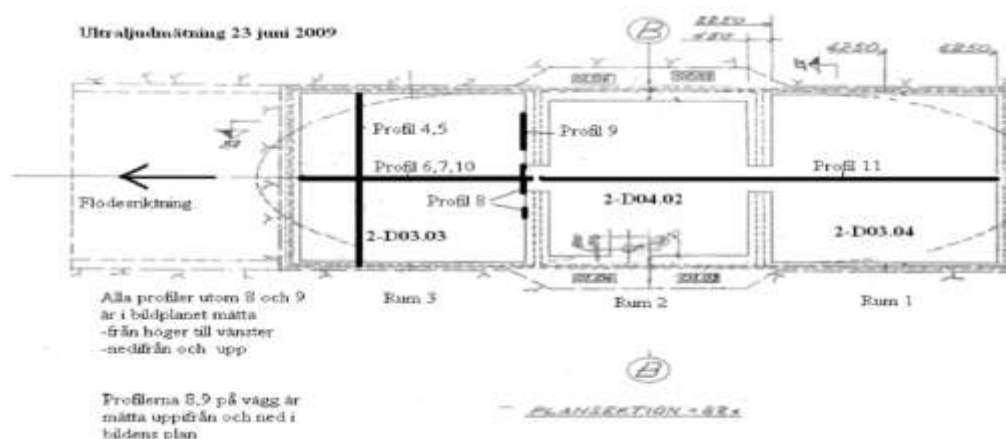
B3.5 Slutsatser

Horisontalplanbilderna ger en anmärkningsvärt skarp bild av de olika simulerade delamineringarnas omfattning, trots stort djup i flera fall. Skillnaden mellan kompressionsvågsökare och skjuvvågsökare är inte så stor i dessa C-scanbilder som antytts i A-scan och B-scanmätningarna. Dock kan slutsatsen dras att avbildningen med skjuvvågssökare med sökarens längdriktning ortogonal mot sökriktningen tycks ge de bästa resultaten.

Systematisk avsökning med skjuvvågsökare på en scanner kan ge goda bilder av delaminering och djupa horisontella sprickor och hålrum i betong.

Bilaga 4: Mätningar i Ringhals

Inom projektet gavs det möjlighet att göra en mätning i det delaminerade golvet ovanför utloppskanalen för kylvatten i Ringhals 2. På golven i rum 1 och 3 hade delaminering kunnat konstateras genom bomknackning med hammare. Nedan visas hur profilerna är belägna. Endast profilerna 4, 6 och 11 kommer att presenteras. Texten är huvudsakligen en kopia av mättrapporten.



Figur B4.1 Mätprofilernas läge i Ringhals 2. Rummen är belägna rakt ovanför utsläppschanalen med strömningsriktning enligt pilen.

B4.1 Mätningarnas utförande

Ultraljudmätning med torrkoppling är ett relativt nytt mätförfarande som gör ultraljudmetoden lätthanterlig därigenom att man inte behöver arrangera våtkoppling mellan sensorer och testföremål. Detta kan vara mycket besvärligt på vertikala ytor. Det aktuella instrumentet använder dels skjuvvågor vid 55 kHz dels kompressionsvågor vid 100 kHz. Eftersom man kan välja om sändpulsens skall bestå av $\frac{1}{2}$, 1 eller $1\frac{1}{2}$ cykler av respektive frekvens kommer mätningarna att vara bredbandiga, dvs de innehåller ett spektrum av frekvenser, bredare ju kortare sändpulsens är.

Metodens främsta tillämpning är att ge information om den strukturella uppbyggnaden av betong eller annorlunda uttryck tvärsnittets geometri. Både principiellt och resultatmässigt påminner metoden om georadar. Den viktigaste skillnaden är att georadarantennen inte behöver vara i fysisk kontakt med testföremålet. Metoden ger inte någon information om förhållanden bortom en luftfylld spricka som georadar har förmågan att göra. I stället anses metoden kunna ge information bortom tät armering, något som georadar inte klarar av.

En horisontell spricka på ringa djup har vi sett ger upphov till ringning, men om den befinner sig på större djup kommer de vanliga fenomenen som uppträder vid delaminering inte att göra sig påminda, t ex bomknackning funge-

rar inte. Sådana sprickor, även mycket tunna, kan detekteras med den aktuella ultraljudmetoden.

I det aktuella fallet misstänktes delaminering och det var därför en intressant studie att se hur A1220 skulle indikera sådana.

Varje mätning är utförd som en profil, dvs som en serie punktmätningar på rad. Genom att presentera dessa punktmätningar i ett tvådimensionellt diagram med tid (ms) på vertikala axeln och avstånd (m) längs den undersökta ytan på den horisontella axeln, erhålles en bild som påminner om ett vertikalt snitt genom konstruktionen. Med vertikalt skall då förstås samma riktning som den undersökta ytans normal. Det är därför självklart att bildkvaliteten blir beroende av hur många mätpunkter som registreras, vilket också påverkar tidåtgången och därmed kostnaden.

Mätningar utfördes bl a i de tre rummen omedelbart ovanför utloppstunneln. Det måste framhållas att dessa mätningar är de första operatören gör utanför laboratoriemiljö. Det bör därför kunna tillkomma väsentligt ökad kvalitet i mätningarna efterhand som erfarenhet byggs upp. Samtidigt är resultaten ett tecken på att A1220 är ett relativt lättanvänt instrument.

I de aktuella utrymmena var betongytan täckt av ett tjockt lager "betongdamm". Ett sådant lager gör att torrkopplingen mellan sökaren och betongen kan bli bristfällig. Ju fastare yta desto mer energi går in i betongen och desto djupare delaminering kan lokaliseras.

B4.2 Resultat

Vissa profiler har trunkerats i djupled, så att de utgör en enhetlig presentation av förhållandena i de tre rummen ovanför utloppstunneln. Så är fallet för profil 4 respektive profil 11+6 i denna rapportdel.

Profil 4 är belägen i det rum som ligger längst nedströms relativt strömningsriktningen för vattnet i utloppstunneln eller längst i väster. Den är belägen på golvet, 1.3 m från den vägg som ligger i "teknisk" väster, samtidigt längst nedströms. Sett i vattnets strömningsriktning löper profil 4 från vänster till höger alternativt från söder mot norr. Profil 4 är vinkelrätt orienterad relativt Profilerna 6+11. Profilerna utgör således ett kors. Kärnkraftverkets reaktor 2 är inte orienterad exakt i väderstrecken. För att ändå kunna använda väderstrecken som referensriktningar har man infört begreppet "tekniskt" väderstreck.

För att på ett överskådligt sätt visa resultatet från rummen ovanför utloppstunneln har profilerna 6 och 11 fogats samman och presenteras i samma skala som profil 4. Profilerna 6+11 går genom mittaxeln, på golvet i de tre rummen ovanför utloppstunneln. Som kombinationen redovisas löper x-axeln från uppströms mot nedströms eller i västlig riktning. Profil 11 är längst uppströms. Profilerna 11 och 6 möts i valvet mellan mellanrummet och det västliga rummet.

Alla profiler går från vägg till vägg med c:a 10 - 15 cm mellanrum mellan första och sista mätpunkterna i profilerna och väggen. Detta orsakas av att betonggolvet är mycket ojämnt intill väggen och av att sensorns mitt används som lägesreferens. Mätningarna separeras av ett avstånd om 5 cm. 1 cm ger bättre profiler men tidsskäl tvingade till en glesare mätning.

Profilerna visar inga ihållande reflexer i horisontell riktning. Detta skulle vara tecknet på en lagergräns i betongen, t ex två olika gjutningar eller ett ihållande horisontellt sprickplan. Däremot uppträder det fenomen som i georadardiagram kallas ringning. Det orsakas av att det nära antennen finns ett starkt reflekterande objekt som får den utsända energin att studsas fram och tillbaka mellan mottagaren och objektet. *Mycket snart uppdagades att detta fenomen kunde kopplas till delaminering tidigare identifierad med hammarslag (bomknackning).* Det var alltså, enligt ovan, fråga om ganska ytligt belägen delaminering. Denna ytliga, horisontella delaminering tycks blockera djupare nedträngning i betongen. Skjuvvågor går nämligen ej genom luft eller vatten.

Då ringningsfenomenet är svårt att kvantifiera visuellt har signalen omvandlats till envelopp, en operation som är något mer sofistikerad än rikriktning av växelström. Därefter har enveloppen integrerats längs tidaxeln. Värdet av denna integral för varje mätpunkt får bli ett index, vilket visar hur stark ringningen är. Detta kan då hypotetiskt sättas i relation till delamineringen. Detaljerna för detta fenomen är dock okända. Man kan emellertid anta att en tunn delaminering på ringa djup kan få samma effekt som en större delamineringspricka på större djup om delamineringen uttrycks som ett index. Ju tjockare en delaminerad skiva är desto högre blir skivans resonansfrekvens eftersom den blir styvare, ju större skivan är desto lägre blir resonansfrekvensen eftersom skivan blir vekare. Dessa resonansfenomen ligger uppenbart inom den undersökta metodens bandbredd och man borde således skulle kunna söka mer information om delamineringsens egenskaper i ringningens spektrala egenskaper.

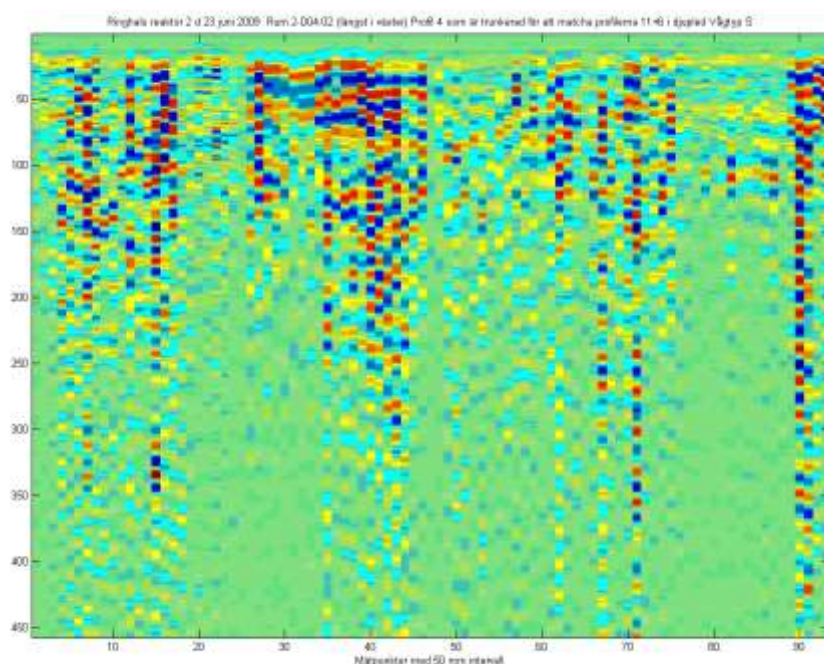
I profil 11 identifierades områden med delaminering som inte tidigare var kända. Riktigheten av detta kunde konstateras med efterföljande hammarslag.

Försök med 200V sändpuls (Profil 7) gav ingen signifikant skillnad visuellt mot mätning med 100 V sändpuls (Profil 6).

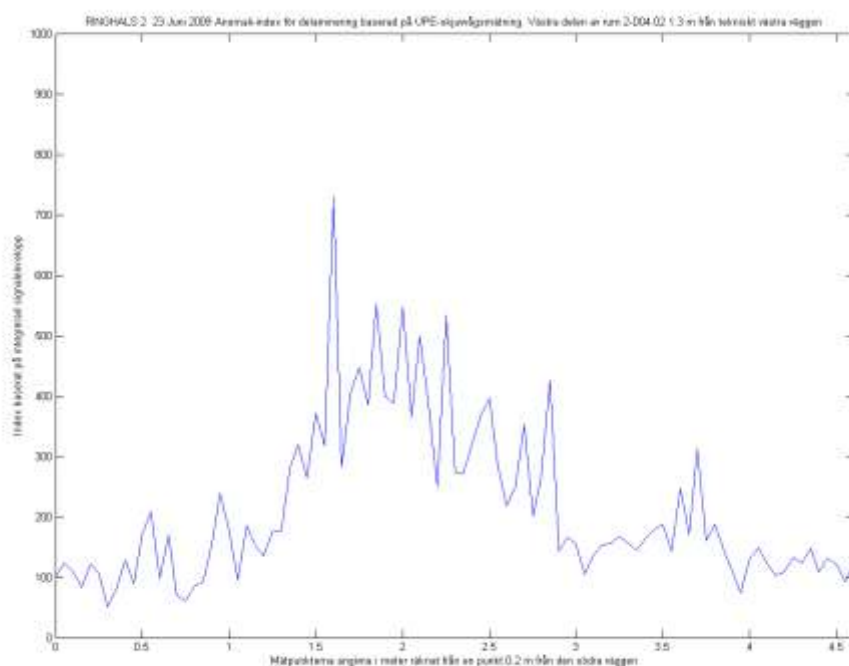
Försöket med genomlysning av väggen (Profil 8,9) gav endast det resultatet att i ett parti där betongytan var särskilt jämn - slutet av profil 8, de 5 sista signalerna - gick det att få en reflex från motstående väggyta. Instrumentet var inställt på att ge en djupskala som motsvarade en skjuvvågshastighet uppgående till 2700 m/s. Då det därigenom erhöles tjockleksvärdet överensstämde med väggens tjocklek 0.46 m kunde man konstatera att den valda skjuvvågshastigheten var representativ för den friska betongen. Profil 9 som mättes mot en reparation på motstående väggyta gav inga ekon från reparationen.

De korsande mätprofilerna 11+6 respektive 4 presenteras nedan med beräknat ringningsindex.

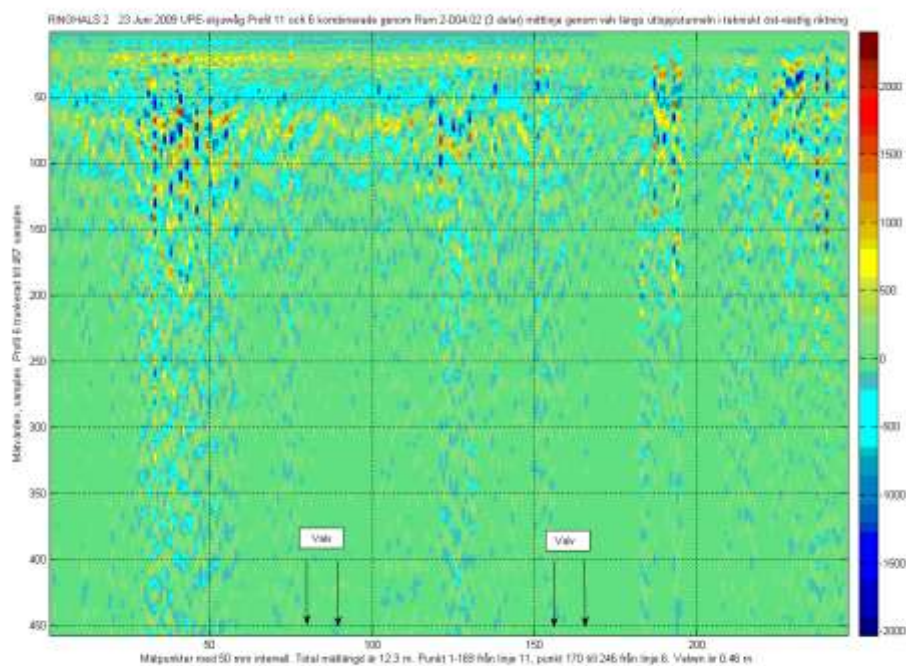
Ringningen uppträder i Figururernas ovankant och klingar av när man följer förloppet nedåt i Figururerna. Indexberäkningen tydliggör ringningsförloppets intensitet längs den horisontella mätsträckan, horisontalaxeln i diagrammet. Bilderna baseras på B-scan-mätning, dvs ett stort antal punktmätningar efter varandra på en linje. Ringningen kan pågå under längre tid än vad som motsvaras av den tid det tar för ultraljudspulsen att gå fram och åter genom betongkonstruktionen. Under ringningsförloppet maskeras andra ekon från betongen.



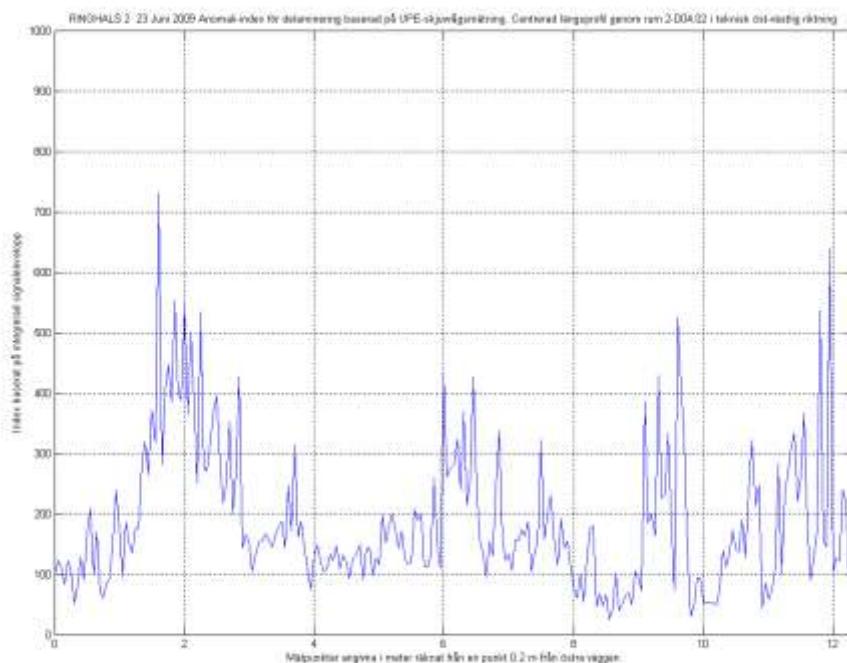
Figur B4.2 Profil 4 löpande från söder till norr i det västligaste rummet. På vertikala axeln anges samplenummer proportionellt mot djup i betongen.



Figur B4.3 Ringnings / Delamineringsindex för profil 4. X-axel graderad i meter från söder



Figur B4.4 Profil 11+6 löpande i västlig riktning genom de båda valven mellan de tre rummen



Figur B4.5 Ringnings / Delamineringsindex för profilerna 11+6. X-axeln graderad i meter från öster.

Det förefaller vara så att A1220 instrumentet med framgång kan indikera ytlig delaminering genom det ringningsförlopp sådan delaminering skapar. Djupare delaminering kommer att ge upphov till konventionella ekon, vilket visas genom försöken med betongprovkropparna. Ringningsförloppet kan räknas om till ett mer lätttydligt index genom några enkla matematiska operationer. Dessa operationer kan inte sägas vara vedertagna utan är snabbt ihopkomna i syfte att kunna presentera en komplex funktion på ett enkelt sätt. Som redan antytts är det sannolikt att det finns information i ringningsförloppet av en natur som påminner om de fenomen man utnyttjar inom metodiken impact-echo, vilken bygger på stående vågor i tunna skikt.

B4.3 Slutsats

Resultaten från Ringhals visar att ytlig delaminering ger upphov till ringning, liksom den gjorde i laboratorieförsöken. Indexberäkningarna visar att man på ett enkelt sätt kan förenkla ringningen till en enda parameter som låter sig plottas som en funktion av position längs mätlinjen. Därmed kan de delaminerade områdena lokaliseras objektivt.

I de aktuella utrymmena var betongytan täckt av ett tjockt lager "betongdamm". Ett sådant lager gör att torrkopplingen mellan sökaren och betongen kan bli bristfällig. Ju fastare yta desto mer energi går in i betongen och desto djupare delaminering kan lokaliseras.

Bilaga 5: Avsökning med Vattenstråle

Transmissionsmetoden som redovisats i litteraturstudien (D2) kan inte användas vid undersökning av betongytor med vattenstråle eftersom endast en sida av betongen är åtkomlig. Den teknik som undersökts i detta projekt går ut på att man vid vattenstrålens anslag mot betongytan exciterar en svängningsrörelse och att denna rörelse ger upphov till ljudvågor som fortplantar sig upp längs strålen. Ljudvågorna kan därefter detekteras med en mottagare i munstycket.

B5.1 Konstruktion av munstycke

För att ljudvågorna skall kunna röra sig upp längs strålen och kunna detekteras fordras det att strålen är sammanhängande. Enligt tillgänglig litteratur är det turbulens som gör att en vattenstråle bryts sönder. Vattnets rörelse måste alltså bli så laminär som möjligt när det lämnar munstycket. Kan vattenströmmen göras laminär redan inne i munstycket underlättas dessutom att registrera ljudvågorna som kommer upp längs strålen, då munstycket alstrar mindre störande ljud i mottagaren.



Figur B5.1 Sprutmunstycke med sensor i form av en 200 kHz transducer

Munstycket är sammansatt av standardiserade rördelar i rostfritt. Inuti vattenvägen har anordningar gjorts för att åstadkomma så laminärt flöde som möjligt samt för att mottagaren, en 200 kHz transducer, inte skall störa vattenflödet och skapa egenbrus. Även en standardhydrofon, Brüel&Kjaer 8104, har använts i försöken.

Flödet genom munstycket har i dessa experiment varit 1.0 l/s. Vattentrycket har varit 4.2 bar, vilket är det vattentryck som fanns i ledningarna i V-husets källare vid försökstillfällena. Strålens diameter är 15 mm och vattenpartiklarnas hastighet vid anslaget således 4.5 m/s.

Avståndet mellan munstycket och träffområdet har varit 5 - 10 cm i försöken. Nästa försöksomgång avser att studera överföringens avståndsberoende,

Registreringarna har antingen gjorts genom att spela in givarsignaler med hjälp av ljudkortet i en laptop eller genom att använda en Dynamic Signal Analyzer - DSA. Detta är ett instrument som innehåller en styrbar oscillator och två inkanaler. Syftet med instrumentet är att jämföra två signaler och beskriva deras samspel. En typisk mätning görs så att flera hundra diskreta frekvenser stegas igenom. För varje frekvens plottas relationen mellan de två signalerna. I det här fallet har oscillatoren kopplats till kanal 1 och den studerade signalen till kanal 2 i nästan alla försök.

I huvudsak används DSA-mätningarna för att presentera spektrum där amplitud plottas mot frekvens. Registreringarna med ljudkortet används främst för att plotta spektrogram i vilka frekvensinnehållet presenteras som funktion av tid. Samplingsfrekvensen har varit ljudkortets högsta - 44100 Sa/s.



Figur B5.2 I försöken använd mätutrustning. DSA till vänster under oscilloskopet.

B5.2 Använda försöksuppställningar

Tre försöksuppställningar har använts: Stråle mot betongplatta för att studera alstrat frekvensspektrum, stråle mot vibrerande plexiglasskiva för att studera transporten av ljudvågor upp längs vattenstrålen samt stråle mot ett litet stålstånd i samma syfte som stråle mot betongplattan, men ett försök att undvika de resonansfrekvenser betongplattan visade.

B5.2.1 Strålmunstycke riktat mot 400 mm cirkulär betongplatta med tjocklek 60 mm.

På betongplattans undersida är en fästordning för en accelerometer fastklistrad. Accelerometern kommer från PCB, har frekvensområdet 1-2000 Hz och har en stark utsignal jämfört med vanliga accelerometrar. Accelerome-

terns känslighet ligger bättre än -3dB under korrekt nivå i det angivna intervallet. Den blir inte okänslig utanför intervallet men signalnivån blir felaktig



Figur B5.3 400 mm betongplattor med tjockleken 60 mm.

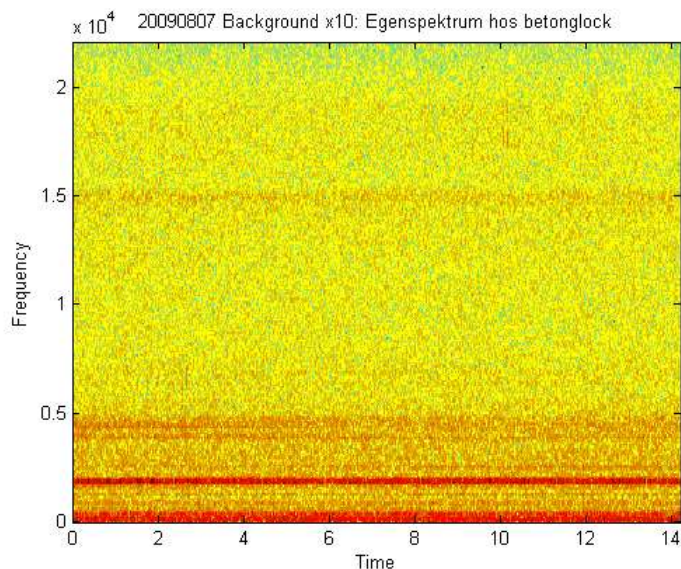
Vid försöken har betongplattan varit upphängd i tre snören inuti en upp och nedvänd murbruksbalja. Baljan är till för att begränsa vattenstänk vid försöken. Baljan har ett 8 cm hål i botten genom vilket strålen riktas.



Figur B5.4 Försöksuppställning med stänkskydd

B5.2.1.1 Bakgrundsmätningar

I detta försök görs en inspelning utan något vattenflöde. Syftet är att ta reda på de frekvenser som förekommer i omgivningen och påverkar försöket. Försöken är utförda i betongstationen i V-husets källare. Mängden roterande installationer är riklig och det förekommer också varierande elektriska fält.

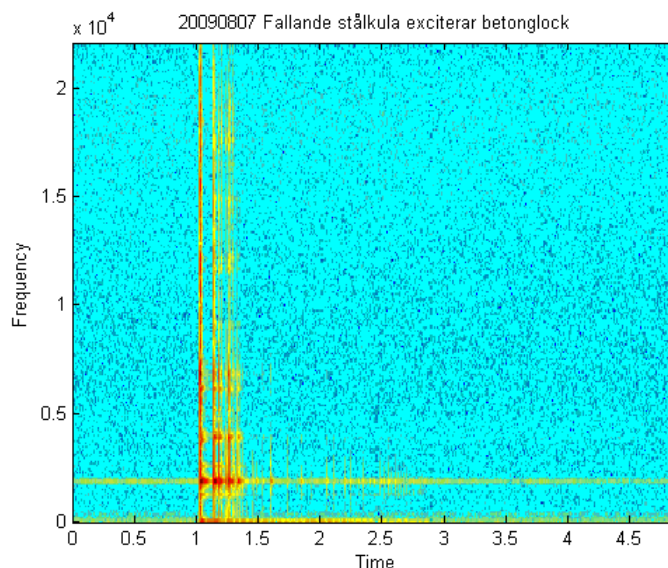


Figur B5.5 Bakgrundsspektrum med dominerande ton vid 1809 Hz. Tid i s.

Resultatet visar att det finns frekvenskomponenter upp till 5 kHz, med en svag antydning vid 15 kHz. De dominerande frekvensbanden är under 500 Hz och en skarp linje vid 1809 Hz.

B5.2.1.2 Betongplattans egenfrekvenser

För att närmare undersöka orsaken till den dominerande frekvensen vid 1809 Hz utfördes ett impulsexcitieringsförsök på betongplattan när vattenstrålen var avstängd. En stålkula fick falla mot betongytan och signalspektrum registrerades.



Figur B5.6 Impulsexcitering av betongplattans egenfrekvenser med fallande stålkula. Tid i s.

Som framgår av försöket genererar stålkulans fall ett spektrum som under kort tid sträcker sig från 0 till 22 kHz. Eftersom kulan släpptes ned genom hålet i plastbaljan uppstår flera anslag i snabb följd. Inte oväntat finner man att grundmoden för betongplattan är 1809 Hz och att det därefter kommer åtminstone två högre moder med frekvenserna 3600 resp. 5400 Hz. Man ser också att 1809 Hz vibrationen även exciteras av bakgrundvibrationerna, liksom i föregående mätning. Det framgår därigenom att signalen förekommer före och efter anslagen av stålkulan.

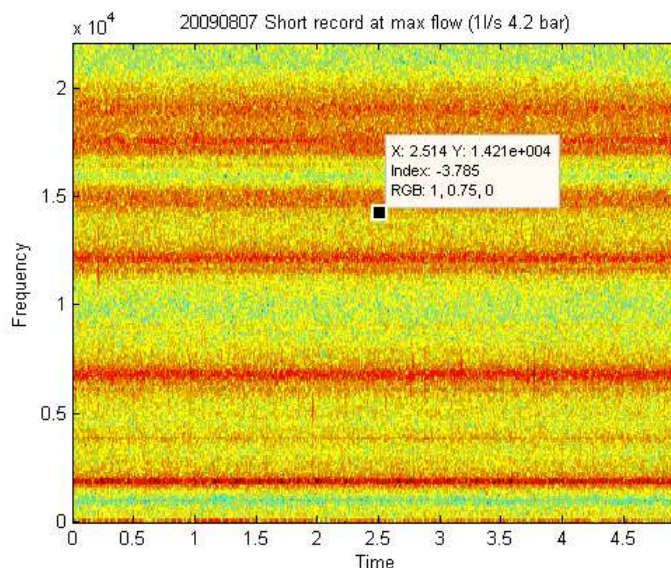
Vi får här också en indikation på vilket frekvensområde ett delaminerat betongskikt kan tänkas vibrera vid. Denna vibrationsfrekvens är beroende av delamineringens utbredning och det delaminerade skiktets tjocklek.

Tidigare försök (Ö2) har visat att ett fast inspänt cirkulärt betongskikt med 30 cm diameter och 50 mm tjocklek, uppvisar resonanser vars maximum inträffar vid 5600 Hz. Resonansen är kraftigt dämpad och tydlig vibration uppstår mellan 3900 Hz och 7000 Hz.

B5.2.1.3 Det av vattenstrålen alstrade vibrationsspektrumet i betongplattan

I detta försök träffas betongplattan av vattenstrålen med full kraft. Flödet är 1 liter/s och det statiska vattentrycket i ledningen är 4.2 bar. Vattnets hastighet kan beräknas genom att man dividerar flödet Q i m³/s med munstyckets tvärsnittsytan A i m². Då erhålls vattenhastigheten v i m/s. Vattenstrålen är 15 mm i diameter så en vattenpartikel träffar betongytan med hastigheten

$$v = Q/A = 1000 \text{ cm}^3/\text{s} / 2.25 \text{ cm}^2 = 444 \text{ cm/s} = 4.5 \text{ m/s}$$



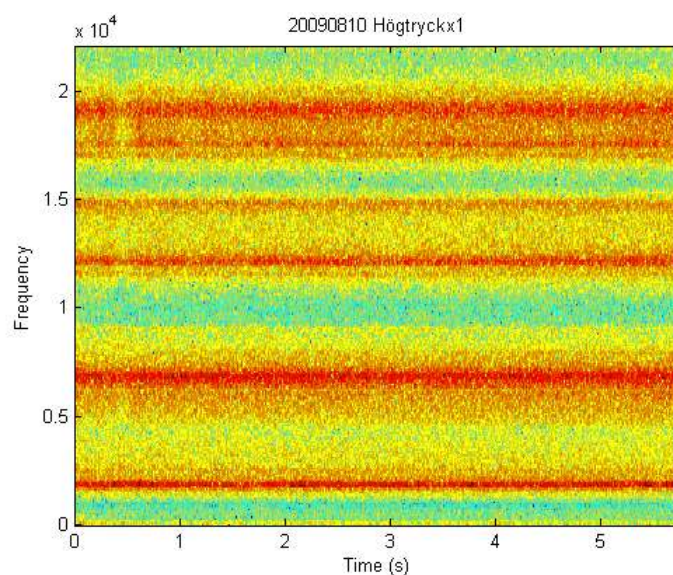
Figur B5.7 Vibrationsspektrum i betongplattan när den träffas av den lami-nära vattenstrålen. Tid i s.

Vi ser nu att vattenstrålen alstrar frekvenser i hela frekvensområdet, men att det finns frekvensband som är särskilt starka. Naturligtvis återfinner vi 1809 Hz men också nya band (de röda / mörka linjerna) vid 7 kHz, 12 kHz, 15 kHz och mellan 17 och 20 kHz. Dessa frekvensband får antas representera högre svängningsmoder i betongplattan. Grundmoden 1809 Hz får då antas vara membranresonansen eller den sk trumskinnsmoden (D7) dvs att plattan har en enda utböjning som är helt symmetrisk. Nästa mod innebär att plattans ena sida böjer upp när den andra böjer ner. Högre moder kan t ex innebära att plattans yta delas i fyra fält som svänger ömsom upp ömsom ner osv.

Detta är en första gynnsam indikation på att metoden kan fungera. Den infal-lande vattenstrålen skapar verkligen ett vibrationsspektrum i betongplattan, vilket är beroende på betongens resonanta egenskaper.

B5.2.1.4 Spektrum genererat av högtryckstvätt med fixerat munstycke

I detta försök ersätts den laminära strålen från det specialgjorda munstycket med den starkt turbulenta strålen från en högtryckstvätt. En sådan stråle hänger inte samman och kan därför inte leda tillbaka något ljud. Däremot skulle man kunna registrera ljudet som uppstår med en mikrofon. Detta har naturligtvis den nackdelen att en sådan mikrofon även plockar upp andra ljud från arbetsplatsen.

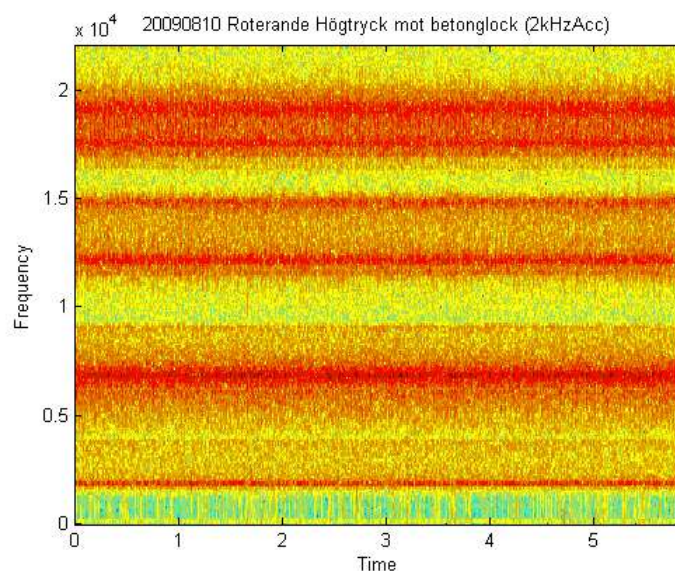


Figur B5.8 Vibrationsspektrum i betongplattan träffad av en turbulent, fixerad vattenstråle

Det framgår att det turbulenta spektrumet är mycket likt det som erhålles med den laminära strålen, men att bakgrundsnivån mellan de starka frekvensbanden är något högre.

B5.2.1.5 Spektrum genererat av högtryckstvätt med roterande stråle

Detta munstycke förefaller rent akustiskt att ge upphov till en kraftigare stråle än det fixerade munstycket till högtrycksapparaten.

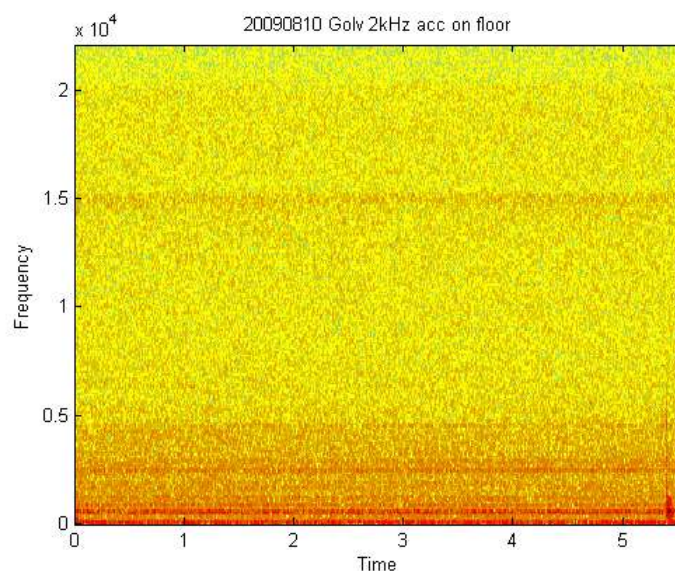


Figur B5.9 Vibrationsspektrum i betongplatta träffad av turbulent, roterande vattenstråle. Tid i s.

De exciterade frekvensbanden är dock de samma med de båda munstyckena till högtrycksapparaten. Den roterande strålen ger sig till känna i frekvensbandet 0 - 2 kHz där amplituden förefaller variera på ett systematiskt sätt, kanske orsakat av strålens roterande rörelse. Detta framgår endast om bilden betraktas i färg.

B5.2.1.6 Bakgrundsnivå vid försök med högtryckstvätt

Bakgrundsnivån har mätts tidigare, men eftersom det var vid ett annat datum än försöken med högtrycksapparaten presenteras här ett bakgrundsspektrum.



Figur B5.10 Bakgrundsspektrum vid högtrycksförsök. Tid i s.

Bakgrundsmätningen visar att störningsnivån har varit låg vid försöken med högtrycksapparaten.

B5.2.2 Strålen från munstycket riktad mot en vibrator på vilken en cirkulär plexiglasskiva med 200 mm diameter monterats.

Strålen träffar i plexiglasskivans centrum som är en nod för de flesta resonansfrekvenser i plexiglasplattan. Därigenom eftersträvas att excitera så lite vibrationer som möjligt i plexiglasskivan med vattenstrålen. Skivans syfte är att leda bort vattnet från den elektriska vibratoren under skivan. Vibratorn är inte vattentät. Den är en typ av högtalare DWARF som skall fästas mot en bordskiva eller dylikt för att kunna återge ljud.

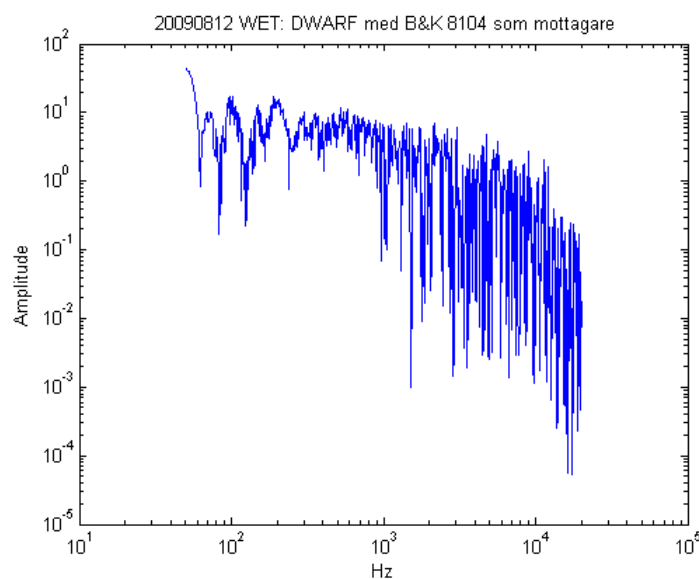


Figur B5.11 Försöksupställning vibrator med plexiglasplatta

Följande experiment har utförts:

B5.2.2.1 Vattenstråle träffar vibrerande platta signalen från Brüel&Kjaer 8104 hydrofon i sprutmunstycket registreras

I detta försök används en 8104 standardhydrofon från Brüel&Kjaer för att registrera det ljud som finns i strålmunstycket. Hydrofonens arbetsområde är från 10 Hz till 10 kHz inom vilket nivån håller sig inom -3dB från korrekt värde. Signal uppstår även utanför detta område men den är då försvagad mer än -3dB. Denna hydrofon sticker in i vattenflödet och skapar därmed en viss turbulens, som ger upphov till brus, sk egenbrus i detta sammanhang. Den vibrerande plattan styrs av oscillatoren i DSA-instrumentet, som också registrerar utsignalen från hydrofonen för varje frekvens. Resultatet presenteras i ett spektrum nedan.

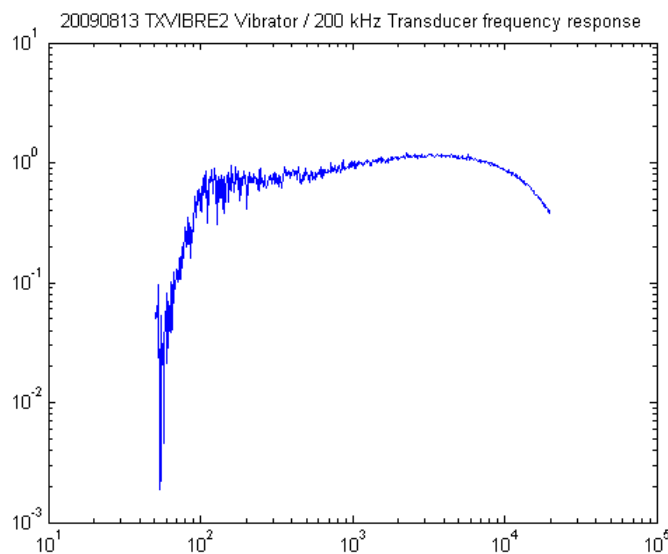


Figur B5.12 Signal registrerad i munstycket med B&K 8104 när strålen träffar vibratorplattan

Vi ser att signalen håller sig på en hög nivå i frekvensområdet 100 Hz till c:a 3 kHz. Vid högre frekvenser uppstår en besvärande variation i signalen, vilken misstänks bero på en ogynnsam jordning av mätkedjan.

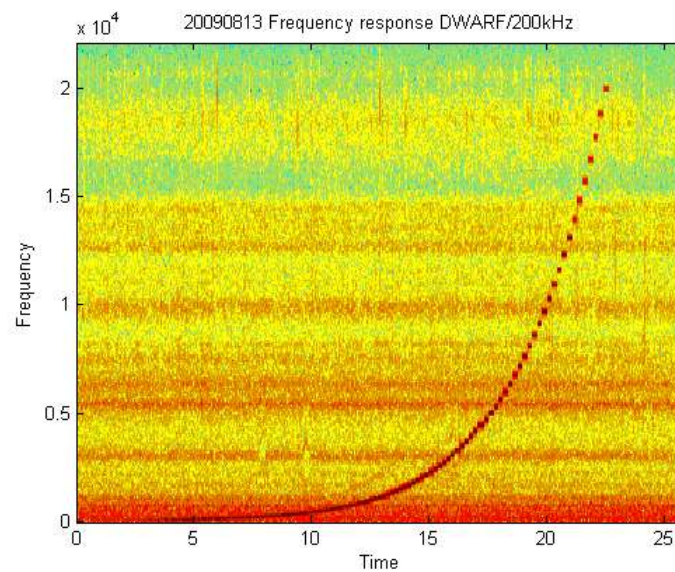
B5.2.2.2 Vattenstråle träffar vibrerande platta - signalen från 200 kHz transducer i sprutmunstycket registreras

I detta försök har en specialgjord hydrofon använts. Den består av en 200 kHz sonartransducer från Radarsonic. Med 200 kHz avses att dess resonansfrekvens är 200 kHz. Det innebär att man bör vara försiktig med mätningar vid frekvenser som närmar sig 200 kHz, därför att nivåerna kommer att bli för höga. Vid de frekvenser vi studerar är detta inget problem. För att undvika att hydrofonen ger upphov till turbulens i munstycket har transducern gjutits in i epoxi, så att vattenvägen är helt fri. Epoxin är utformad så att den omsluter den ena halvan av vattenvägen.



Figur B5.13 Signal registrerad i munstycket med 200 kHz transducer när strålen träffar vibratorplattan

Det framgår att 200 kHz transducern har en stabilare signal än B&K 8104. Vi ser här att det är möjligt att på ett trovärdigt sätt registrera vibrationer i frekvensområdet 100 Hz - 20 kHz via vattenstrålen. Denna mätning har också skett i form av ett spektrogram, vilket presenteras nedan.



Figur B5.14 Spektrogram som visar uppmätt signal i munstycket vid frekvenssvep i vibratorn. Enheten för tid är s för frekvensen Hz.

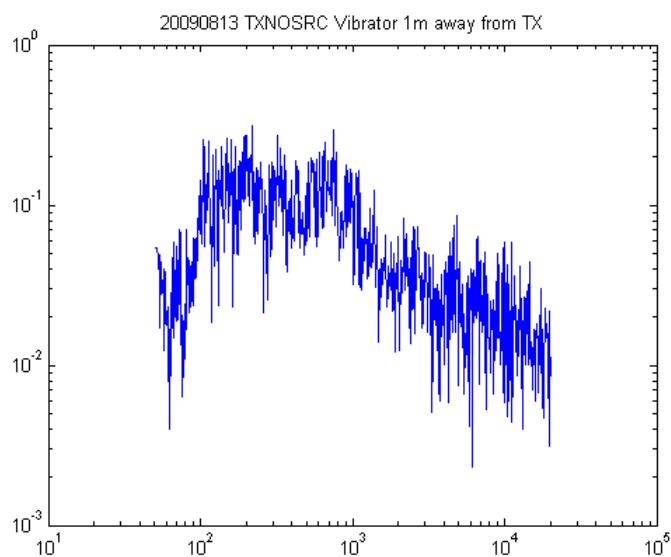
Spektrogrammet bekräftar att mottagningskedjan i systemet fungerar ypperligt. Att frekvenserna inte faller på en rät linje beror på att svepet är logaritmiskt i så måtto att det uppehåller sig under längre tid vid låga frekvenser.

B5.2.2.3 Bakgrundsmätning DSA

I syfte att eliminera mätfel orsakade av elektrisk överhörning upprepas försöket med vibratorplattan bortflyttad från vattenstrålen. Vattenstrålen är påslagen men vibratoren står på golvet en meter från försöksuppställningen, vilket framgår av nedanstående bild.

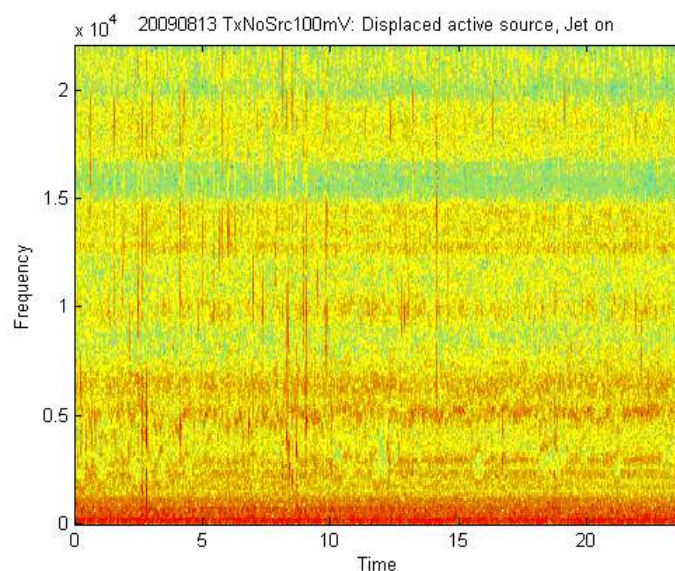


Figur B5.15 Vibratorn på golvet utplockad från försöksuppställningen



Figur B5.16 Bakgrundsspektrum utan vibrator men med stråle genom munstycket. Horisontalaxeln frekvens Hz och vertikalaxeln relativ amplitud.

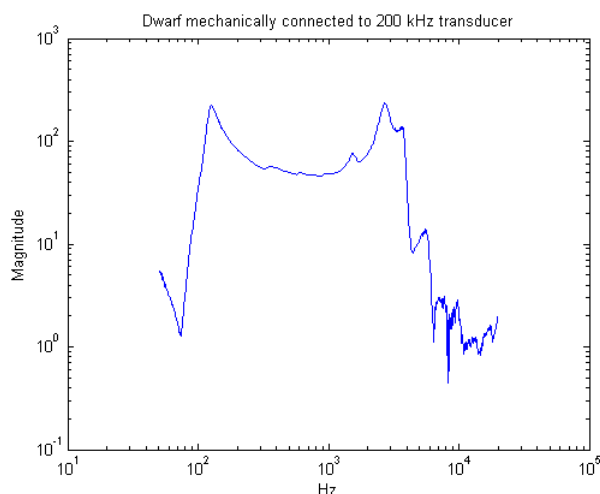
Man ser att signalnivån är nästan en tiopotens lägre än när vattenstrålen träffade vibratorn. Man kan därför dra slutsatsen att det inte föreligger någon elektrisk överhöring mellan källan och mottagaren.



Figur B5.17 Bakgrundsspektrum vid mättillfället i spektrogramform

B5.2.2.4 Direkt koppling mellan vibrator och hydrofon

I syfte att ta reda på överföringsfunktionen mellan vibratorn som användes i försöket 6.2.2 klustrades med dubbelhäftande tejp vibratorns platta mot ytan av en 200 kHz transducer av exakt samma typ som den som är ingjuten i munstycket. Därefter sveptes frekvensområdet 50 Hz till 20 kHz genom och nedanstående transferfunktion registrerades.



Figur B5.18 Direkt koppling mellan vibrator och hydrofon vid frekvenssvep

Av mätresultatet framgår att det finns en utmärkt återgivning av frekvenser inom området 100 Hz till 4 kHz. Vi kan därför dra slutsatsen att försöksupställningen begränsar oss till säkra resultat inom detta frekvensområde.

B5.2.3 Mätning mot litet stålstöd

Då resonanser i betongplattan påverkade mätningarna i det första försöket eftersträvas att låta vattenstrålen träffa en så styv kropp att alla resonansfrekvenser ligger bortom det frekvensområde som vattenstrålen kan excitera eller accelerometern registrera. Därför tillverkades ett stålstöd som lades upp på ett skumplaströr och försågs med en monteringsanordning för en accelerometer på undersidan. Skumplaströret stabiliseras av ett yttre stålrör. Accelerometern är av industrityp SNAP och har ett frekvensområde 10 Hz till 10 kHz. Liksom tidigare gäller dessa siffror -3dB gränserna. Det alstras signal även utanför detta frekvensområde. Syftet med försöket är att förfinas beskrivningen av vilka frekvenser strålen kan excitera.



Figur B5.19 Stålstöd

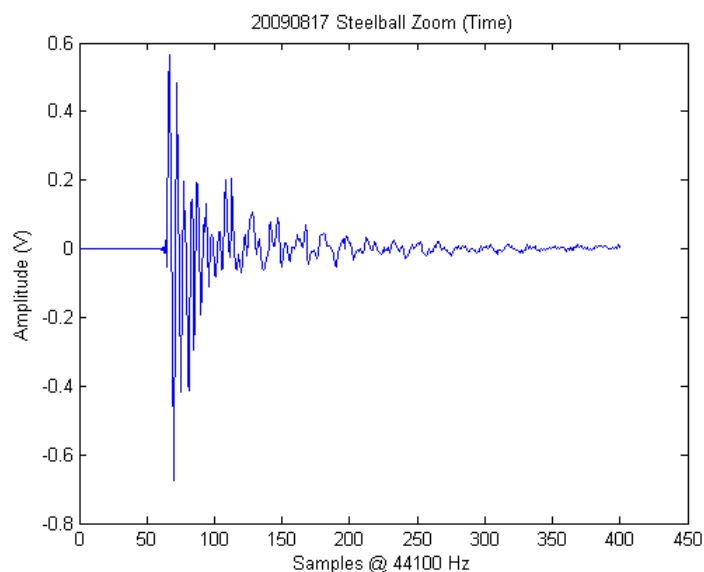


Figur B5.20 Accelerometer under städet

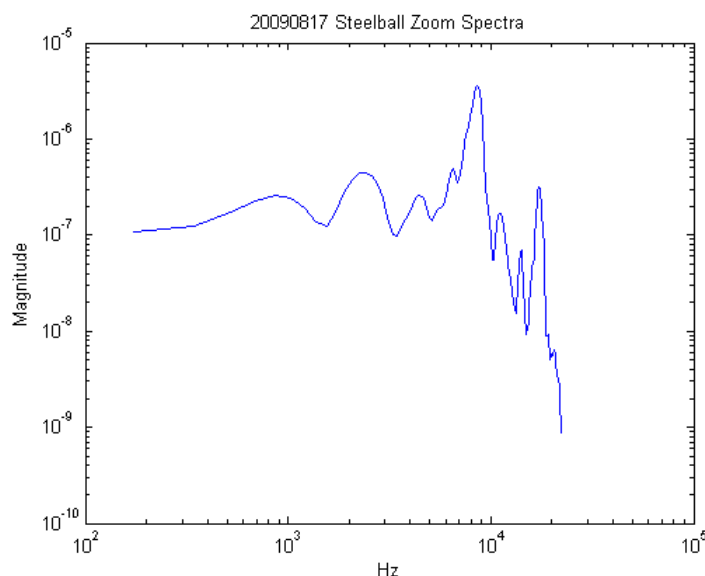
Skumplastcylindern har till syfte att hålla upp städet utan att alstra några resonansfrekvenser i det intressanta området. Skumplastcylindern stöds av ett yttre stålrör som ej är i mekanisk kontakt med det av vattenstrålen träffade städet.

B5.2.3.1 Stålstädets egenfrekvenser

En 10 mm stålkula får falla mot stålstädet och den alstrade signalen analyseras. Nedan visas tidsförloppet när stålkulan träffar stålstädet. Kulan träffar bara en gång. Den studsar så högt att det inte medför någon svårighet att fånga upp den. Registreringen är gjord med datorns ljudkort.



Figur B5.21 Tidsförlopp då 10 mm stålkula träffar stålstädet med accelerometer

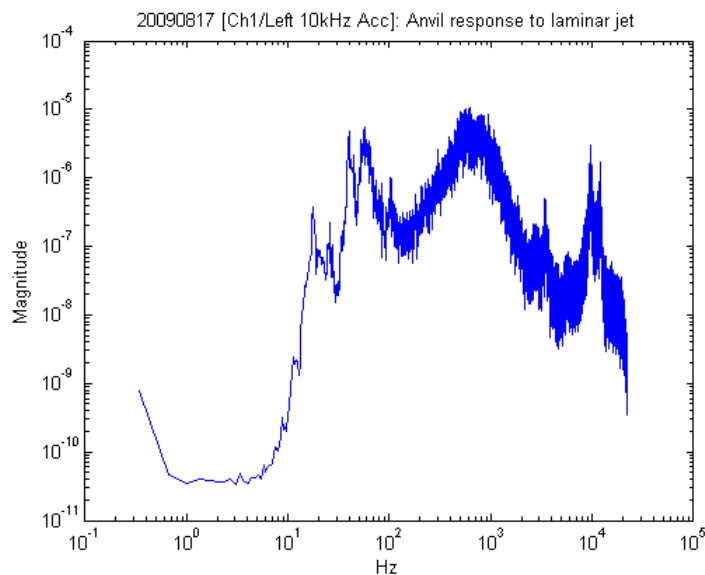


Figur B5.22 Spektrum i stålstället träffat av stålcula

Av spektrumet framgår att det fortfarande finns starka frekvenstoppar men nu uppflyttade till väsentligt högre frekvenser. Den starkaste toppen ligger vid 8500 Hz och nästa topp vid 18 kHz. Med tanke på betongplattans grundmod vid 1809 Hz är det inte troligt att delamineringar av någorlunda storlek skulle ge upphov till så höga resonansfrekvenser.

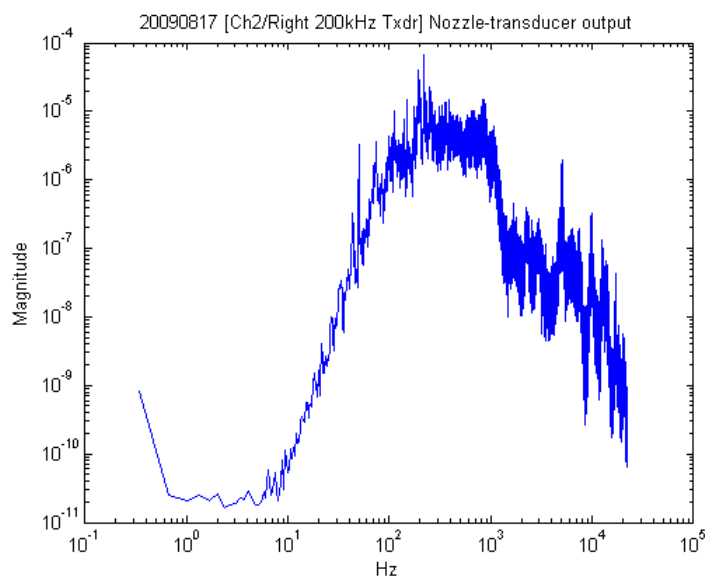
B5.2.3.2 Vattenstråle träffar stålstäl vibrationerna i stålstället och hydrofon registreras

I detta försök har signalerna registrerats med hjälp av datorns ljudkort och inspelningen har skett i stereo. På vänster kanal spelades signalen från accelerometern under stålstället in och på höger kanal spelades signalen från hydrofonen i munstycket in. Detta innebär att inspelningarna är helt synkrona och att man kan parallellanalysera signalerna.



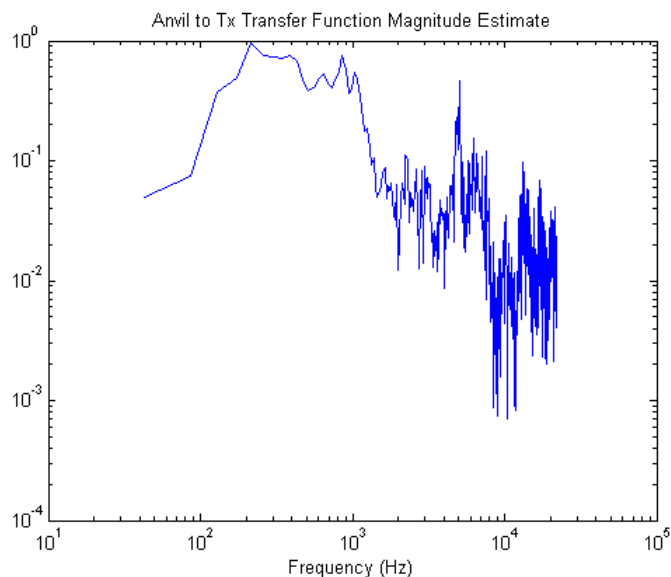
Figur B5.23 Frekvensspektrum registrerat med accelerometern i stålstället

Det verkar som att vattenstrålen alstrar ett spektrum med tyngdpunkten vid 600 Hz och en bandbredd som sträcker sig mellan 100 Hz och 2 kHz.



Figur B5.24 Frekvensspektrum registrerat med hydrofonen i munstycket

Har man signalen från både stålstället och hydrofonen kan man beräkna hur överförings- eller transferfunktionen ser ut. Denna funktion är ett spektrum som visar hur bra den ena signalen motsvarar den andra. Nedan presenteras transferfunktionen för de båda signalerna presenterade ovan.

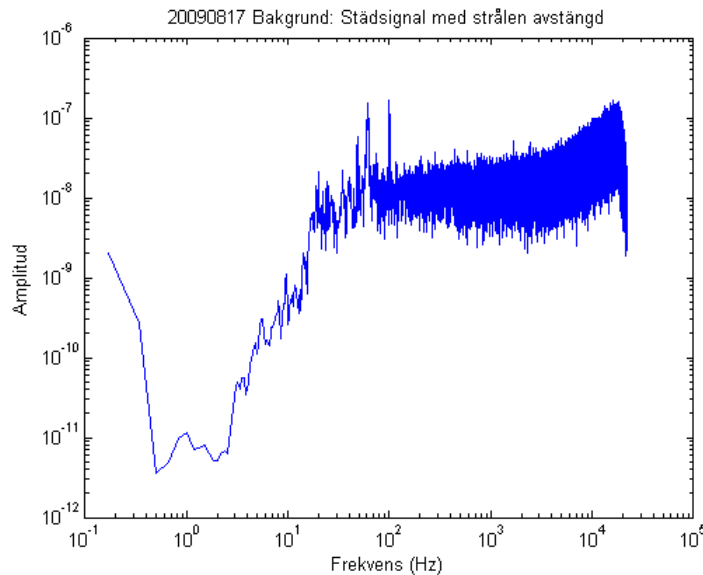


Figur B5.25 Transferfunktion mellan stålståndet och munstyckets hydrofon

Av transferfunktionen framgår det att återgivningen av städets vibrationer är mycket god i intervallet 100 Hz till 1 kHz. Dock måste man tänka på att ljudutbredningen inte helt kan sägas gå från det vibrerande stället till hydrofonen. Den utgående vattenstrålen innehåller ett visst spektrum. Detta spektrum har inte varit möjligt att mäta i försöksuppställningen inomhus eftersom det kräver att vattenstrålen får flyga så långt att den splittras upp. Endast då kan man vara säker på att inget ljud kommer tillbaks längs vattenstrålen.

B5.2.3.3 Bakgrundssignal vid mätning mot stålstädet.

Liksom vid tidigare försök görs en bakgrundsmätning för att eventuella störningar skall framträda.



Figur B5.26 Bakgrundssignal registrerad med stålstädets accelerometer

Det framgår att bakgrundssignalen ligger minst två tiopotenser under mätsignalen. Några störningar har inte uppstått däri genom.

B5.3 Slutsats

Försöken med vattenstrålen har visat att den alstrar ett brett frekvensspektrum i den träffade betongytan. Därigenom kan resonansfrekvenser för membranmoden i den delaminerade betongskivan exciteras. Försöken visar också att dessa resonansfrekvenser kan registreras i en mottagare i sprutmunstycket. Detta innebär att man via en sammanhållen, laminär vattenstråle, dels kan excitera vibrationer i en betongyta kontaktlöst, dels registrera vibrationernas frekvensinnehåll också kontaktlöst. Förutsatt att delaminerad betong har andra svängningsegenskaper än solid/homogen betong kan man därmed lokalisera delaminering genom att svepa en lämplig vattenstråle över betongytan. Frekvenserna som skapas påverkas inte av passagen genom vattenstrålen.

Bilaga 6: Litteraturstudie - Tematiskt uppdelad

Beteckningar Sxx och Dxx refererar till referenslistans beteckningar. S-referenser relaterar till skjuvvågor. D-referenser relaterar till delaminering. Ö-referenser refererar till övrigt material.

B6.1 BETONGMATERIALET

B6.1.1 Hållfasthet och moduler (S13, S16)

Olika standarder för pulshastighetsbestämning går igenom. Vanligast är bestämning av hållfasthet med hjälp av kompressionsvåghastighet. Transmissionsmetoden dominerar för bestämning av ljudhastigheten. Flera normer använder resonansmetoden för att bestämma E-modulen. Sambandet mellan ljudhastighet och hållfasthet antas vara linjärt eller exponentiellt och gäller endast för den betongtyp sambandet etablerats för, dvs. det finns inget generellt accepterat samband. Trots det finns i den ungerska normen en formel där koefficienterna i formeln anges. Hastigheten mäts vanligen i 200 mm kuber. Ljudhastighetsmätningarna lämpar sig bäst för att bestämma hållfasthetens utveckling i en given konstruktion. I den brittiska standarden sägs att sådan kontroll skall ske med samma transducers i samma positioner. Använda teoretiska samband mellan hållfasthet och ljudhastighet är härledda för linjärelastiska material men betong är inte ett sådant material. En annan god tillämpning för ljudhastighetsmätningar är att undersöka betongs homogenitet. För det syftet kan emellertid armeringsjärn utgöra en störande faktor. Formler för beräkning av E_{dyn} och G_{dyn} anges. (S13)

Högre frekvent test av ung cement. Hastigheten (v_p, v_s) ökar efterhand som betongen härdar. En puls-eko-mottagare används för att bestämma båda våghastigheterna i en kilformad betongprisma. Vattenmättad betong har högre ljudhastighet än torr. 1% ökning av luftinnehållet förorsakar 1% minskning av ljudhastigheten, men en minskning av nästan 10% av tryckhållfastheten. De elastiska konstanterna λ och μ samt K , E och ν är mer känsliga för förändring i vct än pulshastigheten. Ingen teoretisk relation existerar mellan hållfasthet och pulshastighet, inte ens för linjärelastiska material. (S16)

B6.1.2 Impedans (D10, D17, D18, D19, D21, D23, D26)

Beräkning av felstorlekar för puls-eko-mätning av akustisk impedans. Statistiskt inriktat arbete som resulterar i slutsatsen att små mätfel kan leda till stora parameterfel i följande beräkningar. Felet blir också större ju större impedansskillnaderna är vid det gränsskikt där reflexen uppstår. (D10)

Impedansmätning med vibrerande stång. Redogör för svenskt arbete med cylindriska och koniska stänger. Detta är en omodern teknik, vilken ersätts av mätning med impedanshuvud, vars utsignal är direkt proportionell mot impedansen. (D17)

Impedansmetodens känslighet. Impedanshuvud ger säkrare resultat än vibrerande stång, vars utsignal är starkt olinjär mot impedansen. Mätningar med impedanshuvud utförs vanligen i frekvensområdet 1 - 10 kHz. Vid en delaminering är den fundamentala moden membranresonansen. Uttryck för membranets styvhet anges. Mätning med impedanshuvud kräver inget kopplingsmedium, kan alltså ske helt torrt. (D18)

Impedansmetoden. Metoden fungerar bäst mot styva konstruktioner. Kontaktstyvheten arbetar i serie med defektstyvheten. Uttryck ges för membranresonansen. (D19)

Impact-echo-metoden ger signaler i frekvensområdet 3-40 kHz. Impulsrespons 100 x spänningen medför lägre frekvenser 0-1 kHz, böjmod. Mobiliteten (v/F) används som presentationsparameter. Impulsradar ger goda ekon när det saknas gjutning bakom elementet. (D21)

Microflown är en apparat som i en punkt mäter dels ljudtryck, som en mikrofon, dels vektoriell ljudhastighet med varmtrådsmetoden. Spegelmetoden är lämplig för mätningar mot starkt reflekterande material som betong. Man placerar då sensorn mellan betongytan och ljudkällan och med den känsliga riktningen mot spegelkällan, dvs. mot betongytan. Den uppmätta signalstyrkan motsvarar källsignalen multiplicerad med reflektionskoefficienten. Om man kalibrerar sensorn mot en yta vars reflektionskoefficient är 1 kommer den uppmätta hastighetskvoten att motsvara reflektionskoefficienten. (D23)

Reflektivitet med rörapparat. Omfattar ett teoretiskt och ett experimentellt arbete. Rörapparaten är alltför komplicerad för att kunna användas i avsökning av delaminering under betongytor. (D26)

B6.1.3 Dämpning (D22, S9)

Ultraljud för frys- och saltavspjälkningsskador. Ljudhastigheten är inte särskilt känslig för förekomsten av mikrosprickor. Dämpningen visar större känslighet. *Mikroskopiska skador kan tänkas påvisa (predict) återstående livslängd.* ASTM C666 för bestämning av dynamisk modul med resonansmetod. Betongprovkroppar fick hårdna från 28 till 71 dagar. Ljudhastigheten ökade 3% medan amplituden ökade 38%. Proven utsattes också för cykliska laster.

Procenttalen gäller relativt obelastade provkroppar. (D22)

	46 cykler	61 cykler
Ljudhastighet	-3%	-9%
Youngs modulus	-25%	-50%
Amplitud	-31%	-84%
Resonansfrekvens	-44%	-76%

Transmissionsmätning med högfrekvent ultraljud (0.5 - 1 MHz) mot dålig betong. Dämpningen studeras genom att mäta amplituden på "andraekot", som har gått tre gånger genom mätobjektet när det når mottagaren. Man använder en "cross spectrum method" för att minska variansen för dämpningen. Det innebär att man beräknar medelvärdet av transferfunktionen mellan direktsignalen och andraekot från flera mätningar och dividerar det med autospektrum för direktsignalen. P-, S- och ytvågor testades. Hastighet och dämpning mättes. Ytvågorna visar 24% minskning i hastighet och skjuvvågsdämpningen blir 10 ggr starkare (1000%) för den sämsta betongen. Dämpningsmätning är alltså att föredra framför hastighetsmätning. (S9+9b)

B6.1.4 Reflektionskoefficient (D23, D24, D25, D26, D27, D28)

Microflown är en apparat som i en punkt mäter dels ljudtryck, som en mikrofon, dels vektoriell ljudhastighet med varmtrådsmetoden. Spegelmetoden är lämplig för mätningar mot starkt reflekterande material som betong. Man placerar då sensorn mellan betongytan och ljudkällan och med den känsliga riktningen mot spegelkällan, dvs mot betongytan. Den uppmätta signalstyrkan motsvarar källsignalen multiplicerad med reflektionskoefficienten. Om man kalibrerar sensorn mot en yta vars reflektionskoefficient är 1 kommer den uppmätta hastighetskvoten att motsvara reflektionskoefficienten. (D23)

Mätning av den komplexa reflektionskoefficienten med ultraljud. Metoden arbetar med longitudinella och transversella vågrörelser, P-våg och S-våg, varför G- och L-moduler kan bestämmas. Samband med E-modul, kompressionsmodul (K) och tvärkontraktionstal ges i artikeln. (D24)

Mätning av komplex reflektionskoefficient i newtonska vätskor. Fassetkillnaden mellan infallande och reflekterad våg bestäms, liksom amplitudskillnaden. (D25)

Reflektivitet med rörapparat. Omfattar ett teoretiskt och ett experimentellt arbete. Rörapparaten är alltför komplicerad för att kunna användas i avsökning av delaminering under betongytor. (D26)

Absorptionsmätning mot gräsytor. För detta syfte används tre olika metoder:

- Rörapparaten
- Efterklangskammare (ljudhårt rum)
- Reflektionsmetoden

Man använder i artikeln MLS-sekvenser som kan komprimeras till en kort puls. Man använder ljudkortet i en Lap-top. Sensorn består av en mikrofon som monterats på en stång framför en högtalare. Den reflekterade signalen blandar sig med den utsända. För att råda bot på detta görs en inspelning av den utsända signalen när ingen reflekterande yta finns i närheten. Denna sig-

nal subtraheras därefter när arrangemanget är riktat mot den yta som skall undersökas. (D27)

Reflektionskoefficientens vinkelberoende. Uppmätt signal divideras med utsänd signal vilket ger den komplexa reflektionskoefficienten. Från denna kan man räkna fram den specifika impedansen och absorptionskoefficienten. Samma tekniska apparatur som i artikel 27 användes. (D28)

B6.1.5 Olinjäritet (D6, D15, D16, S2, S10, S15)

Skadedetektering i betong i tids- respektive frekvensdomänen. Mikrosprickor i betong bestäms bäst genom att studera betongens olinjäritet. För att beskriva böj- och torsionsmoder i en provkropp räcker det att scanna två parallella linjer. En lokalt förminskad böjstyvhets kan observeras som en lokal ökning i modkrökning $d_{moddispldx2}$. I tidiga skadeskedet är linjär dämpning känsligare för skadeutvecklingen än våghastigheten. Olinjäritet studerades i båda domänerna. Frekvensdomän: Resonansfrekvensens beroende av amplituden. Lock-in instrument användes. Olinjäritetseffekter är mycket starkare än linjära effekter (hastighet och dämpning). Tidsdomän: Man studerar den exponentiella avklingningen i ett stötförlopp. Stötamplituden ökas. Man skall börja med de låga amplituderna för att inte påverka provet. Använd bara de första cyklerna i avklingningskurvan. (D6)

Olinjäritet. Tredje övertonen förefaller vara mer känslig för skador alstrade genom kompression av betongcylindrar än den andra övertonen. Det rör sig om flera storleksordningar. Olinjäriteten är starkt kopplad till den återstående hållfastheten. Bäst resultat erhålles med en smalbandig källa och en bredbandig mottagare. Det rekommenderas att inte försöka sätta provet i resonans. (D15)

Olinjäritet för sprickdetektering. Artikeln innehåller lång teoretisk utveckling om olinjäritetens orsaker. Man använder sig av en pumpfrekvens och en probefrekvens. Mellan dessa frekvenser uppstår en modulation. Metoden gör det möjligt att försätta provet i resonans för att förbättra detektionsmöjligheten. Observera att det står i strid med rekommendationen ovan. Artikeln innehåller åtskilliga referenser till ryska arbeten om olinjäritet. (D16)

Olinjäritet undersökt med Rayleighvågor. Man studerar den första övertonen. Genom att driva sändaren med låg effekt undviker man att det uppstår olinjäriteter i själva apparaturen. Att studera Rayleighvågor är fördelaktigt av flera skäl:

1. Endast en sida av testobjektet behöver vara åtkomligt
2. Energin i vågrörelsen är koncentrerad i ytan där skadorna finns
3. Rayleighvågen har förmågan att utbreda sig långa sträckor

Olinjäriteten β ökar med avståndet från källan. $\beta = A(2\omega)/A(\omega)$. Sändarelement från en enda kristall är mer linjära än PZT-element. Genom att studera olinjäritetsfaktorn som funktion av avståndet erhålles ett säkrare värde. β' är den relativa olinjäriteten $A_2/(A_1)^2$. I artikeln ges flera intressanta referenser. (S2)

Mikrosprickor i portlandcement studeras med olinjärt ultraljud. Provocerad alkali-kiselreaktion studeras genom att integrerade sidoband divideras med excitationsspektrum. En kontinuerlig 39 kHz sinuston sänds genom provet. Detta slås an med en hammare vid olika energinivåer. Olinjäriteten tilltar med energin i slaget. Känsligheten för mikrosprickor är påtaglig. Cementmaterial är i sig olinjära. Dämpning och hastighet varierar mindre än 10% i liknande test. Metoden ställer en snabbtest för alkali-kiselreaktion i utsikt. (S10)

Sprickdetektion med bispektral metod. Man exciterar med två frekvenser och studerar blandningen. Den bispektrala tekniken är känslig för kvadratisk fas-koppling (QPC) (?). Metoden baseras på betydande medelvärdesbildning, upp till 500 signaler. Exciteringen av vibrationer i sprickan beror på vilken svängningsmod man exciterat. Därför är det lämpligt att excitera många olika moder. Artikeln innehåller en intressant datapresentationsmetod. (S15)

B6.1.6 Nedbrytning (D4)

Nedbrytning av betong i marin miljö studerades. Spjälkning visade sig vara ett större problem än korrosion. Omväxlande vätning och torkning i denna miljö ger mycket omfattande skador. (D4)

B6.1.7 Korrosion (D5)

Korrosionsdetektering med ultraljud i pitch-catch arrangemang visar större känslighet i höghållfast betong och tunna armeringsjärn, det senare beroende på relationen mellan diametern på ultraljudstrålen och armeringsjärnet. (D5)

B6.1.8 Delaminering (D1, D7)

Svängningsmoder som har en nod i det skikt delamineringen finns påverkas mycket svagt av delamineringen. Intressant sensor, en trefot med ett ben som aktuator, det andra som sensor och det tredje endast ett stöd (D1).

Delamineringsdetektion med böjvågor. Mätmetoden svarar mot instrumentet "SURFER". Effekten är störst för delaminering nära ytan i tjocka konstruktioner. Första resonansmoden för en delaminering är membranresonanzen (trumskin). Pulsexcitering bra för att undvika ekon från kantlinjer. (D7)

B6.1.9 Hålrum (S18)

Inspektion av tomrum och armeringsjärn med ultraljud. Smala frekvensband processeras. Diskriminering av objektens storlek via våglängden. (S18)

B6.2 APPARATER

B6.2.1 DPC, UPE, (A1220 S5, S11, S19)

Dry Point Contact (DPC) lågfrekvenstransducer för undersökning av betong. Detta är en beskrivning av de transducers som sitter i UPE-apparaten / A1220 Monolith. Transducerelementen är visköst dämpade för att signalen skall bli kort - 10 dB/period. Den omfattar därför bara 1.5 - 2 perioder. Piezoelementen sitter bara fast i den ände där rörelsen överförs till mätobjektet. Principen är en bimorf. Alltså två sammansatta element där det ena drar ihop sig och det andra sträcker ut sig när en spänning lägges på. En variant har två parallella bimorfer. Man kan då byta vågtyp (P- eller S-våg) på elektrisk väg. Körs morferna i fas uppstår en P-våg, körs de i motfas uppstår en S-våg. Artikeln påstår att det är en fördel att göra kontaktpunkten mellan transducer och betong så liten som möjligt. P- resp S-våggenerering ger samma huvudlob. S-våggenerering verkar ge större andel ytvågor än P-våggenerering. P-vågorna har en resonansfrekvens 140 kHz och S-vågorna 55 kHz. Bandbredden är 60-70 % av resonansfrekvensen. 30 mm hål och större kan detekteras. (S5)

Verifiering av injekteringsfel med P- och S-ultraljudvågor BAM. Man använder sig av Syntetisk Aperture Focusing Technique (SAFT) och Elastodynamic Finite Integral Technique (EFIT). Modelleringen sker med en upplösning som är en tiondel av våglängden. Tunna skikt kan skapa interferens. P- och S-vågor har reflektionskoefficienter med motsatta tecken hävdas det. Man använder transducerhuvudet till A1220 apparaten men exciterar med annan signal, nämligen en fyrkantpuls, 50 mikrosekunder lång och med amplituden 300 Volt. Man studerar fasen. Programvaran medger alltså analys av reflektionskoefficientens tecken. Håligheter i spännkabelrör kan detekteras med hjälp av fastekniken. Effekten blir bättre när våglängden är mindre än spännkabelrörets diameter. (S11)

Moderna ultraljudinstrument 2003. Detta är en beskrivning av utvecklingen i Ryssland. Inget av primärt intresse för A1220, men den nämns. (S19)

B6.2.2 Arrayer (S6, S14)

Tvådimensionell array för luftkopplat ultraljud. Det rör sig om sk Polaroidtransducers som uppges ha ett frekvensband från 20 till 100 kHz. En huvudlob med stark riktverkan ger upphov till många sidlobar och vice versa. Polaroidtransducers ger en kortare signal än kommersiella piezoelektriska transducers. (S6)

Gruppsändare för ultraljud (array). Koncentriska ringar används för att söka vertikalt med möjlighet att ändra fokus. Om elementen placeras längs periferin på en cirkel fås samma apertur och därmed horisontell upplösning som om cirkeln varit helt täckt med element. För samma antal element är den cirkulära konfigurationen effektivare än Mills Cross. Endast en punkt- eller linjekälla skapar en större mängd skjuvvågor om sändaren är designad för P-

vågor. En källa med utsträckning, t ex en rund skiva, alstrar mycket lite skjuvvågor, mindre ju större skivan är räknat i våglängder (aperturen). Göl-lay-sekvenser eller chirpar är mycket användbara i förlustrika material. (S14)

B6.2.3 Sändare (S17)

Ultraljud och ljudalstring i betong. Vibrator fungerar bra under 10 kHz och däröver fungerar de piezoelektriska sändarna bra. (S17)

B6.3 METOD

B6.3.1 Lambwaves (D1, D2, D3, D14, S8)

Svängningsmoder som har en nod i det skikt delamineringen finns påverkas mycket svagt av delamineringen. Intressant sensor, en trefot med ett ben som aktuator, det andra som sensor och det tredje endast ett stöd (D1).

Snett infallande ljudstråle undertrycker ytrelektionen och gör att tillgänglig dynamik i mottagaren kan fokuseras på ekon inifrån konstruktionen. Sensor är mest effektiv om den sänder vid elektrisk resonans och mottar vid mekanisk resonans. Infallsvinkeln bestämmer ytvågornas våglängd, varmed man kan bestämma vilken mod man skall excitera. Man skall välja en mod som inte ligger alltför nära andra svängningsnoder. Avsökning med vattenstråle nämns. (D2).

Flera metoder att bedöma delaminering mellan glasfiberarmerad plast och betong studeras.

Excitering med kort puls är bara effektiv när frekvensen råkar sammanfalla med plastskiktets kvartsvågaresonans. Ytvågor med chirp 200 - 800 kHz med sensorerna på viss avstånd lutade 25 grader så att spegelreflexer undviks (pitch-catch). Med det arrangemanget detekteras bara "leaky Lamb-waves". På detta sätt kan två moder detekteras. Med puls-eko-metoden uppstår det fenomenet att ytreleksen blandar sig med ekot från delamineringen. (D3)

Man borde kunna subtrahera det starka ytekot om man mäter mot en massiv provkropp, vilken enbart ger ett yteko.

Oförstörande provning med luftburet ultraljud. Transmissionsmätningar med snett infallande ljudvågor. Med rätt infallsvinkel åstadkommer man att endast moder med partikelrörelse vinkelrätt mot ytan exciteras. Olinjäritet konstateras samt spänningstillståndets inverkan på anisotropin. (D14)

Excitering av Lamb-waves med punktkontakt (Hertzian contacts). Artikeln ger ett matematiskt uttryck för kontaktytan mellan en sfärisk kropp och en plan yta eller mellan två sfärer. En lock-in-förstärkare används för att detektera ytvågorna. Att använda en punktkälla minskar diffraktionsfelet, s774. Metoden tillämpas på delaminering. Som sensor rekommenderas ett stort antal fjäderbelastade element. En knottrig yta kopplar dåligt mot en plan sändare/mottagare. (S8)

B6.3.2 Torrkoppling (D8, S8)

Dabber probe överför den akustiska energin med hjälp av ett gummiliknande material. Kan därför användas torrt. (D8)

Excitering av Lamb-waves med punktkontakt (Hertzian contacts). Artikeln ger ett matematiskt uttryck för kontaktytan mellan en sfärisk kropp och en plan yta eller mellan två sfärer. En lock-in-förstärkare används för att detektera ytvågorna. Att använda en punktkälla minskar diffraktionsfelet, s774. Metoden tillämpas på delaminering. Som sensor rekommenderas ett stort antal fjäderbelastade element. En knottrig yta kopplar dåligt mot en plan sändare/mottagare. (S8)

B6.3.3 Reflektionsseismik (D9)

CDP-stackning kan utnyttjas för att detektera inre sprickor i betong. Bra beskrivning av den reflektionsseismiska metoden. (D9)

B6.3.4 Impact Echo (D11, D12, S4)

Transferfunktionberäkningar för betongplatta med impact-echo-mätningar. Med impact-echo mäts frekvensen för S1 moden med noll utbredningshastighet. En formel för potentiell beräkning av vidhäftningen mellan ett betongskikt och underliggande betong presenteras. (D11)

Cross spectral density of Impact Echo. Genom att multiplicera ett antal spektra registrerade på olika avstånd från slagpunkten erhålles en förstärkning av den dominanta frekvenstoppen och en kraftig, minst sagt, undertryckning av andra frekvenser. (D12)

Tio lektioner om Impact-echo BAM. Artikeln ogiltigförklarar tidigare tolkningsmodeller. Det bildas inte en våg som studsar fram och tillbaka mellan yta och reflektor. I stället är det en basal svängningsmod för objektet som exciteras (S1-mod). Det alstras inte några reflektioner från spännkabelrör. Faktor 4-förstärkningen mot starka reflektorer är inkorrekt. Huvuddelen av energin som alstras blir Rayleigh-vågor. Det är en stor fördel att scanna impact-echo eftersom mätningar i en diskret punkt kan bli helt felaktiga beroende på betongens egenskaper just invid mätpunkten, t ex luftfyllda porer. T ex skapar spännkabelrör hyperboler om man scannar. (Då måste de väl ge upphov till reflexer?). Bristande vidhäftning av betong mot spännkabelrör skapar problem för metoder baserade på mekaniska vågor. (S4)

B6.3.5 Luftexcitering (D2, D20, S3)

Snett infallande ljudstråle undertrycker ytrelektionen och gör att tillgänglig dynamik i mottagaren kan fokuseras på ekon inifrån konstruktionen. Sensor är mest effektiv om den sänder vid elektrisk resonans och mottar vid meka-

nisk resonans. Infallsvinkeln bestämmer ytvågornas våglängd, varmed man kan bestämma vilken mod man skall excitera. Man skall välja en mod som inte ligger alltför nära andra svängningsnoder. Avsökning med vattenstråle nämns. (D2).

Laser vibrometer. Gnistgap i reflektor ger intensiv excitering genom luft. Den korta exciteringen anses vara fördelaktig, då den ger lång tid att studera konstruktionens respons innan reflektioner från objektets kanter stör signalen. PRF 25 Hz, resonansfrekvenser i området 3-20 kHz. Frekvensmosaiker presenteras på likartat sätt LTH försök. (D20)

Lambwaves alstrade med luftkopplad transducer. Snett infallande ljudvågor kan fås att matcha såväl temporal frekvens som spatial våglängd. Vald vinkel passar också alla övertoner. Intressant uttryck för beräkningen av bandbredd hos en fyrkantpuls. Referenser till kopplingsscheman för högspännings pulsaggregat. (S3)

B6.4 TEORI

B6.4.1 Signalbehandling (D13, S7, S9, S12)

Studier av flerlagerkonstruktioner med spektrogram och spektrum. I rapporten visas spektrogram med mycket egendomligt utseende. (D13)

Hilbert-Huang Transformen (HHT) för ekolokalisering i starkt dämpande material. HHT utgår från medelvärdet av en "maxenvelop" resp en "minenvelop". Detta värde subtraheras från signalen. Därefter upprepas proceduren på den resterande signalen. Hilbert-Huang spektrumet är en sorts spektrogram. Resultatet blir en sorts konstant bakgrundseliminering som klarar lutning. (S7)

Transmissionsmätning med högfrekvent ultraljud (0.5 - 1 MHz) mot dålig betong. Dämpningen studeras genom att mäta amplituden på "andraekot", som har gått tre gånger genom mätobjektet när det når mottagaren. Man använder en "cross spectrum method" för att minska variansen för dämpningen. Det innebär att man beräknar medelvärdet av transferfunktionen mellan direktsignalen och andraekot från flera mätningar och dividerar det med autospektrum för direktsignalen. P-, S- och ytvågor testades. Hastighet och dämpning mättes. Ytvågorna visar 24% minskning i hastighet och skjuvvågsdämpningen blir 10 ggr starkare (1000%) för den sämsta betongen. Dämpningsmätning är alltså att föredra framför hastighetsmätning. (S9+9b)

Split spectrum processering. Dämpningen i betong är typiskt -7dB/cm vid 200 kHz och 27 dB/cm vid 800 kHz. SSS går ut på att man filtrerar signalen till flera subband och amplitudutjämnar varje subband innan man summerar dem igen. För att det hela skall fungera måste naturligtvis subbanden överlappa. Man använder två detektionsmetoder: Minimum i varje frekvensband eller invers fouriertransform och polaritetsväxling. (S12)?

B6.4.2 Syntetisk apertur (S1, S11, S20)

Jämförelse av puls-ekometoder i betong. Syntetisk Apertur Fokuseringsteknik (SAFT) är den bästa metoden att lokalisera hålrum i spännkabelrör. 2-D SAFT kompenserar bättre för betongens anisotropi än 1-D SAFT. Algoritmen fungerar bäst när man även tar med fasen i beräkningarna. Radar, impact-echo och ultraljud är likvärdiga. Spännkabelrör av metall är genomskinligt vid impact-echo mätningar. Impact-echo kan trots detta lokalisera spännkabelrör. Ultraljud fungerar bäst när ballasten i betongen är mindre än 8 mm. Vid så grovkornig ballast som 32 mm förorsakas stora problem för ultraljudmetoden. Bildalstrande metoder var bäst för att lokalisera spännkabelrör med bristande vidhäftning, dvs att röret inte är korrekt ingjutet. Detta fall kan särskiljas från ett spännkabelrör med ofullständig injektering. (S1)

Verifiering av injekteringsfel med P- och S-ultraljudvågor. Man använder sig av Syntetisk Aperture Focusing Technique (SAFT) och Elastodynamic Finite Integral Technique (EFIT). Modelleringen sker med en upplösning som är en tiondel av våglängden. Tunna skikt kan skapa interferens. P- och S-vågor har reflektionskoefficienter med motsatta tecken hävdas det. Man använder transducerhuvudet till A1220 apparaten men exciterar med annan signal, nämligen en fyrkantpuls, 50 mikrosekunder lång och med amplituden 300 Volt. Man studerar fasen. Programvaran medger alltså analys av reflektionskoefficientens tecken. Håligheter i spännkabelrör kan detekteras med hjälp av fastekniken. Effekten blir bättre när våglängden är mindre än spännkabelrörets diameter. (S11)

Syntetisk Apertur med stora element. Vidarutveckling av SAFT-tekniken, vilken ger bättre upplösning (MMSE) (S20)

B6.4.3 Modellering (S11)

Verifiering av injekteringsfel med P- och S-ultraljudvågor. Man använder sig av Syntetisk Aperture Focusing Technique (SAFT) och Elastodynamic Finite Integral Technique (EFIT). Modelleringen sker med en upplösning som är en tiondel av våglängden. Tunna skikt kan skapa interferens. P- och S-vågor har reflektionskoefficienter med motsatta tecken hävdas det. Man använder transducerhuvudet till A1220 apparaten men exciterar med annan signal, nämligen en fyrkantpuls, 50 mikrosekunder lång och med amplituden 300 Volt. Man studerar fasen. Programvaran medger alltså analys av reflektionskoefficientens tecken. Håligheter i spännkabelrör kan detekteras med hjälp av fastekniken. Effekten blir bättre när våglängden är mindre än spännkabelrörets diameter. (S11)

B6.5 Sammanfattning av litteraturstudiens viktigaste resultat

Svängningsmoder som har en nod i det skikt delamineringen finns påverkas mycket svagt av delamineringen eftersom vibrationsamplituden där är noll.(D1) Detta fenomen påverkar ytvågsmätningar.

En sensor är mest effektiv om den sänder vid elektrisk resonans och mottar vid mekanisk resonans. *Avsökning med vattenstråle nämns.* (D2).

Excitering med kort puls är bara effektiv när frekvensen råkar sammanfalla med plastskiktets kvartsvågresonans.(D3)

Omväxlande vätning och torkning i marin miljö ger mycket omfattande skador.(D4)

Första resonansmoden för en delaminering är membranresonansen (trumskinn). Pulsexcitering bra för att undvika ekon från kantlinjer.(D7)

Statistiskt inriktat arbete som resulterar i slutsatsen att små mätfel kan leda till stora parameterfel i följande beräkningar. Felet blir också större ju större impedansskillnaderna är vid det gränsskikt där reflexen uppstår.(D10)

Genom att multiplicera ett antal spektra registrerade på olika avstånd från slagpunkten erhålles en förstärkning av den dominanta frekvenstoppen och en kraftig, minst sagt, undertryckning av andra frekvenser.(D12)

Vid en delaminering är den fundamentala moden membranresonansen.(D18)

Impedansmetoden fungerar bäst mot styva konstruktioner.(D19)

Rekommenderas att geofoner används i stället för accelerometrar, då geofoner har bättre stabilitet vid låga frekvenser. Mobiliteten (v/F) används som presentationsparameter.(D21)

Uppmätt signal divideras med utsänd signal vilket ger den komplexa reflektionskoefficienten. Från denna kan man räkna fram den specifika impedansen och absorptionskoefficienten.(D28)

Stöd för att impedansmätningar borde fungera i kylvattenkanaler, då ju betongkonstruktioner kan anses vara styva. (D 19)

Sändarelement tillverkade av en enda kristall är mer linjära än PZT-element. (S2)

Intressant uttryck för beräkningen av bandbredd hos en fyrkantpuls. (S3)

Det är en stor fördel att scanna impact-echo eftersom mätningar i en diskret punkt kan bli helt felaktiga beroende på betongens egenskaper just invid mätpunkten, t ex luftfyllda porer.(S4)

Detta är en beskrivning av de transducers som sitter i UPE-apparaten. Man kan byta vågtyp (P- eller S-våg) på elektrisk väg. P-vågorna har enligt artikeln en resonansfrekvens av 140 kHz och S-vågorna 55 kHz. Bandbredden är 60-70 % av resonansfrekvensen. 30 mm hål och större kan detekteras. (S5)

Som sensor rekommenderas ett stort antal fjäderbelastade element. (S8)

Dämpningsmätning är alltså att föredra framför hastighetsmätning. (S9+9b)

Cementmaterial är i sig olinjära. Dämpning och hastighet varierar mindre än 10% i liknande test.(S10)

Man använder transducerhuvudet till A1220 apparaten men exciterar med egengenererad signal, nämligen en fyrkantpuls, 50 mikrosekunder lång och med amplituden 300 Volt. Effekten blir bättre när våglängden är mindre än spännkabelrörets diameter. (S11)

Sambandet mellan ljudhastighet och hållfasthet antas vara linjärt eller exponentiellt och gäller endast för den betongtyp sambandet etablerats för, dvs det finns inget generellt accepterat samband. Trots det finns i den ungerska normen en formel där koefficienterna i formeln anges. Hastigheten mäts vanligen i 200 mm kuber. Ljudhastighetsmätningarna lämpar sig bäst för att bestämma hållfasthetens utveckling i en given konstruktion. Använda teoretiska samband mellan hållfasthet och ljudhastighet är härledda för linjärelastiska material men betong är inte ett sådant material.(S13)

Om elementen placeras längs periferin på en cirkel fås samma apertur och därmed horisontell upplösning som om cirkeln varit helt täckt med element. En enda punkt- eller linjekälla skapar en större mängd skjuvvågor/ytvågor om sändaren är designad för P-vågor än en källa med utsträckning, t ex en rund skiva, som alstrar mycket lite skjuvvågor, mindre ju större skivan är räknat i våglängder (aperturen).(S14)

1% ökning av luftinnehållet förorsakar 1% minskning av ljudhastigheten, men en minskning av nästan 10% av tryckhållfastheten. De elastiska konstanterna Lamés två konstanter samt K, E och ν är mer känsliga för förändring i vct än vad pulshastigheten är. Ingen teoretisk relation existerar mellan hållfasthet och pulshastighet, inte ens för linjärelastiska material. (S16)

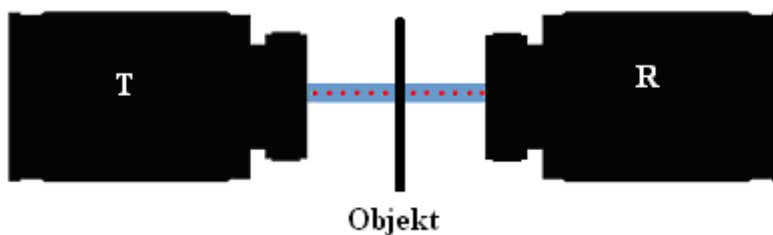
Av litteraturen framgår det att det är en fördel att scanna impact-echo-mätningar då mätningar i flera punkter gör att ett enstaka misslyckat mätvärde inte får så stor inverkan. (S4) UPE instrumentet kan sägas scanna av hela den yta som de 24 mätpunkterna täcker in i varje mätpunkt.

Att använda en kompressionsvågsändare med yttäckning genererar mindre mängd ytvågor än en punktsändare (S14). Det innebär att störningarna för tidiga ekon reduceras. Om flera element seriekopplas samtidigt som de sitter på olika avstånd från ett tänkt sensorcentrum, kommer ytterligare undertryckning av ytvågor att ske. Detta är samma fenomen som gör att man reducerar sk ground roll vid reflektionsseismiska undersökningar genom att i stället för en geofon i varje punkt ha flera. Vissa geofoner kommer då att ge-

nerera positiv signal för en passerande ytvåg, medan andra genererar negativ signal. När dessa summeras analogt undertrycks ytvågorna. De signaler som kommer in i normalriktningen till det plan i vilket elementen sitter kommer däremot att förstärkas genom summering. Därmed uppnås en skärpning av det undersökta området, man får en smalare söklob. Då S-vågorna är polariserade kan de inte monteras i en ring som man kan göra med P-vågelement, vilka saknar polarisering. Om man gjorde det skulle ju de olika elementen motverka varandra.

Tydligen kan samma ryska element i princip användas för alstring av både P- och S-vågor. Det behövs bara en ändring av den elektriska inkopplingen för att skifta mellan de två funktionssätten (S5). I de tillgängliga sökarna kan denna omkoppling inte ske utan man måste skifta mellan sökare för P- respektive S-vågor.

Särskilt avsökning med vattenstråle (D2) verkar intressant, då en sådan används vid rengöringen av kylvattenkanalerna. Den metod som beskrivs i artikeln går ut på att ett laminat träffas av två vattenstrålar 4-8 mm diameter, en från vardera sidan om laminatet. Strålarna är placerade mitt emot varandra och kan flyttas runt över laminatets plan i detta inbördes arrangemang. I det ena munstycket sitter en 500 kHz ultraljudsändare och i den andra munstycket sitter en mottagare. Passerande ultraljud ger genom sin nivå en indikation om delaminering.



Principen för avsökning med vattenstråle - transmission.
(T=sändare, R=mottagare)

REFERENSLISTA

(* särskilt intressant)

Delaminering (D)

- D1 Hirao, M., H. Ogi, et al. (2004). "Interface Delamination of Layered Media: Acoustic Spectroscopy and Modal Analysis." Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on **51**(4): 439-443.
- D2 Castaings, M., P. Cawley, et al. (1998). "Single Sided Inspection of Composite Materials Using Air Coupled Ultrasound." Journal of Nondestructive Evaluation **17**(1): 37-45.
- D3 Kundu, T., M. Ehsani, et al. (1999). "C-scan and L-scan generated images of the concrete/GFRP composite interface." NDT and E International **32**(2): 61-69.
- D4 Costa, A. and J. Appleton (2002). "Case studies of concrete deterioration in a marine environment in Portugal." Cement and Concrete Composites **24**(1): 169-179.
- D5 Yeih, W. and R. Huang (1998). "Detection of the corrosion damage in reinforced concrete members by ultrasonic testing." Cement and Concrete Research **28**(7): 1071-1083.
- D6 Van Den Abeele, K. and J. De Visscher (2000). "Damage assessment in reinforced concrete using spectral and temporal nonlinear vibration techniques." Cement and Concrete Research **30**(9): 1453-1464.
- D7 Cawley, P. (1990). "The detection of delaminations using flexural waves." NDT International **23**(4): 207-213.
- D8 Allin, J. M., P. Cawley, et al. (2003). "Adhesive disbond detection of automotive components using first mode ultrasonic resonance." NDT and E International **36**(7): 503-514.
- D9 Hirao, M., H. Ogi, et al. (2004). "Interface Delamination of Layered Media: Acoustic Spectroscopy and Modal Analysis." Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on **51**(4): 439-443.
- D10 Challis, R. E., G. P. Wilkinson, et al. (1998). "Errors and uncertainties in the ultrasonic pulse-echo reflectometry method for measuring acoustic impedance." Measurement science & technology. **9**(4): 692-700.

- D11 Cheng, C. C., Y. Lin, et al. (2007). "Evaluation of simulated transfer functions of concrete plate derived by impact-echo method." NDT and E International **40**(3): 239-249.
- D12* Medina, R. and M. Garrido (2007). "Improving impact-echo method by using cross-spectral density." Journal of Sound and Vibration **304**(3-5): 769-778.
- D13* Latif, R., H. Aassif, et al. (2006). "The experimental signal of a multilayer structure analysis by the time-frequency and spectral methods." NDT and E International **39**(5): 349-355.
- D14 Solodov, I., K. Pfeleiderer, et al. (2006). "New opportunities for NDE with air-coupled ultrasound." NDT and E International **39**(3): 176-183.
- D15 Shah, A. A., Y. Ribakov, et al. (2009). "Nondestructive evaluation of damaged concrete using nonlinear ultrasonics." Materials & Design **30**(3): 775-782.
- D16* Zaitsev, V., V. Nazarov, et al. (2006). "Novel nonlinear-modulation acoustic technique for crack detection." NDT and E International **39**(3): 184-194.
- D17 Lagerkvist, L. and K. G. Sundin (1983). "Mechanical impedance gauge based on measurement of strains on an impacted rod." Journal of Sound and Vibration **88**(2): 225-231.
- D18 Cawley, P. (1987). "The sensitivity of the mechanical impedance method of non-destructive testing." NDT International **20**(4): 209-215.
- D19* Cawley, P. (1984). "The impedance method of non-destructive inspection." NDT International **17**(2): 59-65.
- D20 Webster, J. M. and T. Thevar (2007). Remote Optical Non-Destructive Inspection Technique for Metal and Composite Structures. **26**: 71-78.
- D21 Davis, A. G., M. K. Lim, et al. (2005). "Rapid and economical evaluation of concrete tunnel linings with impulse response and impulse radar non-destructive methods." NDT and E International **38**(3): 181-186.
- D22 Scott F Selleck, Eric N. Landis, Michael L. Peterson, Surendra P. Shah and Jan D. Achenbach, "Ultrasonic Investigation of Concrete with Distributed Damage", ACI Materials Journal, January-February, 1998
- D23 De Bree, H. E., P. Leussink, et al. (1996). "The μ-flown: A novel device for measuring acoustic flows." Sensors and Actuators A: Physical **54**(1-3): 552-557.
- D24 Alig, I., H. Oehler, et al. (2007). "Monitoring of film formation, curing and ageing of coatings by an ultrasonic reflection method." Progress in Organic Coatings **58**(2-3): 200-208.
- D25 Franco, E., J. Adamowski, et al. (2008). "Viscosity measurement of Newtonian liquids using the complex reflection coefficient." IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control **55**(10): 2247"

- D26 Chung, J., Y. and Blaser D., A., "Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. Theory", J. Acoust. Soc. Am. 68(3), Sept 1980
- D27 Londhe, N., M. D. Rao, et al. (2009). "Application of the ISO 13472-1 in situ technique for measuring the acoustic absorption coefficient of grass and artificial turf surfaces." Applied Acoustics **70**(1): 129-142.
- D28 Mommertz, E. (1995). "Angle-Dependent In-situ Measurements of Reflection Coefficients Using a Subtraction Technique." Applied Acoustics **46**(3): 251-263.

Skjuvvågor (S)

- S1 Krause, M., M. Barmann, et al. (1997). "Comparison of pulse-echo methods for testing concrete." NDT and E International **30**(4): 195-204.
- S2 Shui, G., J. Y. Kim, et al. (2008). "A new technique for measuring the acoustic nonlinearity of materials using Rayleigh waves." NDT & E international. **41**(5): 326-329.
- S3 Yanez, Y., M. Garcia-Rodriguez, et al. (2008). "Lamb wave generation with an air-coupled piezoelectric concave array using square-wave burst excitation." NDT & E International **41**(4): 292-299.
- S4* Schubert, F. and B. Köhler (2008). Ten Lectures on Impact-Echo. Journal of Nondestructive Evaluation **27**: 5-21.
- S5* Schevaldykin, V., G., Samokrutov, A., A. and Kozlov, V., N., "Ultrasonic Low-Frequency Transducers with Dry Dot Contact and their Applications for Evaluation of Concrete Structures", 2002 IEEE Ultrasonic Symposium-793
- S6 Blum, F., J. Jarzynski, et al. (2005). "A focused two-dimensional air-coupled ultrasonic array for non-contact generation." NDT & E International **38**(8): 634-642.
- S7 Kazys, R., O. Tumsys, et al. (2008). "Ultrasonic detection of defects in strongly attenuating structures using the Hilbert-Huang transform." NDT & E International **41**(6): 457-466.
- S8 Degertakin, F. L. and B. Khuri-Yakub (1997). "Lamb wave excitation by Hertzian contacts with applications in NDE." Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on **44**(4): 769-779.
- S9 Goueygou, M., Naffa, S., O., Piwakowski, B., Buyle-Bodin, F., "Non Destructive Evaluation of Degraded Concrete Cover Using High-Frequency Ultrasound", 2001 IEEE Ultrasonic Symposium-761
- S10 Chen, X. J., J. Y. Kim, et al. (2008). "Characterization of progressive microcracking in Portland cement mortar using nonlinear ultrasonics." NDT & E International **41**(2): 112-119.
- S11 Krause, M., B. Milmann, et al. (2008). Ultrasonic Imaging Methods for Investigation of Post-tensioned Concrete Structures: A Study of Interfaces at Artificial

- Grouting Faults and Its Verification. Journal of Nondestructive Evaluation **27**: 67-82.
- S12 Karaoguz, M., Bilgütay, N., Akgül, T. and Popovics, S., "Defect Detection in Concrete Using Split Spectrum Processing", 1998 IEEE Ultrasonic Symposium-843
- S13 Komlos, K., S. Popovics, et al. (1996). "Ultrasonic Pulse Velocity Test of Concrete Properties as Specified in Various Standards." Cement and Concrete Composites **18**(5): 357-364.
- S14 Drinkwater, B. W. and P. D. Wilcox (2006). "Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: A review." NDT & E International **39**(7): 525-542.
- S15 Courtney, C. R. P., B. W. Drinkwater, et al. (2008). "Factors affecting the ultrasonic intermodulation crack detection technique using bispectral analysis." NDT & E International **41**(3): 223-235.
- S16 Bouhadjera, A. and C. Bouzrira (2005). "High-frequency ultrasonic testing of young cement-based materials using the 'prism technique'." NDT & E International **38**(2): 135-142.
- S17 Popovics, J., S. (1998). "Ultrasound and Sound Generation Alternatives for Concrete Structures.", Nätsökning, ingen ytterligare angivelse
- S18 Gaydecki, P. A., F. M. Burdekin, et al. (1997). "An ultrasonic inspection system capable of detecting voids and corroded steel components embedded in prestressed concrete structures." NDT & E International **30**(4): 263-263.
- S19 Samokrutnov, A., A., "Modern Ultrasonic Instruments for the Nondestructive Inspection of Metal Products", Mellaurgist, Övers. fr. ryska, Vol. 47, Nos. 7-8, 2003
- S20 Lingvall, F., T. Olofsson, et al. (2003). "Synthetic aperture imaging using sources with finite aperture: Deconvolution of the spatial impulse response." The Journal of the Acoustical Society of America **114**(1): 225-234.
- S21 Kim, H. S. and J. Y. Kim (2008). "High-resolution profiling of alluvial aquifer in potential riverbank filtration site by use of combining CMP refraction and reflection seismic methods." Journal of Applied Geophysics **66**(1-2): 1-14.

Referade tidskrifter (antal artiklar)

NDT & E International (20)

NDT International (3)

IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control (3)

The Journal of the Acoustical Society of America (3)

Journal of Sound and Vibration (2)

Cement and Concrete Composites (2)

Journal of Nondestructive Evaluation (2)

Applied Acoustics (2)

Cement and Concrete Research (2)

Materials & Design (1)

Measurement science & technology (1)

Progress in Organic Coatings (1)

Sensors and Actuators A: Physical (1)

Journal of Applied Geophysics (1)

Övriga (Ö)

- Ö1 Ulriksen, P., "Högupplösnings Tredimensionell Radar - En metod att genom oförstörande provning studera inre variationer i betongkonstruktioner", Avd f Teknisk Geologi, LTH, ISRN: LUTVDG/TVTG-3048-SE, 1995
- Ö2 Ulriksen, P. och Wiberg, U., "Geofysiska metoder för Oförstörande Provning och Kartering", LTH, ISRN: LUTVDG/TVTG-3051-SE, 1999

ELFORSK

SVENSKA ELFÖRETAGENS FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGS - ELFORSK - AB

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