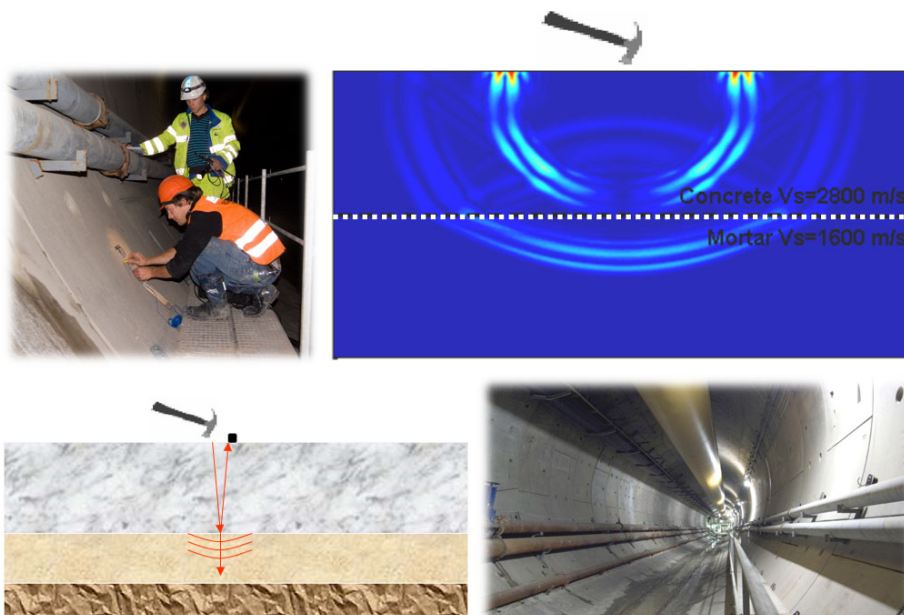


# OFÖRSTÖRANDE PROVNING TUNNLAR

*Produktionskontroll av bakfyllnad i tunnlar av  
prefabricerade tunnelelement*



**Nils Rydén**

**2019-09-15**

# FÖRORD

Detta projekt har finansierats och drivits inom Formas GeoInfra utlysning och finansierats av Skanska/SBUF och Formas 2012-2017. Projektgruppen vill rikta ett stort tack till finansörerna som gjort detta projekt möjligt. En ny metod för oförstörande provning av bakfyllnad i tunnlar av prefabricerade tunnelement har utvecklats och testats och implementerats i industrin, ”*Impact Echo Q-factor*”. Nils Rydén, Lunds Tekniska Högskola (LTH), är huvudförfattare till denna SBUF rapport som skrivits i efterhand på svenska för att ge en enklare överblick över hela projektet och metoden. Djupare detaljer finns redovisade i internationella vetenskapliga artiklar vilka finns angivna som referenser i denna rapport.

Det är många som varit med och bidragit till detta projekt och utvecklingen av metoden. Först och främst vill jag tacka Robert Sturk och Oskar Aurell från Skanska samt Jan Hartlén som företrätt Trafikverket, som alla tre tog initiativ till starten på denna utveckling i Hallandsåstunneln redan 2007 och som varit med och stöttat utvecklingen under alla år. Jag vill också tacka Mats Svensson, Tyréns som var med i förarbetet 2007-2008 som ledde fram till detta projekt.

Christian Möttinen, Pernilla Nilsson, Samuel Wiklund, Bartosz Kubica och Marzena Burzec-Burzynska från Skanska-Vinci HB har alla bidragit med värdefull hjälp vid mätningar och implementering i Hallandsåstunneln 2007-2015.

Inom detta GeoInfra projekt har flera kritiska detaljer och frågetecken som uppstod under testerna i Hallandsåstunneln kunnat studeras i detalj. Här har Josefin Starkhammar, Andreas Jacobsson och Unn Dahlén från LTH bidragit med värdefull hjälp och nya resultat inom detta GeoInfra projekt.

Huvudförfattaren vill rikta ett stort tack till alla som varit med och stöttat detta projekt från den ursprungliga starten i Hallandsåstunneln 2007 fram till utvecklingen som fortfarande pågår på LTH. Den utvecklade metoden har fått internationell uppmärksamhet och vunnit ett internationell innovationspris (tidskriften Tunnels and Tunneling Innovation Award). Idag används tekniken bland annat i Follobanan i Norge.

Lund september 2019

Nils Rydén

# SAMMANFATTNING

Inom detta projekt har vi utvecklat en ny metod för oförstörande kvalitetskontroll av betongtunnlar. Metoden kan användas för produktionskontroll av bakfyllnadsmaterialet i tunnlar som byggs med prefabricerade tunnelement (liner) i kombination med en tunnelborrmaskin (TBM). Det finns ett stort behov av att kunna kvalitetsvärdera bakfyllnaden i tunnlar av prefabricerade tunnelement. Bakfyllnadsmaterialet injekteras bakom betongelementen och ska ge tillräcklig strukturell hållfasthet för tunneln och minimera läckage av vatten in i tunneln. Idag används fortfarande dyr förstörande provning i form av borrning genom de nytillverkade betongelementen för att kontrollera den injekterade bakfyllnaden.

Material och metoder som används i detta projekt är huvudsakligen baserade på teoretisk modellering, fältmätningar i Hallandsås tunneln, och avancerad signalbehandling. Med hjälp av numerisk simulering av mätningen i kombination med mätningar i fält har ny teknik för både mätningförfarande och signalbehandling utvecklats. Mätningarna är baserade på den så kallade Impact Echo (IE) metoden. Med denna metod mäts tjockleksresonansen i en betongplatta för att uppskatta tjockleken eller djupet till en delaminering i en betongkonstruktion. Data registreras med en accelerometer som mottagare och en liten hammare som källa. Den registrerade signalen från accelerometern omvandlas till frekvensdomänen, där den dominerande resonansfrekvensen identifieras. IE resonansen är stark och tydlig i en "fri" betongplatta utan kontakt med något annat material (betongvägg eller betongbjälklag i hus). I detta fall, studsar den seismiska energin fram och tillbaka över betongens tjocklek och skapar en tydlig resonans. Beroende på egenskaperna hos materialet bakom betongen (dold bakfyllnad i detta projekt) blir resonansen mer eller mindre dämpad på grund av energiförlust till bakomliggande material.

I detta projekt har vi utvecklat en ny variant av IE mätningen genom att utnyttja och studera förstärkningen (eller dämpningen) av IE resonansfrekvensen. Resultaten från projektet visar att förstärkningen,  $Q$  värdet, är mycket känslig för styvheten och fyllnadsgraden i bakfyllnaden. Den uppmätta IE resonansfrekvens och  $Q$  värdet är direkt relaterad till kvaliteten på bakfyllnadsmaterialet. Inom projektet har vi teoretiskt validerat att  $Q$  värdet kan uppskattas med den föreslagna mät och signalbehandlingsmetoden och jämfört teori med experiment för att göra metoden så robust och tillämpbar som möjligt. De rapporterade resultaten är viktiga för att kunna tillämpa tekniken i andra framtida tunnlar med varierande mark/bergförhållanden och betongtjocklekar. Den föreslagna metoden utgör en signifikant förbättring av kvalitetskontroll och kvalitetssäkring av tunnlar som byggs med prefabricerade tunnelement. Övergången från förstörande till oförstörande provning möjliggör kvalitetsvärdering av en mycket större yta av den totala tunnelarean till en lägre kostnad, vilket ökar säkerheten och tillförlitligheten av den färdiga tunneln. Både tekniska, miljömässiga och ekonomiska risker kan minskas vilket ger en ökad samhällsnytta. Den utvecklade metoden har vunnit internationellt erkännande och intresse och används för närvarande också i Norge.

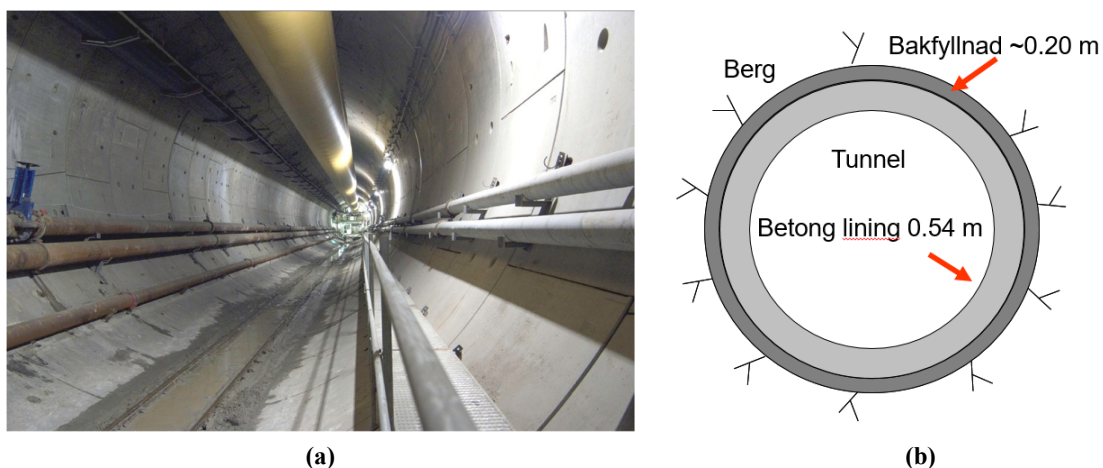
# INNEHÅLL

<b>BAKGRUND</b> .....	<b>4</b>
<b>SYFTE</b> .....	<b>5</b>
<b>METODIK</b> .....	<b>5</b>
IMPACT ECHO (IE) METODEN .....	5
<b>RESULTAT FRÅN UTFÖRDA UNDERSÖKNINGAR</b> .....	<b>7</b>
INLEDANDE TEORETISKA BERÄKNINGAR .....	7
MÄTNINGAR I LABORATORIUM.....	10
INLEDANDE MÄTNINGAR OCH UNDERSÖKNINGAR I TUNNELN GENOM HALLANDSÅS .....	13
NUMERISKA SIMULERINGAR FÖR OPTIMERING AV MÄTMETOD .....	16
<i>Optimering av mätområde</i> .....	17
<i>Verifiering av Q värde vid summering av signaler på olika avstånd</i> .....	20
<i>Optimering av tidsfönster för dämpning av direkt ytvåg</i> .....	21
ALTERNATIVA METODER FÖR FÖRBÄTTRAD UPPSKATTNING AV $Q$ .....	22
UTVÄRDERING AV OLINJÄR RESPONS I RESONANSFREKVENSMÄTNING .....	24
<b>SLUTSATSER</b> .....	<b>27</b>
<b>LITTERATURFÖRTECKNING:</b> .....	<b>28</b>

## BAKGRUND

Det finns ett stort behov av att kunna kvalitetsvärdera bakfyllnaden i tunnlar av prefabricerade tunnelelement. Bakfyllnadsmaterialet injekteras bakom betongelementen och ska ge tillräcklig strukturell hållfasthet för tunneln och minimera läckage av vatten in i tunneln. Idag används fortfarande dyr förstörande provning i form av borrhning genom de nytillverkade betongelementen för att kontrollera den injekterade bakfyllnaden. Alla hål som borrar genom tunnelelementen kan bli potentiella svagheter i framtiden, särskilt i de fall tunneln är utsatt för höga vattentryck utifrån. En tillförlitlig oförstörande metod för kvalitetsvärdering av bakfyllnaden skulle vara fördelaktig både kvalitetsmässigt och ekonomiskt. Tyvärr kan traditionella oförstörande metoder baserade på radar (Zhang m fl., 2010), ultraljud, impulsrespons (Davisa m fl., 2005) eller traditionell Impact Echo (IE) (Aggelis m fl., 2008) vara svåra att applicera på tjocka ( $>0,30$  m) armerade betongelement. Dessa metoder kan ge information om betongelementen men är inte känsliga nog att kunna ge information om materialet bakom betongelementen. Det är främst tjockleken på betongen, armering och grövre ballastkorn som gör dessa traditionella oförstörande mätningar okänsliga för bakfyllnadens egenskaper.

Under bygget av tunneln genom Hallandsåsen undersöktes möjligheten att bedöma kvalitén på bakfyllnaden med traditionella oförstörande provningsmetoder. Ingen befintlig metod visade sig vara direkt tillämpbar vilket ledde till en utökad undersökning av möjligheterna att utveckla en ny metod som var tillämpbar i Hallandsåstunneln. I detta tunnelprojekt var förutsättningarna för oförstörande provning av bakfyllnaden extra utmanande eftersom tunnelementen är relativt tjocka (0.54 m) och vattentrycket relativt högt ( $\sim 100$  m). En ny, alternativ oförstörande metod som bygger på Impact Echo (IE)  $Q$  värde utvecklades och testades experimentellt direkt i produktionen av Hallandsåstunneln under åren 2008 till 2012. Metoden visade på lovande resultat och har inom detta "GeoInfra" projekt (Formas/SBUF/Skanska) studerats vidare för ytterligare verifiering och möjlighet till tillämpning i andra tunnlar med andra egenskaper och tjocklekar på tunnelementen.



**Figur 1. (a) Tunneln genom Hallandsås med prefabricerade tunnelelement i betong (liner) och (b) schematisk figur med tunnelement av betong (lining) och bakfyllnad.**

## SYFTE

Huvudsyftet med detta projekt har varit att djupare undersöka och validera de antagande som den föreslagna Impact Echo  $Q$  värde metoden bygger på. Potentiella felkällor i mätmetoden och signalbehandlingsmetoden har undersökts i detalj. Vidare har också möjligheten till förbättrade mätresultat genom mer avancerade algoritmer för signalbehandling undersökts. Tillexempel har möjligheten att uppskatta bakfyllnadens dynamiska E-modul och eventuella olinjära egenskaper också undersökts.

## METODIK

Projektet har bedrivits som en kombination av experimentellt och teoretiskt arbete för att förfina och utveckla Impact Echo metoden för kvalitetsvärdering av bakfyllnadsmaterialet i tunnlar som byggs med prefabricerade tunnelelement (liner).

### Impact Echo (IE) metoden

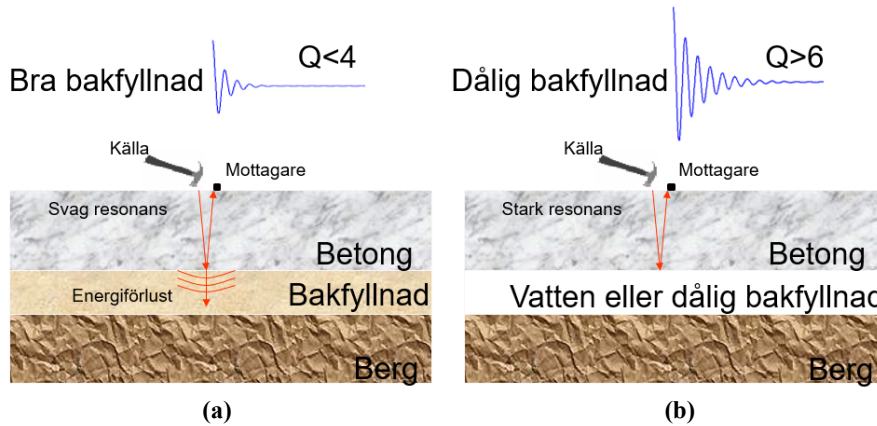
I den konventionella Impact Echo (IE) metoden (Sansalone och Streett, 1997) mäts tjockleksresonansfrekvensen ( $f_r$ ) med en liten hammare som slagkälla och en vibrationsgivare som mottagare nära källan (Figur 2). Tjockleken ( $h$ ) och kompressionsvågshastigheten ( $V_P$ ) hos plattan är relaterad till  $f_r$  genom:

$$f_r = \frac{\beta V_P}{2h} \quad (1)$$

där  $\beta$  är en gammal empirisk korrektionsfaktor som sedan 2006 kunnat förklaras teoretiskt och visat sig bero på tvärkontraktionstalet ( $\nu$ ) (Gibson och Popovics, 2005) ( $\beta = 0.96$  används vanligtvis för betong med  $\nu \sim 0.20$ ). IE-resonansen är vanligtvis stark och tydligt i en betongplatta omgiven av luft på båda sidor (bjälklag). Dynamiskt är betongens under och ovansida i detta fall "fria" att vibrera utan motstånd från något annat elastiskt material. Vid resonansfrekvensen omvandlas då det mesta av den dynamiska (eller seismiska) energin från källan i betongen till en tydlig resonans i tjockleksriktningen. Detta skapar typiskt en tydlig resonansstopp i ett uppmätt amplitudspektrum från en vibrationsgivare (accelerometer) nära källan. Metoden används vanligen till att lokalisera områden i en betongplatta eller vägg med drastiskt avvikande resonansfrekvens vilket kan uppstå vid lokala defekter inne i betongen.

Om betongens undersida däremot inte är "fri" blir motsvarande tjockleksresonans mer dämpad och svagare. Beroende på materialets egenskaper bakom betongen (bakfyllningen i tunnlar) kommer IE-resonansförhållandet att vara mer eller mindre dämpat på grund av energiförluster till materialet bakom betongen. Detta fenomen har aldrig utnyttjats i den traditionella Impact Echo metoden där enbart frekvensen mäts (Aggelis m fl., 2008) och är den bakomliggande idén till den utvecklade metoden i detta projekt, "Impact Echo  $Q$ -factor".  $Q$  värdet (quality factor eller förstärkningsfaktor) är i detta sammanhang ett kvantitativt mått på hur stark resonansen blir. Figur 2a illustrerar hur en del av energin överförs till bakfyllnadsmaterialet vilket reducerar den

energi som stängs in och ger resonans i betongen. En hög förstärkning (Figur 2b) och därmed högt  $Q$  värde indikerar att bakfyllnaden har en betydligt lägre styvhet (E-modul) jämfört med betongen. Detta fall kan fås om bakfyllnaden består av luft, vatten, sämre bakfyllnadsmaterial eller om utrymmet inte är helt fyllt med styv bakfyllnad (injektering).



**Figur 2. Schematisk figur över mätupställning på betonglinjer med (a) bra och (b) sämre bakfyllnad.**

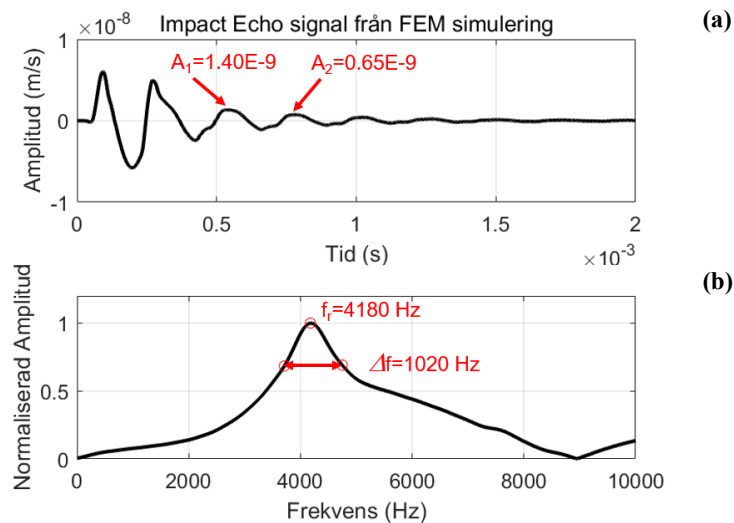
Förstärkningsfaktorn ( $Q$ ) är en viktig parameter i detta projekt och rapport och definieras därför i lite mer detalj.  $Q$  för en dämpad svängning är ett mått på energin i svängningen (resonansen i detta fall) jämfört med den energi som sprids per svängningscykel. Detta gör  $Q$  värdet till ett känsligt mått på energiförluster.  $Q$  värdet kan beräknas från skillnaden i amplitud mellan två toppar i en dämpad resonansfrekvens i tidsdomän ( $A_1$  och  $A_2$  i Figur 3a) med Ekvation 2.

$$Q = \frac{\pi}{\ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right)} \quad \text{Ekvation 2}$$

Det är dock oftast mer robust att beräkna  $Q$  i frekvensdomän med hjälp av den så kallade "half power bandwidth" metoden:

$$Q = \frac{f_r}{\Delta f} \quad \text{Ekvation 3}$$

där  $\Delta f$  är bandbredden vid 70.7 % (halva energin) av amplituden vid  $f_r$  (Figur 3b). Med ekvationerna ovan och värdena i exemplet i Figur 3 blir  $Q=4.1$  från både tids och frekvensdomänberäkningen.



**Figur 3. Exempel på finita elementmetoden (FEM) simulerad dämpad Impact Echo signal med parametrar för att beräkna  $Q$  faktorn i både tidsdomän (a) och frekvensdomän (b).**

## RESULTAT FRÅN UTFÖRDA UNDERSÖKNINGAR

Den grundläggande iden med ”*Impact Echo Q-factor*” metoden som beskrivits ovan och i Figur 2 har studerats och utvecklats genom både praktiska mätningar i laboratorium och fält samt med teoretiska simuleringar i detta projekt. Dessa undersökningar och resultat beskrivs i mer detalj i detta kapitel.

### Inledande teoretiska beräkningar

Figur 2 illustrerar hur dynamiska eller seismiska vågor överförs till bakomliggande material när bakfyllnaden består av ett material som är förhållandevis styvt jämfört med betongen. För seismiska kompressionsvågor ( $P$ -vågor) är det mer specifikt vågens infallande vinkel och kontrasten i den dynamiska impedansen ( $Z_P$ ) som avgör hur mycket amplitud som överförs från betongen (material 1) till bakfyllnaden (material 2). Impedansen  $Z$  definieras som produkten av seismisk hastighet ( $V$ ) och densitet ( $\rho$ ) i materialet (karaktäristisk akustisk impedans). Impedansen kan beräknas för både  $P$ - och  $S$ -vågor (skjuvvågor) och för en  $P$ -våg i material 1 blir impedansen:

$$Z_{P1} = V_{P1}\rho \quad (\text{Ekvation 4})$$

Överföringen eller transmissionen ( $T$ ) av vågamplitud från material 1 till material 2 kan för både  $P$ - och  $S$ -vågor med vinkelrät infallsvinkel ( $90^\circ$ ) beräknas som:

$$T = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (\text{Ekvation 5})$$

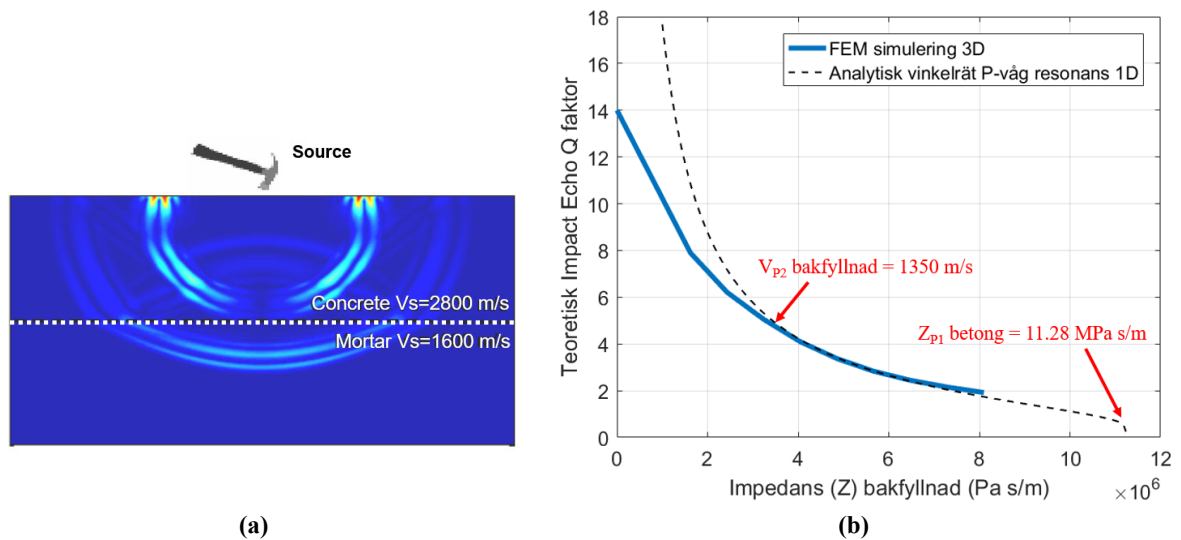


Resterande amplitud reflekteras tillbaka in i material 1 med en reflektionskoefficienten  $R$  ( $R=I-T$ ).

Impact Echo resonansfrekvensen byggs upp av interferens mellan både  $P$ - och  $S$ -vågor i betongen (material 1) med olika riktningar längs ytan och reflektionsvinklar som inte är riktigt  $90^\circ$  (Prada m fl., 2005). Detta gör att det inte finns någon enkel analytisk lösning för att beräkna ett exakt teoretisk  $Q$  värde för en given styvhet i betongen och bakfyllnaden. Relativt omfattande numeriska simuleringar med finita elementmetoden (FEM) eller motsvarande behövs för att beräkna teoretiska  $Q$  värde för olika styvhet på bakfyllnaden. I detta projekt har simuleringar med FEM programmet COMSOL använts för att studera detta (Figur 4a). Figur 4b visar resultatet från numeriska simuleringar (blå linje) men också det förenklade analytiska resultatet baserat på en reflekterande  $P$ -våg i betongen med  $90^\circ$  infallsvinkel (svart streckad linje från Ekvation 2 och 5) för olika styvheter i bakfyllnaden. Figuren visar att den förenklade metoden kan prediktera  $Q$  värden som ligger nära de mer exakta beräkningarna från FEM simuleringar över det mest relevanta området med  $Q$  värden från 2 till 8. Beräkningarna börjar avvika för  $Q$  värden över 5 när impedansen i bakfyllnaden närmar sig  $3.2 \text{ MPa m/s}$  vilket motsvarar  $V_{P2}=1350 \text{ m/s}$ .

För dessa simuleringar hölls materialegenskaperna i betongen konstanta ( $V_{P1}=4700 \text{ m/s}$ ,  $V_{S1}=2800 \text{ m/s}$ ,  $\nu_1=0.23$ ,  $\rho_1=2400 \text{ kg}$  vilket motsvarar en E-modul ( $E_1$ ) på  $46 \text{ GPa}$  och  $Z_1=11.28 \text{ MPa m/s}$ ) medans styvheten i bakfyllnaden varierades ( $V_{P2}=676-3378 \text{ m/s}$ ,  $V_{S2}=400-2000 \text{ m/s}$ ,  $\nu_2=0.23$ ,  $\rho_2=2400 \text{ kg}$  vilket motsvarar en  $E_2= 0.9-23.6 \text{ GPa}$  och  $Z_2=1.6-8.1 \text{ MPa m/s}$ ) för att verifiera att  $Q$  värdet teoretiskt kan "känna av" styvheten i bakfyllnaden. En punkt utan bakfyllnad vid  $Z_2=0 \text{ Pa m/s}$  och  $Q=14$  har också lagts till i Figur 4b. Den förenklade beräkningen (svart streckad linje) visar att  $Q$  värdet går mot noll när bakfyllnadens styvhet närmar sig betongens styvhet eftersom den reflekterade amplituden då går mot noll.

Figur 4b visar ett tydligt samband mellan styvheten i bakfyllnaden och teoretiskt  $Q$  värde. Dessutom visar figuren att  $Q$  värdet blir mer känsligt för bakfyllnadens styvhet när denna minskar och blir sämre. Det bör också påpekas att det exakta sambandet i Figur 4b kan användas för att uppskatta (kvantifiera) styvheten på bakfyllnaden från uppmätta  $Q$  värde så länge egenskaperna i betongen är konstanta och kända.



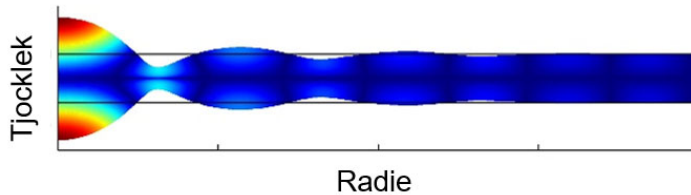
**Figur 4. (a) FEM modell med betong och bakfyllnad. Teoretiskt beräknade  $Q$  värden för resonans i en betongplatta som är fri på ena sidan och i kontakt med ett bakomliggande material på andra sidan med varierande styvhet (Impedans).**

Även om skillnaden mellan den förenklade 1D simuleringen (Ekvation 2 och 5) och den mer exakta 3D FEM beräkningen inte är så stor i Figur 4b finns det andra stora skillnader som är viktiga för förståelsen av den föreslagna "Impact Echo  $Q$ -faktor" metoden. Som nämnts ovan byggs själva resonansen i betongen upp från interferens mellan både  $P$  och  $S$ -vågor i olika riktningar (Prada m fl., 2005). Betongens rörelse vid resonansstoppen kallas modform och kan beräknas med FEM i frekvensdomän.

Figur 5 visar resultatet från en sådan beräkning för enbart betongen utan bakfyllnad. Figuren visar överdrivna vertikala vibrationsamplituder men plattans tjocklek och radie från källan är plottad i skala. IE metoden beskrivs vanligtvis som en lokal punktmätning med ett litet influensområde (Sansalone och Streett, 1997) och scannande mätningar görs ofta med ett litet avstånd mellan mätpunkterna (~2-5 cm) som om metoden kunde urskilja små avvikelser längs med ytan på betongplattor. Figur 5 visar dock att IE resonansen i en betongplatta inte är lokal utan påverkas av ett relativt stort område med en radie på flera platt tjocklekar. Som väntat är vibrationen störst i centrum nära vibrationskällan (hammaren vid mätningar) och vertikal vibration är i fas ut till första nodpunkten (ingen svängning) som uppstår vid en radie på ungefär dubbla tjockleken. Störst är vibrationsamplituden inom ca en tjocklek från källan. Detta avstånd är dock beroende på Poisson's tal ( $\nu$ ) i plattan och kan variera relativt mycket vilket undersökts närmare längre fram i denna rapport.

Detta betyder att IE mätningen påverkas av ett cirkulärt område med en radie som är i samma storleksordning som tjockleken på plattan och att vibrationerna inom detta område är i fas vid IE resonansfrekvensen. Det betyder också att källan (hammaren) helst skulle vara lika stor som detta område för att få igång så mycket som möjligt av IE resonansen och också dämpa andra vågor med mindre horisontell våglängd längs plattan. En så stor vibrationskälla är praktiskt svårt att hantera men samma effekt kan fås genom att summera många tidssynkroniserade mätningar inom samma område. Vanligtvis används bara en liten punktkälla (hammare) vid traditionella IE

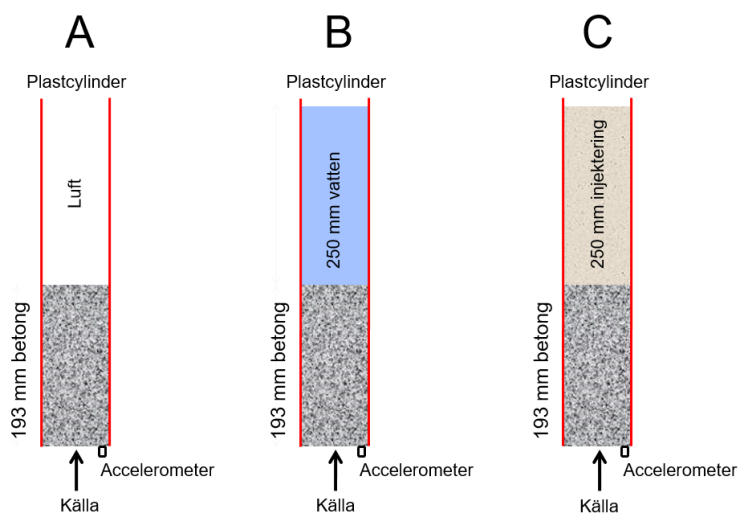
mätningar men i detta projekt har flera hammarslag inom en tjockleks avstånd från centrum på mätpunkten använts för att förstärka energin i IE vibrationsmoden (Figur 5) och samtidigt dämpa andra vågor längs ytan på betongen.



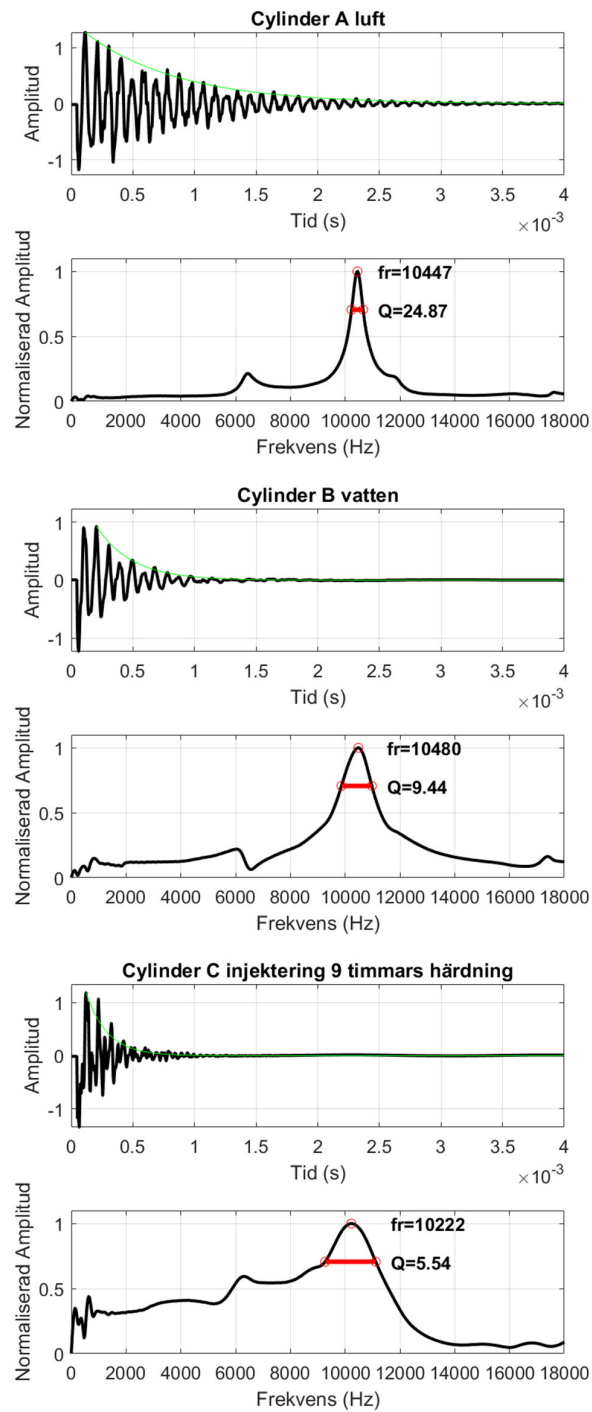
**Figur 5. Modform (absolut vertikal vibration) vid IE resonansfrekvensen i en platta.**

### Mätningar i laboratorium

För att verifiera idén om att  $Q$  värdet skulle kunna användas för att känna av styvheten i bakfyllnaden (Figur 4b) gjordes först några förenklade tester i laboratorium (Ryden m fl., 2013). Eftersom simuleringarna ovan visar att IE resonansfrekvensen utbreder sig över ett stort område med en radie från källan på flera tjocklekar (Figur 5) förenklades mätningarna till en renodlad 1D geometri i 100 mm plaströr för att kunna fokusera enbart på hur  $Q$  värdet påverkas av bakfyllnaden. Denna geometri och typ av resons liknar den analytiska lösningen i Figur 4b (svart linje) och ger dessutom inga störande 2D eller 3D effekter från andra typer av vågor längs betongens yta. Figur 6 visar en schematisk figur över försöksupställningen med 3 olika typer av bakfyllnad. Betongen (193 mm) göts först längst ner i plaströren med 100 mm diameter och en total längd på 450 mm. Olika typer av bakfyllnad kunde sedan provas genom att fylla cylindrarna med olika material ovanifrån (Figur 6).



**Figur 6. Cylindrar för provning i laboratorium med impuls-källa och accelerometer på betongens undersida.**



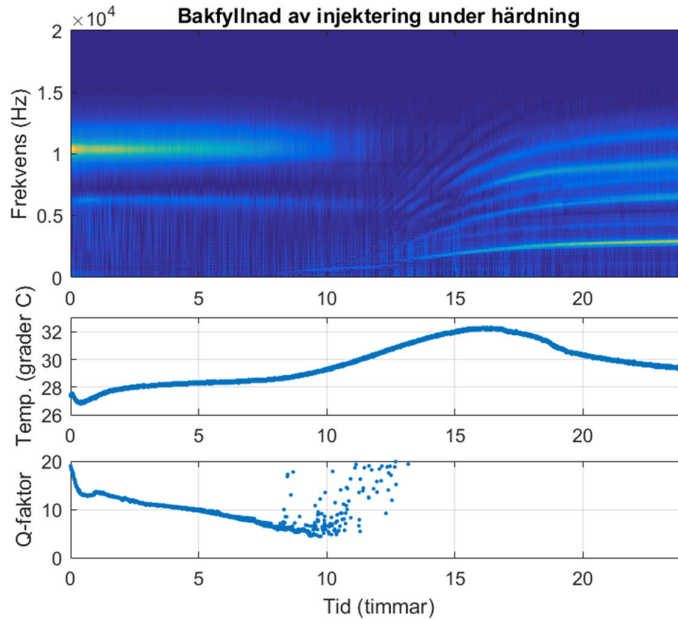
**Figur 7. Resultat från mätningar på cylindrar med betong och bakfyllnad av (A) luft (B) vatten och (C) injektering som härdat i 9 timmar i rumstemperatur.**

Figur 7 visar resultat från mätningar på cylinder A-C från Figur 6 ovan. Den översta figuren visar medelvärde i tidsdomän från 8 slag med en liten impulsälla på undersidan av betongen. Den undre figuren från respektive cylinder visar samma data i frekvensdomän med utvärdering av  $f_r$  och  $Q$  (Ekvation 3). Den tunna gröna linjen i tidsdomän motsvarar det utvärderade  $Q$  värdet från frekvensdomän plottat i tidsdomän (Ekvation 2). Ekvation 1 kan användas för att uppskatta  $V_P$  i betongen med hjälp av uppmätt tjocklek och resonansfrekvens ( $V_P=2*0.193*10447=4033$  m/s).

Som väntat är  $Q$  värdet högst i cylinder A och lägre i cylinder B och C där betongen har kontakt med ett annat material (vatten respektive injektering). För vatten med känd densitet (1000 kg/m<sup>3</sup>) och kompressionsvågshastighet (ca 1450 m/s) blir det teoretiska  $Q$  värdet ca 9 vilket stämmer väl överens med resultatet från cylindern med vatten (B).

För att ytterligare studera hur  $Q$  värdet varierar med olika styvhet på bakfyllnaden gjordes också mätningar under härdning av injekteringen i cylinder C. En temperaturgivare sattes fast på cylinderns utsida för att logga temperaturen under härdningen. En automatisk impulsälla sattes fast på betongens undersida och två mätningar per minut under de första 24 timmarna sparades till en mät dator. Överst i Figur 8 har alla amplitudspektrum plottats i färgskala som funktion av tiden. Den gula linjen i början på tidsskalan motsvarar resonansfrekvensen i betongen strax över 10 kHz (Ekvation 1 med  $\beta=1.0$  på grund av 1D geometrin). Amplituden på denna resonans avtar succesivt och vid ca 10 timmar är amplituden så låg att det inte längre går att se någon tydlig pik. Efter ytterligare några timmar syns nya linjer i figuren vid lägre frekvenser. Dessa linjer motsvarar nya genomgående resonansfrekvenser i hela cylindern (betong och bakfyllnad). Dessa nya resonansfrekvenser är inte så intressanta eller relevanta för detta projekt eftersom det i en verklig tunnel alltid kommer att finnas berg eller jord bakom bakfyllnaden som tar hand om den energi som går genom både betong och bakfyllnad. Att dessa nya resonansfrekvenser fortsätter öka i frekvens efter 24 timmar visar dock att bakfyllnaden inte har härdat färdigt efter denna tid och temperatur.

Längst ner i Figur 8 har det utvärderade  $Q$  värdet plottats som funktion av tid. Utvärderingen görs automatiskt i frekvensdomän (Ekvation 3) och efter ca 10 timmar är amplituden så låg att det inte längre går att utvärdera något  $Q$  värde från betongens resonansfrekvens baserat på Ekvation 3. Redan efter ca 8 timmar börjar  $Q$  värdet att bli lite ostabilt vilket illustrerar vikten av att kunna mäta upp resonansfrekvensen så bra som möjligt vid låga  $Q$  värden (bra styv bakfyllnad). Resultaten i Figur 8 utvärderas automatiskt från varje enskilt slag med den automatiska impulsällan. Ingen medelvärdesbildning eller annan signalbehandling har gjorts för att mäta upp resonansfrekvensen i betongen så tydligt som möjligt. Det bör också poängteras att i detta fall börjar  $Q$  värdet på nästan 20 vilket är högre än vatten (9.5). Detta antas bero på att injekteringen blandats med visp i en hink och innehåller luftbubblor som gör att den inte är helt vattenmättad. Kompressionsvågshastigheten (och därmed impedansen) i flerfasmaterial sjunker drastiskt strax under 100% vattenmättnadsgrad (Santamarina m fl., 2001).



**Figur 8. Kontinuerlig mätning av temperatur på utsidan av cylinder C och  $Q$  värde under de första 24 timmarna av bakfyllnadens härdning.**

## Inledande mätningar och undersökningar i tunneln genom Hallandsås

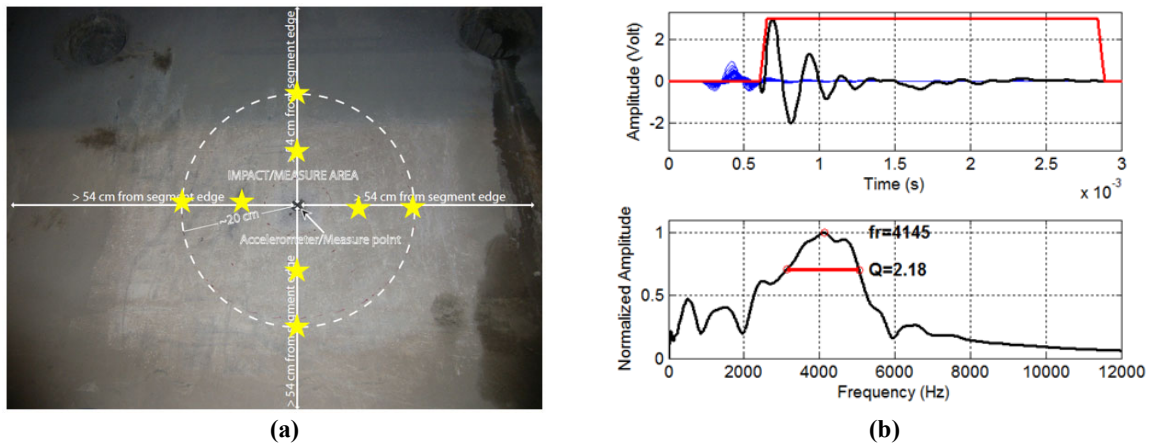
Mycket av det grundläggande arbetet ovan utfördes parallellt med mätningar i Hallandsåstunneln för att så snabbt som möjligt kunna använda en första prototyp av metoden i arbetet med tunneln. Grunderna till metoden som beskrivits ovan visar att det finns stor chans att kunna bedöma bakfyllnadens tillstånd genom  $Q$  värdet på IE resonansfrekvensen i betongen.

Den stora utmaningen i fält är att kunna mäta upp resonansstoppen så tydligt som möjligt även vid låga  $Q$  värde då resonansen i de prefabricerade tunnelelementen är låg. Resultaten från de förenklade 1D mätningarna på cylindrar visade att detta kan vara en utmaning även utan störningar från andra vågor längs ytan (3D effekter). I en verklig 3D miljö genereras vågor i alla riktningar och framförallt ytvågor har en hög amplitud längs ytan.

Inledande mätningar i Hallandsåstunneln med 0.54 m tjocka betongelement (liner) visade tydligt att en vanlig IE mätning med ett eller flera slag nära källan inte gav tillräckligt robusta resultat för att kunna utvärdera robusta  $Q$  värde vid  $Q < 10$ . Flera olika metoder med medelvärdesbildning testades då direkt i tunneln för att förbättra den uppmätta resonansstoppen. Upprepade slag på olika avstånd och riktningar från accelerometern gav snabbt stora förbättringar i uppmätt resonansstopp.

Figur 9 visar effekten av flera slag på två olika avstånd från accelerometern (0.1 m och 0.2 m) och i fyra olika riktningar från accelerometern. Blåa signaler i Figur 9b kommer från varje enskilt slag med en liten hammare och den svarta tjockare linjen är summan av alla signaler. När alla signaler har summerats förstärks IE resonansstoppen så att ett  $Q$  värde går att uppskatta med Ekvation 3 även vid relativt låga  $Q$  värde. Signalerna har här också begränsats i tid med ett

fönster (röd linje i den övre delen av Figur 9a). Fönstret dämpar främst den första cykeln i varje signal vilken är den direkta ytvågen från källan som annars dominerar och stör IE resonansen.



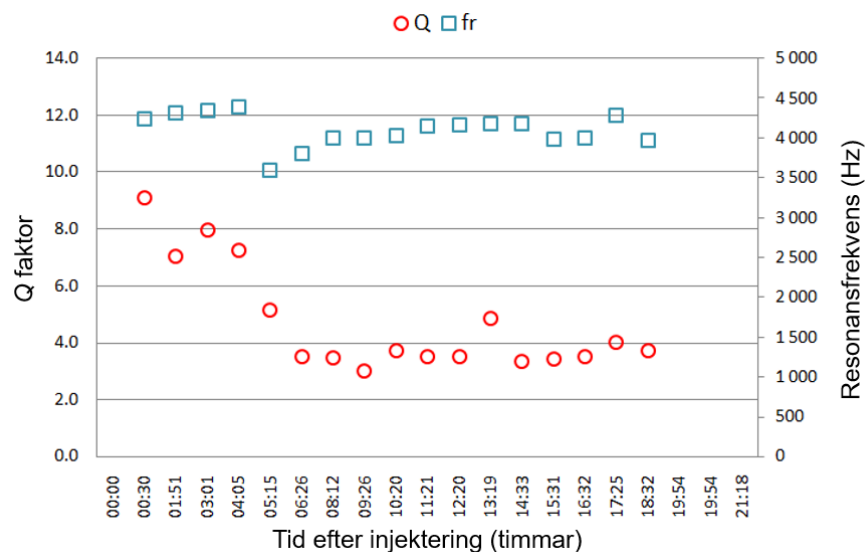
**Figur 9. (a) Slagpunkter på två olika avstånd och i fyra olika riktningar från accelerometern som fästs i mitten på mätpunkten. (b) Exempel på resultat från summering av alla slag i alla slagpunkter runt accelerometern vid lågt  $Q$  värde.**

Efter dessa inledande förbättringar av metoden utfördes ett blindtest i Hallandsåstunneln där 6 olika sektioner hade olika men för utföraren okända typer av bakfyllnad. I varje sektion som var några meter långa utfördes 10 mätningar och Tabell 1 visar medelvärdet från uppmätta  $Q$  värde och  $f_r$  i alla sektioner. Sektionen med oinjekterade ärtsingeln (B) gav ett betydligt högre  $Q$  värde (8.17) jämfört med övriga sektioner som hade olika typer av bakfyllnadsmaterial och mängd injektering och ett  $Q$  värde under 5. Sektion D-F hade samma bakfyllnadsmaterial men hade injekterats med olika stor teoretisk volym av den tillgängliga volymen bakom tunnelelementen. I dessa sektioner minskar  $Q$  värdet med ökande fyllnadsgrad vilket bekräftar en bättre och styvare bakfyllnad ju mer injektering som har använts. Sammanfattningsvis gav blindtestet ett positivt svar på den viktigaste frågan, om metoden kunde identifiera oinjekterade områden bakom tunnelelementen (sektion B).

**Tabell 1. Sammanställning av uppmätta medelvärde och standardavvikelse i blindtestet.**

Sektion	Bakfyllnad	$Q$ medel	$Q$ std	$f_r$ medel (Hz)	$f_r$ std (Hz)
A	Murbruk 1	3.05	1.36	3 806	810
B	Oinjekterad ärtsingel vattenmättad	8.17	1.66	4 315	99
C	Murbruk 2	4.05	3.10	3 811	425
D	100 % injekterad putsbruk	4.84	2.10	3 938	347
E	160 % injekterad putsbruk	3.09	0.93	3 884	289
F	140 % injekterad putsbruk	4.13	1.83	3 875	268

I Hallandsåstunneln gjordes också upprepade mätningar i samma punkt medan injekteringen härdade. Detta försök liknar mätningarna på cylinder C (Figur 8) men med en verklig 3D geometri i full skala. I Figur 10 representerar tiden noll ungefärlig tid då bakfyllnaden injekterades och inte den exakta åldern på injekteringen eller exakt tid när injekteringen nådde testpunkten. Som förväntat börjar  $Q$  faktorn (röda cirklar) vid ett högt värde (8-10) när bakfyllnaden är dålig (vattenmättad ärtsingel eller färsk injektering).  $Q$  minskar sedan under injekterings härdning och stabiliserar sig vid ett lågt  $Q$  värde (3-4) som representerar ett helt fyllt tillstånd. Figur 10 visar också en plötslig minskning av resonansfrekvensen (blå kvadrater) efter cirka 5 timmar, vilket indikerar att huvudkällan för reflekterad energi förändras från betongbakfyllnad gränsen till den djupare gränsen mellan bakfyllnad och berg (jämför med Figur 8 från cylindermätningarna). Men i detta fall återspeglar det uppmätta  $Q$  värdet ändå fortfarande rätt status för återfyllningen eftersom energin fortsätter att spridas in i berget vilket inte är möjligt vid dålig bakfyllnad.

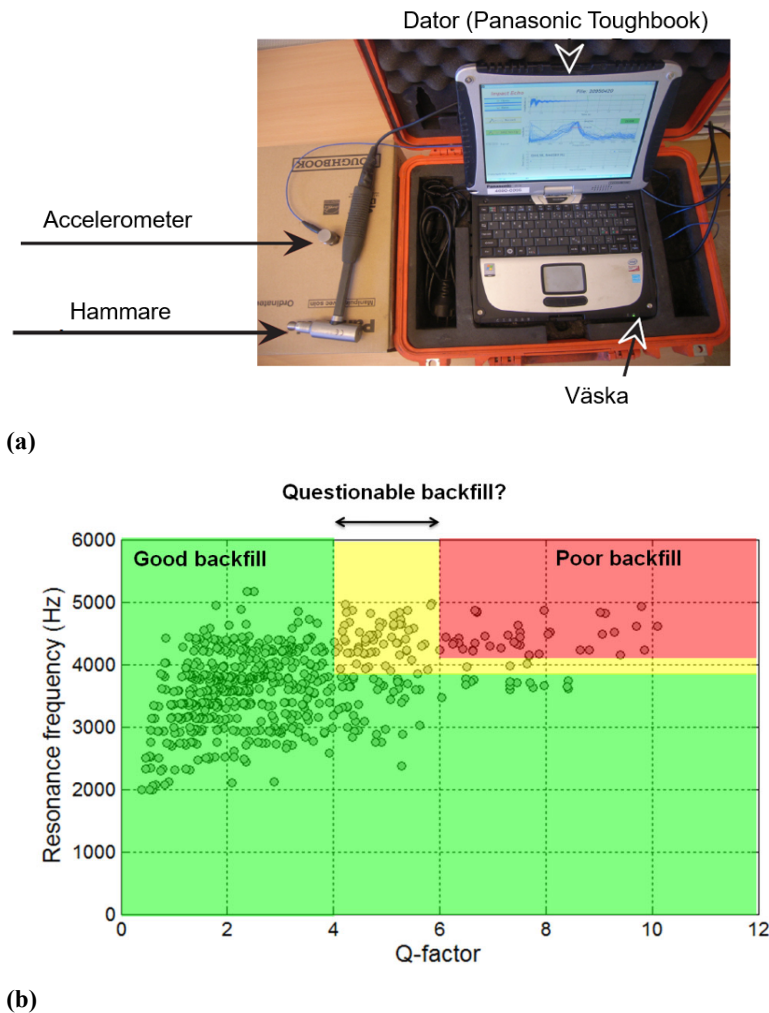


**Figur 10. Resultat från upprepade mätningar i samma punkt i Hallandsåstunneln efter att bakfyllnaden injekterats och börjat härda.**

Under dessa inledande tester i Hallandsåstunneln provades också flera olika källor och vibrationsgivare. Resultatet av dess tester ledde till en enkel mätutrustning baserad på en bärbar dator för fältmiljö där data samlas in med ljudkortet i datorn (samplingshastighet 96 kHz). Ett egenutvecklat datorprogram sparar data och utvärderar resultatet automatiskt direkt efter varje mätning. Signalerna från hammaren (PCB Model 086D05) och accelerometern (PCB Model 353B33) förstärks med en USB förstärkare (PCB Model 485B36) för att slippa fler batterier än batteriet i den bärbara datorn. Figur 11a visar en bild på utrustningen som togs fram för mätningar i Hallandsåstunneln. Observera att hammaren är instrumenterad med en kraftgivare vilken används som ”trigger” vid alla mätningar. Summeringen av tidssynkroniserade signaler från flera hammarslag vid olika slagpunkter förutsätter att triggern fungerar mycket bra. Triggerns funktion kan enkelt kontrolleras genom att upprepa flera slag i samma punkt och sedan plotta alla signaler på varandra. Alla signaler ska då börja vid samma tid och se likartade ut.



Figur 11b visar det utvärderingskriterium som användes under de inledande mätningarna i Hallandsåstunneln. Bedömningen bygger i huvudsak på  $Q$  värdet ( $Q < 4$  bra och  $Q > 6$  sämre) men har också kompletterats med resonansfrekvensen för att göra bedömningen så robust som möjligt. Resonansfrekvenser under 3900 Hz antas komma från den djupare gränsen mellan bakfyllnad och berg vilket betyder att bakfyllnaden är tillräckligt bra.



**Figur 11. (a) Utrustning för "Impact Echo Q-factor" mätningar i Hallandsåstunneln. (b) Bedömning av bakfyllnaden baserat på uppmätt  $f_r$  och  $Q$  värde under inledande tester i Hallandsåstunneln.**

## Numeriska simuleringar för optimering av mätmetod

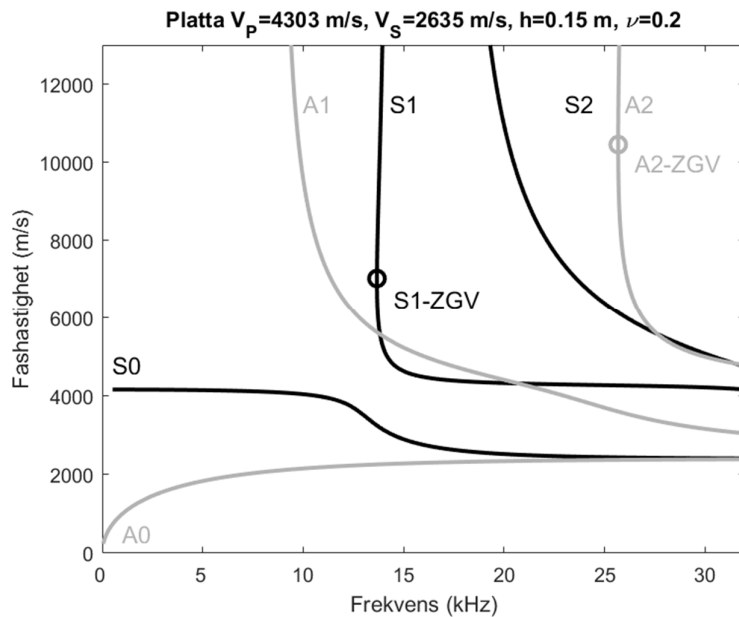
Under de inledande mätningarna i Hallandsåstunneln identifierades flera frågeställningar som aldrig kunde studeras vidare i detalj innan detta forskningsprojekt initierades. Mätningarna i tunneln visade tydligt att antalet slagpunkter och slagpunkternas avstånd från accelerometern var mycket kritiskt för att få en tydlig resonansstopp vid låga  $Q$  värde. För att kunna optimera

mätförändret och förstå hur IE resonansen kunde förstärkas genom upprepade slag har flera numeriska simuleringar utförts.

Den första frågan som studerats är hur stort område från accelerometern som kan användas som slagyta för att förbättra den uppmätta resonanstoppet. Det är också viktigt att kunna verifiera att den föreslagna metoden, att summera alla tidssynkroniserade slag, inte påverkar det utvärderade  $Q$  värdet på något felaktigt och systematiskt sätt. Dessa frågor har studerats i detalj i Ryden (2016) och sammanfattas här nedan.

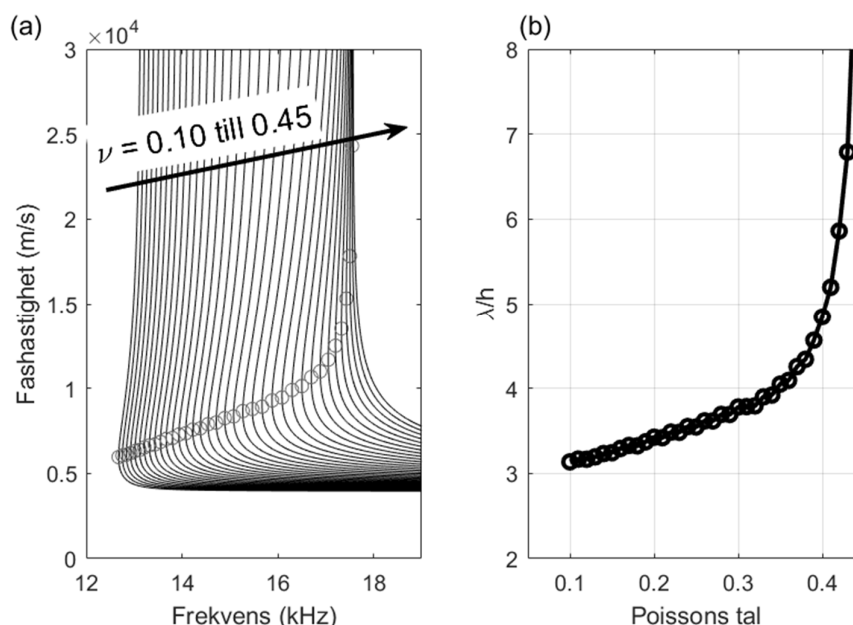
### Optimering av mätområde

Som nämnts tidigare byggs IE resonansfrekvensen upp av interferens mellan både  $P$ - och  $S$ -vågor i betongen med olika riktning längs ytan och reflektionsvinklar som inte är riktigt  $90^\circ$  mot ytan (Prada m fl., 2005). Detta gör att det inte finns någon enkel analytisk lösning för att beräkna IE frekvensen för olika kombinationer av  $V_P$  och  $V_S$  (Poisson's tal) samt den horisontella våglängden längs ytan (modformen). Den så kallade Lambvågsekvationen (Lamb waves) kan dock användas för att beräkna dessa värden för en helt fri platta (Viktorov, 1967). Genom att leta upp lösningar till Lambvågsekvationen iterativt kan så kallade dispersionskurvor som visar möjliga kombinationer av frekvens och våglängd (eller fashastighet) i en fri platta plottas. Figur 12 visar de 6 första Lambvågsmoderna i en fri platta. För dessa beräkningar har en 0.15 m tjock platta med E-modul på 40 GPa,  $\rho=2400 \text{ kg/m}^3$  och  $\nu=0.20$  använts (motsvarar  $V_P=4303 \text{ m/s}$  och  $V_S=2635 \text{ m/s}$ ). IE frekvensen är den punkt, på den andra symmetriska moden (S1), där frekvensen är som lägst och betecknas ofta som S1ZGV (vilket står för S1 Zero Group Velocity). I denna punkt transporteras ingen energi bort från källan vilket ger upphov till en kraftig resonans utan någon transport av vågenergi (grupphastighet) längs plattan.



**Figur 12. Lambvågsdispersionskurvor för en fri platta. Dispersionskurvorna visar möjliga vibrationsmoder, kombinationer av frekvens och fashastighet (eller våglängd längs plattan).**

Figur 13a visar en mindre del av S1 dispersionskurvan där S1ZGV punkten markerats med en cirkel för olika värden på  $\nu$ . Figuren visar att S1ZGV punktens läge är känsligt för  $\nu$ . I Figur 13b har kvoten mellan horisontell våglängd ( $\lambda$ ) och plattans tjocklek ( $h$ ) plottats som funktion av  $\nu$ . För betong och små dynamiska töjningar brukar  $\nu$  ligga runt 0.15-0.25. I detta intervall är våglängden längs med ytan minst  $3h$ . Första nodpunkten ligger vid halva våglängden vilket motsvarar  $1.5h$  och vibrationen har störst amplitud inom ett område på ungefär en platt tjocklek (jämför också med Figur 5).

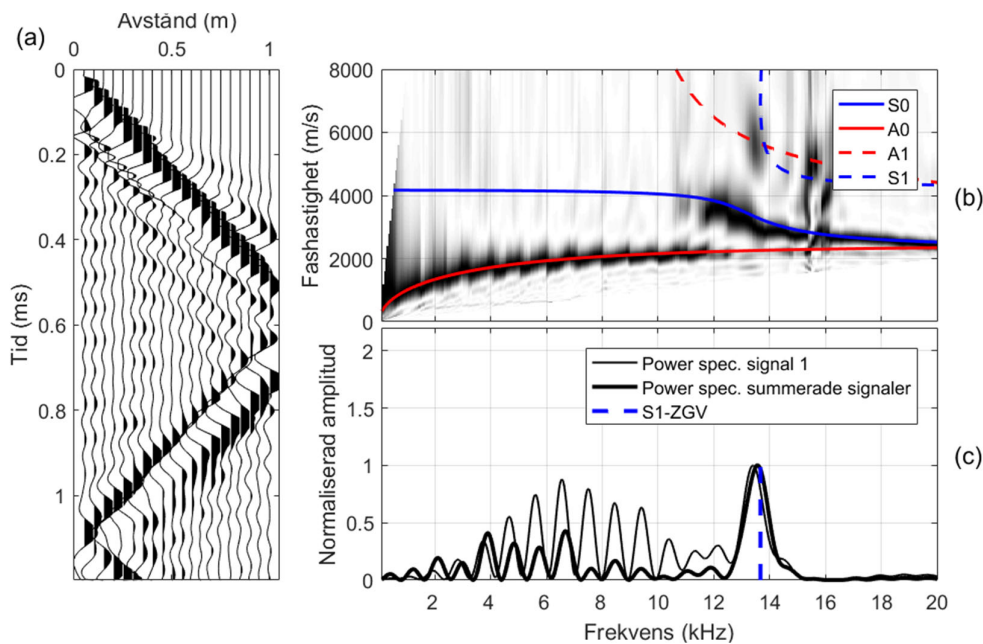


**Figur 13. (a) Dispersionskurvor för den andra symmetriska Lambvågen (S1) med IE frekvensen inringad med cirkel (S1ZGV). (b) Kvoten mellan våglängd ( $\lambda$ ) längs plattans yta och tjocklek på plattan ( $h$ ) som funktion av  $\nu$ .**

Resultaten ovan bekräftar att IE resonansen inte är lokal utan utbreder sig över ett område på flera platt-tjocklekar för alla rimliga värden på  $\nu$  i betong. Detta resultat har stor betydelse för möjligheten att förbättra mätningen av IE resonansen och samtidigt dämpa störningar från andra typer av vågor med kortare våglängd. Inom en radie ( $r$ ) på ca  $1.5h$  från källan är vibrationerna i fas vid IE resonansfrekvensen och kan därmed förstärkas genom signalbehandling där alla signaler från olika men tidssynkroniserade hammarslag summeras. Ett hammarslag på ytan av plattan genererar dock alla moder som existerar inom det frekvensområde som hammaren alstrar. För referensplattan i Figur 12 kommer till exempel A0 moden genereras med en våglängd på 0.16 m (fashastigheten/frekvens vid S1ZGV frekvensen). Samtidigt genereras också en S0 mod med en våglängd på 0.24 m längs plattans yta. Vid S1ZGV frekvensen är våglängden längre (0.5 m) och genom att summera signaler inom en radie på halva denna våglängd kommer S1ZGV att kunna förstärkas samtidigt som A0 och S0 moden dämpas på grund av summering över en hel

våglängd (lika stor positiv och negativ amplitud). För att illustrera och studera denna idé i mer detalj har en FEM modell av en mindre platta modellerats.

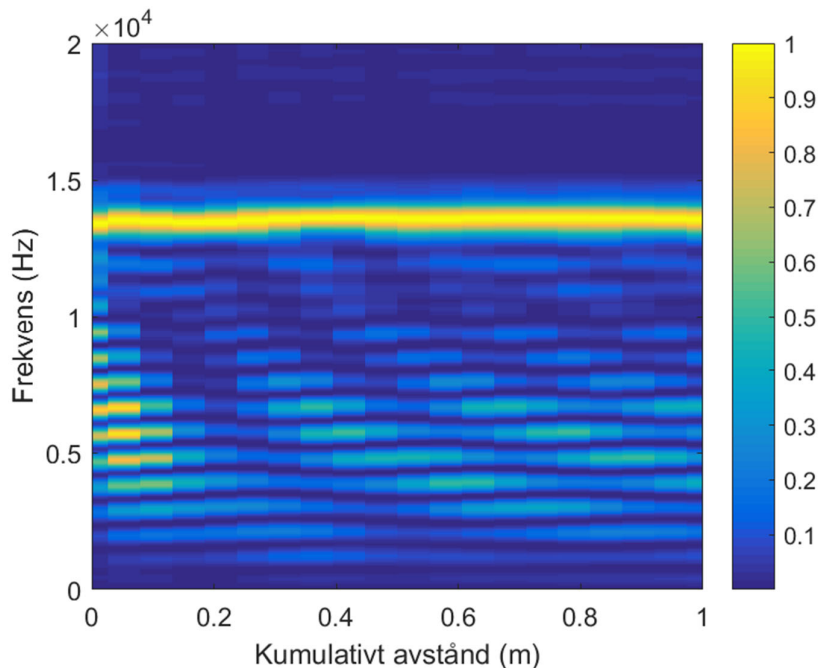
Figur 14 visar resultat från en 2D axialsymmetrisk FE modell med en platta med samma egenskaper som ovan och med en radie på 1.3 m. Simuleringen visar vibrationer längs en linje på avstånd från 0.05 m till 1.00 m från källan. Plattan exciteras i detta fall med en källa i mitten på plattan ( $r=0$ ) men detta är ekvivalent till fallet med en vibrationsgivare och flera källor i en linje. Plattan har gjorts medvetet relativt liten för att få med reflekterande vågor från plattans ändyta vid  $r=1.3$  m. I Figur 14a syns en tydlig reflektion av ytvågen (A0 moden) men också den snabbare S0 moden reflekteras och stör S1ZGV moden som bara kan anas som en ringning i signalerna närmast källan runt 0.3-0.6 ms. Figur 14b visar samma data i frekvens-fashastighetsdomän och här syns tydligt de propagerande moderna A0 och S0. Det är framförallt A0 moden (ytvåg) som har betydligt större amplitud jämfört med IE resonansen och dessutom kan reflekteras flera gånger i kanterna på en platta eller ett tunnelement. Vid låga  $Q$  värden där IE resonansen är mycket svag kommer denna våg att helt dominera allt som mäts på ytan utan någon typ av signalbehandling för att dämpa A0 och förstärka IE frekvensen. I Figur 14c har spektrum från signalen närmast källan (normal IE mätning) jämförts med spektrum från summan av alla signaler längs linjen i Figur 14a (kraftigare linje). Resultaten visar att resonansspiken vid S1ZGV frekvensen förstärks och störande pikar vid andra frekvenser dämpas genom summeringen av alla signaler. I detta fall är ändå plattan helt fri (ingen bakfyllnad) vilket är det mest gynnsamma fallet för IE mätning. Förstärkning av resonansfrekvensen och dämpning av propagerande ytvågor blir ännu viktigare när plattan har kontakt med bra bakfyllnad.



**Figur 14. (a) Simulerad data från FEM modell av fri platta i tidsdomän. (b) Motsvarande data i frekvens-fashastighets domän med teoretiska Lambvågsdispersionskurvor. (c) Spektrum från en signal närmast källan jämfört med spektrum från summan av alla signaler.**

## Verifiering av $Q$ värde vid summering av signaler på olika avstånd

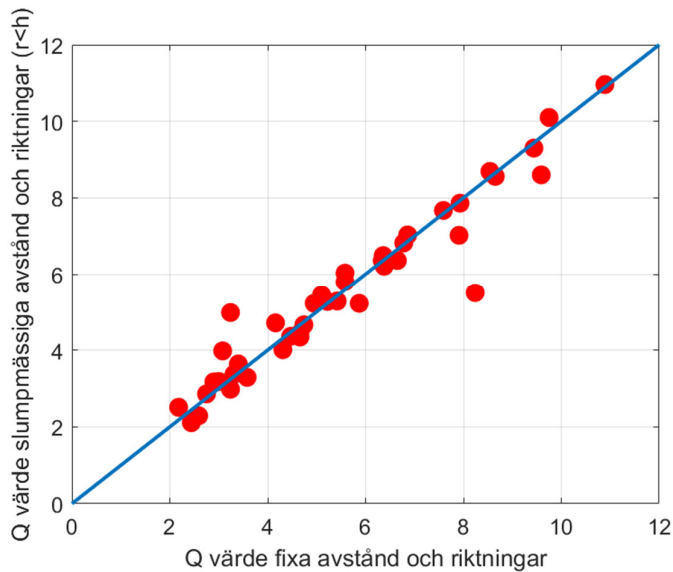
För att ytterligare studera hur IE resonanstoppnen påverkas av summeringen av flera signaler på olika avstånd från källan har summeringen gjorts som en funktion av kumulativt avstånd från källan. Figur 15 visar resonanstoppnen i färgskala som funktion av kumulativt avstånd från källan. IE frekvensen vid 13 670 Hz syns som ett tydligt gult horisontellt streck i Figur 15. Bredden på frekvenstoppen är också konstant vilket betyder att både frekvensen och  $Q$  värdet är mycket stabilt och i princip oberoende av hur långt avstånd med signaler som tas med i summeringen. Detta är ett mycket viktigt resultat som visar att de exakta avstånden från accelerometern till hammarens slagpunkt i tunnelmätningarna inte är så kritiskt. Figur 15 visar också att ju fler signaler som summeras desto mer dämpas störningar (andra frekvenstoppar vid lägre frekvenser) från A0 moden.



**Figur 15. Spektrum från data i Figur 14a som funktion av kumulativt avstånd från källan.**

I en verklig 3D miljö med olika längd och bredd på plattan kommer också riktningen från accelerometern att påverka resultatet. I detta fall borde dämpningen av ytvågor inklusive deras reflektioner i ändtytor och förstärkning av IE frekvensen bli som bäst vid summering av signaler från slumpmässiga avstånd och riktningar innanför den första nodpunkten ( $r < 1.5h$ ). För att ytterligare bekräfta resultaten ovan gjordes därför en jämförelse mellan mätningar på två avstånd (0.1 m och 0.2 m) i fyra riktningar (Figur 9a) och mätningar med slumpmässiga avstånd och riktningar inom ca  $1h$  från accelerometern. Figur 16 visar resultatet från upprepade mätningar i 42 olika mätpunkter i Hallandsåstunneln. De flesta punkterna ligger på eller mycket nära den blå linjen som motsvarar exakt samma resultat från de båda mätningarna. Ingen systematisk skillnad mellan de båda mätningarna syns i Figur 16. Eftersom mätningar på slumpmässiga avstånd och

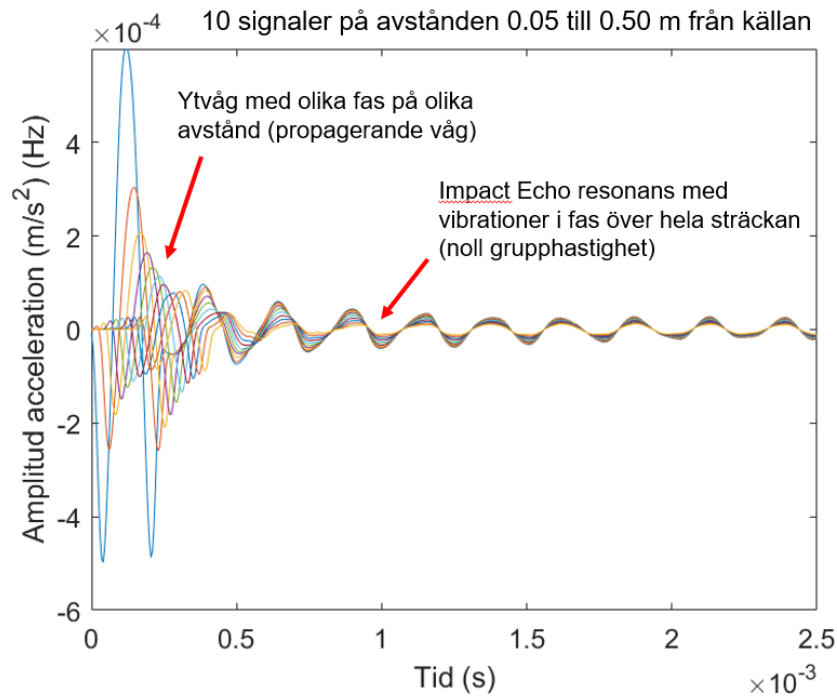
riktningar är enklare och snabbare och dessutom verkar ge robustare resultat rekommenderas denna förbättrade mätmetod.



**Figur 16. Jämförelse av resultatet från 42 olika mätpunkter i Hallandsåstunneln med normal mätning vid två avstånd och fyra riktningar (Figur 9a) och mätning med slumpmässigt avstånd och riktning inom  $r < h$ .**

#### Optimering av tidsfönster för dämpning av direkt ytvåg

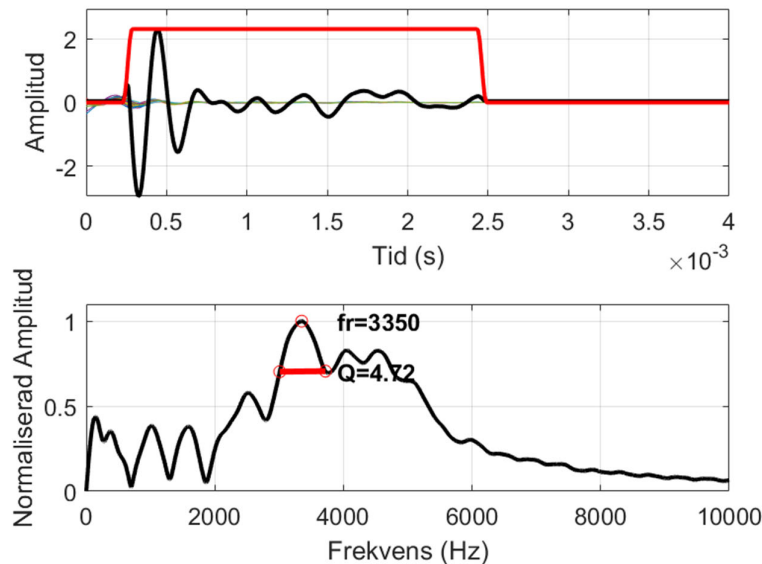
Figur 14c och Figur 15 visar att trots summeringen av många signaler inom det optimala området  $r < h$  så finns det fortfarande lite störningar kvar från den direkta och reflekterade ytvågen (A0). För att minimera störningar från ytvågen kan ett tidsfönster användas för att dämpa den direkta ytvågen och minimera brus vid sena tider i signalerna. Tidsfönstret behöver optimeras för betongens tjocklek vilket kan göras genom att plotta signaler från olika avstånd mellan källa och mottagare och identifiera tiden då alla signaler är i fas och ytvågen (A0) har passerat. I exemplet från en FEM modell i Figur 17 är denna tid ca 0.6 ms. För att minimera störningar av själva tidsfönstret är det viktigt att fönstret (amplitud som funktion av tid) inte är helt rektangulärt utan går från noll till 1 gradvis över en kort tid. Figur 9b visar ett exempel på ett tidsfönster från 0.6 ms till 2.9 ms (röd linje). Den summerade signalen multipliceras med detta tidsfönster innan transformation till frekvensdomän och automatisk beräkning av  $Q$  värdet.



**Figur 17. Signaler på avstånden 0.05 m till 0.50 m från FEM simulering med 0.54 m tjock platta.**

### Alternativa metoder för förbättrad uppskattning av $Q$

Hittills har  $Q$  värdet i alla exempel beräknats med Ekvation 3 (se också Figur 3). Så länge  $Q$  värdet är högt är denna metod oftast robust och bra. Men vid låga  $Q$  värde kan resonanstoppet bli uppdelat i flera pika och den automatiska identifieringen av bandbredden ( $\Delta f$ ) vid 70.7 % av toppvärdet kan bli svår. Figur 18 visar ett exempel på data från en punkt med bra bakfyllnad där den vanliga metoden för beräkning av  $Q$  värde inte blir tillräckligt robust. Betongens resonansfrekvens ligger här på ca 4100 Hz men resonansen är så svag att hela resonanstoppet från 2000 Hz till 6000 Hz har delat upp sig i flera pika. Den automatiska utvärderingen av  $Q$  ger här ett för högt värde. Om  $\Delta f$  istället hade beräknats vid 60% av toppvärdet skulle  $Q$  värdet bli betydligt lägre.

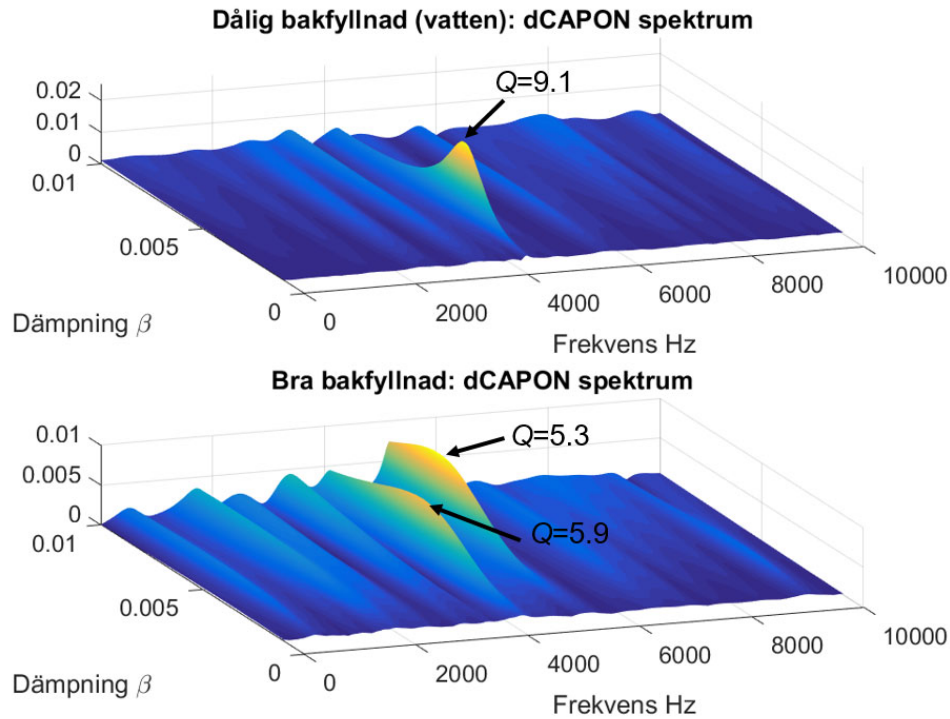


**Figur 18. Exempel på data från en punkt med bra bakfyllnad där den enkla beräkningen av  $Q$  värde (Ekvation 3) inte är robust och tillförlitlig.**

Metoden ovan bygger på spektraluppskattning med en så kallad *Fourier Transform* (FFT) och beräkning av dämpning med den så kallade *Half Power Bandwidth* metoden (Ekvation 3). Det finns dock en mängd andra metoder för spektraluppskattning (Stoica och Moses, 2005). I detta projekt har flera mer avancerade parametriska och icke parametriska spektraluppskattningsmetoder studerats på data från mätningar i Hallandsåstunneln. Gemensamt för dessa metoder är att de ofta bygger på en identifiering och modellering av både brus och dämpade moder i signalen. Genom att försöka modellera den uppmätta signalen med en uppsättning dämpade moder kan både frekvens och dämpning från moder som ligger nära varandra och överlappar varandra i ett vanligt FFT spektrum särskiljas. Figur 19 visar ett exempel på den så kallade dCAPON metoden där de dominerande moderna i en signal kan plottas i en 2D bild över frekvens och dämpning (Stoica och Sundin, 2001).

Det översta exemplet i Figur 19 visar resultatet från en mätning i den oinjekterade sektionen från blindtestet (Tabell 1). Här syns som väntat bara en tydlig pik vid en frekvens på 4300 Hz. Dämpningen kan läsas av direkt på y-axeln (0.0037) och motsvarar ett  $Q$  värde på 9.1. Den undre delen av Figur 19 visar ett exempel på bättre bakfyllnad men en signal som innehåller minst 2 olika närliggande resonansfrekvenser med lite olika dämpning. I detta fall kan de individuella moderna separeras och en korrekt dämpning från varje mod fås direkt från figuren. Den här typen av 2D spektrum kan ge en bättre och mer korrekt bild över resonansfrekvenser i uppmätta signaler från tunnelmätningar men är inte lika snabba och robusta som den enklare FFT metoden.



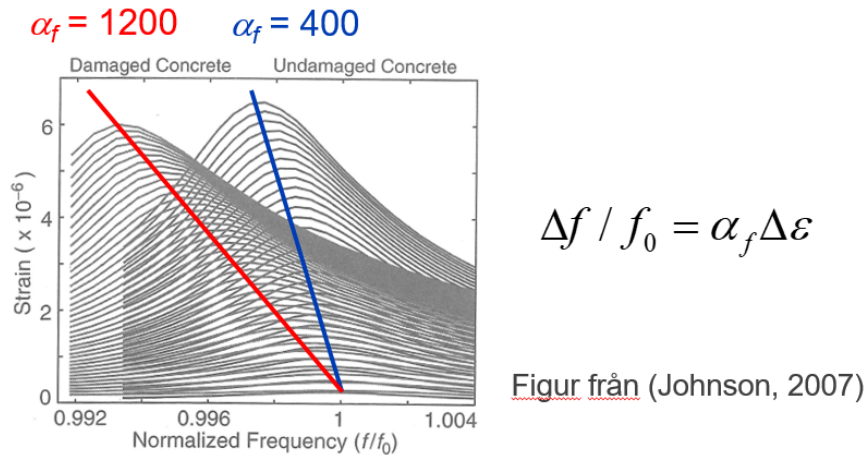


**Figur 19. Exempel på dCAPON spektrum från dålig bakfyllnad (övre figuren) och bättre bakfyllnad men (undre figuren).**

### Utvärdering av olinjär respons i resonansfrekvensmätning

Uppskattning av ett materials olinjära elastiska respons har fått mycket uppmärksamhet inom oförstörande provning av material under de senaste åren. Många exempel inom ultraljudsteknik har visat att graden av olinjäritet vid små dynamiska töjningar (vågutbredning) kan ge ett känsligt mått på skador och inhomogenitet i betong och berg (Guyer och Johnson, 1999). Olinjäriteten har i många fall visat sig vara en faktor 100 gånger känsligare jämfört med uppmätta variationer i ljudhastighet, E-modul eller dämpning. Ett vanligt sätt att uppskatta olinjäriteten är att variera excitationens amplituden vid resonansfrekvensmätningar och sedan definiera olinjäriteten som ett mått på amplitudens frekvensberoende (Nonlinear Resonant Ultrasound Spectroscopy NRUS) (Chen m fl., 2010). En högre amplitud leder i detta fall ofta till en lägre resonansfrekvens eftersom E-modulen i materialet är töjningsberoende även vid dessa mycket små töjningsnivåer (Guyer och Johnson, 1999).

## Nonlinear Ultrasound Spectroscopy (NRUS)



**Figur 20. Exempel på utvärdering av olinjäritet ( $\alpha$ ) med NRUS teknik, modifierad figur efter Johnson (2007).**

Inom detta projekt så har möjligheten att utvärdera ett mått på olinjäriteten ( $\alpha$ ) i ett material börjat utvecklas på provkroppar i laboratorium. Tanken är att denna metod i förlängningen också ska kunna användas vid IE mätningar som de som utförts i Hallandsåstunneln. Metoden bygger på en liknande teknik som 2D spektraluppskattningsmetoderna i kapitlet ovan. Istället för att göra en konventionell FFT på den uppmätta signalen anpassas en eller flera dämpade svängningsmoder som tillåts ha en tidsberoende frekvens och dämpning. Metoden beskrivs i detalj i Dahlen m fl. (2015) och exemplifieras här kortfattat.

För att utnyttja hela amplitudområdet i en uppmätt signal från en resonansfrekvensmätning anpassas en syntetisk signal ( $z(t)$ ) till den uppmätta signalen ( $x(t)$ ) (Dahlen m fl. 2015). Genom att använda en modellerad signal där frekvens- och dämpningsparametrarna får ändras med tiden, kan materialets olinjäritet uppskattas över hela det uppmätta amplitudområdet (efterklang av signalen). I sin enklaste form kan den modellerade signalen uttryckas med bara en svängningsmod ( $k=1$ ) som:

$$z_k(t, \theta_k) = \rho_k \exp^{-\Psi(t, \theta_k) + i\phi(t, \theta_k)} \quad \text{Ekvation 6}$$

där  $\rho_k$  är den initiala absoluta amplituden vid  $t=0$ . Dämpningen och fasen (frekvensen) för signalen modelleras som två separata polynomer  $\Psi(t, \theta_k)$  och  $\phi(t, \theta_k)$ :

$$\Psi(t, \theta_k) = \sum_{m=1}^{P_k} b_m t^m \quad \text{Ekvation 7}$$

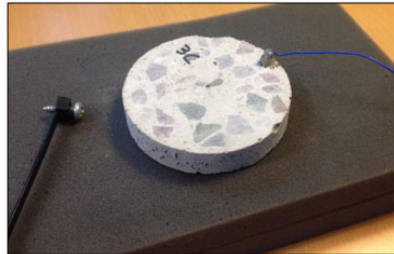
och

$$\phi(t, \theta_k) = \sum_{m=0}^{Q_k} a_m t^m \quad \text{Ekvation 8}$$

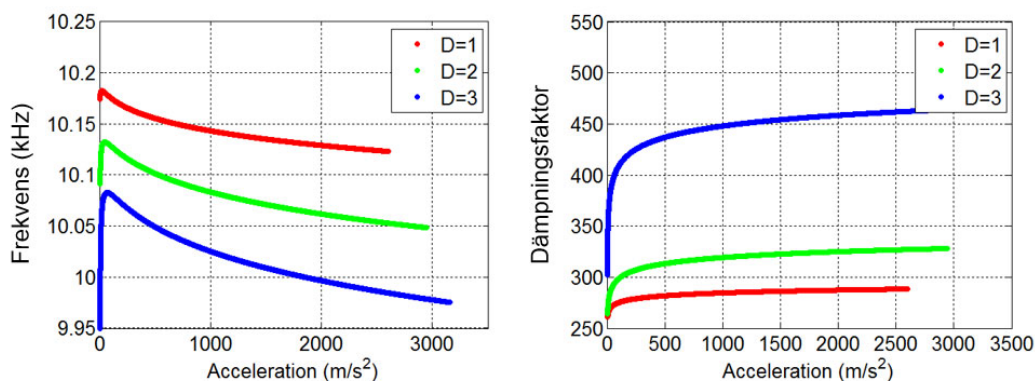
där  $P_k$  och  $Q_k$  representerar polynomets ordning för dämpning respektive fas.  $a_m$ - och  $b_m$ -koefficienterna tillsammans med  $\rho_k$  är de okända koefficienterna som uppskattas automatiskt för varje svängningsmod,  $k$ , vid matchningen av modellerad och uppmätt signal.

För  $P_k=1$  och  $Q_k=1$  reduceras den modellerade signalen (Ekvation 6) till en konventionell exponentiellt avtagande sinusformad signal. Att lägga till en andra term till faspolynom (  $Q_k=2$  ) introducerar en linjär frekvensförändring som en funktion av tiden. På detta sätt kan ytterligare termer läggas till så länge en bättre passning uppnås. Att matcha flera svängningsmoder med högre ordningens polynom kan vara ett utmanande optimeringsproblem som beskrivs i detalj i Dahlen m fl. (2015).

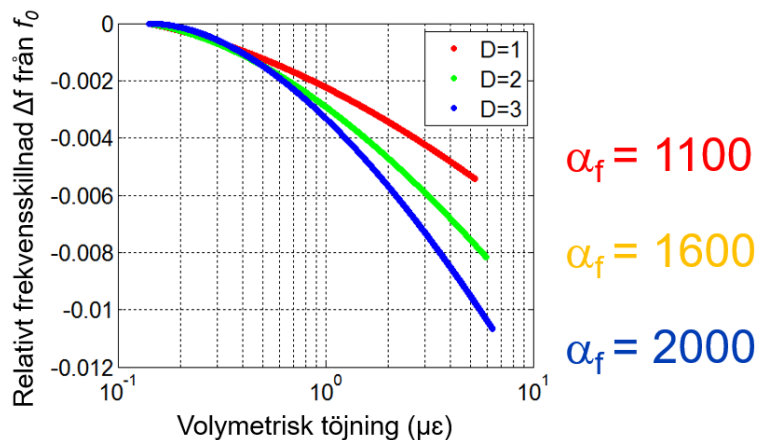
Figur 21 visar ett exempel från Dahlen m fl. (2015) där den anpassade signalen  $z(t)$  varierar i frekvens och dämpning vid olika amplituder och olika grad av skada i provkroppen. Skadan har i detta fall gjorts medvetet genom att slå till provkroppen (överst i Figur 21) lite nätt med en normalstor hammare. Inge synliga sprickor har observerats i provkroppen men resultatet visar att provkroppen får större och större olinjär respons efter varje grad av microskada (D1-D3). I Figur 22 har det relativa frekvensskiftet plottats som funktion av volymetrisk töjning i provkroppen (från uppmätt acceleration) för att kunna kvantifiera den olinjära parametern  $\alpha_f$ . Beräknade värden stämmer väl överens med resultat från mer avancerade mätningar med NRUS tekniken (Payan m fl., 2014). Den stora fördelen med den utvecklade metoden är att den går att applicera på vilken resonansfrekvensmätning som helst och därför också kan användas vid framtida IE mätningar i tunnlar (Ryden m fl., 2015).



Provkropp som utsatts för större och större skada i tre olika steg (D)



Figur 21. Exempel från tre olika mätningar vid tre olika grader av microskada på samma provkropp.



Figur 22. Beräknad olinjærhetsparameter ( $\alpha_f$ ) från exemplet i Figur 21.

## SLUTSATSER

Inom detta projekt har vi utvecklat en ny metod för oförstörande kvalitetskontroll av betongtunnlar, *Impact Echo Q-factor* metoden. Metoden kan användas för produktionskontroll av bakfyllnadsmaterialet i tunnlar som byggs med prefabricerade tunnelement (liner) i kombination med en tunnelborrmaskin (TBM). Med hjälp av numeriska simuleringar i kombination med mätningar i både laboratorium och fält har mätförfarande och signalbehandling optimerats.

Metoden är baserad på den så kallade Impact Echo (IE) metoden men har utvecklats för att kunna kvantifiera förstärkningen ( $Q$  värdet) av IE resonansfrekvensen. Resultaten från projektet visar att  $Q$  värdet är mycket känsligt för styvheten och fyllnadsgraden i bakfyllnaden. Detta har kunnat verifieras med mätningar i laboratorium och i fält. Genom numeriska simuleringar har betydelsen av det fysiska mätområdets storlek kunnat studeras i detalj. En cirkel med en radie som är lika stor som tjockleken på tunnelementen rekommenderas som optimalt mätområde. Resultaten visar dock att  $Q$  värdet förblir stabilt även för ett större mätområde så länge materialegenskaperna inom detta område inte varierar. Det uppmätta  $Q$  värdet avspeglar homogenitet och styvhet i bakfyllnaden men det exakta gränsvärdet för vad som är tillräckligt bra är projektspecifikt och får provas fram för den tunnel och de material som används. Inom detta projekt har också en helt ny metod för utvärdering av materialens olinjæra elastiska egenskaper utvecklats. Metoden förväntas kunna tillämpas på alla typer av resonansfrekvensmätningar och ge ytterligare information om skador och inhomogenitet i materialen.

Sammanfattningsvis är resultaten i denna rapport viktiga för att kunna tillämpa tekniken i andra framtida tunnlar med varierande mark/bergförhållanden och betongtjocklekar. Den föreslagna metoden utgör en signifikant förbättring av kvalitetskontroll och kvalitetssäkring av tunnlar som byggs med prefabricerade tunnelement. Övergången från förstörande till oförstörande provning möjliggör kvalitetsvärdering av en mycket större yta av den totala tunnelarean till en lägre kostnad, vilket ökar säkerheten och tillförlitligheten av den färdiga tunneln. Både tekniska, miljömässiga och ekonomiska risker kan minskas vilket ger en ökad samhällsnytta.

## LITTERATURFÖRTECKNING:

Aggelis, D. G., Shiotani, T., Kasai, K., 2008, Evaluation of grouting in tunnel lining using impact-echo, *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 23, p. 629–637.

Chen, J., Jayapalan, A.R., Kim, J.Y., Kurtis, K.E., Jacobs L.J., 2010, Rapid evaluation of alkali–silica reactivity of aggregates using a nonlinear resonance spectroscopy technique, *Cem. Concr. Res.*, vol. 40, no. 6, pp. 914–923.

Dahlen, U., Ryden, N., Jakobsson, A., 2015, Damage Identification in Concrete using Impact Non-Linear Reverberation Spectroscopy, *NDT & E International*, Vol. 75, pp. 15-25.

Davisa, A. G., Lima, M. K., and Petersen, C. G., 2005, Rapid and economical evaluation of concrete tunnel linings with impulse response and impulse radar non-destructive methods, *NDT&E International*, Vol. 38, pp. 181–186.

Gibson, A., and Popovics, J., 2005, Lamb wave basis for impact-echo method analysis, *J. Eng. Mech-ASCE*, 131(4), 438–443.

Guyer R., Johnson, P., 1999, Nonlinear mesoscopic elasticity: Evidence for a new class of materials, *Phys. Today*, no. 1, pp. 1–5.

Payan, C., Ulrich, T.J., Le Bas, P.Y., Saleh, T., Guimaraes, M., 2014, Quantitative linear and nonlinear resonance inspection techniques and analysis for material characterization: Application to concrete thermal damage., *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 136, no. 2, p. 537, Aug. 2014.

Prada, C., Balogun, O., and Murray, T.W., 2005, Laser based ultrasonic generation and detection of zero-group velocity Lamb waves in thin plates, *Appl. Phys. Lett.*, 87, 194109.

Ryden N., Aurell O., Nilsson P., Hartlén J., 2013, Impact Echo Q-Factor Measurements Towards Non-Destructive Quality Control of the Backfill in Segmental Lined Tunnels. In: Güneş O., Akkaya Y. (eds) *Nondestructive Testing of Materials and Structures*. RILEM Bookseries, vol 6. Springer, Dordrecht

Ryden, N., Dahlen, U., Jakobsson, A., 2015, Characterization of progressive damage in concrete using impact non-linear reverberation spectroscopy, *Proc. of the 8th Int. Symp. on Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE 2015)*, Berlin, Germany, pp. 146-155.

Ryden, N., 2016, Enhanced impact echo frequency peak by time domain summation of signals with different source receiver spacing, *Smart Structures and Systems*, Vol.17, No.1, pp. 59-72, DOI: 10.12989/sss.2016.17.1.059

Sansalone, M., and Streett, W., 1997, *Impact-Echo Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry*. Ithaca, NY: Bullbrier Press.

Santamarina, J.C., Klein, K.A., Fam, M.A., 2001, *Soils and Waves: Particulate Materials Behavior, Characterization and Process Monitoring*, John Wiley & Sons Inc.

Stoica P., Sundin, T., 2001, Nonparametric NMR Spectroscopy, *J. Magn. Reson.*, vol. 152, pp. 57–69.

Stoica P., Moses, R., 2005, *Spectral Analysis of Signals*, Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J.

Viktorov, I. A., 1967, *Rayleigh and Lamb Waves*. New York: Plenum Press.

Zhang, F., Xie, X., and Huang, H., 2010, Application of ground penetrating radar in grouting evaluation for shield tunnel construction, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 25, n. 2, p. 99-108.