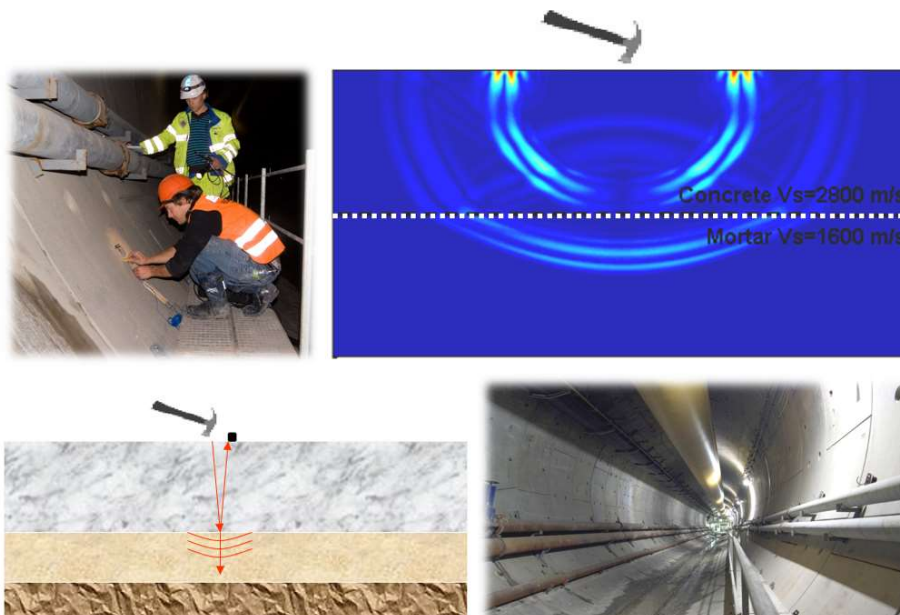


OFÖRSTÖRANDE PROVNING TUNNLAR

*Produktionskontroll av bakfyllnad i tunnlar av
prefabricerade tunnelelement*

POPOLÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING



Nils Rydén

2020-02-09

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. Traditionellt används fortfarande dyr förstörande provning i form av borring genom de nytillverkade betongelementen för att kontrollera den injekterade bakfyllnaden.

Utvecklingen av den föreslagna oförstörande metoden började redan under produktionen av Hallandsåstunneln i samarbete med Trafikverket. Metoden visade sig då ha potential att bidra till en signifikant förbättring av kvalitetskontroll och kvalitetssäkring av tunnlar som byggs med prefabricerade tunnelement. Inom detta forskningsprojekt (SBUF 12725) har den nya metoden kunnat studeras teoretiskt för att kunna kvantifiera osäkerheter och optimera signalbehandling baserat på både teoretiska modelleringar och mätdata från Hallandsåstunneln samt laboratorium. Resultatet av detta arbete innebär att metoden nu kan appliceras på andra tunnlar med andra förutsättningar när det gäller tjocklek och material i liner och bakfyllnad samt helt nya applikationer där ett material behöver undersökas från utsidan av ett annat material.

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 används för närvarande också i Follo tunneln i Norge.

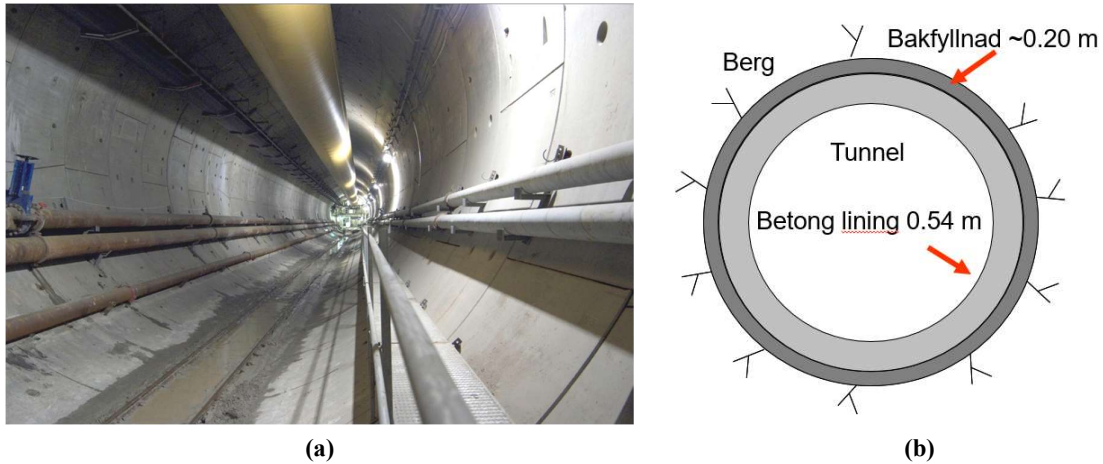
SYFTE

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. Till exempel har möjligheten att uppskatta bakfyllnadens dynamiska E-modul och eventuella olinjära egenskaper undersökts.

BAKGRUND

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 (~100 m). En ny, alternativ oförstörande metod som bygger på Impact Echo Q -värdet 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 samt för andra tillämpningar där material ”bakom” ett annat material behöver undersökas.

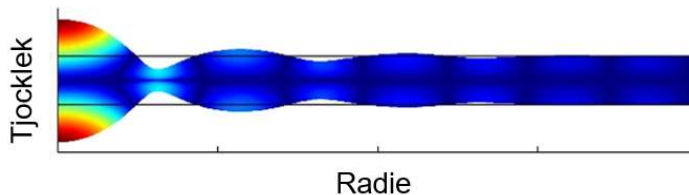


Figur 1. (a) Tunneln genom Hallandsås med prefabricerade tunnelement i betong (liner) och (b) schematisk figur med tunnelement av betong (lining) och bakfyllnad.

UTVECKLAD METOD ”IMPACT ECHO Q-FAKTOR”

Inom området oförstörande provning av betong är den så kallade ”Impact Echo” metoden en av de mest använda metoderna för att detektera anomalier (skada, hålrum, delaminering) inne i en betongplatta (Sansalone och Streett, 1997). I den konventionella Impact Echo metoden 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 $f_r = (\beta V_p / 2h)$ där β är en korrektionsfaktor ($\beta = 0.96$ används vanligtvis för betong).

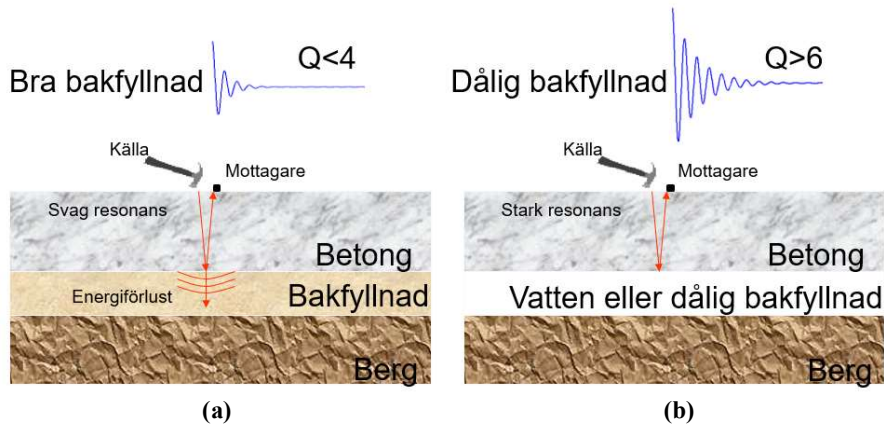
Impact Echo resonansen är vanligtvis stark och tydligt i en betongplatta omgiven av luft på båda sidor (bjälklag). Dynamiskt är betongens under och ovansida i detta fall ”fria” att vibrera utan motstånd från något annat elastiskt material. Figur 2 visar vertikal vibrationsamplitud (överdriven) i en fri platta vid Impact Echo resonansfrekvensen.



Figur 2. Modform (absolut vertikal vibration) vid IE resonansfrekvensen i en platta.

Om betongens undersida däremot inte är ”fri” blir motsvarande tjockleksresonans mer dämpad och svagare. Beroende på materialets egenskaper bakom betongen (bakfyllningen i tunnlar) kommer 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

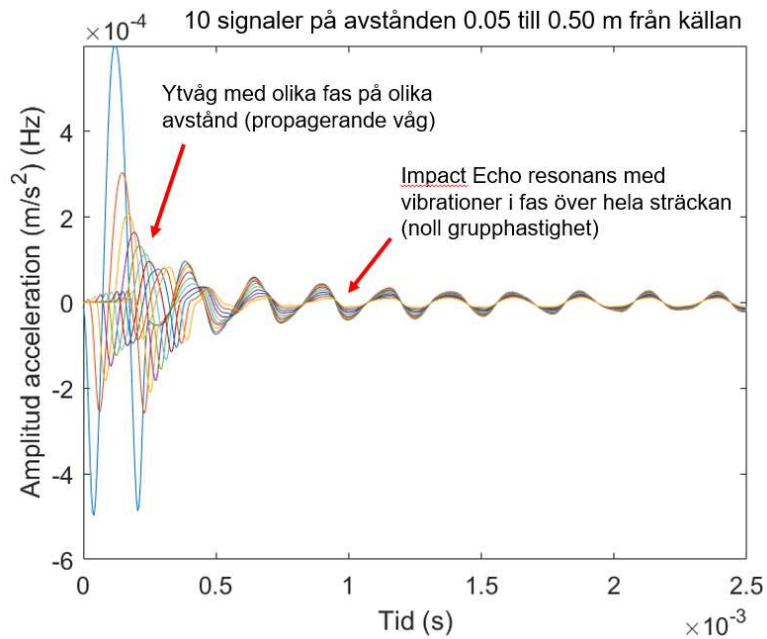
den utvecklade metoden i detta projekt, ”Impact Echo Q -factor”. Q -värdet (quality factor eller förstärkningsfaktor) är i detta sammanhang ett kvantitativt mått på hur stark resonansen blir. Figur 3a illustrerar hur en del av energin överförs till bakfyllnadsmaterialet vilket reducerar den energi som stängs in och ger resonans i betongen. En hög förstärkning (Figur 3b) 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). Principen kan jämföras med så kallad bomknackning på utsidan av en reglad gipsvägg. Ljudet (frekvensen och dämpningen) blir då olika vid knockning rakt över en regel jämfört med mellan regler i väggen.



Figur 3. Schematisk figur över mätupställning på betonglinjer med (a) bra och (b) sämre bakfyllnad.

Inom detta projekt har vi fram för allt studerat hur mätförfarande och signalbehandling kan optimeras för att få ett teoretiskt korrekt och robust mätvärde på både f_r och Q . Det viktigaste resultatet från detta arbete har varit idén att summera flera tidssynkroniserade slag på olika slumpmässiga avstånd och riktningar från vibrationsgivaren (Ryden, 2016). Denna mätmetod ger en förstärkt amplitud på själva Impact Echo resonansen och minimerar andra typer av seismiska vågor och brus. Normalt används bara ett slag i en punkt så nära vibrationsgivaren som möjligt i den traditionella Impact Echo metoden, men denna typ av mätning är inte tillräcklig för att få en korrekt uppskattning av Q -värdet och därmed egenskaperna på det bakomliggande materialet.

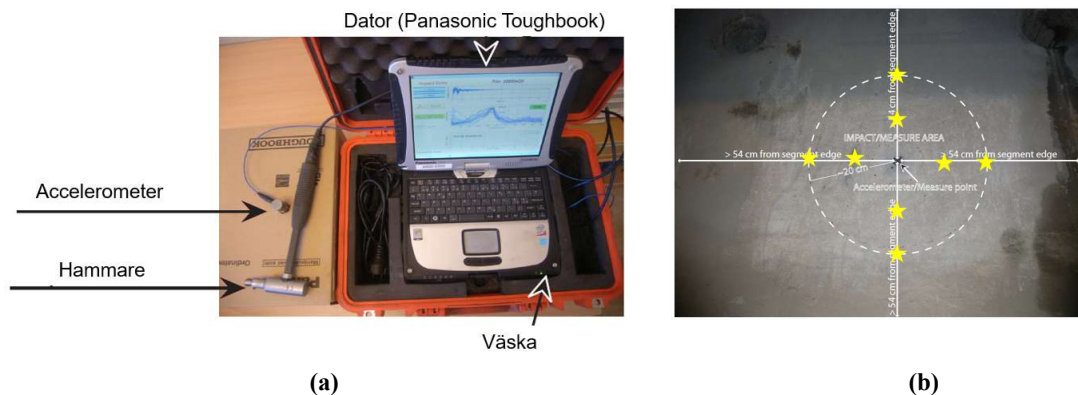
Figur 4 illustrerar detta viktiga fenomen genom ett exempel på simulerade signaler i en riktning längs ytan av en 0.54 m platta. Signalerna med högst amplitud i Figur 4 kommer från punkterna närmast källan. De första 0.5 ms av dessa signaler domineras av den direkta ytvågen som är den starkaste vågen som genereras från en seismisk punktkälla (hammare) på en yta. Efter ca 0.5 ms domineras vibrationerna istället av en konstant frekvens, Impact Echo frekvensen, och signaler inom en tjockleks avstånd från källan är i fas. Genom att summera alla signaler i Figur 4 fås därmed automatiskt en dämpning av ytvågen och en förstärkning av Impact Echo resonansfrekvensen. I en verklig 3D miljö kan denna effekt bli ännu bättre när signaler på olika avstånd och i olika riktningar från vibrationsgivaren summeras.



Figur 4. Signaler på avstånden 0.05 m till 0.50 m från FEM simulering med 0.54 m tjock platta.

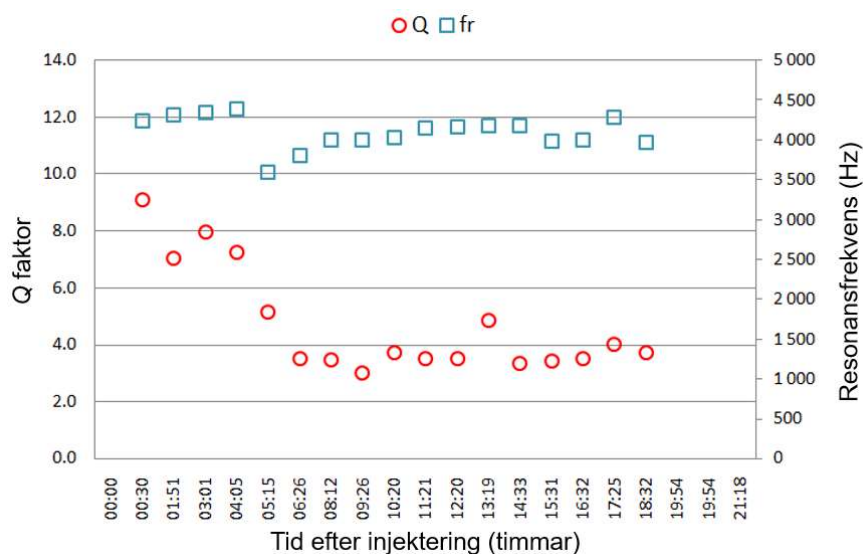
EXEMPEL PÅ MÄTRESULTAT

Figur 5 visar den mätutrustning som togs fram i samband med mätningarna i Hallandsåstunneln. Utrustningen är förhållandevis enkel och 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. Observera att hammaren är instrumenterad med en kraftgivare vilken används som ”trigger” vid alla tidssynkroniserade mätningar.



Figur 5. (a) Utrustning för ”Impact Echo Q-factor” mätningar i Hallandsåstunneln. (b) Slagpunkter på två olika avstånd och i fyra olika riktningar från accelerometern som fästs i mitten på mätpunkten.

Figur 6 visar ett exempel från upprepade mätningar i samma punkt i Hallandsåstunneln medan injekteringen (bakfyllnaden) härdar. I Figur 6 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 härkning och stabiliserar sig vid ett lågt Q -värde (3-4) som representerar ett helt fyllt tillstånd. Figur 6 visar också en plötslig minskning av resonansfrekvensen (blå kvadrater) efter cirka 5 timmar, vilket indikerar att huvudkällan för reflekterad energi förändras från betong-bakfyllnad gränsen till den djupare gränsen mellan bakfyllnad och berg. Men det uppmätta Q -värdet återspeglar ändå fortfarande rätt status för bakfyllningen eftersom energin fortsätter att spridas in i berget vilket inte är möjligt vid dålig bakfyllnad.



Figur 6. Resultat från upprepade mätningar i samma punkt i Hallandsåstunneln efter att bakfyllnaden injekterats och börjat härda.

SLUTSATSER

Vi har utvecklat en ny metod för oförstörande kvalitetskontroll av bakfyllnadsmaterialet i tunnlar som byggs med prefabricerade tunnelelement (liner), *Impact Echo Q-factor* metoden. Med hjälp av numeriska simuleringar i kombination med mätningar i både laboratorium och fält har mätförfarande och signalbehandling optimerats. 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 signalbehandlingsmetod för utvärdering av materialens olinjära elastiska egenskaper utvecklats (Dahlen m fl. 2015). Metoden förväntas kunna tillämpas på alla typer av resonansfrekvensmätningar och ge ytterligare information om skador och inhomogenitet i materialen.

Resultatet av detta arbete innebär att metoden nu kan appliceras på andra tunnlar med andra förutsättningar när det gäller tjocklek och material i liner och bakfyllnad samt helt nya applikationer där ett material behöver undersökas från utsidan av ett annat material.

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.

REFERENSER

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.

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.

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.

TACK

Detta projekt har finansierats och drivits inom Formas GeoInfra utlysning och finansierats av Skanska/SBUF och Formas. Projektgruppen vill rikta ett stort tack till finansörerna som gjort detta projekt möjligt. 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 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 Möttönen, 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 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 februari 2020, Nils Rydén