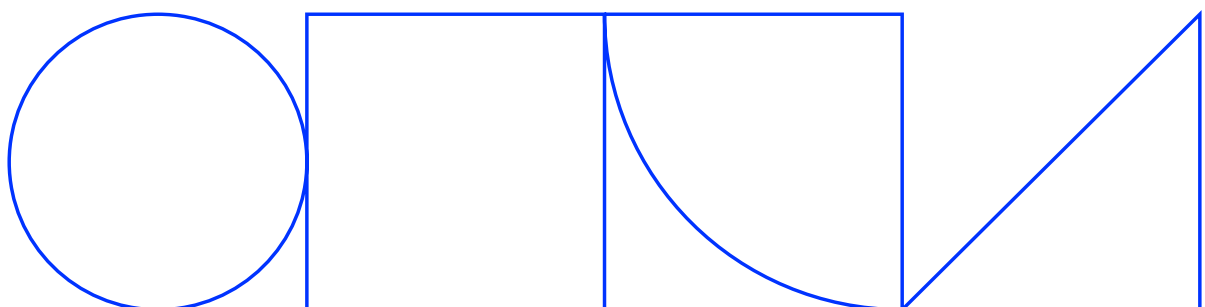


Oförstörande provning av betongkonstruktioner

med syntetiska sensorgrupper

Oskar Tofeldt
Högskolan Väst

2025-11-10

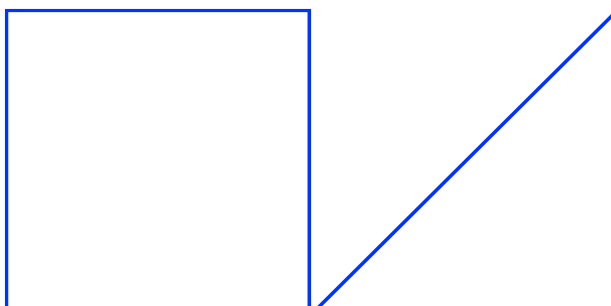


Förord

Den här rapporten sammanfattar arbetet i projektet "Oförstörande provning av betongkonstruktioner med syntetiska sensorgrupper". Projektet pågick under åren 2020–2025 med mig, Oskar Tofeldt, vid Högskolan Väst som utförare och där min arbetstid i projektet har motsvarat 1.5 års heltidsarbete. Jag vill först och främst rikta ett stort tack till projektets finansiärer SBUF genom PEAB och Trafikverket genom branschprogrammet FOI-BBT, ni är avgörande för att projektet kunnat genomföras!

Jag vill även framföra ett tack till Jens Häggström och Staffan Isaksson på Trafikverket samt till Nils Rydén och Martin Laninge på PEAB som på olika sätt stöttat och bistått projektet. Tack också till deltagare i projektets referensgrupp.

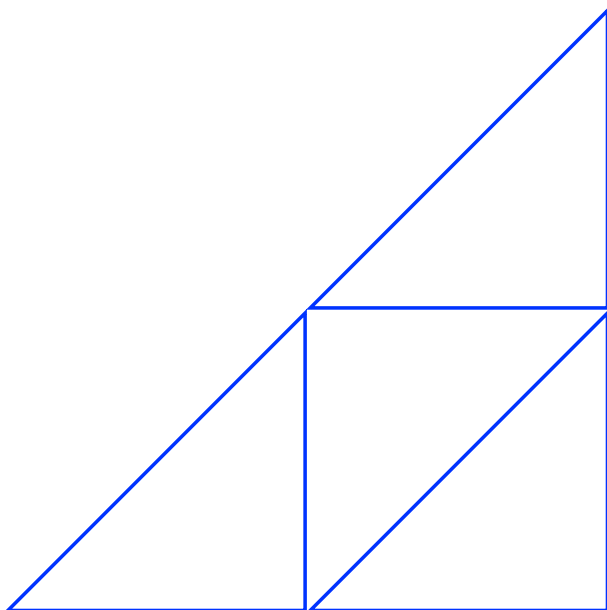
november 2025
Oskar Tofeldt



Sammanfattning

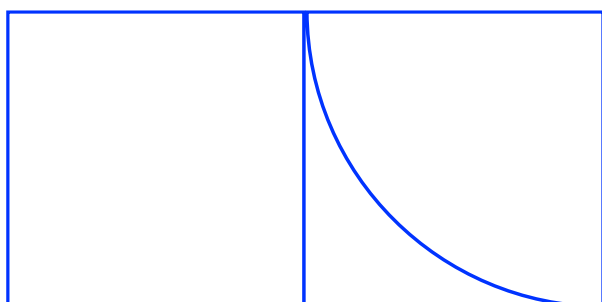
I det här projektet har ett nytt system för lokalisering av hammarslag utvecklats. Systemet integreras med ett befintligt system för oförstörande provning av betongkonstruktioner med Impact-Echo och ytvågsmätning. Genom datorseende lokaliseras hammaren inom mätområdet genom färgsegmentering. Fysiska koordinater för hammarens spets bestäms därefter med hjälp av metrisk bildanalys. Därmed försvinner behovet av manuell inmätning av hammarslagens positioner vid Impact-Echo och ytvågsmätning, eftersom dessa registreras och bestäms automatiskt av systemet för datorseende. Det integrerade systemet med datorseende för Impact-Echo och ytvågsmätning skapar nya möjligheter till fördjupad utvärdering av stora och kraftigt armerade betongkonstruktioner genom oförstörande provning eftersom en större mängd mätdata kan samlas in effektivt.

I tre exempel på fältmätningar demonstreras systemet för datorseende vid Impact-Echo och ytvågsmätning. Resultat visar att en minst likvärdig noggrannhet och precision fås som vid manuell inmätning och registrering av hammarslagens positioner. Utöver att effektivisera mätningar skapar även systemet goda möjligheter att visuellt presentera resultat genom de bilder som tas över mätområdet. Eftersom systemet använder metrisk bildanalys är dessa bilder kalibrerade, vilket innebär att verkliga fysiska mått kan mätas i dem. Genom att förbättra möjligheten till att effektivt presentera resultat visuellt i bild bedöms användningen av oförstörande provning av betongkonstruktioner kunna öka. Det bedöms som betydelsefullt eftersom oförstörande provning kommer vara en viktig del i en framtida bygg- och anläggningsbransch med ökade krav på tillståndsbedömning, kvalitetskontroll, effektivt resursutnyttjande och hållbarhet.



Innehåll

1. Introduktion	4
2. Bakgrund	5
a) Ljudvågor i betongkonstruktioner	5
b) Impact-Echo	7
c) Ytvågor	8
d) Kombinerad Impact-Echo och ytvågsmätning	9
e) Motivering av behov för forskning och utveckling	12
f) Syfte, problemställningar och mål	12
3. Lokalisering av hammarslag med ljud	15
4. Lokalisering av hammarslag med datorseende	17
a) Utrustning och översikt av system	17
b) Kalibrering av kamerasystem	19
c) Lokalisering av hammare	22
5. Integrering av system för datorseende för Impact-Echo och ytvågsmätning	28
6. Fältextempel av integrerat system	34
a) Exempel 1 – mätning med Impact-Echo	34
b) Exempel 2 – mätning med ytvågor	39
c) Exempel 3 – kombinerad Impact-Echo och ytvågsmätning	42
7. Slutsatser	45
8. Diskussion och förslag till fortsatt arbete	47
Referenser	49



1. Introduktion

Betong, som är ett av världens mest använda byggnadsmaterial, är mycket vanligt förekommande i stora bygg- och anläggningskonstruktioner som exempelvis broar, kraftverk, tunnlar och hamnar. Med ett allt större fokus i samhället på hållbar utveckling och effektivt nyttjande av materiella resurser finns ett växande behov av metoder som kan bedöma tillståndet hos befintliga betongkonstruktioner. En grupp av metoder som är användbara i det här fallet är metoder baserade på oförstörande provning (OFP). Oförstörande provning innebär att en konstruktion kan undersökas och utvärderas utan att permanent skada uppstår (Shull, 2002). Det sker genom att mäta fysikaliska fenomen och koppla dess mätvärden mot antaganden om hur fenomenet interagerar med konstruktionen. Beroende på vad för sorts frågeställning som är i fokus kan olika sorters fysikaliska fenomen (OFP metoder) användas. Till exempel kan elektromagnetiska vågor i form av radar användas för att detektera och fastställa lägen för armeringsjärn i betongkonstruktioner medan mekaniska vågor (ljudvågor) kan användas för att hitta områden med sprickor, hålrum och svagare material (Malhotra and Carino, 2004).

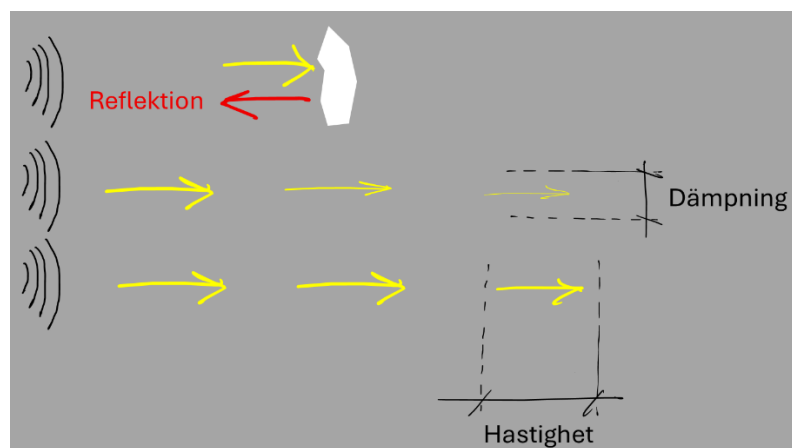
Det finns inte någon oförstörande provningsmetod som kan ge alla svar samtidigt för en konstruktion. Vanligt är att flera olika metoder kan behöva användas samtidigt för att ge en samlad bild av konstruktionens tillstånd. Vidare kan resultat från oförstörande provning utföra underlag för en mer detaljerad undersökning där exempelvis förstörande provning så som kärnborrning görs. På så vis kan de olika mätmetoderna komplettera varandra och tillsammans skapa en så heltäckande bild av tillståndet av en konstruktion som möjligt. En jämförelse är att betrakta oförstörande provningsmetoder som olika verktyg i en verktygslåda: typiskt behövs en uppsättning av flera olika sorters verktyg för att hantera en bredd av olika sorters reparationer.

2. Bakgrund

a) Ljudvågor i betongkonstruktioner

I den här rapporten redovisas resultaten av ett projekt om oförstörande provning av betongkonstruktioner. Arbetet tar sin utgångspunkt från en kombinerad metod (Ryden and Park, 2006) med grund i Impact-Echo (Sansalone and Carino, 1986) och ytvågsmätning (Park et al., 1999). Dessa två metoder, Impact-Echo och ytvågsmätning, är baserade på oförstörande provning med hjälp av mekanisk vågutbredning, vilket kan tolkas som ljudvågor eller vibrationer i betongmaterialet. Resultat och information från den kombinerade Impact-Echo och ytvågsmätningen blir alltså beroende av de materiella och strukturella egenskaper som styr ljudvågornas rörelse.

I ett perfekt homogent material kommer mekaniska vibrationer (ljudvågor) att utbreda sig likt ringar på ett spegelblankt och stilla vatten. I likhet med vågor i vatten samt ljus sker reflektioner då materialet som vågorna rör sig i ändras: för vattenvågor till exempel vid stenar, för ljusvågor till exempel vid speglar och för ljudvågor i betong vid sprickor eller kanter hos konstruktionen. Genom att studera hur ljudvågorna rör sig inom en betongkonstruktion kan vi ta reda på hur dess inre ser ut, bedöma materialstatus och hitta skador utan att vi behöver genomföra förstörande provning såsom provborrning. I tillägg till att studera hur ljudet rör sig kan vi även mäta dess hastighet. Typiskt svarar en högre våghastighet mot ett styvare material och omvänt att lägre våghastighet svarar mot ett mjukare material. Även parametrar som hur ljudet klingar av (dämpning) kan användas för att bestämma exempelvis hur väl en konstruktion är förankrad med omgivande berg och mark. En konceptuell illustration av hur ljudet rör på sig och hur det kan utnyttjas visas i Figur 1.

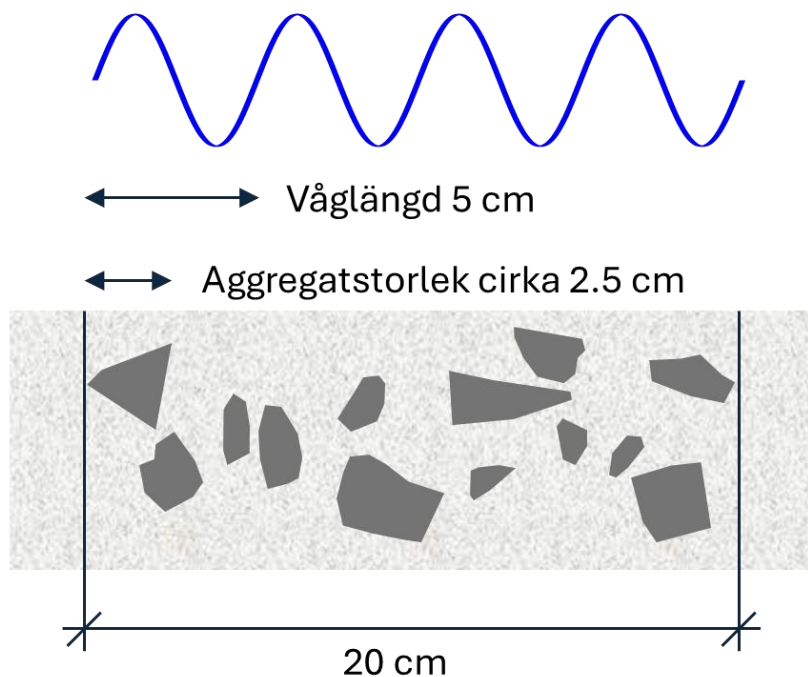


Figur 1. Konceptuell illustration av ljudvågors uppträdande och egenskaper.

Betong är ett kompositmaterial bestående av flera ingående material: cement, vatten, ballast och eventuella tillsatsmedel. Därutöver bidrar armering med ytterligare en typ av ingående material i betongkonstruktioner. Att betongkonstruktioner är komposit

har stor inverkan på hur oförstörande provning med ljudvågor kan tillämpas. Till skillnad från homogena material bestående av en enhetlig och kontinuerlig materialfas kommer ljudvågor i armerade betongkonstruktioner att röra sig i flera olika materialfaser: cementpasta, ballast och armering. Beroende på våglängden av ljudet som används fås olika stor inverkan av de ingående materialen på hur ljudvågorna rör sig. När storleken på ballastaggregaten och armering är i en jämförbar storlek (t.ex. halva storleken) som ljudets våglängd fås en komplicerad spridningsbild av hur ljudet rör sig. Det beror på att ljudvågorna relativt sett rör sig i ett alltmer heterogent material med skiftande egenskaper. En illustration av en representativ skjuvvåg med avseende på våghastighet och frekvens (Maierhofer et al., 2010) i betong vid ultraljudsprovning ses i Figur 2. Det är tydligt att aggregaten i betongen skapar ett komplext vågfält där vägen som ljudvågen propagerar blir svårförutsägbar. Utöver ett komplext spridningsmönster fås även dämpning av ljudvågorna på grund av aggregaten. Sammantaget innebär spridning och dämpning utmaningar för ultraljudsprovning av betongkonstruktioner. Detta eftersom ultraljudsprovning generellt sett utgår från antaganden om att våghastigheten är känd och att vågornas utbredningsväg typiskt antas vara rätlinjig och förutsägbar. I stora betongkonstruktioner som är kraftigt armerade och med grov ballast blir effekterna av spridning och dämpning särskilt betydande vilket försvårar effektiv och tillförlitlig användning av ultraljud (Almansouri et al., 2017; Schickert et al., 2003; Schickert and Krause, 2010; Wiggenhauser et al., 2016)

Skjuvvåg, hastighet 2400 m/s, frekvens 48 kHz

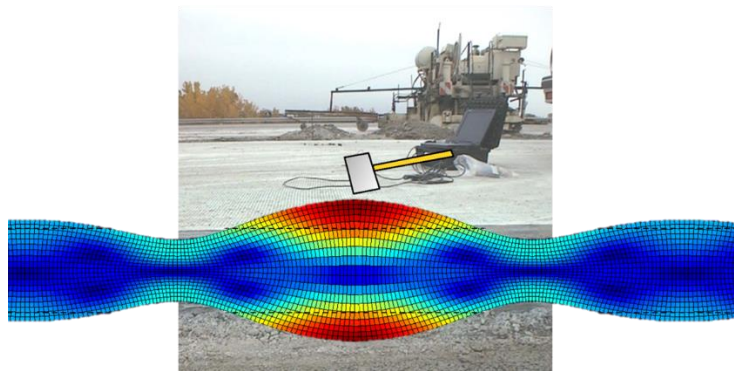


Figur 2. Illustration av en skjuvvåg i betong med frekvens 48 kHz och betongmaterial med aggregat med storlek upp till cirka 2.5 cm. Betongmaterialet i figuren är skapat efter en borrhäna tagen ur Barsebäck i projektet CONSAFESYS.

b) Impact-Echo

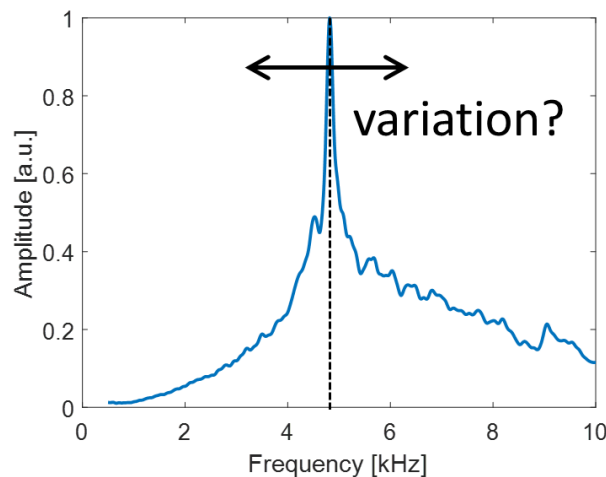
Ett sätt att minska de negativa effekterna av spridning och dämpning, som beror på betongens heterogena struktur (cementpasta, ballast och armering), är att istället använda ljudvågor med längre våglängd än den som används vid mätning med ultraljud. Användning av en längre våglängd är det samma som att använda en lägre frekvens. Då blir den enskilda inverkan av betongens ingående material relativt sett mindre, och utbredningen av ljudvågorna i konstruktionen beter sig alltmer likt det som sker i ett homogent material. Därmed minskar de negativa effekterna av dämpning och spridning, vilket möjliggör användning vid tjockare (cirka >0.5 m) och kraftigt armerade konstruktioner.

En oförstörande mätmetod som kan tillämpas för tjocka konstruktioner är Impact-Echo (Sansalone and Carino, 1986; Sansalone and Streett, 1997). I fallet för plattliknande konstruktioner, vilket är ett vanligt antagande för stora betongkonstruktioner, baseras mätning och utvärdering av en vågresonans som uppstår då ett slag görs på ytan. En illustration av mätmetoden vågformen som används visas i Figur 3.



Figur 3. Illustration av Impact-Echo applicerat på en gjuten betongplatta (våg).

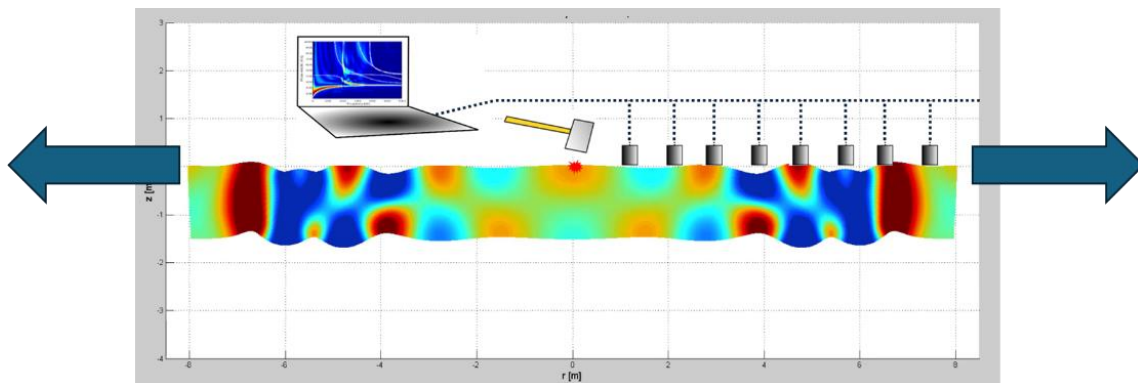
Mätningen går till genom att en accelerometer fästes på betongytan, sedan skapas en resonansmod genom ett hammarslag. Frekvensen för resonansmoden blir en markör för potentiella avvikelser i material och geometri hos konstruktionen. Typiskt utvärderas hur frekvensen varierar inom konstruktionen: så länge som material och tjocklek är densamma fås samma resonansfrekvens. En illustration och exempel på hur Impact-Echo utvärderas ses i Figur 4. Frekvensen som mäts upp kan om tjockleken och våghastigheten är känd översättas till en kvantitativ uppskattning av konstruktionens E-modul inom mätområdet, men i de flesta fall är utvärderingen begränsad till att studera variation av resonansfrekvens. Med andra ord är Impact-Echo i huvudsak att betrakta som en relativ mätmetod där respektive mätpunkt analyseras och jämförs med omkringliggande mätpunkter för att skapa en helhetsbild av konstruktionens tillstånd.



Figur 4. Exempel på data från en Impact-Echo mätning. Resonansfrekvensen (cirka 4.8 kHz) framgår tydligt av toppen i diagrammet.

c) Ytvågor

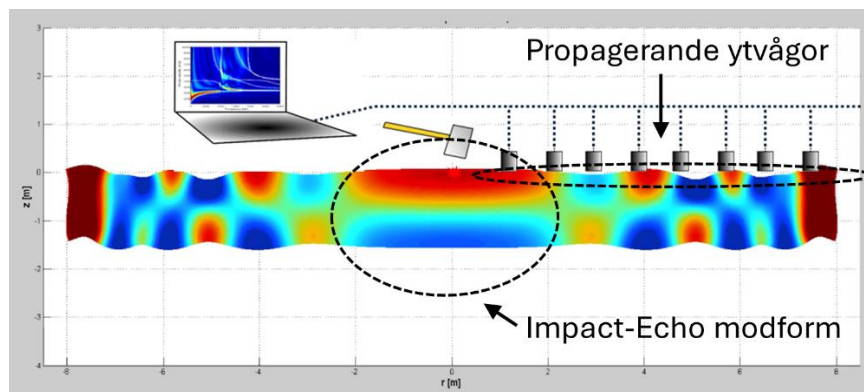
Ytvågor är, som namnet antyder, mekaniska vågor som rör sig utmed ytan på en konstruktion. Ofta består de av vågformer (vågmoder) som når betydligt djupare än enbart ytan, så namnet kan ses som en samlingsterm för vågor som kan mätas på ytan av en konstruktion. I Figur 5 visas en konceptuell mätning av ytvågor med hjälp av en hammare och accelerometer. Genom att variera avståndet mellan accelerometern och hammarslagen kan det propagerande ytvågsfältet mätas upp. Det kan noteras att det praktiska tillvägagångssättet är mycket likt det som görs vid en Impact-Echo mätning. Skillnaden är antalet hammarslag och avståndet mellan accelerometer och hammare. I figuren kan också noteras att många accelerometrar används. I själva verket är dock antalet accelerometrar endast en eller ett fåtal. Men genom att använda teori om reciprocitet kan antalet accelerometrar reduceras. Reciprocitet betyder i det här sammanhanget att mätsignalen är densamma även om accelerometern och punkten för hammarslaget byter plats. Därigenom kan mätdata bestående av många "syntetiska" sensorer skapas genom att göra hammarslag i punkter med varierat avstånd från accelerometern, exempelvis genom hammarslag fördelat längs en linje eller en yta, se Figur 5. Vi använder ordet "syntetisk" för att betona att i verkligheten är det enbart ett fåtal accelerometrar (sensorer), men genom reciprocitet kan ett obegränsat antal skapas genom upprepade hammarslag.



Figur 5. Mätning med ytvågor som genereras av ett hammarslag. Genom reciprocitet motsvarar illustrationen en praktisk mätupställning med en accelerometer (i punkten där hammarslaget visas) och flera hammarslag (i punkterna som visar sensorer) på ökande avstånd från accelerometern.

d) Kombinerad Impact-Echo och ytvågsmätning

Impact-Echo kan effektivt kombineras med ytvågsmätning eftersom en ytvågsmätning kan ses som en Impact-Echo mätning men där ytterligare slag görs på ett ökande avstånd från accelerometern. Anledningen till att de två metoderna kan kombineras är att ett hammarslag till sin natur är skapar en frekvensmässigt bredbandig puls i konstruktionen. Eftersom hammarslaget innehåller energi över ett brett frekvensspektrum fås flera olika typer av vågor, däribland Impact-Echo modformen och propagerande ytvågor, se Figur 6.

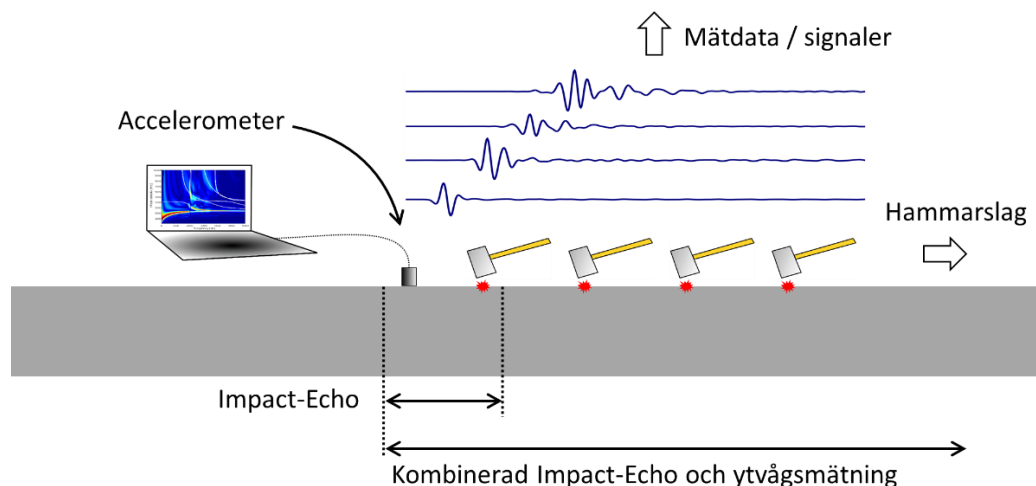


Figur 6. Kombinerad Impact-Echo och ytvågsmätning. De ingående vågtyperna är markerade med streckade linjer.

Med andra ord är alltså ett hammarslag ett effektivt och robust sätt att skapa vågor som kan nyttjas i såväl Impact-Echo som ytvågsmätning. En ytterligare fördel med hammarslag är att de inte är låsta till en specifik arbetsfrekvens. Tyngden i hammaren avgör kontakttiden för slaget, som i sin tur inverkar på frekvensinnehållet. Genom att använda hammare med olika tyngd kan på så vis frekvensinnehållet i mätningen anpassas. Jämfört med tekniker som ultraljud som utgår från sändare och mottagare

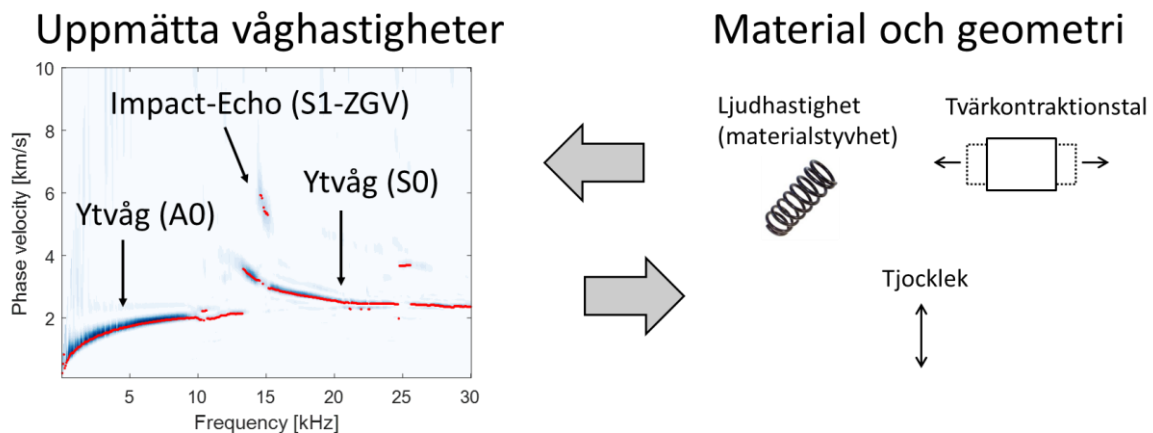
med en anpassad och dedikerad arbetsfrekvens fås med hammarslagen en betydligt mer flexibel mätmetod. Detta gör att den kombinerade metoden med Impact-Echo och ytvågsmätning har många fördelar just för mätning och utvärdering av tjocka betongkonstruktioner med mycket armering. Detta tack vare sin förmåga att flexibelt kunna anpassa sin arbetsfrekvens vilket gör att påverkan av spridning och dämpning på grund av aggregat kan minskas.

Kombinerad Impact-Echo och ytvågsmätning utförs praktiskt genom att hammarslag utförs på ett ökande avstånd ifrån en accelerometer som mäter vibrationerna av vågutbredningen som genereras av slagen. Ett vanligt sätt att mäta är att göra 40 slag med avstånd på 5 cm mellan slagen, vilket ger en mätsträcka på 2 meter. Typiskt sker dessa slag utefter en linje, se Figur 7, där en illustration av mätförfarandet visas. Här framgår också att första slaget kan betraktas som en Impact-Echo mätning och efterföljande slag gör det möjligt att mäta upp det propagerande ytvågsfältet.



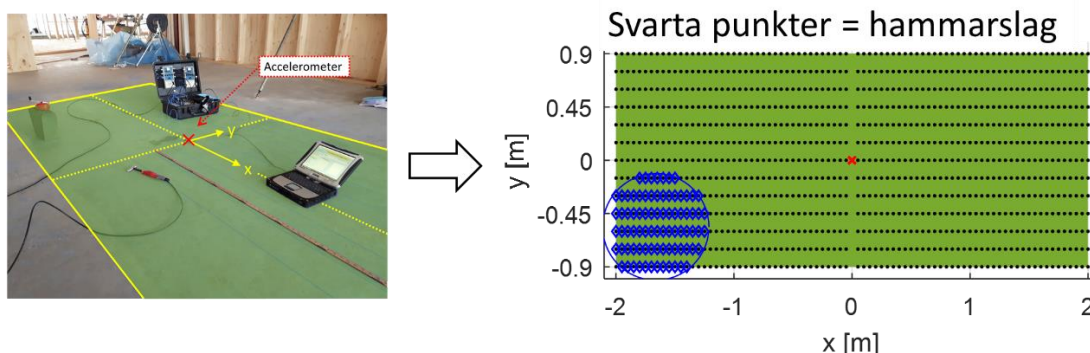
Figur 7. Konceptuell skiss på mätupställning för kombinerad Impact-Echo och ytvågsmätning längs en linje.

Utöver möjlighet att anpassa mätningars arbetsfrekvens i förhållandet till konstruktionens material och geometri finns flera fördelar med en kombinerad Impact-Echo och ytvågsmätning. Eftersom slagen (signalerna) är uppmätta på ett enhetligt sätt och därtill är tidssynkroniserade, kan dessa processas i en gemensam utvärdering av mätdata. Med det menas att istället för att repetera en och samma mätning där signaler utvärderas enskilt, som i traditionell Impact-Echo, kan istället flera mätsignaler utvärderas gemensamt. Därigenom fås en ökad informationsmängden i mätdata som används i utvärderingen. Det gör att exempelvis konstruktionens material kan bestämmas med avseende på våghastighet och tvärkontraktionstal, se Figur 8. I tillägg kan även tjockleken bestämmas. Den här utvärderingen av mätdata till kvantitativa mått på konstruktionens egenskaper görs utan något behov av kalibrerande sektioner då all information som behövs finns i mätdata som innehåller både resonansmoden från Impact-Echo och det propagerande ytvågsfältet.



Figur 8. Exempel på mätdata från kombinerad Impact-Echo och ytvågsmätning (vänster). Kvantiteter som kan bestämmas från mätdata (höger). Utvärdering sker utan behov av kalibrering och i förväg kända mått på konstruktionen.

Det finns emellertid ingen begränsning till att hammarslagen måste utföras utefter en linje. Det är möjligt att samla in mätdata utöver en yta också, vilket visas med ett exempel i Figur 9 (Tofeldt and Ryden, 2018). Här skapas ett stort dataset för en kombinerad Impact-Echo och ytvågsmätning genom att mätdata samlas in utefter flera linjer som är närliggande. Genom den ökade mängden mätsignaler samt att de är spridda över en tvådimensionell yta kan nya utvärderingsmetoder för dataanalys tillämpas. Den här typen av mätningen kan sägas vara ett närmande mot applikationer som geofysik och laserbaserade ultraljud där stora mängder mätsignaler samlas in och sedan bearbetas i en gemensam utvärdering.



Figur 9. Illustration av kombinerad Impact-Echo och ytvågsmätning utförd genom insamling av mätdata över en yta. Mätområdet är 4 m x 1.8 m och innefattar 26 mätlinjer med 40 slag/linje, totalt 1040 hammarslag markerade som svarta punkter i höger delfigur. Accelerometerns position är i mitten av mätområdet (rött kryss). Blå markeringar i höger delfigur visar på exempel av en "syntetisk sensorgrupp", alltså ett urval av mätsignaler.

e) Motivering av behov för forskning och utveckling

Det finns ett behov av att kunna bedöma tillståndet för viktiga bygg- och anläggningskonstruktioner. Ofta är dessa konstruktioner stora, kraftigt dimensionerade och med mycket armering. Därmed finns flera utmaningar för oförstörande provning med exempelvis konventionellt ultraljud för betong. Ett alternativ är att arbeta i en lägre arbetsfrekvens med metoder som Impact-Echo och ytvågsmätning. Här kan nämnas att användandet av Impact-Echo metoden är väletablerat och vanligt förekommande vid oförstörande provning av betongkonstruktioner men att ytvågsmätning baserat på hammarslag och accelerometrar är desto mer ovanligt. Industriell användning av kombinerad Impact-Echo och ytvågsmätning är, till rapportförfattarens bästa kännedom, sällsynt i sammanhang av provning av betongkonstruktioner och återfinns i princip uteslutande i forskning och utveckling. En trolig förklaring, enligt rapportförfattaren, till det låga industriella användandet av kombinerad Impact-Echo och ytvågsmätning är att den kombinerade metoden utgår från en mer komplex teori (Lambvågor, vågor i vågledare) än den empiriska förklaringsmodell som traditionellt används för Impact-Echo metoden (Sansalone and Streett, 1997; Tofeldt, 2017).

Sammantaget finns det behov av att bedöma tillståndet hos stora bygg- och anläggningskonstruktioner men bara ett begränsat utbud av metoder tillämpliga för stora och kraftigt armerade betongkonstruktioner som till exempel broar, kraftverk och tunnlar. Forskning visar att det finns en stor potential i att använda metoder så som kombinerad Impact-Echo och ytvågsmätning (Tofeldt, 2017; Tofeldt and Ryden, 2018). Det blir speciellt tydligt i perspektivet av att just den kombinerade Impact-Echo och ytvågsmätningen har stora likheter med metoder inom andra fält så som geofysisk prospektering med hjälp av seismik eller laserbaserat ultraljud för provning av exempelvis metallkomponenter och kompositer (Flynn et al., 2013; Prada et al., 2008). Förenklat kan en kombinerad Impact-Echo och ytvågsmätningen betraktas som ett nerskalat fall av en seismikmätning eller ett uppskalat fall av laserbaserat ultraljud. Såväl området seismisk prospektering som laserbaserat ultraljud är välstuderat fält där det finns många metoder för dataanalys. Det finns därför goda möjligheter att vidareutveckla konceptet av kombinerad Impact-Echo och ytvågsmätning till att involvera metoder från området av seismik och laserbaserat ultraljud. Detta eftersom egenskaperna på dataseten är mycket närbesläktade även om tillämpningarna är olika. Det finns alltså behov av mer forskning och utveckling inom kombinerad Impact-Echo och ytvågsmätning och detta utgör motivationen för det här projektet.

f) Syfte, problemställningar och mål

Syftet med det här forskningsprojektet är att vidareutveckla kombinerad Impact-Echo och ytvågsmätning. Därigenom skapas nya och förbättrade möjligheter för tillståndsbedömning och kvalitetskontroll av stora och kraftigt armerade betongkonstruktioner

Projektet har utgått från två problemställningar och anknyttande mål:

1. Förbättrad datainsamling

I Figur 9 visas hur mätdata för en kombinerad Impact-Echo och ytvågsmätning kan samlas in över en tvådimensionell yta. Exemplet visar på potentialen av att samla in en stor mängd mätdata. I mätningen har området som studeras markerats manuellt med hjälp av måttband, tumstock och snörslå. Därefter har hammarslag utförts var 5:e centimeter över en linjelängd på 2 meter. Denna typ av mätning är tidskrävande då antalet mätlinjer blir stort (se Figur 9 med 40 styck mätlinjer) vilket utgör ett hinder för både forskning, utveckling såväl som ett slutligt industriellt användande. Det finns dock inget krav på att hammarslagen måste utföras längs med raka linjer i ett exakt rutnät. Den kritiska faktorn är att positionerna för hammarslagen finns registrerade och att positionerna i stora drag är jämnt fördelade över ytan som studeras. Om positionerna för hammarslagen istället automatiskt kan registreras i samband med att slagen utförs försvinner behovet av manuell mätning och utmärkning av linjer. Därigenom kan mätförfarandet förenklas avsevärt och skapar samtidigt nya möjligheter att tillämpa kombinerad Impact-Echo och ytvågsmätning.

Problemställningen berör ytterst frågan hur positionerna för hammarslag utförda på en betongyta kan bestämmas och registreras automatiskt? Projektet har genomförts med målet att lösa den här problem- och frågeställningen.

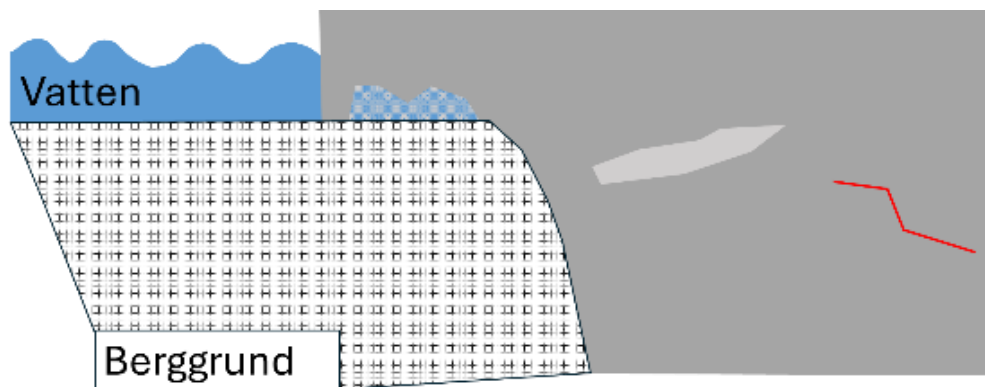
2. Vidareutveckling av metoder för utvärdering av mätdata

När en större mängd mätdata kan samlas in systematiskt och effektivt med tillräcklig noggrannhet och precision har förutsättningar för nya utvärderingsmetoder skapats. I grunden bygger kombinerad Impact-Echo och ytvågsmätning på dataset där vibrationer genererats (hammarslag) och mäts av sensorer (accelerometrar). Dessa dataset är synkroniserade i tid genom att inspelning av vibrationerna är kopplade till en kraftsensor i hammaren. Därigenom startas inspelningen för alla signaler på ett konsekvent och enhetligt sätt. Genom att hammarslagen även lokaliseras med en känd position i rummet fås en beskrivning av ett mekaniskt vågutbredningsfält i tid och rum. Den här typen av mätdata, med ett vågutbredningsfält uppmätt i tid och rum, återfinns inom en stor mängd olika tillämpningsområden, till exempel geofysik och ultraljudstillämpningar för att nämna några. Tack vara den generella karaktären av dataset från kombinerad Impact-Echo och ytvågsmätning är det därför rimligt att anta att utvärderingsmetoder från angränsande områden kan anpassas och tillämpas för oförstörande provning av betongkonstruktioner.

Nuvarande utvärderingsmetoder inom kombinerad Impact-Echo och ytvågsmätning tar ofta sin utgångspunkt i teori om vågor i vågledare (Guide waves/Lamb waves). För plattliknande konstruktioner innebär det att utvärderade parametrar beskriver egenskaper med genomsnittliga värden för ett tvärsnitt genom djupet och tjockleken av konstruktionen (se Figur 8). En anomali eller defekt påverkar därmed utvärderat värde genom att medelvärdet

förändras. Dock saknas vanligen information om anomalins eller defektens läge i djupled genom tjockleken.

Genom att anpassa och implementera nya metoder för utvärdering av mätdata, kan steg tas mot att utvärdera konstruktionens tillstånd i ett tvärsnitt som funktion av djupet genom tjockleken. Speciellt kan det vara viktigt för konstruktioner som innehåller lokala anomalier och defekter såsom nedbrutet material och sprickplan, se principskiss över en sådan konstruktion i Figur 10.

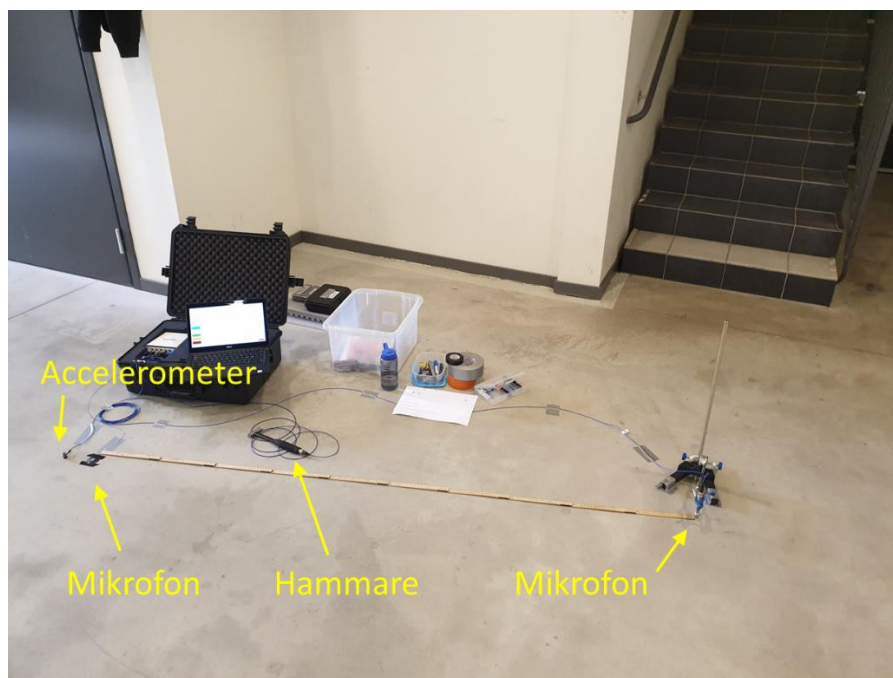


Figur 10. Exempel på konstruktion där information i djupled genom tjockleken är av betydelse.

3. Lokalisering av hammarslag med ljud

Genom att komplettera systemet för kombinerad Impact-Echo och ytvågsmätning med ett mikrofonsystem var planen initialt i projektet att studera hur hammarslag kan lokaliseras med hjälp av ljudet som uppstår då slagen görs. Hammarslagen kan förvisso approximativt lokaliseras med hjälp av vågutbredningen i betongkonstruktionen, men är svårtillämpat eftersom våghastigheten i betongmaterialet vid en mätningens början är okänt och därtill inte kan antas vara konstant inom konstruktionen. För luft kan dock ljudhastigheten antas vara konstant inom mätområdet, vilket gör att ett hammarslag kan lokaliseras genom att utvärdera ankomsttiderna för ljudvågen som når mikrofoner som placeras ut i mätområdet. Tillämpningen att lokalisera ljudkällor (hammarslag) är välstuderat inom andra tillämpningsområden (Benesty et al., 2008).

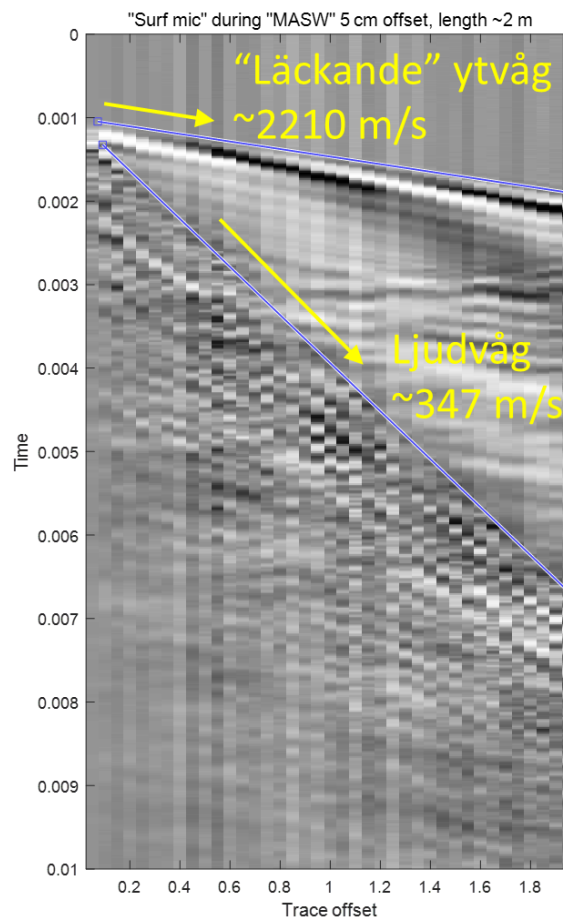
Ett exempel på försökssuppställning för lokalisering av hammarslagen med hjälp av ljudvågor i luften syns i Figur 11. Här utförs en kombinerad Impact-Echo och ytvågsmätning samtidigt som ljudvågorna i luften från hammarslagen registreras med mikrofoner.



Figur 11. Provmätning för lokalisering av hammarslag med hjälp av ljudvågor.

Det visade sig dock relativt tidigt att lokalisering med hjälp av ljudvågor i luften registrerade med mikrofoner skulle bli utmanande, se exempel på mätdata från mikrofoner i Figur 12. I figuren visas mätdata i form av gråskala med avstånd från mikrofon på x-axeln och tid på y-axeln. Det framgår att ljudvågen från hammarslagen kan registreras, men att även en "läckande" ytvåg är tydlig. Med läckande menas här att när hammarslagen görs mot betongytan skapas en ytvåg, vilken vi mäter med accelerometrar. Rörelsen i ytvågen skapar i sin tur även rörelse i luften, vilket gör att utöver ljudet från själva hammarslaget finns även en ljudvåg som genereras av ytvågen, en så kallad läckande våg eller leaky wave. Effekten blir att ljudet vi mäter med mikrofonerna blir en kombination av både själva slaget, vilket är vårt

huvudintresse vid lokalisering, samt de läckande vågor genererade av ytvågorna. Kombinationen av att vi i praktiken mäter flera vågtyper gör att det blir utmanande att bestämma en väldefinierad ankomsttid för ljudvågen av själva hammarslaget.



Figur 12. Mätdata från mikrofon i samband med en kombinerad Impact-Echo och ytvågsmätning.

Det finns troligen flera tillvägagångssätt som potentiellt kan förbättra möjligheterna att lokalisera hammarslag med hjälp av ljudvågor i luften. I mätningar undersökte vi olika positioner för mikrofoner samt möjligheterna att isolera ljudvågorna från betongytan och därigenom minska effekten av de läckande ytvågorna. Men det bedömdes att påverkan av läckande vågor ändå skulle innebära flera utmaningar, även om deras effekt kunde minskas. En slutsats här är att lokalisering med hjälp av ljudvågor med fördel görs i tillämpningar då ljudkällan kan bestämmas utan att behöva ta hänsyn till kombination och interferens av två olika vågtyper, till exempel lokalisera en högtalare eller talande människa i ett rum. Givet de noterade utmaningarna med att lokalisera hammarslag med hjälp av ljudvågor valdes därför att undersöka ett alternativt spår baserat på datorseende, se följande avsnitt.

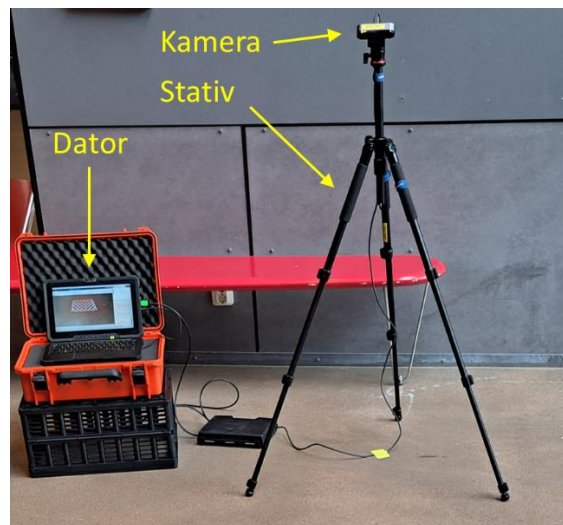
4. Lokalisering av hammarslag med datorseende

Datorseende (engelska Computer Vision) innebär att med datorers hjälp se och tolka bildinformation. Det är ett mycket stort område som återfinns inom en mängd olika applikationer och tillämpningar. Vid Högskolan Väst bedrivs forskning inom ämnena produktionsteknik, automation och produktionssystem. Där ingår bland annat användandet av datorseende i olika tillämpningar. Med inspiration från användning av datorseende inom dessa områden undersöktes möjligheterna att utnyttja datorseende för lokalisering av hammarslag vid kombinerad Impact-Echo och ytvågsmätning. Det visade sig vara ett framgångsrikt och högst tillämpbart tillvägagångssätt för att lokalisera hammarslag. Därmed kom projektet att fokusera på att utveckla och implementera datorseende för tillämpning inom kombinerad Impact-Echo och ytvågsmätning. Tillämpningen av datorseende i det här projektet kan sammanfattas och beskrivas till två deluppgifter 1) att detektera hammarens position i samband med hammarslag och 2) bestämma det verkliga fysiska läget (metriska mått och koordinater) för den detekterade positionen.

a) Utrustning och översikt av system

För att möjliggöra datorseende krävs en sensor som kan förse datorn med visuell information. En av de vanligaste typerna av sensorer för datorseende är kameror och i det här projektet har en högupplöst webbkamera, Logitech Brio, använts. Denna kamera har en relativt hög upplösning på 4096 x 2160 pixlar vilket säkerställer att en tillräcklig noggrannhet i datorseendet kan uppnås. Det betonas att resultaten i det här projektet inte är begränsat till just denna modell, utan andra modeller av kameror är också tillämpbara. Webbkameran som använts skulle exempelvis kunna bytas till en mer robust och fältmässig modell för att säkerställa drift i krävande arbetsmiljöer med damm, fukt, kyla eller värme. Det kan dock betonas att modellen av webbkamera som använts i projektet har fungerat bra utan några problem även i miljöer utomhus, trots att utomhusanvändning egentligen ligger utanför dess specificerade användningsområde. Anledningen till att en kommersiellt tillgänglig webbkamera använts är att projektet eftersträvat att använda så enkel utrustning som möjligt, så länge som tillräcklig prestanda kan säkerställas. En översikt av systemet för datorseende som använts i projektet ses i

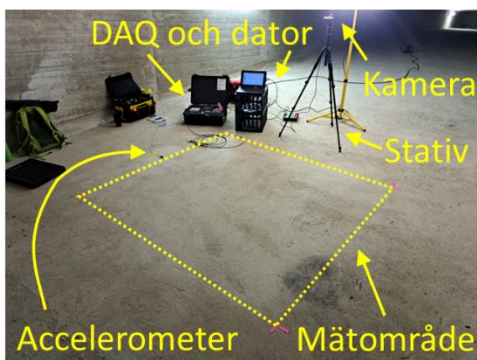
Figur 13. Det är viktigt att säkerställa att kameran står stadigt och inte rör på sig och därför används ett stativ för att montera kameran i en fix position.



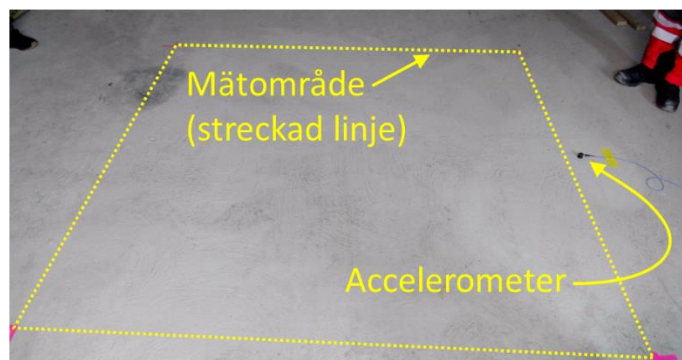
Figur 13. System för datorseende bestående av kamera på stativ inkopplat till dator.

Kameran ansluts via USB port till dator och kontrolleras genom Image Acquisition Toolbox i MATLAB ("MATLAB," 2024). Motivet till att använda MATLAB för hantering av bilddata är att systemet för mätning av Impact-Echo och ytvågor också använder sig av MATLAB. Därigenom skapas möjligheten att sömlöst integrera dessa två olika sorters tekniker (bildupptagning och vibrationsmätning). Utrustningsmässigt är skillnaden mot tidigare mätningar (utan datorseende) att systemet för kombinerad Impact-Echo och ytvågsmätning kompletteras med en kamera på stativ som placeras intill mätområdet, se Figur 14.

Översikt mätuppställning



Vy från kamera (system för datorseende)

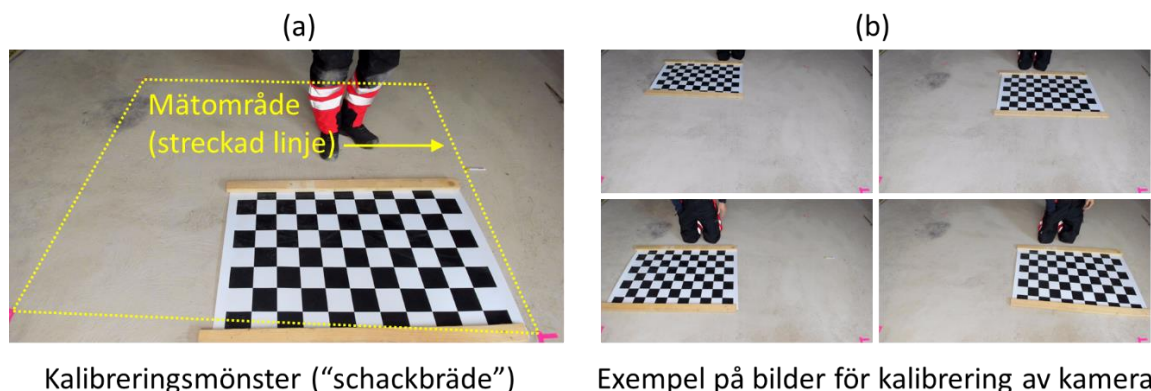


Figur 14. Översikt av mätuppställning för kombinerad Impact-Echo och ytvågsmätning med datorseende (vänster delfigur). Vy från kamera som används för datorseende (höger delfigur). Mätområdet markerat med streckad gul linje är densamma för både höger och vänster delfigur, men sett från olika vinklar. Det gula stativet bakom kamerastativet (vänster delfigur) är till för arbetsbelysning.

b) Kalibrering av kamerasystem

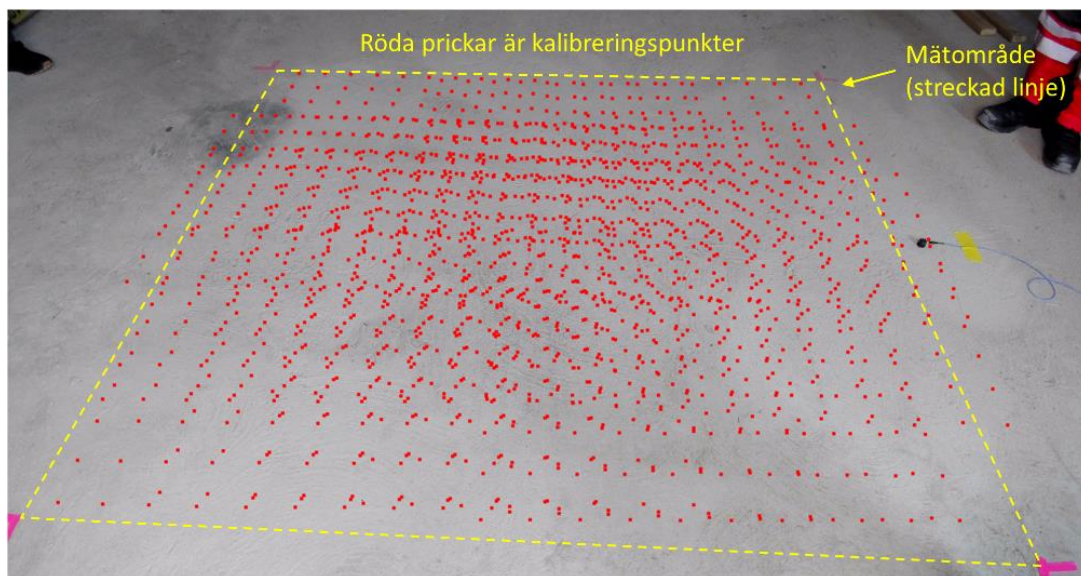
För att kunna utvärdera mätdata från en kombinerad Impact-Echo och ytvågsmätning måste positionerna för hammarslagen vara registrerade. Detta eftersom avstånden mellan slagen och accelerometer bland annat används för att bestämma hastigheten i de propagerande ytvågorna. Förenklat kan behovet av exakta positioner betraktas utifrån ett sträcka-tid-hastighetsproblem. För en renodlad Impact-Echo mätning kan dock krav på exakta avstånd mellan slagpositionerna emellertid förbises, men för en kombinerad Impact-Echo och ytvågsmätning hammarslagens positioner vara kända. Ett syfte med systemet för datorseende är därför att utnyttja metrisk bildanalys för att estimeras hammarslagens positioner och inbördes avstånd inom mätområdet. För att möjliggöra metrisk analys inom datorseende krävs att kamerasystemet kalibreras. Det innebär att man beräknar kamerans interna paramaterar – såsom brännvidd, huvudpunkt och distorsion – samt externa parametrar som beskriver kamerans position och orientering i förhållande till mätområdet. Efter genomförd kamerakalibrering kan bilddata som exempelvis avståndet mellan pixlar översättas till verkliga fysiska mått. Det möjliggör att både position för hammarslagen såväl som accelerometer kan bestämmas från bilddata.

Kalibrering av kamerasystemet sker genom att placera ett förutbestämt mönster med väldefinierade mått inom mätområdet (bilden från kameran). I det här projektet har ett svart-vit rutigt mönster liknande ett schack-bräde använts, se Figur 15 (a). Mönstret utgörs av svart och vita kvadrater med sidan 100 mm utskrivet på en A0 plansch. Den här typen av mönster är vanligt förekommande vid kalibrering av kamerasystem för datorseende eftersom det erbjuder god möjlighet att detektera hörnpunkterna mellan de svarta och vita områdena. Det finns dock möjlighet att använda andra sorters kalibreringsmönster, typiskt för mönstren är att de har fördefinierade mått och ett specifikt utseende som är lätt för automatisk bildanalys att detektera. Genom att förflytta det svart-vit-rutiga mönstret för kalibrering över mätområdet, se Figur 15 (b), och för varje kamerabild detektera hörnpunkterna för de svarta och vita områdena skapas en uppsättning av kalibreringspunkter. Därigenom skapas ett underlag för kamerakalibrering genom att avstånden mellan de lokaliserade kalibreringspunkterna (hörnen av det svart-vita fälten) uppmätt i pixlar kan jämföras med det verkliga fysiska avståndet som är konstant 100 mm inom mönstret.



Figur 15. Bilder från systemet för datorseende. Delfigur (a) visar mätområdet och kalibreringsmönstret som utgörs av ett svart-vitt rutigt A0 plansch där varje ruta har en storlek på 100x100 mm. Delfigur (b) visar exempel på hur mönstret flyttas runt inom mätområdet som ses i bilden från kameran.

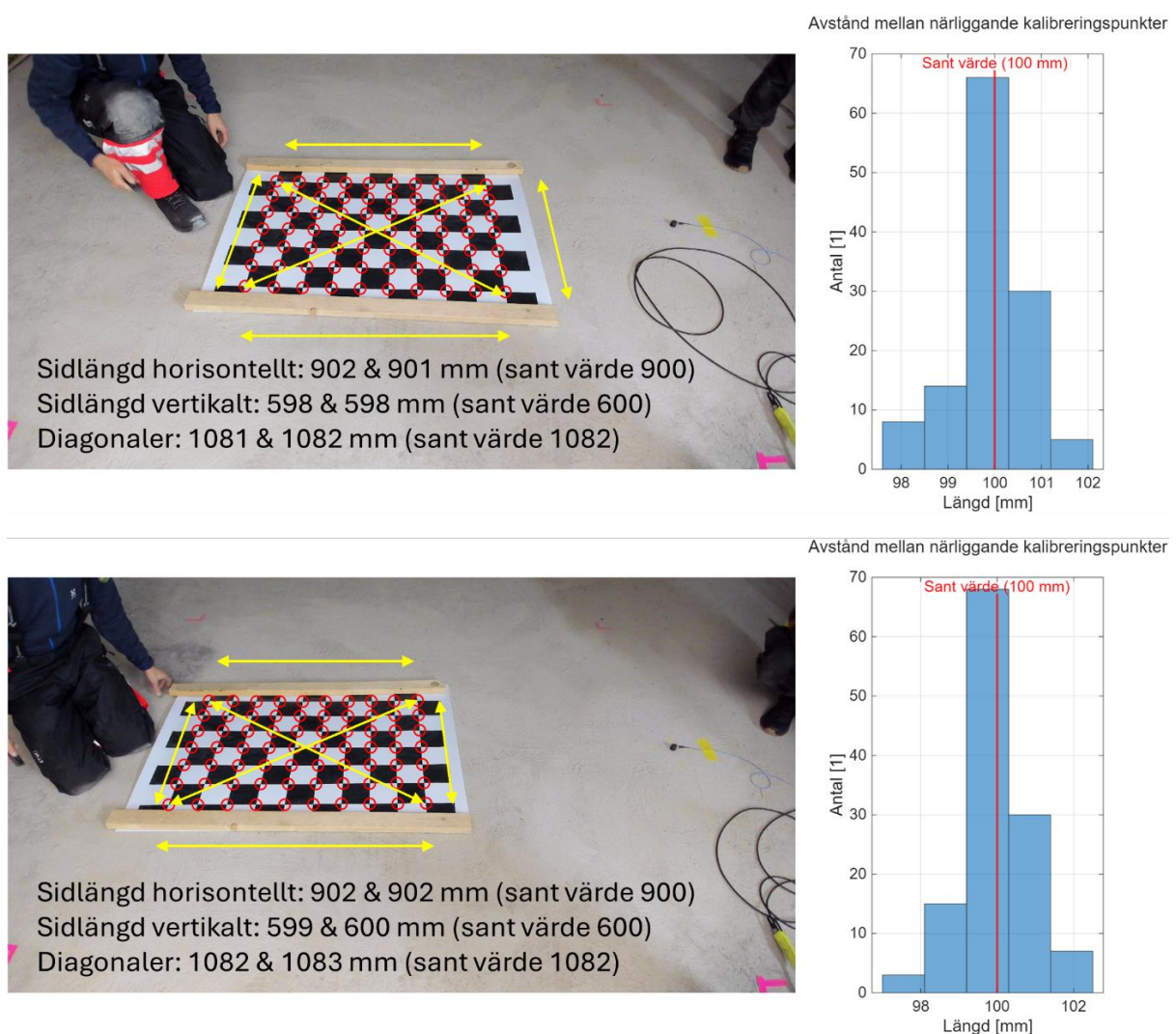
En tumregel vid kamerakalibrering är att minst 10–20 bilder behövs och att mönstret ska placeras på olika positioner inom området som kalibreras ("MATLAB, Computer Vision Toolbox," 2024). Bilderna i Figur 15 (b) visar ett mindre urval av de totalt 26 bilder som används vid kalibreringen i detta fall. En översikt av alla punkter som används vid kalibreringen ses markerade samtidigt i Figur 16 med röda prickar. Beräkningen av parametrar för kamerakalibrering görs med hjälp av MATLAB (Heikkila and Silven, 1997; Zhang, 2000).



Figur 16. Mätområde (streckad gul linje) och kalibreringspunkter (röda prickar) från totalt 26 bilder av kalibreringsmönstret.

Efter att parametrarna för kamerakalibreringen har slutförts kan verkliga fysiska mått uppskattas utifrån bilderna från systemet för datorseende. Det är i många fall lämpligt att genomföra en kontroll och utvärdering av kalibreringens resultat. Ett sätt att genomföra det är att ta ytterligare bilder på kalibreringsmönstret och låta systemet

utvärdera vad för mått som mönstret har. Med andra ord undersöks vad för fysiska mått som uppskattas i mönstret utifrån bilder som ej har använts för kalibreringen. Två sådana exempel visas i Figur 17 där de vänstra delfigurerna visar två kontrollbilder där mönstrets hörnpunkter (röda ringar) har lokaliserats. Därefter beräknas avstånden mellan närliggande röda ringar och jämförs med det verkliga värdet som är 100 mm. En fördelning av alla dessa beräknade avstånd mellan närliggande röda ringar återges i högra delfigurerna. Där framgår att huvuddelen av avstånden är inom 1 mm felmarginal och att de största avvikelserna når omkring 2 mm. I tillägg utvärderas även horisontella, vertikala och diagonala måtten på kalibreringsmönstret. Även här är resultatet inom en acceptabel felmarginal för tillämpningen av en kombinerad Impact-Echo och ytvågsmätning.



Figur 17. Exempel på kontroll och utvärdering av kalibreringsresultat för två bilder av kalibreringsmönstret.

Exemplet på kalibrering av kamerasystemet som visas i Figur 15-Figur 17 utgår från att kalibreringsmönstret förflyttas inom mätområdet (förflyttningen inom bilderna som kameran tar), så kallad "camera-centric calibration". Det här förfarandet är oftast enkelt att utföra om mätområdet och konstruktionen är horisontell eller har begränsad lutning. Om en mätning emellertid sker på en vertikal yta eller en horisontell yta såsom undersidan av ett tak blir förflyttningen av mönstret svårare att utföra, eftersom det oftast kräver en ny montering och applicering mot konstruktionsytan för varje bild som tas. Lyckligtvis kan här dock en annan procedur tillämpas, så kallad "pattern-centric calibration". Genom att montera kalibreringsmönstret i en fix position på konstruktionens yta och istället låta kamerans position och vinkel ändras, så att mönstret hamnar i olika delar av bilden, kan ett underlag för kalibrering skapas. Här är det viktigt att betona att båda tillvägagångssätten är likvärdiga i form av prestanda och att valet mellan hur kalibreringen sker i slutändan är en praktisk fråga.

c) Lokalisering av hammare

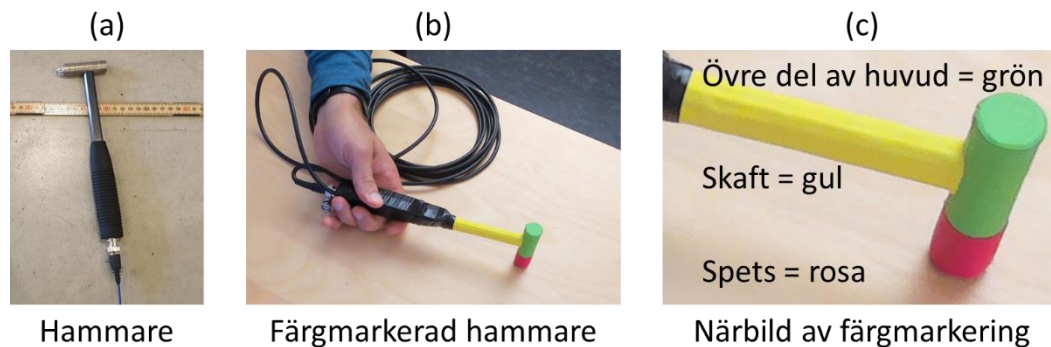
När systemet för datorseende är kalibrerat kan verkliga mått uppskattas från bilddata. Genom kalibreringen skapas även ett koordinatsystem i mätområdet vilket kan användas för att beskriva positionerna för accelerometer och hammarslagen i en kombinerad Impact-Echo och ytvågsmätning, se Figur 18. I det här projektet har en manuell procedur använts för att bestämma läget av accelerometrar i bilderna (exempel i Figur 18 (a)). För hammarslagens positioner har ett automatiskt tillvägagångssätt baserat på bildanalys implementerats och använts (exempel i Figur 18 (b)), eftersom målet är att bestämma hammarens spets vid ett stort antal slag inom mätområdet.



Figur 18. (a) Bild från systemet för datorseende. Bilden visar mätområdet (streckad linje) med tre styck accelerometrar (markerat med tre pilar). (b) Bild där hammarens spets lokaliserats automatiskt genom bildanalys.

Det finns flera tänkbara alternativ som kan användas för att lokalisera ett objekt så som en hammare i en bild. I det här projektet har en lösning baserat på segmentering av bilder utifrån färg använts, där hammaren och dess spets lokaliseras genom markering med utvalda färger som enkelt kan detekteras i bilderna, se Figur 19. Figur 19 (a) visar hammaren i originalfärg och med en tumstock i bakgrunden för storleksreferens medan delfigur (b) visar hammaren med en applicerad färgmarkering, vilken är ytterligare förstörad i delfigur (c). Färgmarkeringen skapas genom att vävtape

(gaffatape) med tydlig gul, grön och rosa färg fästes på hammarens skaft, huvud och spets (spets synlig i delfigur a, men dold i delfigur b-c). Här kan nämnas att det finns flera principer för att tillämpa segmentering av bilder utifrån färg, exemplet som visas i projektet utgör en av potentiellt många lösningar. Gemensamt är dock vanligen att färger som är tydliga och enkla att skilja från bakgrunden i bilden eftersträvas att användas.

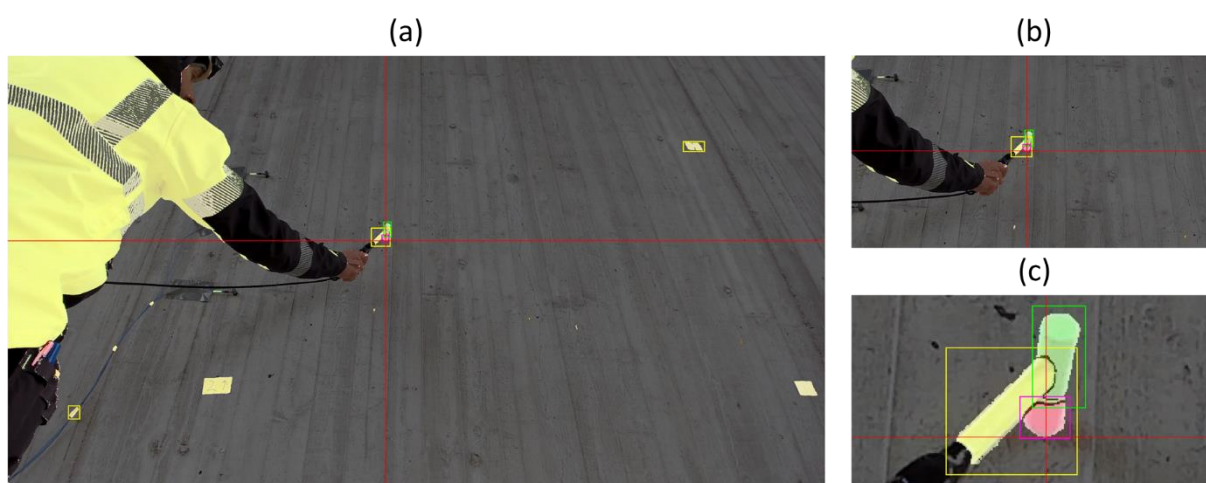


Figur 19. Bild på hammare utan färgmarkering (a) och med färgmarkering (b) och (c).

För automatisk lokalisering med bildanalys, som i projektets fall av en hammare, är det i teorin tillräckligt att enbart använda en applicerad unik färg. Inledningsvis i projektet tillämpades den typen av enkel markering med enbart en unik färg applicerad på nedre delen av hammarens huvud nära hammarspetsen. Dock visade det sig ofta svårt att i praktiska fältmätningar entydigt lokalisera hammarspetsen då enbart en unik färg användes. Det beror på att den automatiska bildanalysen lätt kan förhindras om en liknande färg, som den som används för markering på hammaren, förekommer inom bildområdet. För att minska risken för förväxling av lokaliserat föremål (färgmarkering) är ett tillvägagångssätt att säkerställa att inga liknande färger som den som används för markering av hammarspetsen får finnas inom bildområdet. Alternativt kan ett snävare intervall på tröskelvärdena för färgerna eller kriterier för färgområdets storlek i bildanalysens segmentering tillämpas. Men det skapar i sin tur potentiellt ytterligare svårigheter då tröskelvärdena för färg och storlek kan behöva uppdateras frekvent på grund av exempelvis ändrade ljusförhållanden i bild, vilket är vanligt utomhus. Det är alltså i fältmässiga mätningar i praktiken en utmaning att arbeta med enbart en unik färg för lokalisering av hammarspetsen. Speciellt gäller det om man eftersträvar att bildanalysen ska kunna användas i fältmässiga tillämpningar där operatören kan tänkas bära klädsel med varselfärg eller reflexer som kan skapa svårförutsägbara färgsvar i bild, se till exempel Figur 18 där operatören bär en gul varseljacka med reflexer. I tillägg kan det även vara svårt att säkerställa att föremål som verktyg och utrustning, vilka potentiellt också kan bära färg som kan förhindra bildanalysen, inte förekommer i bild, se till exempel Figur 18 där gul tape används för montering och märkning. Mot bakgrund av dessa utmaningar och syftet att skapa en fältmässigt tillämpbar mätmetod har det i det här projektet implementerats en rutin för bildanalys som baseras på tre styck unika färger (gul, grön och rosa, se Figur 19). Grundidén är här att

för lokalisering av hammaren utnyttja villkor om att de tre färgerna gul, grön och rosa, som är markerat på hammaren, måste förekomma samtidigt i närheten av varandra och utefter ett antal ställda kriterier. Därigenom ökar sannolikheten för att en entydig lokalisering av hammarens position för de svårare fall då färger på operatörens klädsel, verktyg och föremål är snarlika de som används som markering på hammaren.

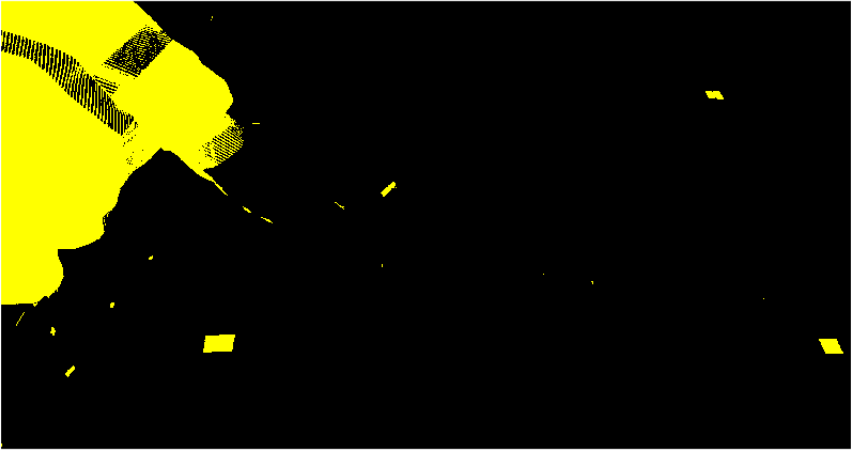
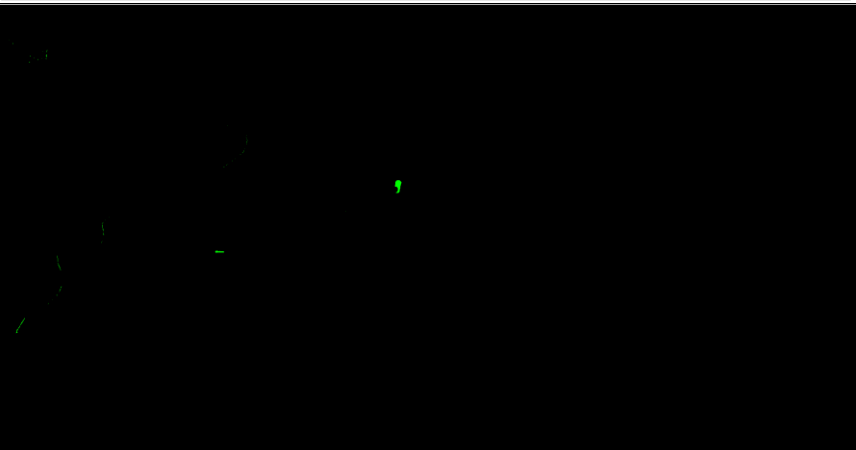
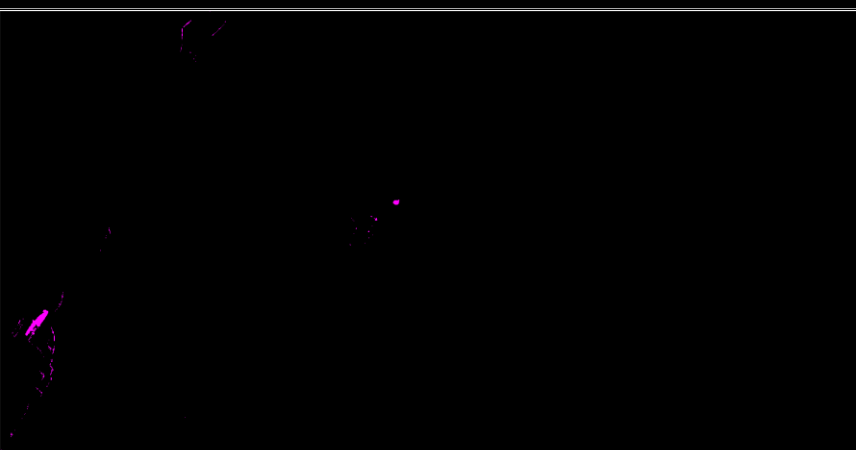
Ett exempel på tillämpning av rutinen för att lokalisera hammarens spets för samma bild som i Figur 18 (b) visas i motsvarande färgsegmenterade bild i Figur 20 (a). Här är bilden från kameran över mätområdet visad med mörk ton och ovanpå den tydliggörs detekterade områden av färgerna gul, grön och rosa vilka används för lokalisering av hammaren (se Figur 19 (b-c)).



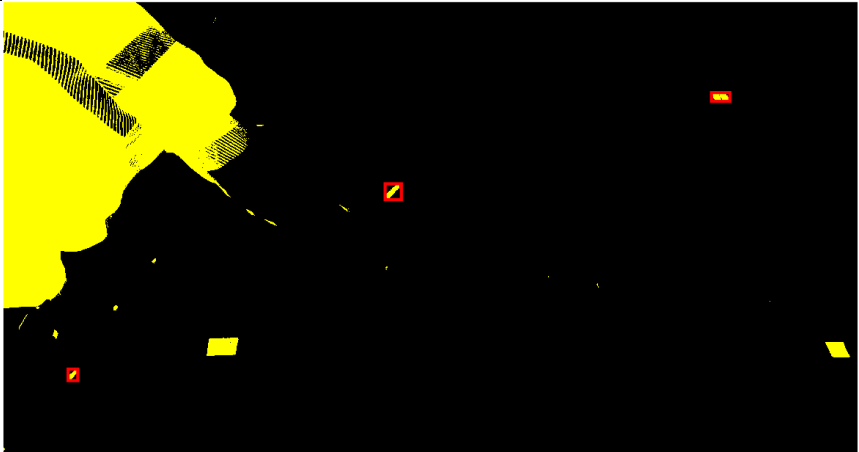
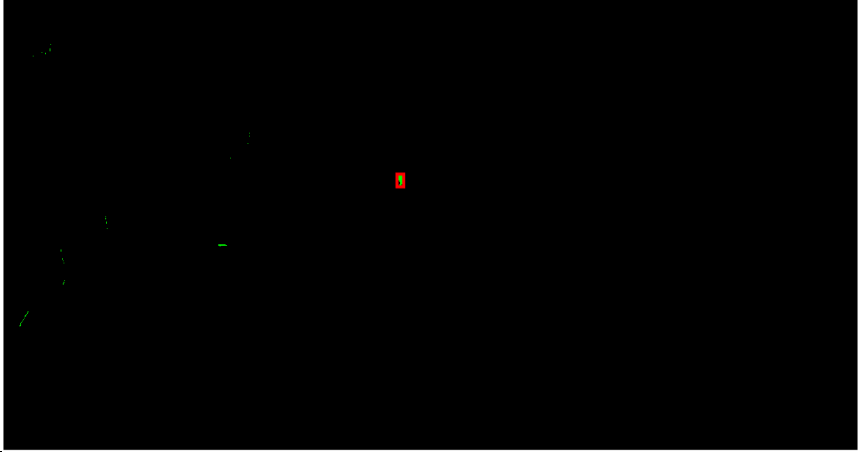
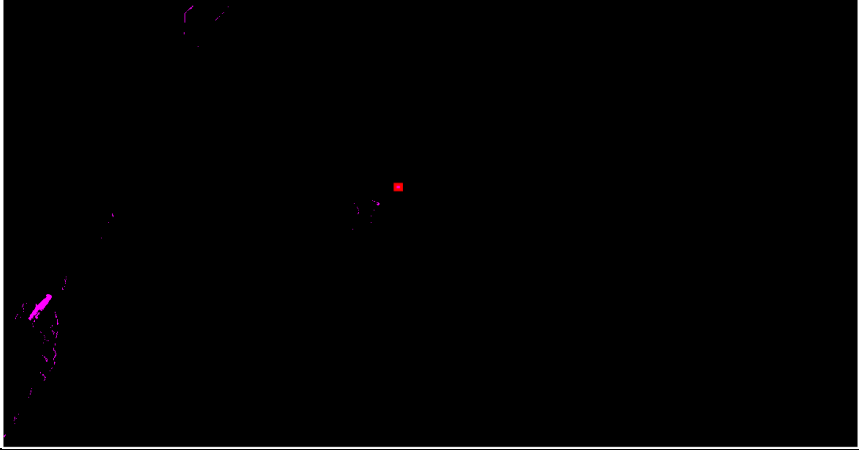
Figur 20. Exempel på färgsegmentering av bild från systemet för datorseende (a). Närbild på operatörens arm, hand och hammare (b). Närbild på segmenterade färgområden på hammaren (c). I alla delfigurer är den lokaliserade positionen för hammarspetsen markerad som ett rött kors.

I Figur 20 (a) ses tydligt att operatörens jacka har en färg som är liknande den som utgör markering på hammarens skaft. Men eftersom bildanalysen sker utefter krav på att alla färger (gul, grön och rosa) måste förekomma i samtidig närhet av varandra kan objekt såsom operatörens klädsel samt tapebitar för markering av mätområdet sorteras bort i bildanalysen. Därmed fås en mycket robust algoritm för lokalisering som har låg känslighet för yttre störande faktorer. Bildanalysen sker därefter enligt följande konceptuella steg, visat för exempelbilden i Figur 20 (a):

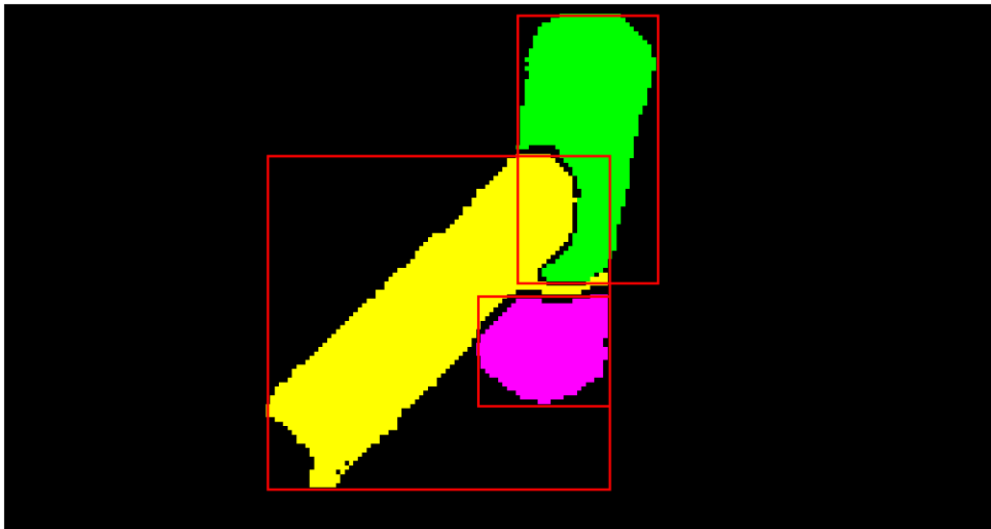
1. Segmentera ursprunglig bild utefter färgerna gul, grön och rosa. Det här steget genererar tre styck bilder med information om var den ursprungliga bilden har färginnehåll som uppfyller tröskelvärden för gul, grön och rosa färg.

Gul segmentering	 A binary image showing the yellow segmentation mask. The mask highlights the yellow regions of the original image, which include the yellow shirt and some yellow elements in the background. The rest of the image is black.
Grön segmentering	 A binary image showing the green segmentation mask. The mask highlights the green regions of the original image, which include the green shirt and some green elements in the background. The rest of the image is black.
Rosa segmentering	 A binary image showing the pink segmentation mask. The mask highlights the pink regions of the original image, which include the pink shirt and some pink elements in the background. The rest of the image is black.

2. För varje segmentering, hitta sammanhängande områden (så kallad blob-analys som genererar "blobar" som resultat) som uppfyller krav på min- och maxstorlek av sammanhängande pixlar. Detekterade blobar är markerade med röda rektanglar, men på grund av deras små storlekar kan de vara svåra att se tydligt.

Gula blobar	
Gröna blobar	
Rosa blobar	

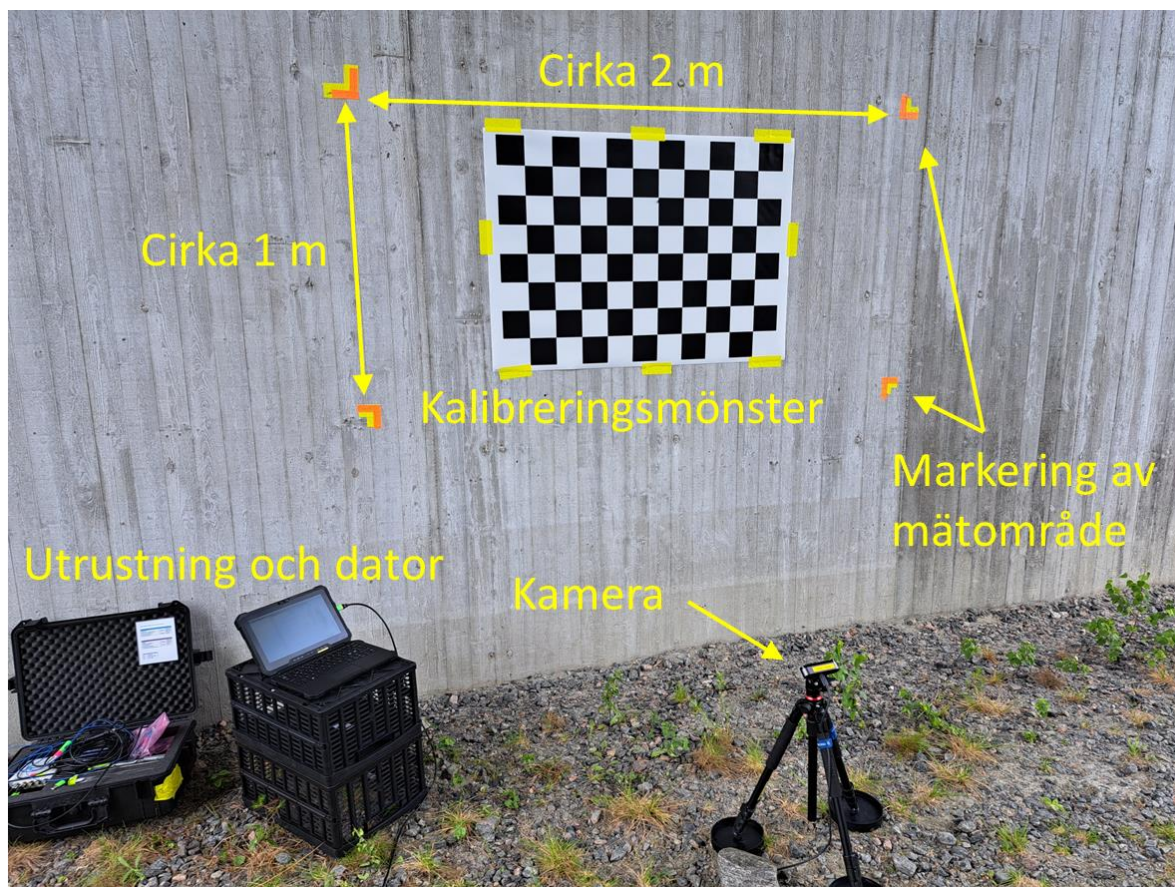
3. Sortera bort områden av grön färg ("blobar") som inte uppfyller krav på lodrät orientering. Hammaren förväntas hållas vinkelrätt mot ytan och då måste den övre delen av hammaren (grön färgmarkering) vara lodrät. I det här exemplet har ingen bortsortering skett.
4. Lokalisera hammaren genom att hitta det kluster av färgområden ("blobar") i gul, grön och rosa färg som är intill varandra. Verifiera att färgen grön är ovanför färgen rosa i klustret, vilket motsvarar att hammarspetsen alltid måste vara nedåt mot ytan. När ett entydigt kluster hittats bestäms hammarspetsen position genom det rosa färgområdet, se exempelfiguren nedanför som visar en kombination av identifierade gula, gröna och rosa blobar. Figuren nedanför innehåller samma bilddata som Figur 20 (c) men visar enbart lokaliserade blobar från hammaren.



5. Integrering av system för datorseende för Impact-Echo och ytvågsmätning

Systemet för kombinerad Impact-Echo och ytvågsmätning integreras med systemet för datorseende genom att båda delsystemen styrs och kontrolleras via MATLAB. Därigenom skapas en sömlös integration till ett nytt enhetligt och sammansatt system. Mätningar utförs på liknande sätt som tidigare för kombinerad Impact-Echo och ytvågsmätning men med skillnaden att i tillägg behöver systemet för datorseende även monteras och kalibreras för mätplatsen.

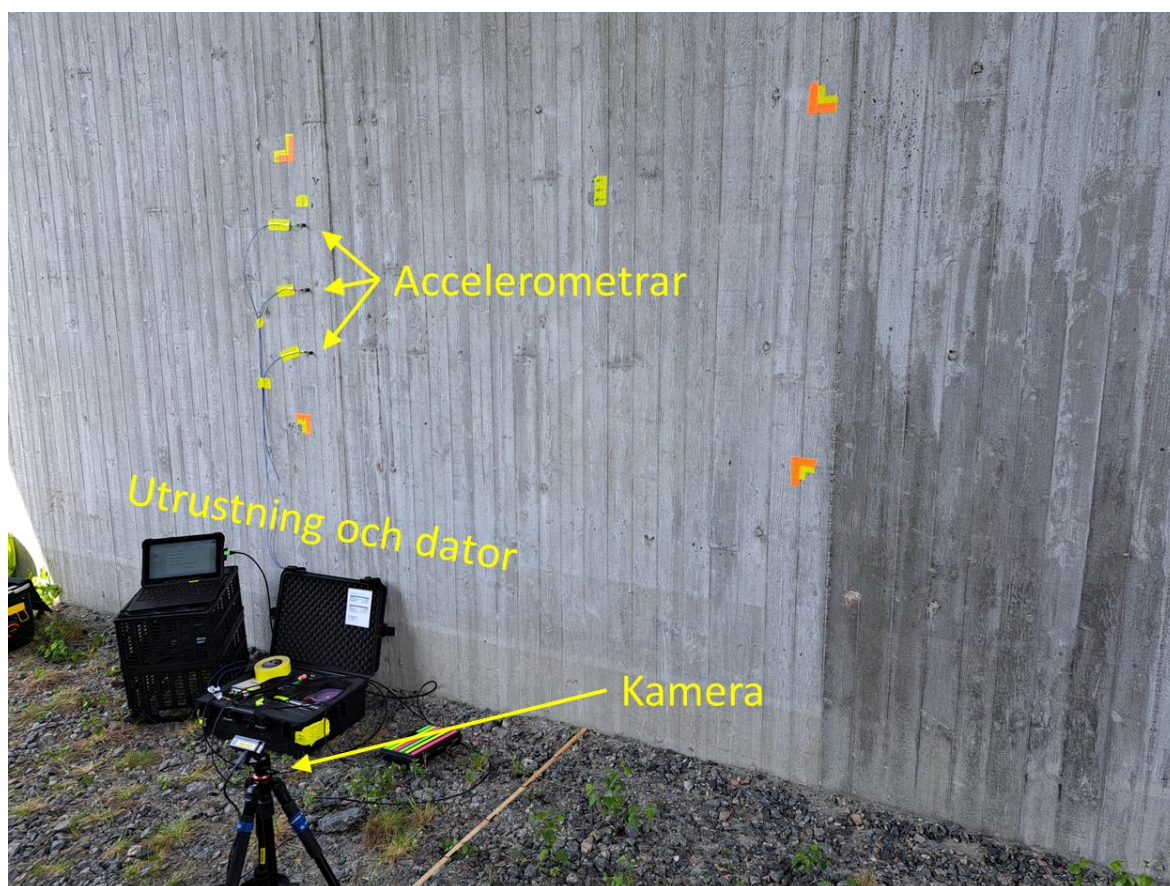
En mätning med det integrerade systemet för Impact-Echo och ytvågsmätning med datorseende kan konceptuellt beskrivas med följande aktiviteter och steg. Inledningsvis märks mätområdet ut med markeringstape eller andra föremål som kan skapa en yttre referensram av mätområdet. Detta görs för att systemet för datorseende bildmässigt ska kunna ställas in, med tydliga markeringar i förhållandet till området som ska kalibreras. Vanligtvis är ett mätområde i ungefärlig storlek av 2 meter x 2 meter. Men det betonas att det inte finns någon strikt begränsning eller krav på storlek för mätområdet, utan storleken är beroende på vad för upplösning av systemet för datorseende som efterfrågas och vad som är praktiskt hanterbart. Med andra ord kan alltså storleken på mätområden anpassas utefter vad för sorts mätning som ska göras och efter de lokala förutsättningarna för konstruktionen. Ett exempel på markering av mätområde kan ses i Figur 21 där även kalibreringsmönstret finns placerat. I exemplet är mätområdet cirka 2 meter i bredd och 1 meter i höjd. När mätområdet är markerat sker kalibrering av kameran genom att bilder tas på kalibreringsmönstret så som beskrivits i tidigare avsnitt. I det här exemplet tillämpas proceduren där mönstret behålls i en fix position och kameran flyttas och fotograferar mönstret ur olika positioner och med mönstret placerat i olika delar av bildområdet.



Figur 21. Markering av mätområde och kalibreringsmönster.

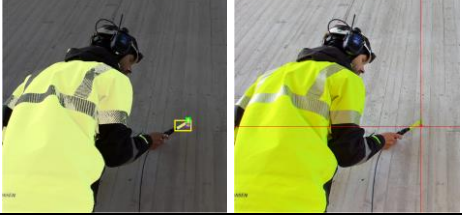
När kameran i systemet för datorseende är kalibrerad återstår att justera gränser för storlekar på hammarens färgområden. Det görs genom att hammaren placeras i bildområdet och därefter markeras i datorn manuellt storleken på den gula, gröna och rosa markeringen på hammaren. Vid behov kan även gränser och tröskelvärden för färgerna justeras. Men givet att bildanalysen utgår från att tre samtidiga färger ska vara i närheten av varandra kan tröskelvärdena i de flesta fall utgå från förinställda standardvärden och vid behov kan dessa justeras under mätningens gång.

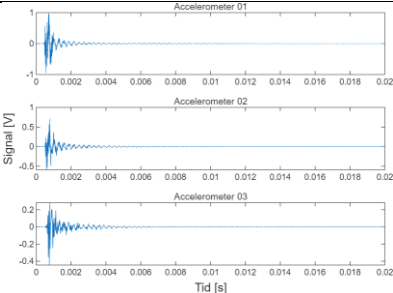
Beroende på vad för sorts mätning som genomförs monteras antingen en eller flera accelerometrar inom mätområdet, se Figur 22 där tre styck accelerometrar har monterats i vänster del av mätområdet. Därefter kontrolleras att systemet som används för Impact-Echo och ytvågsmätning fungerar som det ska. Typiskt kontrolleras här att accelerometrar har tillräcklig kontakt mot underlaget och att hammaren, som används för att generera vibrationerna och vågorna i materialet, registrerar kraftpuls vid slagen och att dessa är repeterbara. Ett repeterbart slag och därmed en likformig kraftpuls är viktig eftersom denna används för att starta och stoppa inspelningen av vibrationerna.



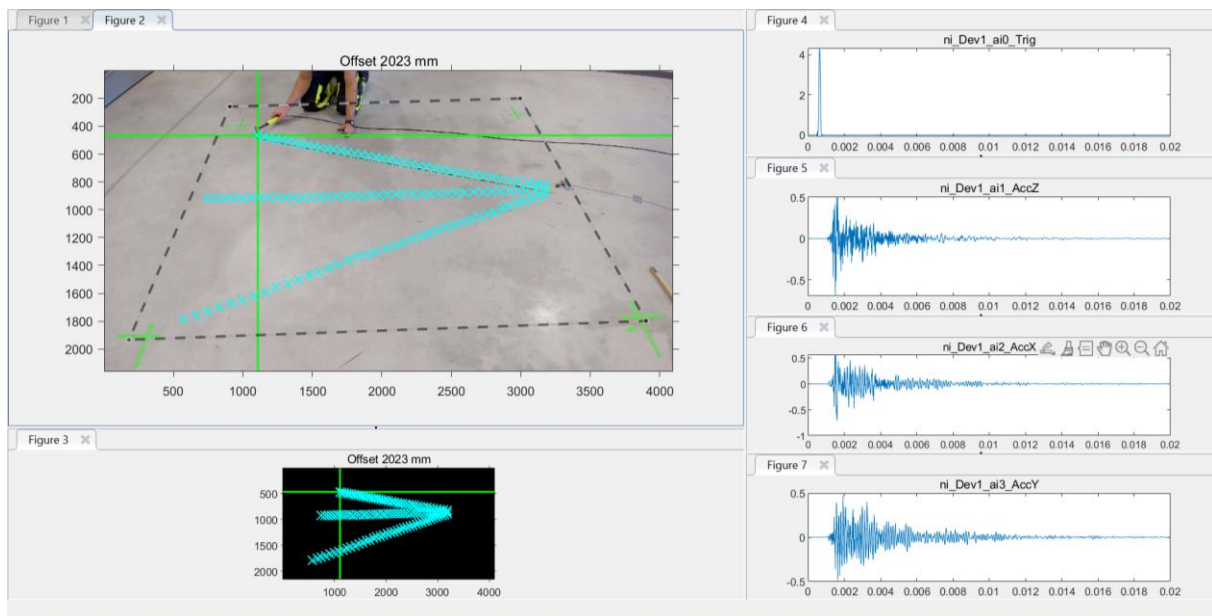
Figur 22. Bild på mätområdet med markeringar och monterade accelerometrar. I bilden ses även kamerasystemet, system för mätning av vibrationer och dator.

Med både systemet för datorseende och systemet för Impact-Echo och ytvågsmätning konfigurerat och på plats kan mätningen starta. Beroende på vad för sorts mätning som genomförs samlas mätdata från hammarslag in på olika positioner inom mätområdet. Proceduren för hur mätdata samlas in för ett enskilt hammarslag är dock densamma för alla typer av mätningar och sker enligt följande principiella flöde.

1. Operatören flyttar hammaren till avsedd position för slaget och håller hammarens spets stilla mot underlaget. Genom ett knapptryck på en fjärrkontroll initieras en bildtagning av systemet för datorseende.	
2. Systemet för datorseende genomför bildanalys utifrån segmentering av färger och lokalisering av markeringar på hammarens skaft, huvud och spets.	
3. Återkoppling via ljud (och bild vid behov)	

a. Om hammarens spets entydigt lokaliseras i bildanalysen uppmärksammas operatören med ett ljud som indikerar detta. Mätningen (hammarslagen) i den aktuella punkten kan starta.	
b. Om hammarens spets inte entydigt kan lokaliseras eller om det finns andra felmeddelanden från bildanalysen uppmärksammas operatören genom återkoppling av ljud.	
4. Operatören genomför hammarslag i den avsedda punkten. Vanligtvis genomförs flera slag i samma punkt och mätdata skapas genom medelvärdesbildning, därigenom minskas effekterna av eventuellt bakgrundsbrus.	
5. En automatisk kontroll genomförs av mätdata där bland annat likformighet av signaler görs. På så vis kan avvikande mätdata på grund av exempelvis felaktiga hammarslag detekteras i ett tidigt skede.	
a. Om mätdata klarar den automatiska kontrollen sparas data för hammarslagen för den aktuella positionen. Information som sparas är signaler från accelerometrar och hammare, position för slaget, tidpunkt för slaget. I tillägg sparas även en loggbild på den lokaliserade hammarspetsen för varje position. Därigenom kan det i efterhand säkerställas att systemet för datorseende inte lokaliserat positioner felaktigt. När data är sparad får operatören ett återkopplande ljud och kan förbereda för nästa position för hammarslag och då repetera flödet från steg 1.	
b. Om mätdata inte klarar kontrollen uppmärksammas operatören istället med ljud och felmeddelande.	

Som förklarat i texten om flödet för mätningarna ovan så används ljud till stor del för att återkoppla till operatören statusen för mätningen, vad som är nästa steg och eventuella felmeddelanden. Under arbetet i projektet med att integrera systemet för datorseende med systemet för kombinerad Impact-Echo och ytvågsmätning blev det tydligt att just återkoppling till operatören via ljudmeddelanden var en viktig faktor för att göra arbetet med praktiska mätningar effektiva. Genom återkoppling via ljudmeddelanden kan operatören rikta fullt fokus mot konstruktionen och mätområdet utan att behöva rikta fokus mot information visuellt presenterad på datorn. Återkopplingen till operatören via ljudmeddelanden kan ske på flera sätt, till exempel genom att utnyttja datorns inbyggda högtalare. I det här projektet har i huvudsak använts hörlurar eller hörselskydd med inbyggda hörlurar, vilket ger operatören god möjlighet att rikta fullt fokus mot mätningarna då yttre störningar kan minskas.



Figur 23. Exempel på bild från mätatorns display.

För att ge operatören möjlighet till en heltäckande bild av hur mätningarna fortgår presenteras även återkopplande information visuellt i bild på datorn som används för att kontrollera systemet för datorseende och systemet för Impact-Echo och ytvågsmätning. Ett exempel på information som presenteras i bild ses i Figur 23. Där visas aktuell bild från kameran, hammarens lokaliserade position och avstånd till accelerometern. Från systemet för mätning av vibrationer presenteras accelerometers registrerade signaler såväl som hammarens kraftpuls. I tillägg visas även föregående positioner för hammarslag där mätdata samlats in, i exemplet i Figur 23 som ljusblå kryss. Systemet för datorseende ger alltså en god möjlighet att under pågående mätkampanj sammanställa information kring hur mätningen fortlöper.

I det här arbetet med att integrera systemet för datorseende och systemet för Impact-Echo och ytvågsmätning har en trådlös fjärrkontroll använts för att styra datorn, till

exempel vid initiering av bildtagning för lokalisering av hammarens spets. Inledningsvis i arbetet undersöktes möjligheten att använda hammarens kraftsensor för att styra bildtagningen. Konceptuellt är det ett möjligt alternativ som kan göra mätflödet enklare. Dock är ett hammarslag till sin natur en transient händelse med mycket kortvarigt förlopp. I praktiken är kontakttiden som hammaren har mot underlaget vid slaget mycket kort. Det i sin tur ställer mycket höga krav på kamerasystemet vad gäller exponering och ljusförhållanden. Mot bakgrund av detta valdes att arbeta med en manuell styrning via en fjärrkontroll. Ett annat alternativ är att arbeta med rörelsestyrd initiering av bildtagning, exempelvis att en bild tas då hammaren hålls stilla på en plats. I projektet provades en enkel form av rörelsestyrning där mätning automatiskt startade då hammaren hölls stilla, men det visade sig att den här typen av styrning i nuläget skapade onödig komplexitet och ställde högre krav på datorn då en kontinuerlig bildström måste bearbetas och analyseras i motsats till lösningen med fjärrkontroll som enbart kräver bearbetning och analys av enskilda bilder.

6. Fältextempel av integrerat system

Med den nya integrationen av systemet för datorseende kan flera olika typer av mätningar genomföras, såväl Impact-Echo som ytvågsmätning och kombination av dessa. I det här avsnittet visas hur det integrerade systemet kan användas i fält med tre exempel på mätningar. Det betonas emellertid att det nya integrerade systemet inte är begränsat till enbart dessa tre typer av exempel då systemet utgår från ett flexibelt ramverk som enkelt kan anpassas till olika och nya tillvägagångssätt.

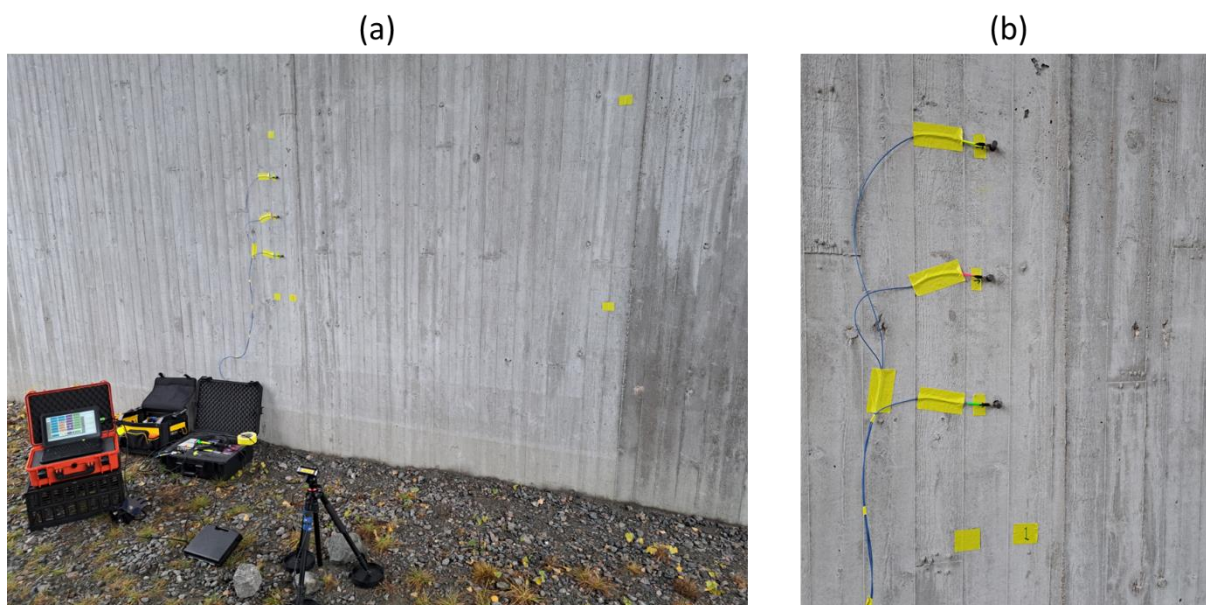
a) Exempel 1 – mätning med Impact-Echo

En mätning baserad på Impact-Echo genomfördes på en plattrambro som är del av järnvägen mellan Trollhättan och Göteborg. Fotografier på bron visas i Figur 24 där det i delfiguren längst till höger är ungefärligt markerat på brons väggsida var mätningen genomfördes. Den här mätningen syftar till att visa hur en Impact-Echo mätning kan genomföras och kompletteras med systemet för datorseende.



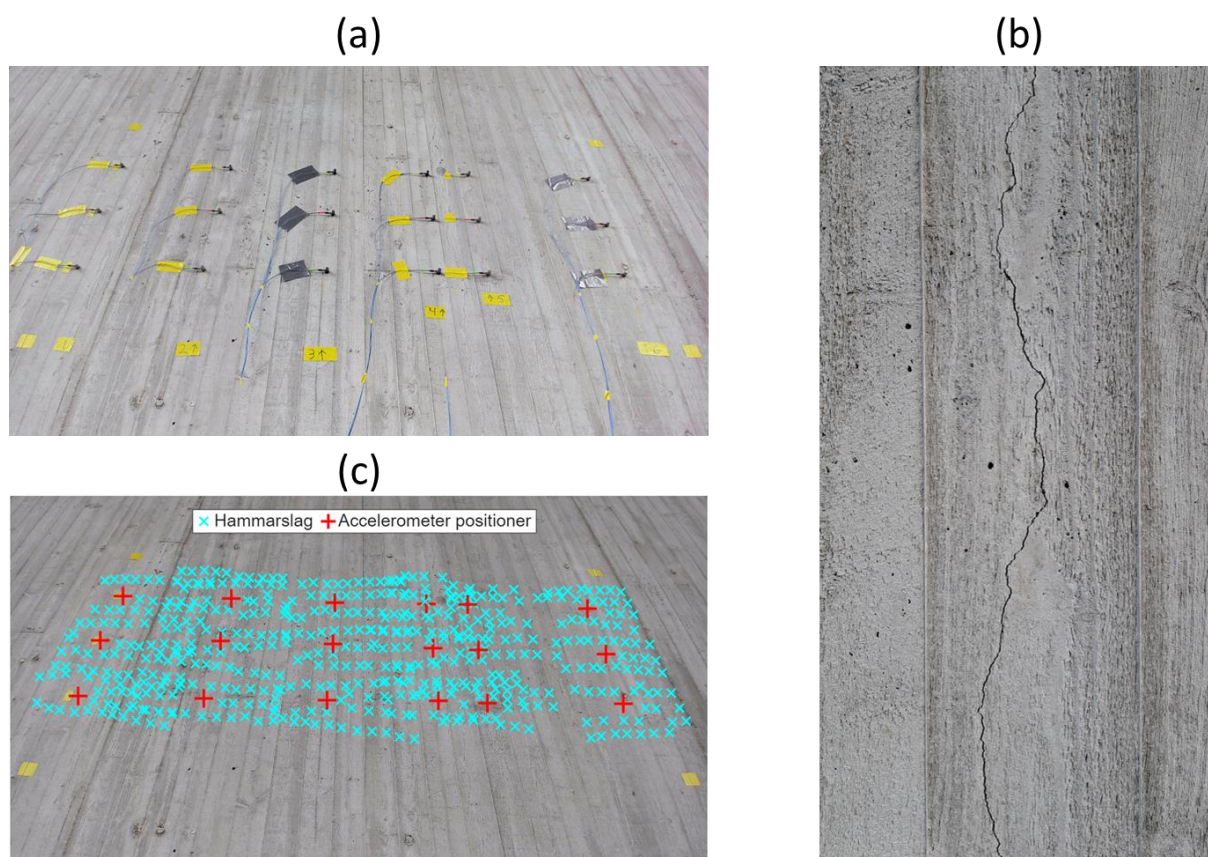
Figur 24. Plattrambro som utgör exempel för mätning med Impact-Echo tillsammans med systemet för datorseende.

Mätningen följde den procedur och flöde som tidigare beskrivits i avsnittet om integrering av systemet för datorseende tillsammans med systemet för Impact-Echo och ytvågsmätning, se avsnitt 5. Först markerades mätområdet, sedan utfördes kalibrering av systemet för datorseende och därefter startade mätningen med Impact-Echo. En översikt av mätområdet och utrustningen ses i Figur 25 (a). Vid mätningen användes tre accelerometrar av modell PCB 352C33, de monterades på broväggen i mätområdet vilket visas i en närbild av accelerometrarna i Figur 25 (b).



Figur 25. Bild på uppställning av utrustning och mätområde (a). Närbild på accelerometrar som används vid mätningen (b).

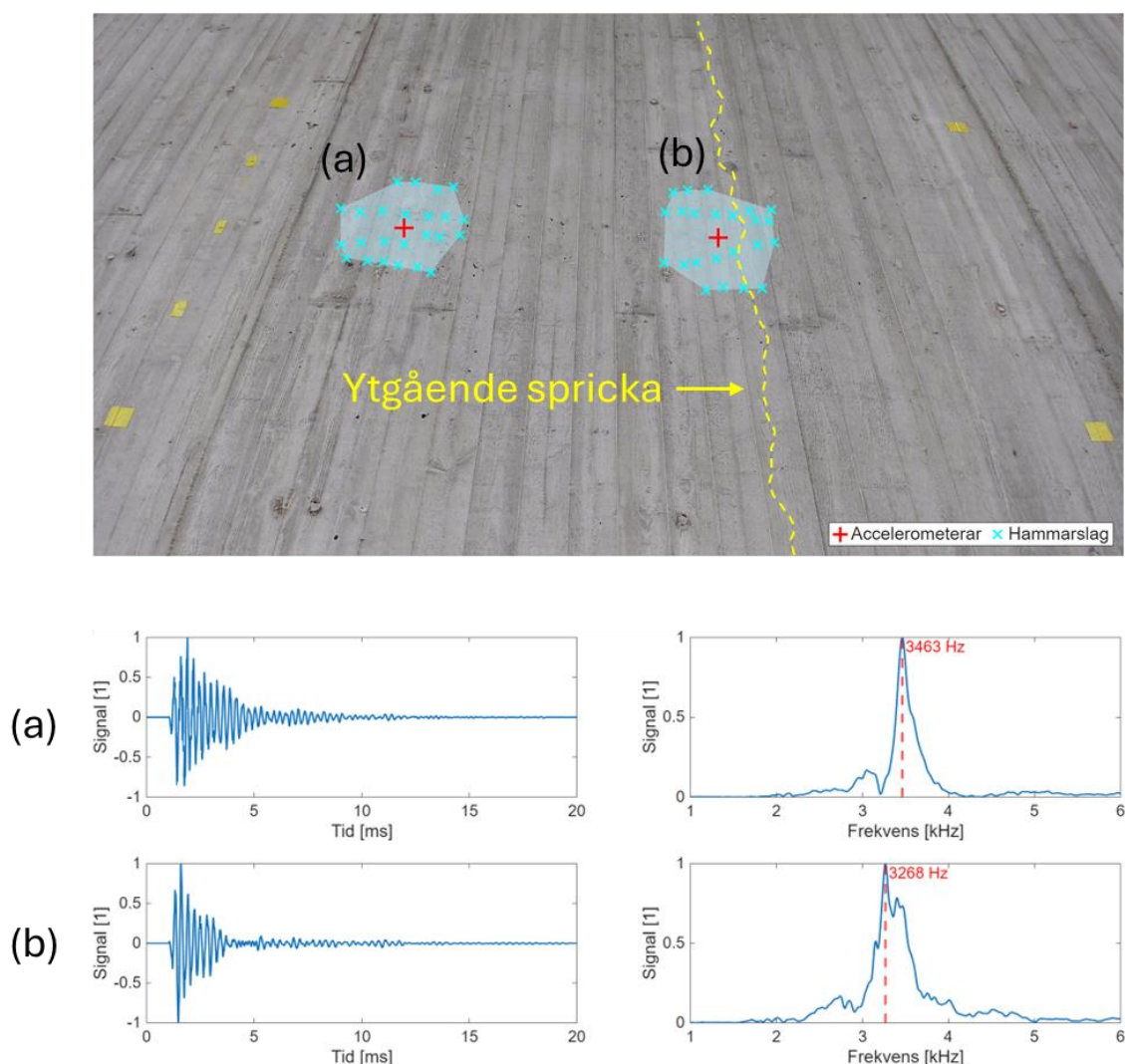
Hammarslag genomfördes runt accelerometrarna och vibrationerna spelades in, vilket motsvarar en traditionell Impact-Echo mätning. Därefter förflyttades de tre accelerometrarna till en ny position inom mätområdet varefter nya hammarslag genomfördes. På så vis stegades mätområdet igenom med nya positioner för de tre accelerometrarna och tillhörande hammarslag. En översikt av alla positioner för accelerometrarna visas i ett montage av foton i Figur 26 (a), en motsvarande översikt av positionerna för genomförda hammarslag visas i Figur 26 (b) där även accelerometrarna positioner framgår.



Figur 26. Fotomontage av alla positioner för accelerometrarna (a). Spricka i konstruktionen (b). Positioner för accelerometrarna och tillhörande utföra hammarslag.

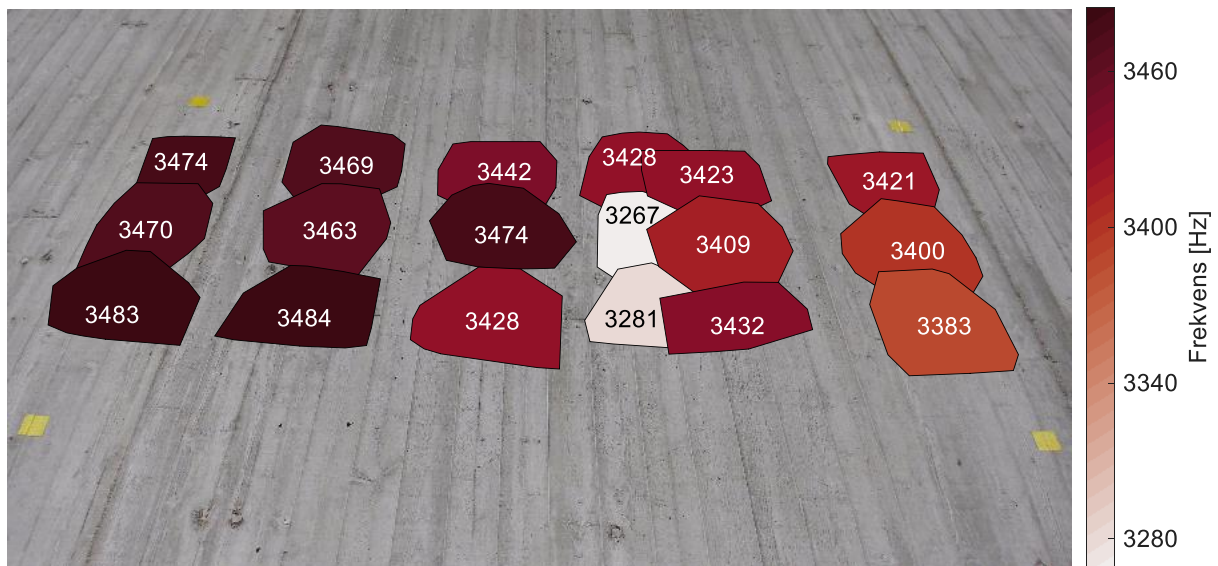
De horisontella avstånden mellan accelerometrarnas positioner är cirka 40 cm förutom i närheten av en vertikalt synlig spricka, se Figur 26 (b) och (c). Där är det horisontella avståndet istället strax under 20 cm eftersom det är intressant att en noggrannare studie av konstruktionens respons inom detta område. Enligt relationshandling för konstruktionen är den nominella väggjockleken 0,6 meter inom hela mätområdet. Figur 26 (b) visar hammarslagen som utfördes vid mätningen. Mätdata analyseras utifrån Impact-Echo metoden genom att de slag som är inom 20 cm radie från respektive accelerometer grupperas. Mätsignalerna från dessa slag inom gruppen summeras till en gemensam signal som sedan studeras i frekvensdomän för att bestämma aktuell Impact-Echo frekvens, alltså frekvensen för S1-ZGV Lamb moden. Principen med att summera slag i närheten av varandra från olika positioner är ett effektivt sätt att förstärka detekterbarheten av Impact-Echo frekvensen (S1-ZGV) (Ryden, 2016). Exempel på utvärderat mätdata med Impact-Echo visas i Figur 27 responsen i två accelerometrar jämförs. Accelerometer (a) befinner sig cirka 90 cm från den ytgående observerbara sprickan medan accelerometer (b) befinner sig i en strax närhet av sprickan med cirka 5 cm avstånd. För respektive accelerometer är tillhörande hammarslag för utvärderingen markerade med ljusblå kryss, se Figur 27. Mätdata i tidsdomän visas i nedre vänstra delfigurer och motsvarande data i frekvensdomän visas i nedre högra delfigurerna, här visas även med röd streckad linje Impact-Echo frekvens (S1-ZGV). Figur 27 visar att de två positionerna för accelerometrarna (a och b) är kopplade till olika värde för Impact-Echo frekvensen.

Den här variationen i frekvens bedöms vara kopplad till den ytgående observerbara sprickan i närheten av accelerometer (b). Resonansmoden som kopplas till Impact-Echo för platt-liknande konstruktioner motsvarar en S1-ZGV Lamb mod som kräver en sammanhängande platta utan geometriska eller materiella diskontinuiteter. Om en spricka finns i konstruktionen, så som är observerad i exempelvis Figur 27, förändras förutsättningarna för en S1-ZGV Lamb mod och därmed förändras den detekterbara Impact-Echo resonansfrekvensen. Frekvensinnehållet runt Impact-Echo frekvensen i högre nedre delfiguren i Figur 27 visar även upp tendens till att innehålla flera närliggande moder vid Impact-Echo frekvensen, vilket är en indikation på en diskontinuitet i konstruktionens homogenitet, i första hand troligen geometri i det här fallet.



Figur 27. Exempel på mätdata och utvärderat resultat för Impact-Echo för två positioner (accelerometrar).

En likadan utvärdering av mätdata som den som beskrivs för de två exemplen ovan genomfördes för samtliga positioner för accelerometrarna som visas i Figur 26. Därigenom skapas en översikt, se Figur 28, av konstruktionens respons i form av Impact-Echo resonansfrekvens (S1-ZGV). I översikten är respektive område för accelerometer markerat med en färgmarkering. Formen på markeringen utgörs av yttre begränsningslinjen som formas genom hammarslagen som befinner sig inom en radie på 20 cm från accelerometern. Eftersom hammarslagen inte är gjorda enligt ett perfekt cirkelmönster blir markeringarna oregelbundna till sin form, det har dock emellertid ingen negativ inverkan på möjligheten att utvärdera Impact-Echo resonansfrekvensen (S1-ZGV). I respektive område står uppmätt frekvens utskrivet för Impact-Echo resonansen samt illustreras med färgsättning enligt färgskala till höger i figuren. Översikten visar att en tydlig avvikelse på den uppmätta resonansfrekvensen fås i två delområden i anslutning till den observerade ytgående sprickan, vilket är förväntat då en spricka innebär en diskontinuitet i konstruktionens geometri.

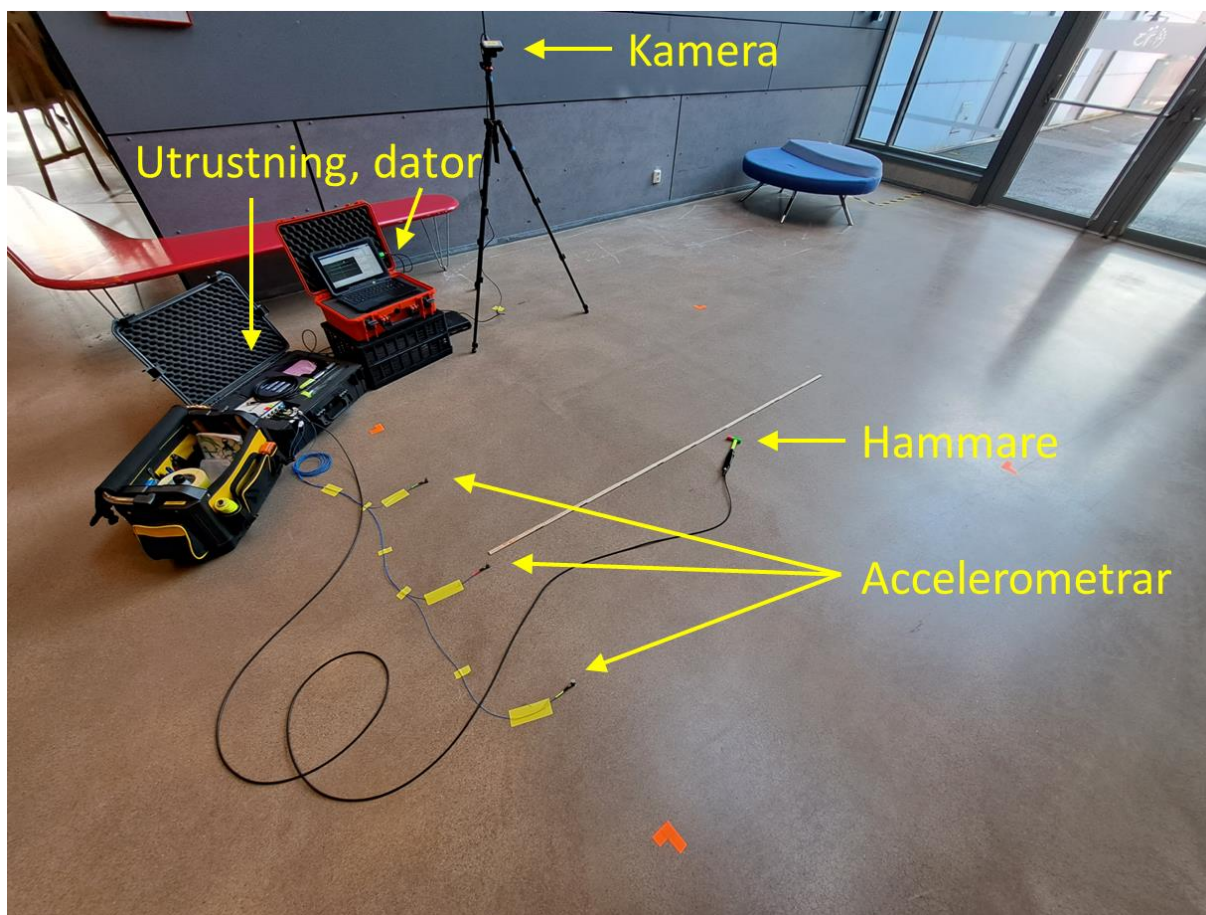


Figur 28. Översikt av Impact-Echo frekvens (S1-ZGV)

En viktig observation från det här exemplet på mätning är även de förbättrade och utökade möjligheterna till att presentera resultat som skapas genom systemet för datorseende. Eftersom systemet för datorseende samlar in bilddata över konstruktionen och att underlag för metrisk bildanalys (data för kalibrering av kamera) finns kan resultat återföras till ursprungsposition från mätområdet med korrekt måttsättning. Därigenom finns goda möjligheter för att på ett visuellt effektivt sätt redovisa och presentera resultat. Som exempel skulle översikten i Figur 28 kunna utgöra ett planeringsunderlag för fortsatt fördjupad undersökning av den observerade ytgående sprickan.

b) Exempel 2 – mätning med ytvågor

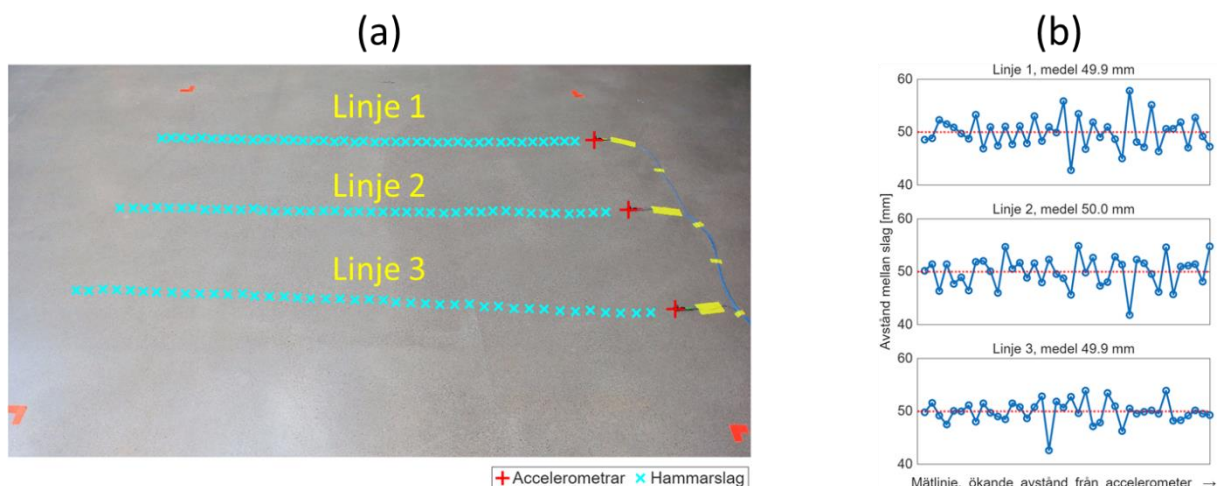
Med den nya integrationen av datorseende är det viktigt att det går att mäta ytvågor på ett lika tillförlitligt sätt som om det görs utan systemet för datorseende. Specifikt handlar det om att hammarslagen måste kunna lokaliseras och positioneras med minst likvärdig noggrannhet och precision som om mätningen hade utförts med en manuell inmätning av hammarslagens positioner. Med syfte att undersöka hur väl systemet för datorseende fungerar i tillämpning av ytvågsmätning utfördes därför en studie på ett betonggolv, se Figur 29. I undersökningen användes tre accelerometrar (PCB 352C33) vilka monterades med cirka 50 cm avstånd från varandra. Intill mätområdet markerat med orange tape, se Figur 29, placerades kameran till systemet för datorseende på ett stativ.



Figur 29. Översikt av mätupställning för undersökning med ytvågor.

Efter kalibrering av kamera och inställning av systemet för datorseende genomfördes mätning med ytvågor genom insamling av data längs med tre linjer, se Figur 30 (a) där de tre linjerna och accelerometrarna visas. För alla tre linjer användes ett konstant avstånd mellan hammarslagen på 5 cm genom en tumstock som guide och referens, det här motsvarar en traditionell mätning med ytvågor baserat på hammare och

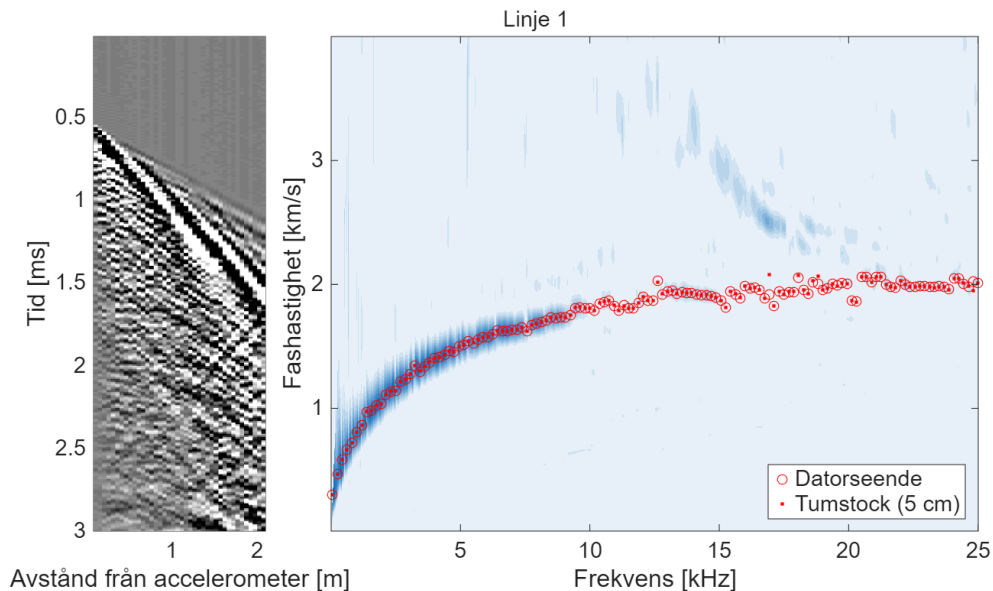
accelerometer (Ryden et al., 2004). I nästa steg utvärderades avstånden mellan hammarslagen utifrån positioner lokaliserade och uppmätta med systemet för datorseende, se Figur 30 (b) som visar avståndet mellan hammarslagen längs med respektive linje. Graferna visar att uppmätt avstånd mellan hammarslagen av systemet för datorseende inte är konstant 5 cm, typiskt sker en liten variation med ökande och minskande. Emellertid är medelvärdet för avstånden mellan hammarslagen för alla tre linjer lika med eller mycket nära 5 cm, vilket var måttet som eftersträvades med hjälp av tumstocken. En tolkning av graferna är att de visar den naturliga variation som kan fås då hammarslag utförs på i förväg givna positioner med inbördes avstånd på 5 cm. Både Figur 30 (a) och (b) visar att hammarslagens positioner kan lokaliseras och bestämmas på ett tillförlitligt sätt, vilket är en garant för att utvärderingen av ytvågsmätningen kan ske med minst samma tillförlitlighet som om positionerna enbart registrerats utifrån en manuell inmätning med tumstock. Oavsett vilken teknik som används för att mäta ut hammarslagens positioner är det viktigt att betona att det finns inget strikt krav på att avstånden mellan slagens positioner måste vara konstant. Huvudpoängen är att positionerna är kända och kan fastställas korrekt, utvärderingen av data tar sedan hänsyn till eventuell variation av avstånden mellan slagen (Tofeldt and Ryden, 2018).



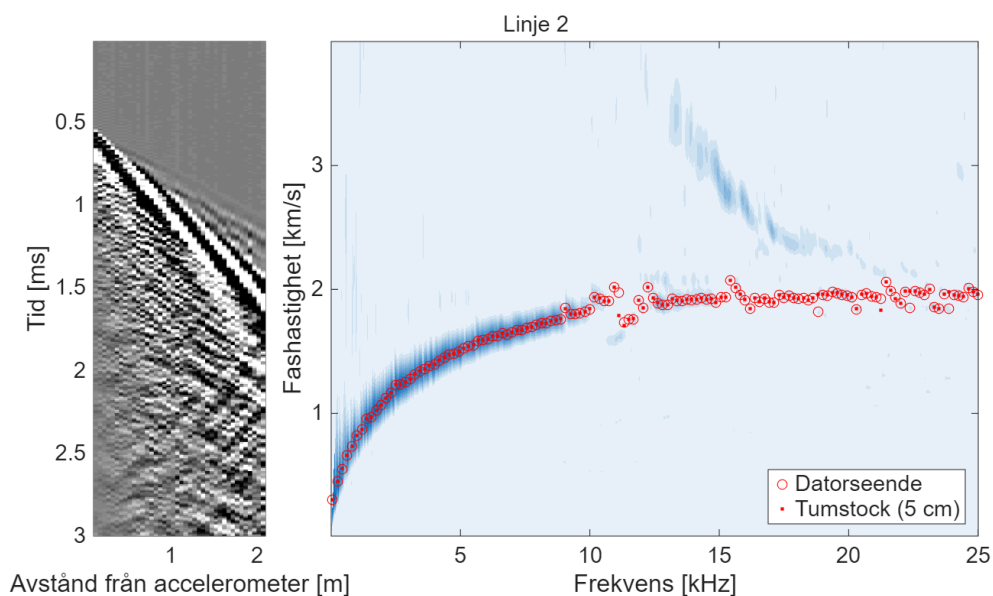
Figur 30. Vy från system för datorseende över mätområdet med tre linjer (a). Avstånd mellan närliggande hammarslag utvärderat från positioner lokaliserat med systemet för datorseende (b).

Mätdata och utvärderat resultat i form av fashastigheter som funktion av frekvens för de tre linjerna visas i Figur 31-Figur 33. I vänstra delfigurerna visas mätdata för läge längs med mätlinjen (avstånd från accelerometer) som funktion av tid (y-axel) för tiden 0 – 3 ms. Här syns den propagerande ytvågen såväl som den första P-vågen. Genom transformation till frekvens-fashastighetsdomän, de högra delfigurerna, kan våghastigheterna enklare utvärderas och bestämmas. För alla mätlinjer ses en tydlig ytvåg i form av Lamb-moden A0, som är markerat med röda ringar och prickar (jämför gärna med diagram i Figur 8). De röda ringarna bestäms utifrån en utvärdering där hammarslagen lokaliseras genom systemet för datorseende och de röda prickarna bestäms från en utvärdering där hammarslagen antas ett fixt avstånd på 5 cm mellan

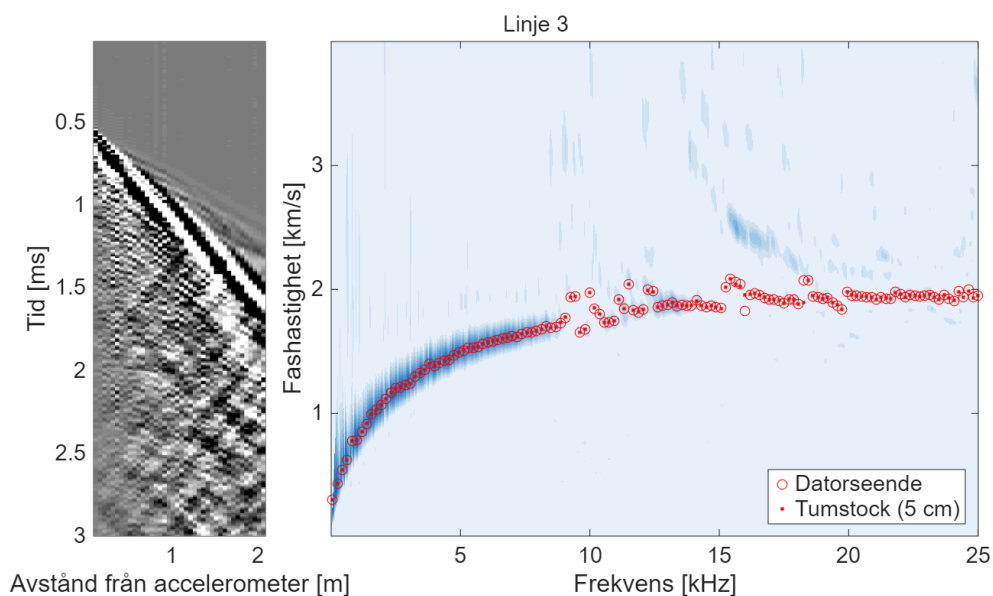
slagen utifrån tumstock. För alla mätlinjer 1–3, se Figur 31-Figur 33, framgår att systemet för datorseende ger ett likvärdigt resultat i form av utvärderad våghastighet som resultaten från utvärdering utifrån ett fixt antaget avstånd om 5 cm med tumstock. Resultatet från mätningen visar alltså att systemet för datorseende enkelt kan tillämpas för ytvågsmätning och får ett likvärdigt resultat som om hammarslagens positioner mäts in manuellt med hjälp av tumstock.



Figur 31. Data och resultat för linje 1.



Figur 32. Data och resultat för linje 2.



Figur 33. Data och resultat för linje 3.

c) Exempel 3 – kombinerad Impact-Echo och ytvågsmätning

En kombinerad Impact-Echo och ytvågsmätning genomfördes på Stenungsöbron som är en konsolbyggt lådbalkbro och del av vägförbindelsen mellan Stenungssund och ön Tjörn. Mätningen genomfördes inuti brobalken på golvet, se Figur 34 som visar bron och den ungefärliga platsen för mätningen inuti lådbalken. Syftet med mätningen var att studera hur systemet för datorseende fungerar vid en undersökning där både Impact-Echo och ytvågsmätning kombineras.



Figur 34. Foto på Stenungsöbron och plats för mätning.

Vid mätningen användes en triaxial-accelerometer (PCB 356A17) vilket innebär att rörelse i alla tre planen (x, y och z) samtidigt kan mätas i samma punkt. En översikt av mätområdet och en närbild av accelerometern som användes ses i Figur 35.

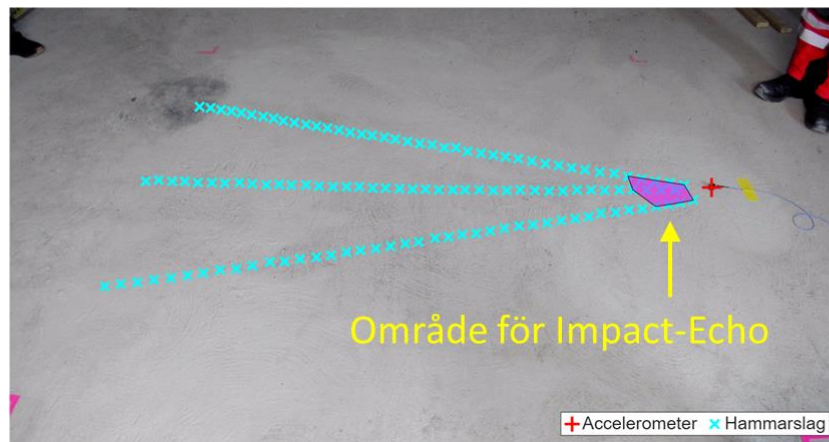


Figur 35. Översikt av mätområde (a) och närbild av triaxial-accelerometer (b) monterad på balklådans golv.

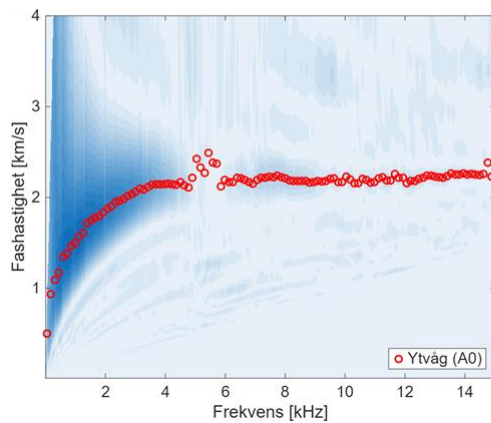
Efter kalibrering av systemet för datorseende fästes accelerometern i golvet av balklådan och därefter utfördes hammarslag längs med tre mätlinjer, se Figur 36 (a). För att minska påverkan av lokala strukturella resonansmoder på grund av mätning nära balklådans sidovägg utnyttjades alla tre mätlinjer samtidigt i utvärderingen av ytvågor. Utvärderingen av våghastigheterna visas i Figur 36 (b), där en tydlig ytvåg motsvarande Lambvågen A0 ses markerad med röda ringar. För utvärderingen med Impact-Echo användes hammarslag från alla tre mätlinjer inom ett avstånd på 30 cm från accelerometern, se området som är markerat med rosa färg i Figur 36 (a). I likhet med exemplet där mätningen skedde på en plattrambro (avsnitt 6.a)) är syftet med att använda flera signaler att förbättra förutsättningarna för att bestämma ett tydligt värde för Impact-Echo resonansfrekvensen, vilket motsvarar frekvensen för Lamb moden S1-ZGV. Resultat från utvärderingen ses i Figur 36 (b), där toppen motsvarar Impact-Echo resonansfrekvensen.

Vid kombinerad Impact-Echo och ytvågsmätning kan betongkonstruktionens tjocklek, dynamisk E-modul och tvärkontraktionstal bestämmas direkt ur mätdata. I det här fallet var dock mätdata inte av tillräckligt god kvalitet för att på ett robust sätt kunna bestämma dessa tre parametrar entydigt. Istället användes kännedom om den nominella tjockleken av betongkonstruktionen inom området för att utvärdera mätdata till ett kvantitativt resultat. Utifrån uppmätt våghastighet (Figur 36 (b)) och resonansfrekvens för Impact-Echo (Figur 36 (c)) samt med kunskap om tjockleken kunde E-modulen uppskattas till 35 GPa och tvärkontraktionstalet till 0.22. Dessa värden kan antas vara representativa medelvärden för konstruktionens elastiska egenskaper inom området som innesluter mätlinjerna (Figur 36 (a)).

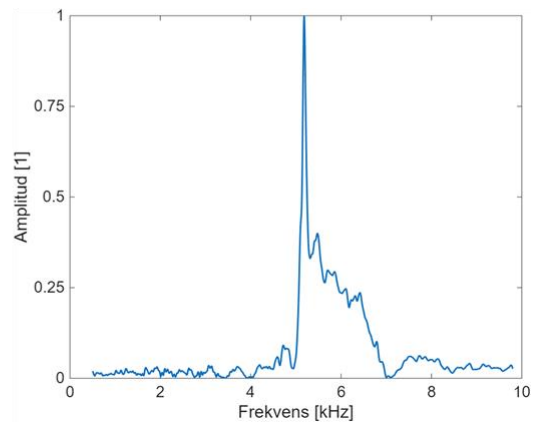
(a)



(b)



(c)



Figur 36. Bild från kamera från systemet för datorseende (a) med markeringar av hammarslag och området för Impact-Echo utvärdering. Utvärdering av fashastigheter (b) med identifierad ytvåg A0. Utvärdering av Impact-Echo (c) med identifierad resonansfrekvens för S1-ZGV mod (Impact-Echo resonans).

7. Slutsatser

I det här projektet har ett system för automatisk lokalisering av hammarslag vid provning med Impact-Echo och ytvågmätning utvecklats. Systemet bygger på datorseende där en kamera används för att samla bilddata över mätområdet. Genom metrisk bildanalys och segmentering av bilddata utifrån färger kan hammaren, som används för att skapa mekaniska vågor i betongkonstruktionen som undersöks, lokaliseras. Därigenom bestämmer systemet automatiskt hammarslagens positioner och fysiska koordinater inom mätområdet. Systemet har under projektets gång utvecklats från att initialt fungera i labbskala till att slutligen fungera robust och funktionellt i fältmässigt riktiga mätningar för ett flertal olika typer av verkliga testmiljöer och konstruktioner. Systemet för automatisk lokalisering av hammarslag har integrerats med ett befintligt system för Impact-Echo och ytvågmätning till ett nytt sammansatt system. Det nya integrerade systemet kan fortfarande betraktas som ett lättviktssystem med avseende på bärbarhet, utrustningens omfattning, krav på utrymme och yttre förutsättningar. Detta är inte minst viktigt utifrån perspektiv av att skapa förutsättningar för praktisk framtida användning i branschen.

Det nya integrerade systemet, där hammarslagens positioner bestäms genom automatisk lokalisering via datorseende, har demonstrerats för Impact-Echo, ytvågmätning och kombination av dessa. Utifrån projektets praktiska erfarenhet och arbete med systemet såväl som demonstrerade fältextempel visar resultat att den nya integrationen av datorseende ger minst likvärdig noggrannhet och precision som vid manuell inmätning av hammarslag. Det betyder att projektet har skapat ett nytt system som möjliggör en mer effektiv insamling av mätdata eftersom hammarslagen kan lokaliseras per automatik utan behov av manuell inmätning. För att möjliggöra metrisk bildanalys krävs dock att systemet för datorseende kalibreras, vilket innebär ett extra arbetsmoment jämfört med tidigare. Men tidsåtgången för kalibrering övervinns enkelt då ingen manuell inmätning av hammarslagen därefter behövs, vilket framförallt skapar betydande tidsvinster vid större och mer omfattande insamlingar av mätdata.

Med det integrerade systemet för datorseende vid Impact-Echo och ytvågmätning kan nu stora mängder mätdata samlas in på ett effektivt och systematiskt sätt. Därmed skapar systemet möjlighet till och banar väg för utveckling och implementering av nya rutiner för utvärdering av mätdata så som exempelvis seismik och SAFT ("Synthetic Aperture Focusing Technique"). Därmed förväntas kombinerad Impact-Echo och ytvågmätning kunna fortsätta att utvecklas till att även användas för utvärdering av en konstruktions tillstånd som funktion av djupet och avstånd från ytan, se exempelvis Figur 10. Projektet hade som mål att även studera och utveckla detta område, men har på grund av tidsbrist inte kunnat slutföra detta mål vilket därför lämnas som förslag till fortsatt arbete i efterföljande avsnitt.

För projektet har målet att automatiskt kunna lokalisera hammarslag varit essentiellt. Emellertid visade det sig under arbetets gång att systemet för datorseende i tillägg till att kunna användas för lokalisering även har stor användning för att kunna presentera och redovisa resultat. Genom systemet för datorseende skapas även nya och förbättrade möjligheter till tydlig och visuell kraftfull presentation av mätresultat i bilder över konstruktionen med korrekt måttsättning. Härigenom förenklas presentation och

utvärdering av mätresultat vilket i sin tur är en betydelsefull faktor för att tillgängliggöra OFP till fler användare inom bygg- och anläggningsbranschen, vilket är viktigt utifrån framtida perspektiv av krav på ökad kontroll och utvärdering.

8. Diskussion och förslag till fortsatt arbete

Det här projektet har som främsta resultat att det nu finns ett system som möjliggör och skapar en grund för nya framtida utvecklingar inom området av Impact-Echo och ytvågsmätning.

Ett prioriterat område för fortsatt arbete är forskning och utveckling kring nya förbättrade rutiner för utökad utvärdering av mätdata. Den typ av mätdata som nu enkelt kan samlas in med det integrerade systemet, som utvecklats i det här projektet, har stora likheter med dataset som återfinns både inom seismik såväl som ultraljudstillämpningar. Därmed bedöms att nytt arbete inom området kring utvärdering av mätdata från betongkonstruktioner kan ta fördel av och samverka med närbesläktade områden utifrån gemensamma problem- och frågeställningar inom signalbehandling och dataanalys. På så vis skapas överhörning och kunskapsutbyte mellan olika tillämpningsområden för oförstörande provning.

Projektet har även visat att det finns stora fördelar med att fortsätta använda tekniken med datorseende för tillämpning inom oförstörande provning av betongkonstruktioner. Det finns därmed motiv till fortsatt arbete kring ytterligare förbättring av systemet för datorseende. Ett exempel för implementering är att tillåta att kameran för systemet kan förflyttas och placeras åter i samma utgångspunkt utan att en ny kalibrering behöver genomföras, i dagsläget behöver kameran vara i en fix position under hela mätningen och kan inte flyttas. En närliggande problemställning är att skapa sammansättningar av närliggande mätområden. Med det menas att intilliggande mätområden kan länkas ihop med hjälp av bildanalys. Därigenom bedöms behovet av kalibrering kunna rationaliseras och effektiviseras. Här finns en stor fördel att området bildanalys är välstuderat och idag mycket etablerat, många av de problem- och frågeställningar som är relevanta för tillämpning av datorseende inom oförstörande provning av betongkonstruktioner återfinns med stor säkerhet inom andra tillämpningsområden. Det vill säga att problemen som behöver lösas för framtida förbättringar av systemet för datorseende är generella till sin natur.

Under arbetet med det här projektet har potentialen i att använda bildmaterial för presentation av resultat blivit tydligt. Det finns troligen mycket utveckling som kan göras inom detta område. Utöver möjligheten att arbeta med visuell information i presentation av resultat efter genomförd mätning är ett område att vidareutveckla hur återkoppling till operatören under pågående mätning kan ske, till exempel att under mätning genomföra initial utvärdering av mätdata med en förenklad dataanalys. Genom löpande återkoppling av mätresultat kan operatören potentiellt guidas till att styra mätningen mot områden som direkt ger indikation på avvikelse eller misstänks behöva ytterligare fördjupad undersökning.

I den rapporten presenteras tre exempel på fältmätningar, två broar och ett betonggolv. Metoder som utgår från Impact-Echo och ytvågsmätning är dock inte begränsat till dessa två typer av konstruktioner. I ett fortsatt arbete inom området bedöms det därför vara av värde att utföra och demonstrera mätningar på fler typer av konstruktioner, till exempel kraftverk, tunnlar och andra anläggningskonstruktioner. Mätningar på flera olika konstruktionstyper innebär även ett sätt att arbeta med

spridning av kunskap om oförstörande provning. En större kunskap om metoder för oförstörande provning inom bygg- och anläggningsbranschen bedöms vara värdefullt ur flera perspektiv. Ett perspektiv är att med ökad kännedom och kunskap blir det enklare för branschen att kommunicera och tydliggöra sina behov av tillståndsbedömning, inspektion och kontroll, vilket skapar en grund för mer riktad och effektiv utveckling av relevanta provningsmetoder. Ett annat viktigt perspektiv är att ökad kännedom och kunskap skapar bättre möjligheter för att identifiera och hitta nya tillämpningsområden för oförstörande provning. Det bedöms gynna en framtida bygg- och anläggningsbransch där ett ökande krav på kvalitetskontroll, tillståndsbedömning och effektiv material- och resursanvändning förväntas.

Referenser

- Almansouri, H., Johnson, C., Clayton, D., Polsky, Y., Bouman, C., Santos-Villalobos, H., 2017. Progress implementing a model-based iterative reconstruction algorithm for ultrasound imaging of thick concrete. AIP Conference Proceedings 1806. <https://doi.org/10.1063/1.4974557>
- Benesty, J., Chen, J., Huang, Y., 2008. Microphone Array Signal Processing, Springer Topics in Signal Processing. Springer, Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-78612-2>
- Flynn, E.B., Chong, S.Y., Jarmer, G.J., Lee, J.R., 2013. Structural imaging through local wavenumber estimation of guided waves. NDT and E International 59, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2013.04.003>
- Heikkilä, J., Silven, O., 1997. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction, in: Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Presented at the Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 1106–1112. <https://doi.org/10.1109/CVPR.1997.609468>
- Maierhofer, C., Reinhardt, H.-W., Dobmann, G. (Eds.), 2010. Non-Destructive Evaluation of Reinforced Concrete Structures, Volume 2: Non-Destructive Testing Methods. Woodhead Publishing.
- Malhotra, V.M., Carino, N.J., 2004. Handbook on Nondestructive Testing of Concrete. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- MATLAB, 2024.
- MATLAB, Computer Vision Toolbox, 2024.
- Park, C.B., Miller, R.D., Xia, J., 1999. Multichannel analysis of surface waves. Geophysics 64, 800–808. <https://doi.org/10.1190/1.1444590>
- Prada, C., Clorennec, D., Royer, D., 2008. Local vibration of an elastic plate and zero-group velocity Lamb modes. The Journal of the Acoustical Society of America 124, 203–212. <https://doi.org/10.1121/1.2918543>
- Ryden, N., 2016. Enhanced impact echo frequency peak by time domain summation of signals with different source receiver spacing. Smart Structures and Systems 17, 59–72. <https://doi.org/10.12989/sss.2016.17.1.059>
- Ryden, N., Park, C.B., 2006. A combined multichannel impact echo and surface wave analysis scheme for non-destructive thickness and stiffness evaluation of concrete slabs. AS NT, 2006 NDE Conference on Civil Engineering 247–253.
- Ryden, N., Park, C.B., Ulriksen, P., Miller, R.D., 2004. Multimodal Approach to Seismic Pavement Testing. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 130, 636–645. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:6\(636\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:6(636))
- Sansalone, M., Carino, N.J., 1986. Impact-Echo: A Method for Flaw Detection in Concrete Using Transient Stress Waves, NBSIR 86-3452.
- Sansalone, M.J., Streett, W.B., 1997. Impact-echo: Non-destructive Evaluation of Concrete and Masonry. Bullbrier Press.
- Schickert, M., Krause, M., 2010. Ultrasonic techniques for evaluation of reinforced concrete structures, in: Non-Destructive Evaluation of Reinforced Concrete Structures. Elsevier, pp. 490–530. <https://doi.org/10.1533/9781845699604.2.490>
- Schickert, M., Krause, M., Müller, W., 2003. Ultrasonic Imaging of Concrete Elements Using Reconstruction by Synthetic Aperture Focusing Technique. Journal of Materials in Civil Engineering 15, 235–246. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2003\)15:3\(235\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:3(235))

- Shull, P.J., 2002. *Nondestructive Evaluation - Theory, Techniques, and Applications*. M. Dekker, New York.
- Tofeldt, O., 2017. Lamb wave evaluation of concrete plates. Lund University.
- Tofeldt, O., Ryden, N., 2018. Lamb Wave Phase Velocity Imaging of Concrete Plates with 2D Arrays. *Journal of Nondestructive Evaluation* 37, 4.
<https://doi.org/10.1007/s10921-017-0457-x>
- Wiggenhauser, H., Samokrutov, A., Mayer, K., Krause, M., Alekhin, S., Elkin, V., 2016. Large Aperture Ultrasonic System for Testing Thick Concrete Structures. *Journal of Infrastructure Systems* 23, B4016004.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000314](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000314)
- Zhang, Z., 2000. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 22, 1330–1334.
<https://doi.org/10.1109/34.888718>