

PROJEKTNR. 13 887

# Oförstörande provning (OFP) av betongkonstruktioner – Med fokus på spännbetongkonstruktioner

## Slutrapport

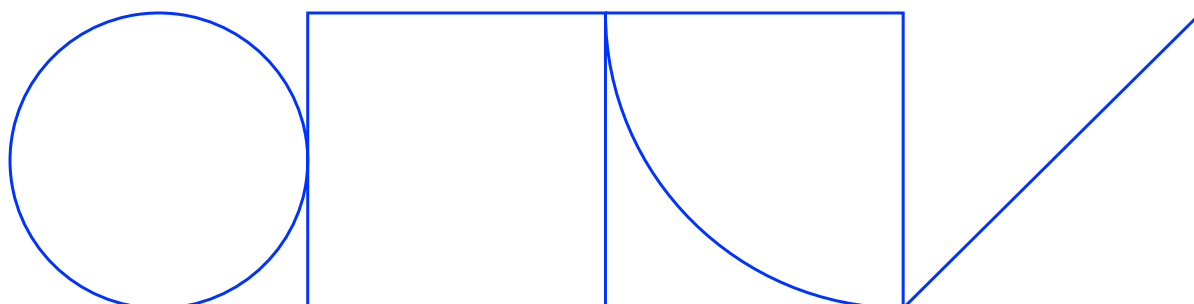
---

Björn Täljsten, Luleå tekniska universitet  
Hans Hedlund, Skanska Sverige AB  
Thomas Blanksvärd, Strängbetong AB

2023 -08-08

**SKANSKA**

LULEÅ  
TEKNISKA  
UNIVERSITET

**INVATOR**  
SAMHÄLLE. TEKNIK. INNOVATION.

## FÖRORD

Arbetet med denna rapport har genomförts under perioden 2020 och 2023. Syftet med rapporten har varit att undersöka möjligheten med oförstörande provningstekniker för att finna defekter hos betongkonstruktioner och framför allt hos spännarmerad betong. I samband med detta arbete har målet också varit att föreslå riktlinjer för tillståndsbedömning gällande betongkonstruktioner i allmänhet och spännarmerade betongkonstruktioner i synnerhet.

Projektet har varit underfinansierat, men under dess gång har projektledarna lyckats allokera extra stöd och resurser från Invator AB, och på så sätt kunnat sammanställa resultat från genomförda fältundersökningar. Gällande riktlinjer har utgångspunkt dels tagits i befintliga standarder för tillståndsbedömning samt rekommendationer funna i litteraturen, men också erfarenhetsmässigt från det arbete som utförts i fält. Arbetet har omfattat såväl litteraturgenomgång, som laboratorieförsök och tillämpningar i fält.

Huvudförfattare respektive medförfattare är Björn Täljsten, Hans Hedlund och Thomas Blanksvärd. Björn Täljsten är professor på deltid vid Luleå tekniska universitet, men arbetar också på Invator AB. Hans Hedlund är adjungerad professor vid Luleå tekniska universitet och arbetar för övrigt på Skanska Sverige AB inom enheten Skanska Teknik. Thomas Blanksvärd, tidigare Skanska Sverige AB inom enheten Skanska Teknik, numer Consolis/Stängbetong AB samt biträdande professor vid Luleå tekniska universitet. Samtliga författare har lång erfarenhet inom områdena betongrehabilitering och förstärkning samt tillståndsbedömning av byggnadskonstruktioner, men har också varit eller är aktiva inom oförstörande provning av betongkonstruktioner.

Författarna vill i första hand tacka SBUF och Skanska för ekonomiskt stöd utan vilket detta arbete inte varit möjlig att genomföra, även ett tack till Invator AB för att vi fått tagit del av genomförda fältprojekt.

Stockholm och Luleå augusti 2023

## SAMMANFATTNING

Genom internationella miljö- och klimatavtal ställs krav på hur vi ska nå utsläppsminskningsmålen globalt och nationellt. Cirka 40 procent av de globala klimatutsläppen kommer från bygg- och anläggningsindustrin. I de nationella målen ingår bland annat att vi ska bygga, använda och driva befintliga anläggningar och byggnader på ett sätt som ger en betydande minskning av utsläppen av växthusgaser. Underhåll och rehabilitering av betongkonstruktioner kommer i framtiden att bidra väsentligt till en hållbar byggindustri och samhällsutveckling. Återanvändning av betongkonstruktioner kommer därför att bli viktigare i framtiden, eftersom det finns en betydande klimatnytta att vinna på återanvändning.

Att genomföra en tillståndsanalys för befintliga betongkonstruktioner är därför mycket viktigt ur ett hållbarhetsperspektiv för att ta hand om betongkonstruktionerna och undvika rivning. Om en tillståndsanalys kan göras innan nedbrytningen kommit för långt blir underhålls-/rehabiliteringsarbetet mindre omfattande och ger därmed mindre utsläpp av växthusgaser.

I denna rapport har vi presenterat varför betong bryts ner över tiden, vad man kan göra åt det och framför allt hur man på ett effektivt och trovärdigt sätt kan bedöma en betongkonstruktions beständighet. Vi har presenterat ett flertal olika tekniker för oförstörande provning (OFP) och använt många av dessa i laboratorieundersökningar men framför allt har de tillämpats i ett flertal fältprojekt. Det övergripande fokus i projekt har varit spännarmerade betongkonstruktioner och möjligheten att undersöka defekter i foderrör. Eventuella defekter i form av hålrum och fukt/vatten kan leda till korrosion vilket i sin tur allvarligt kan försämra konstruktionens bärförmåga och livslängd. Vi har visat att om man kombinerar olika OFP tekniker så kan man detektera hålrum i foderrör. Det har visat sig att en kombination av georadar, ultraljud och Impact Echo är en framgångsrik metodik för just detta. Vi har dock inte kunnat med våra undersökningar kartlägga brott i spännlinor eller pågående korrosion med mer än att foderrören öppnas upp. Vi har också presenterat en tydlig metodik för tillståndsbedömning som vi tror förbättrar processen för tillståndsbedömning och gör den tydligare samt förenklar för beställare som kanske inte alltid besitter den kunskap som krävs när det gäller att förstå beteendet hos våra betongkonstruktioner, i alla fall inte de mindre beställarna.

När det gäller framtida forskning och utveckling behövs i än högre grad att begränsningar för oförstörande provningsmetoder kartläggas, men också vilka ytterligare synergieffekter som kan uppnås. Vi har sett tendenser i fält att falska utslag kan erhållas om densiteten på injekteringsbruket är lågt. Vi ser också begränsningar när det gäller skuggeffekter, dvs när foderrör är placerade bakom varandra. Vidare skulle det även behövas forskning gällande reparations- och förstärkningsmetoder för spännarmerade konstruktioner. En frågeställning är t ex om man finner ett hålrum, går då detta injektera? En annan är om spännkablar är av, kan man då förstärka utanpå konstruktionen och uppnå samma bärförmåga?

Därtill behövs mer erfarenhet gällande tillståndsbedömningar i fält för att skapa ökad erfarenhet samt också för att få in fler aktörer på marknaden. Det är vår övertygelse att användandet av oförstörande provningsmetoder kommer att öka att vi på det sätt får en ökad förståelse av våra betongkonstruktioners beständighet och kvarvarande livslängd.

# FÖRKORTNINGAR OCH NOTATIONER

## Förkortningar

ACI	American Concrete Institute
AE	Akustisk emission
ASR	Alkalisilika reaktioner
ASTM	American Society for Testing and Materials
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer
FRP	Fiber Reinforced Polymer
EKP	Elektrokemisk potentialmätning
GPR	Georadar
IE	Impact Echo
IR	Impulse Response
OFP	Oförstörande Provning
PCFRP	Prestressed CFRP
SLS	Serviceability Limit State
ULS	Ultimate Limit State
UPE	Ultrapulse Echo
UPV	Ultrapulse velocity

## Notationer

	<i>Beskrivning</i>	<i>Enhet</i>
$a$	Avstånd	$m$
$d$	sprickdjup	$m$
$f_R$	Uppmätt frekvens	$1/s$ (Hz)
$t_1$	transittid	$s$
$t_2$	transittid	$s$
$v_p$	P-vågens hastighet	$m/s$

# INNEHÅLL

<b>FÖRORD</b> .....	<b>I</b>
<b>SAMMANFATTNING</b> .....	<b>II</b>
<b>FÖRKORTNINGAR OCH NOTATIONER</b> .....	<b>III</b>
FÖRKORTNINGAR.....	III
NOTATIONER .....	III
<b>INNEHÅLL</b> .....	<b>IV</b>
<b>INTRODUKTION</b> .....	<b>1</b>
<b>BAKGRUND</b> .....	<b>3</b>
<b>SYFTE OCH MÅL</b> .....	<b>4</b>
<b>PROJEKTETS GENOMFÖRANDE</b> .....	<b>4</b>
<b>BEGRÄNSNINGAR</b> .....	<b>4</b>
<b>RAPPORTENS STRUKTUR</b> .....	<b>5</b>
<b>SKADOR HOS BETONGKONSTRUKTIONER</b> .....	<b>6</b>
ALLMÄNT .....	6
BETONG .....	6
<i>Mekaniska</i> .....	6
<i>Fysiska</i> .....	8
ARMERINGSKORROSION.....	9
<i>Karbonatisering</i> .....	10
<i>Klorider</i> .....	11
<b>TILLSTÅNDBEDÖMNING AV BETONGKONSTRUKTIONER</b> .....	<b>14</b>
ALLMÄNT .....	14
<i>Nivå 1 – Enkel tillståndsanalys</i> .....	15
<i>Nivå 2 – Utvidgad tillståndsanalys</i> .....	15
<i>Nivå 3 – Omfattande tillståndsanalys</i> .....	15
TILLSTÅNDBEDÖMNING AV SPÄNNARMERADE BETONGKONSTRUKTIONER .....	21
<b>REPARATION OCH FÖRSTÄRKNING AV BETONGKONSTRUKTIONER</b> .....	<b>23</b>
ALLMÄNT .....	23
PÅGJUTNINGAR.....	24
SAMVERKAN .....	24
SPÄNNKRAFT .....	24
AVLASTNING .....	24
INTERN INJEKTERING .....	24
EXTERN INJEKTERING .....	24
PASSIV OCH AKTIV FÖRSTÄRKNING.....	25
REPARATION OCH FÖRSTÄRKNING AV SPÄNNARMERADE BETONGBROAR .....	26
<i>Allmänt</i> .....	26
<i>Förstärkning</i> .....	26
Extern efterspänning.....	27
Skarvning av spännlinor .....	29
Extern förstärkning med ospänd kolfiberkomposit .....	30
Extern förstärkning med efterspänd kolfiberkomposit .....	30

Sammanfattning av olika förstärkningstekniker .....	31
<b>OFÖRSTÖRANDE PROVNING AV BETONGKONSTRUKTIONER .....</b>	<b>32</b>
ALLMÄNT .....	32
MEKANISKA OCH AKUSTISKA METODER .....	36
<i>Impact Echo (IE)</i> .....	36
<i>Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) och Ultrasonic Pulse Echo (UPE)</i> .....	37
<i>Ultraljud Tomografi</i> .....	39
<i>Akustisk emission (AE)</i> .....	41
<i>Impulse Response (IR)</i> .....	42
ELEKTROMAGNETISKA METODER .....	43
<i>Georadar (GPR)</i> .....	43
<i>Täckskiktsmätare</i> .....	44
<b>LABORATORIEFÖRSÖK .....</b>	<b>46</b>
INLEDNING .....	46
BEGRÄNSNINGAR.....	46
MOCK-UP .....	46
<i>Allmänt</i> .....	46
<i>Tillverkning av Mock-Up</i> .....	48
<i>Laboratorieförsök med GPR</i> .....	48
RESULTAT.....	51
<b>FÄLTTILLÄMPNINGAR.....</b>	<b>56</b>
INLEDNING .....	56
BRO ÖVER ABISKOJOKKA.....	56
<i>Bakgrund</i> .....	56
<i>Oförstörande provning</i> .....	58
Täckskiktsmätning.....	58
Mätning av sprickdjup.....	59
GPR och ultraljud .....	64
MÄTNING MED ULTRASONIC PULSE ECHO (MIRA).....	66
Sammanfattning bro över Abiskojojokka .....	68
HERÖYSUND BRU .....	69
<i>Bakgrund</i> .....	69
<i>Målsättning</i> .....	69
<i>Provningsproceduren</i> .....	71
<i>Provområden</i> .....	73
Översikt.....	73
Stöd 6, norra och södra balken.....	73
Stöd 3, norra och södra balken.....	74
Mittspann, norra och södra balken.....	74
Mittspann, norra och södra balken mot stöd 5.....	74
Mittspann, norra och södra balken mot stöd 4.....	75
Brodäck, stöd 4.....	75
Brodäck, stöd 5.....	75
<i>Resultat från oförstörande provning</i> .....	76
Sammanställning från samtliga undersökta foderrör .....	76
Stöd 6.....	77
Stöd 3.....	78
Bromitt.....	80
<i>Kommentarer och slutsatser till undersökningen av Heröysund Bro</i> .....	84

VALLBYBRON VÄSTERÅS.....	85
<i>Bakgrund</i> .....	85
<i>Inspektion av spännkablar</i> .....	88
Procedur för inspektion.....	88
Visuell inspektion.....	89
LIDAR.....	89
<i>Oförstörande provning</i> .....	91
Allmänt.....	91
Ground Penetrating Radar (GPR).....	91
Skanning av spännkablar med Ultraljud (tomografi).....	96
<i>Övriga provtagning</i> .....	105
Kärnborring.....	105
Kloridprover.....	106
<i>Sammanfattning och förslag till fortsatt arbete</i> .....	107
Allmänt.....	107
<b>FÖRSLAG SAMT RIKTLINJER GÄLLANDE OFÖRSTÖRANDE PROVNING AV BETONGKONSTRUKTIONER.....</b>	<b>108</b>
TILLSTÅNDSANALYS AV BETONGKONSTRUKTIONER I ALLMÄNHET.....	108
METODIK.....	110
<i>Programfas</i> .....	110
<i>Planläggningsfas</i> .....	111
<i>Undersökningsfas</i> .....	112
<i>Värderingsfas</i> .....	114
<i>Rapporteringsfas</i> .....	114
ANALYSNIVÅ.....	114
<i>Nivå 1 – Enkel tillståndsanalys</i> .....	115
<i>Nivå 2 – Utvidgad tillståndsanalys</i> .....	115
<i>Nivå 3 – Omfattande tillståndsanalys</i> .....	115
TILLSTÅNDSANALYS AV SPÄNNARMERADE BETONGKONSTRUKTIONER.....	116
<i>Steg 1: Täcksiktetsmätning</i> .....	117
<i>Steg 2: Georadar (GPR)</i> .....	118
<i>Steg 3: UPE – MIRA</i> .....	119
<i>Steg 4: Impact Echo (IE)</i> .....	120
<i>Steg 5: Friläggning och upplagning</i> .....	121
<i>Steg 6 Rapportering</i> .....	122
<b>BEHOV AV FORSKNING OCH UTVECKLING.....</b>	<b>124</b>
ALLMÄNT.....	124
KOMPETENSBEHOV.....	124
<i>Universitet och högskolor</i> .....	124
<i>Konsulter och entreprenörer</i> .....	124
<i>Beställare</i> .....	125
<b>DISKUSSION OCH SAMMANFATTNING.....</b>	<b>126</b>
<b>REFERENSER.....</b>	<b>127</b>
<b>WEBBASERADE REFERENSER.....</b>	<b>130</b>
<b>APPENDIX A.....</b>	<b>1</b>
MEKANISKA OCH AKUSTISKA METODER.....	1
ELEKTROMAGNETISKA METODER.....	6

ANDRA METODER.....	9
ENKLA METODER.....	10
KEMISKA OCH POTENTIALMETODER.....	13
<b>APPENDIX B – MÖJLIGA ORSAKER TILL SKADOR HOS BETONGKONSTRUKTIONER</b>	<b>14</b>
<b>APPENDIX C - ANVÄNDNING AV OFP FÖR SKADOR I BETONGKONSTRUKTIONER ....</b>	<b>15</b>
<b>APPENDIX D – OFÖRSTÖRANDE PROVNING MÖJLIGHETER OCH BEGRÄNSNINGAR</b> .....	<b>17</b>



## INTRODUKTION

Genom internationella miljö- och klimatavtal ställs krav på hur vi ska nå utsläppsminskningsmålen globalt och nationellt. Cirka 40 procent av de globala klimatutsläppen kommer från bygg- och anläggningsindustrin. I de nationella målen ingår bland annat att vi ska bygga, använda och driva befintliga anläggningar och byggnader på ett sätt som ger en betydande minskning av utsläppen av växthusgaser.

Underhåll och rehabilitering av befintliga betongkonstruktioner kan vara mer hållbart än att riva och bygga nytt, eftersom man återanvänder ett material som idag representerar stora klimatutsläpp. Sett ur ett livscykelperspektiv kommer befintliga betongkonstruktioner att ha en enorm hållbarhetsfördel gentemot nybyggnation, även om omfattande rehabiliteringsarbeten genomförs.

Detta förutsätter att även rehabiliteringsarbetena utförs med material som ger minsta möjliga utsläpp av växthusgaser. Miljödeklarationer (EPD) kan användas för att bedöma miljöprestandan hos de material som ska användas i samband med rehabiliteringen.

Att genomföra en tillståndsanalys för befintliga betongkonstruktioner är därför mycket viktigt ur ett hållbarhetsperspektiv för att ta hand om betongkonstruktionerna och undvika rivning. Om en tillståndsanalys kan göras innan nedbrytningen kommit för långt blir underhålls-/rehabiliteringsarbetet mindre omfattande och ger därmed mindre utsläpp av växthusgaser.

Livscykelanalyser (LCA) och miljödeklarationer (EPD) för material som ingår i rehabilitering av befintliga betongkonstruktioner kan vara hjälpmedel för att bedöma miljövänliga lösningar och dokumentera att rehabilitering är mer hållbart än att riva och bygga nytt. Livscykelbedömning omfattar alla utsläpp av växthusgaser under hela konstruktionens livscykel - från vagga till grav. För underhåll och rehabilitering beräknas endast utsläppen relaterade till nya material, transporter och byggaktiviteter, eftersom befintliga betongkonstruktioner redan har tagit klimatbördan. Sådana bedömningar som diskuteras här kommer inte att ingå i en tillståndsanalys, utan bör utföras som en del av planering och projektering av underhålls-/rehabiliteringsarbetena. Sådana bedömningar ska utföras av fackmän med särskild kompetens inom ämnesområdet.

Att vidmakthålla framkomliga och säkra infrastrukturkonstruktioner för daglig användning är väsentligt för ett fungerande samhälle. Bristfälliga kommunikationer skapar snabbt omfattande problem vilket i sin tur kan leda till negativ ekonomisk påverkan, minskat välbefinnande och i värsta fall fara för människoliv. Grunden för effektiv livscykel förvaltning är att veta status på befintliga anläggningar, dvs uppfyller anläggningen kraven på säkerhet, om inte, vad kostar det att åtgärda samt när ska det göras? Broar utgör en viktig och väsentlig del i vår infrastruktur, och ett flertal broar är byggda i armerad betong. Många av våra viktigaste betongbroar är av spännbetong eftersom denna teknik möjliggör längre spännvidder. Många av de befintliga spännarmerade betongbroarna har byggts efter andra världskriget och har nu uppnått en ålder där deras tillstånd och säkerhet måste säkerställas. De flesta av dessa är i god kondition och i de fall broar har provats i full skala uppvisar de hög bärförmåga. I Kiruna i Norra Sverige, provades t ex. en 55-år gammal spännarmerad betongbro till brott, (Nilima m.fl., 2015).

Brottet som uppkom var ett relativt segt kombinerat böj-skjuvbrott för en brottlast som var dubbelt så hög som den som erhöles med de modeller som finns i Eurocoderna, (Bagge, 2017. Bagge m.fl.m 2017, Bagge m.fl., 2018a, Bagge m.fl., 2018b, Elfgrén, 2015). Det går dock inte att förutsätta att detta alltid är fallet. Förutom betongens och den traditionella slakarmeringens nedbrytning finns det också risk för korrosion i spännkablar/linor samt risk för utmattning, (Elfgrén, 2015, Fischer

m.fl., 2014). Olyckor har uppstått där detta varit ett faktum, t ex broraset i Genua 2018 där bron över floden Polcervera rasade på grund av bl a bristande underhåll, (Calvi m.fl., 2018) och därtill bron över floden Magra som rasade i april 2020.

Samtidigt som vårt brobestånd blir äldre fortsätter trafikintensitet, hastigheter och belastningar att öka. Det finns också ett mål att marknadsandelen för kollektivtrafiken ska fördubblas till 2030 ([www.svenskkollektivtrafik.se](http://www.svenskkollektivtrafik.se)). För att tillse att våra konstruktioner är säkra och samtidigt uppfyller sin funktion finns det ett växande behov av tillståndsbedömning, infattande visuella inspektioner, övervakning med olika mätsystem samt oförstörande provning som kan tolkas på ett övergripligt sätt för våra anläggningsägare. Detta för att kunna underhållsplanera och i vissa fall reparera, förstärka och även för att byta ut konstruktioner som inte är säkra eller för kostsamma att underhålla. Detta är ett globalt problem och har belysts i ett flertal studier, (BRIME, 2013, COST-345, 2004, SAMARIS, 2006, SB, 2007b).

Inspektionen av befintliga konstruktioner baseras mestadels på data från visuella inspektioner. Till exempel måste kritiska konstruktioner som broar fortfarande inspekteras visuellt under bestämda inspektionsperioder. Dessa visuella inspektioner är tidskrävande, tekniskt och personalmässigt komplexa – dessutom kostsamma. Komplexiteten ökar ytterligare med tilltagande ålder på anläggningarna.

Orsakerna till behovet av inspektion är flera, men i huvudsak ska säkerhet och funktion tillgodoses, och detta till en överenskomlig kostnad. Därtill ska även konsekvenser av eventuella skador kunna bedömas, när de behöver åtgärdas och hur.

En armerad betongkonstruktion ska normalt användas över lång tid, med önskat minimalt underhåll. Konstruktioner utsätts förutom sin egen vikt för yttre laster i form av trafik, temperatur, fukt etc. Konstruktionen ska därtill kunna motstå olika nedbrytningsprocesser och det är heller inte ovanligt att, speciellt för broar, trafiklasterna ökar med tiden.

Historiskt sett har mycket arbete utförts gällande mätning, inspektion, reparation och även normer och rekommendationer gällande den befintliga infrastrukturen och kartläggningarna är relativt rigorösa. En fråga man dock bör säga sig är om detta har varit tillräckligt? I U.S.A t ex. inspekteras ca 600 000 broar vartannat år och beroende på deras kondition graderas de inom skalan 0-9 där 9 anger en nybyggd bro och 0 för en bro som inte uppfyller säkerhetskraven. Enligt denna rangordning är det ca 40% av broarna som anses bärighetsmässigt undermåliga och/eller inte uppfyller sin funktion (Herrman, 2013). Vidare anges att medellivslängden för en bro i U.S.A är 42 år (Pines & Aktan, 2002) emedan dom är dimensionerade för minst 50 år, (Herrman, 2013). Orsakerna till den förkortade livslängden är att hänvisa till bristande underhåll vilket i sin tur lett bl a till korrosion hos armering, förändrade randvillkor genom t ex fastrostade lager, inte tillfredsställande foglösningar etc.

Sveriges statliga brobestånd uppgår till ca 21 000 broar. Av dessa hör ca 16 000 till vägnätet och 4 000 till järnvägsnätet det finns även ca 100 statliga gång- och cykelbroar, (Trafikverket, 2016). Broar över 20 meter och i huvudsak byggda i betong uppgår till ca 12 500 stycken, av dessa är ca 1 700 spännarmerade. Kommunerna har också ansvar för ca 6 600 broar. De statliga broarna förvaltas av Trafikverket där förvaltningsarbetet huvudsakligen finansieras genom statskassan. Det är följaktligen av allmänintresse att denna förvaltningsprocess är kostnadseffektiv då landets befolkning är finansiärer. Intresset avspeglas i Trafikverkets uppdrag som är att leverera avsedd funktion till lägsta möjliga samhällskostnad genom ett effektivt underhållsarbete. Broförvaltning i Sverige organiseras idag med hjälp av det digitala bro- och tunnelförvaltningssystemet BaTMan. Motsvarande sammanställning som i U.S.A gällande broars kvalitet och funktion finns inte offentligt tillgängligt i Sverige.

Det är underförstått att mer effektiva metoder för att tillståndsbedöma våra anläggningskonstruktioner starkt skulle kunna bidra till ökad förståelse för konstruktionernas tillstånd, vilket i sin tur kan leda till mer optimerade och kostnadseffektiva åtgärder.

Här kan olika oförstörande provningsmetoder vara till stor hjälp. Det finns ett stort antal olika oförstörande tekniker som används för att undersöka olika fenomen hos befintliga betongkonstruktioner. De kan i sin enklaste form användas för att kartlägga placering av ytarmering och tjocklek på betongens täckskikt. Mer avancerade metoder kartlägger armeringskorrosion, sprickor och sprickdjup, delamineringar, betongens materialegenskaper och inre skador hos betongen. Även hålrum i foderrör kan kartläggas med oförstörande provningsmetoder, (Karlsson m. fl., 2021).

I denna rapport kartlägger vi oförstörande provningsmetoder för armerade betongkonstruktioner och redovisar olika möjliga tillämpningar för att detektera skador. Oförstörande metoder för armerade betongkonstruktioner presenteras i allmänhet med särskild fokus på spännarmerade betongkonstruktioner.

## BAKGRUND

En effektiv framtida tillståndsbedömning och uppföljning av armerade betongkonstruktioner i allmänhet och spännarmerade betongkonstruktioner i synnerhet kan inte bara bygga på visuella inspektioner och provtagning av betong för att kunna anses vara heltäckande. En bättre förståelse av metoder för oförstörande provning (OFP) krävs, inte minst när det gäller spännarmerade konstruktioner, där dess storlek, placering av kablar och typ av möjliga skador gör inspektionen komplicerad och tidskrävande utan delvis förstörande provning. I detta projekt vill vi föra utvecklingen inom området framåt genom att använda oss av avancerad mätteknik samt laboratorie- och fälttillämpningar. Till detta vill vi i framtiden koppla effektiva reparations och förstärkningsmetoder. Vår förhoppning är att detta ska leda fram till mer underbyggda metoder för oförstörande provning av betongkonstruktioner samt på sikt mer effektiva metoder för att åtgärda eventuella skador, speciellt för efterspända betongkonstruktioner.

## SYFTE OCH MÅL

Våra syften är att skapa

- Moderna och praktiska angreppssätt för kostnadseffektiv drift kopplade till tillståndsbedömning av betongkonstruktioner och speciellt spännarmerade konstruktioner
- Kombination av OFP tekniker för att förbättra tillståndsbedömning av spännarmerade betongbroar
- Möjligheten att skapa konkurrenskraftiga lösningar och affärsmöjligheter avseende tillståndsbedömning av spännarmerade betongbroar
- Bättre beslutsunderlag för planering av drift och underhållsarbete

Detta kommer förhoppningsvis att leda till effektivare angreppssätt för tillståndsbedömning. Ovanstående skapas genom tillämpning av tekniker inom OFP med fokus på spännarmerade betongkonstruktioner och då särskilt kombinationseffekter när flera olika typer av OFP-metoder används.

Målet är att projektet leder fram till riktlinjer för OFP på spännbetongbroar som kan ge mer tillförlitliga och effektiva tillståndsbedömningar samt lägre underhållskostnader

## PROJEKTETS GENOMFÖRANDE

Arbetet i projektet har delats in i huvudsak fyra delar; 1) Informationsinhämtning där befintlig litteratur granskats, 2) Undersökta lovande tekniker genom laboratorieexperiment samt 3) demonstrera tekniker i fält och 4) Föreslå metodik och riktlinjer gällande tillståndsbedömning av spännarmerade betongkonstruktioner. Utöver detta diskuteras möjliga reparations- och förstärkningsmetoder.

## BEGRÄNSNINGAR

Det har inte inom projektet varit möjligt att undersöka alla studerade OFP metoder, framförallt beroende på avsaknad av utrustning samt även begräsning i tid och finansiering. Vi har därför avgränsat oss till följande undersökningsmetoder:

- Studshammare (Rebound hammer)
- GPR (Ground Penetrating Radar)
- IR (Impulse Response)
- Täcksiktmetare
- Pulseeko (Impact Echo)
- Ultraljud (Sprickdjup, Elasticitetsmodul)
- Tomografi (Ultraljud)
- EKP (Elektrokemisk potentialmätning)
- Videoskop

I rapporten presenterar vi tre omfattande fältstudier, men det skulle ha krävts ytterligare tid och resurser för att kunna ha genomfört kompletta undersökningar där ett större antal parametrar undersökts.

Laboratorieförsöken har begränsats av att vi endast har haft en "Mock-Up" att undersöka, den i sin tur har begränsningar i storlek och utformning när det gäller tillämpningar av olika OFP utrustning.

Trots detta har projektet varit mycket värdefullt och resultaten visar på stora möjligheter om man tillämpar OFP tillsammans med traditionella sätt att tillståndsbedöma befintliga betongkonstruktioner.

Fälttillämpningar har skett genom verkliga projekt med hjälp av Invator AB.

När det gäller reparationsmetoder har inga metoder provats ut specifikt utan författarnas erfarenhet av olika metoder har här kommit till användning tillsammans med befintlig litteratur.

## RAPPORTENS STRUKTUR

Rapporten inleds en beskrivning gällande skador hos armerade betongkonstruktioner samt dess orsaker. Därefter presenteras hur tillståndsbedömning av betongkonstruktioner kan genomföras. Vidare diskuteras olika reparations- och förstärkningsmetoder och kapitlet därefter presenterar ingående olika metoder för oförstörande provning. Genomförda laboratorieförsök och fältförsök presenteras och därefter följer riktlinjer för oförstörande provning gällande spännarmerade betongkonstruktioner. Förslag till behov av forskning och utveckling presenteras därefter. Rapporten avslutas med ett kort diskussionsavsnitt samt en sammanfattning av innehållet.

Fyra appendix bifogas:

Appendix A: Detaljerad presentation av tekniker för oförstörande provning av betongkonstruktioner

Appendix B: Möjliga faktorer till skador hos betongkonstruktioner

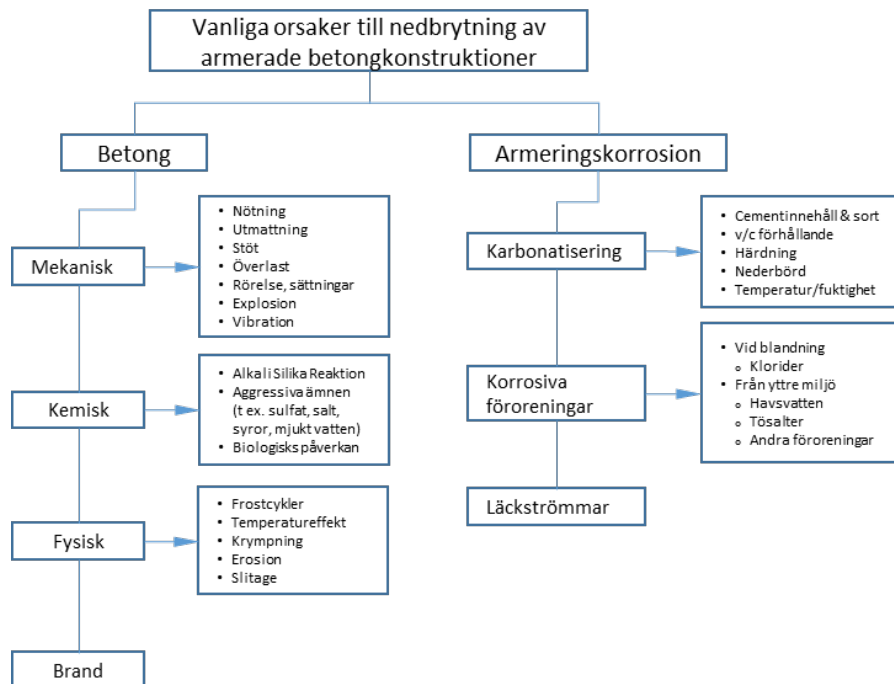
Appendix C: Användning av OFP för skador i betongkonstruktioner

Appendix D: Oförstörande provning – möjligheter och begränsningar

# SKADOR HOS BETONGKONSTRUKTIONER

## Allmänt

Betongkonstruktioner har normalt en lång livslängd och hög beständighet. Över tiden utsätts dock konstruktioner för olika påverkningar. Det kan t ex vara olika yttre laster som trafik, vind, temperatur osv. Det kan också vara påkänningar i form av nötning/slitage, klorider från tössalter och havsvatten samt karbonatisering av betongen på grund av reaktion med luftens CO<sub>2</sub>. Klorider och karbonatisering kan i sin tur leda till korrosion av armeringen. I Figur 1 sammanfattas typiska skador som kan uppstå hos en betongkonstruktion.



Figur 1 Skador hos armerade betongkonstruktioner, efter (EN-1504-9)

Skador klassificeras således efter orsak och orsaken kan vara många. Det är då underförstått att betongkonstruktioner kan behöva regelbundna inspektioner och detta kan då benämnas tillståndsbedömning. En förståelse av uppkomna skador hos betong är väsentligt för att kunna genomföra tillståndsbedömningar, såväl visuellt som med oförstörande provning. Därför beskrivs skador hos betong och armering kortfattat nedan.

## Betong

### Mekaniska

De är många olika typer av skador som kan definieras som mekaniska, t ex nötning, påkörning, skador orsakade av utmattnings, rörelser, överlast etc. Det kan vara ibland vara svårt att direkt veta vad en skada beror på och det kan också vara svårt att se skadan, t ex i utmattnings i betong karakteriseras av begynnande mikrosprickor som inte kan ses med blotta ögat utan måste kartläggas med hjälp av t ex tunnslipsanalys. Ofta är utmattnings i betong inte ett problem utan när man diskuterar utmattnings brukar det vara hos armering, i detta fall är det enklare att kartlägga problemet eftersom det oftast är lokaliserat till dragsprickor som öppnar och stänger sig i samband med belastning.

Nötning kan enkelt noteras visuellt och kan t ex beror på slitage av dubbdäck i parkeringsgarage eller av rinnande vatten och kavitation på skibord. Skador av överlast eller påkörningar visar sig ofta som sprickanvisningar eller avskalningar och sällan som den omfattade skadan i Figur 2. När det gäller analys med oförstörande provning kan dessa tekniker vara behjälpliga för att kartlägga eventuella inre skador och för att bestämma t ex armeringsmängd, betongkvalitet och geometrier för indata gällande beräkningar och analyser av konstruktionerna.



Figur 2 Skador på grund av överlast i en spännarmerad betongbalk (<https://myrenovationspecialist.com>)

Kemiska angrepp kopplas till skador orsakade av alkali-silika reaktioner (ASR), sulfater, mjukt vatten, biologisk påverkan och syror. Skadorna uppvisar något olika karaktär där ASR är kanske den mest kända. Dessa skador karaktäriseras av sk ”map-cracking”, se t ex Figur 3 med sprickor i ett rutnät, men kan också ge sig till känna i form av avflagningar och ”pop-outs” i betongytan. Orsaken till skador av ASR är kombinationen av reaktiv kisel/silika i ballast, alkalier från cement och vatten som fungerar både som reaktant och transportmedium. I Sverige är vi relativt förskonande från ASR skador på grund av vår användning av låg-alkaliskt cement. Allvarligast är i främst äldre konstruktioner från 60- och 70 talet. Även om man känner igen sprickmönstret kan det krävas en petrografisk analys för att kartlägga ASR för den enskilda konstruktionen.



Figur 3 Typiska ASR angrepp hos betongkonstruktioner, ([www.mekaglobal.com](http://www.mekaglobal.com))

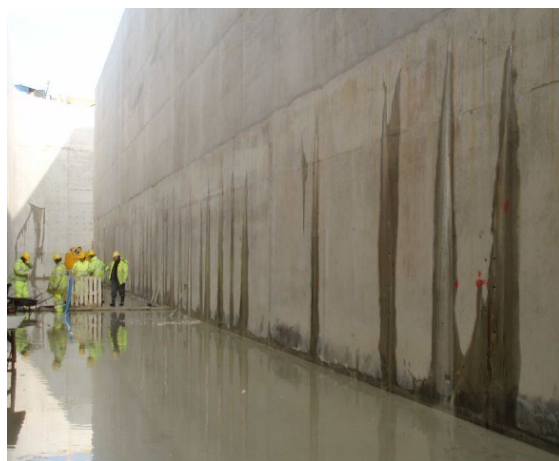
Kemiska angrepp från t ex syror visas sig oftast som avskalningar och är då i första hand lokaliserat till industrier med kemisk verksamhet, se Figur 4. Andra, mer ovanliga angrepp är skador av sulfater vilka är salter av svavelsyra, ofta lösta i vatten som sulfatjoner ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). Dessa skador kan i ett första påseende se ut som ASR skador, men orsakas av att aluminat ( $\text{C}_3\text{A}$ ) och kalciumhydroxid ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) reagerar med sulfat till expansiva produkter. I vissa delar av världen är det vanligt med sulfater i marken och grundvatten, men inte i Sverige. I Sverige kan man finna sulfater i samband med avloppsvatten och skador kopplade till sulfatangrepp är också vanligas här. Sulfatangrepp räknas till kategorin saltangrepp efter som sulfater är salter av svavelsyra.



Figur 4 Typiskt syraangrepp på ett betonggolv (Bögh & Nielsen, 2015)

### Fysiska

Till fysiska skador hänförs frostsador, skador orsakade av temperatur t ex skador från härdning och hydratationsvärme eller från externa värmekällor, typiska skador orsakade av hydratationsvärme visas i Figur 5. Fysiska skador kan också orsakas av erosion och olika typer av slitage inte olik mekaniska skador från nötning. Även krympning hos betongen hänvisas till denna kategori. Betongen krymper vid vattenavgång, därför är det viktigt med korrekt efterbehandling, t ex med bevattning eller membranskydd men också att man projekterar och dimensionerar för de krympkrafter som kan komma att uppstå. Industrigolv är en vanlig konstruktionstyp där krympsprickor är vanliga, se Figur 6.



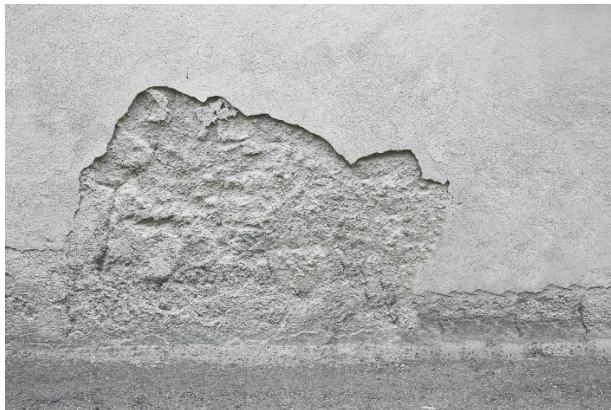
Figur 5 Sprickor hos grova betongkonstruktioner orsakade av hydratationsvärme, foto B. Täljsten





Figur 6 Krympsprickor i industrigolv, foto B. Täljsten

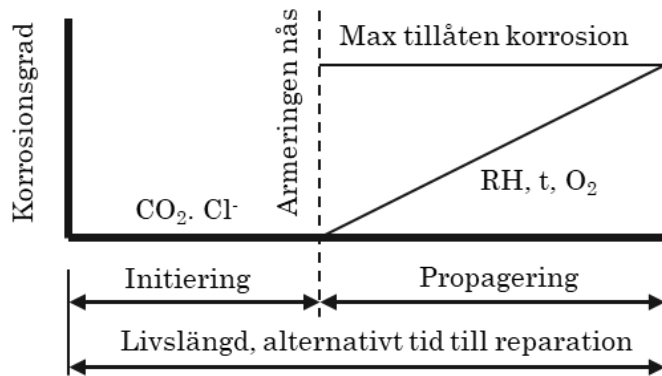
Frostskador visar sig oftast som avskalningar på betongens yta och kan på sikt bryta ner hela skelettet, i Figur 7 visas en typisk frostskada. Orsaken till frostskador brukar i första hand hänvisas till vattnets expansion när det fryser men också till osmotiska processer och skapandet av islinser. Har man en betong som inte är frostbeständig, vilket enkelt brukar definieras som en betong utan en viss mängd luft, < ca 4%, kan risk för frostskador föreligga och effekten är större i samband med klorider. För att skydda sig mot frostskador måste man då leda bort vatten.



Figur 7 Exempel på frostskada i betong som orsakat delaminering i ytan, ([www.fritzpak.com](http://www.fritzpak.com))

## Armeringskorrosion

Korrosion i armering är en av de vanligaste orsaker till bristande säkerhet och förkortad livslängd. Korrosion hos armering brukar delas in i korrosion orsakad av karbonatisering respektive korrosion orsakad av klorider. Många gånger är de skador som uppkommer och observeras en kombination av de båda, men inte alltid. I visas en förenklad principbild gällande kopplad till korrosionsprocessen, dess initiering och propagering av korrosionsprodukter samt estimerad tid till reparation. Korrosion är en elektrokemisk process där elektroner förflyttas mellan anod och katod. Positivt laddade järnjoner,  $Fe^{2+}$  går i lösning vid anoden samtidigt som elektroner via armeringen frigörs till katoden. Vid katoden sker en kemisk reaktion mellan elektroner, vatten och syre som bildar hydroxyljoner  $OH^-$ . Järnjoner  $Fe^{2+}$  och hydroxyljoner  $OH^-$  reagerar och bildar  $Fe(OH)_2$ , dvs rost.



Korrosionsprocessen (efter Betonghandboken Material, 1994).

### Karbonatisering

Armeringen är skyddad av betongens höga pH-värde. Karbonatisering är en diffusionsprocess och uppstår när koldioxiden i luften tränger in i betongens porer och neutraliserar det alkaliska, passiverande betongskikt som täcker armeringen. Koldioxiden reagerar med kalciumhydroxid,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  och ger upphov till en sänkning av betongens pH-värde från ca 13-14 ner till ca 7. Sänkningen av pH-värdet medför gör att armeringen kan börja korrodera om tillgång till fukt och syre är dom rätta. I mycket torr miljö går karbonatiseringsprocessen långsamt och i mycket våt miljö stannar den upp. Korrosion orsakad av karbonatisering karaktäriseras av en jämnt utbredd korrosion över det korroderade området, se Figur 8. För att kartlägga karbonatiseringsdjupet används ofta en fenoftalinlösning som appliceras på en nylig frilagd eller borrarad betongyta. Det område som inte färgas är karbonatiserat. På detta sätt kan man på relativt enkelt sätt kartlägga karbonatiseringsdjupet, se Figur 9

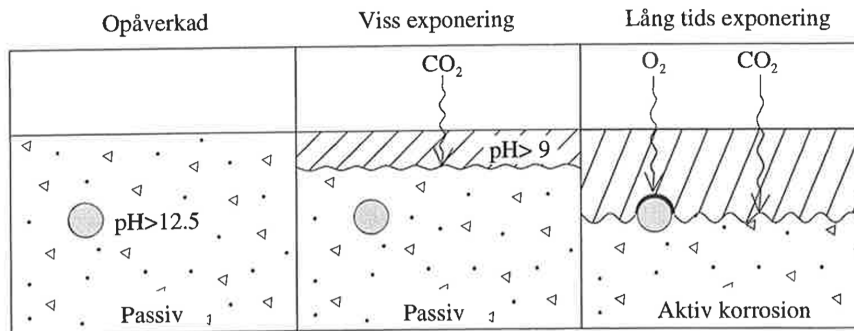


Figur 8 Korrosion orsakad av karbonatisering



Figur 9 Applicering av fenoftalin på en nylig frilagd betongyta, ofärgat område är karbonatiserat ([www.structuralguide.com](http://www.structuralguide.com))

Sammanfattningsvis, propageringshastigheten styrs av syrediffusion och tillgång på fukt, initiering och propagering av korrosion genom karbonatisering visas principiellt i Figur 10.



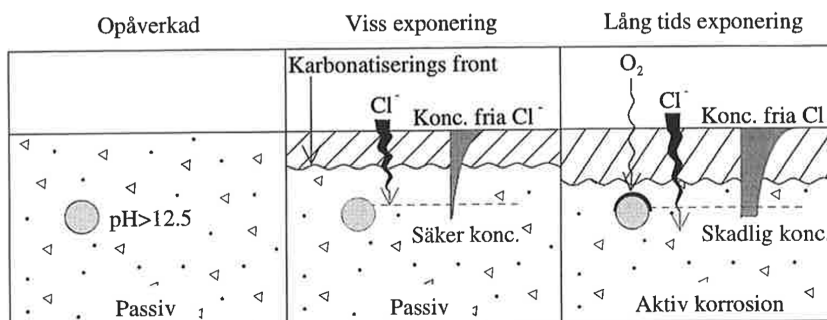
Figur 10 Schematisk skiss för karbonatiseringsinitierad korrosion (Fagerlund, 1992)

## Klorider

Klorider i betongen kan härröra från t ex tösaltning, havsvatten, grundvatten eller tillsatsmedel. Klorider vandrar normalt in från ytan av konstruktionen och ökar vanligen med tiden. När kloridkoncentrationen når en kritisk nivå, kallad tröskelvärde, så initieras korrosion. Kloridinträngningen och påverkan på propageringen beror av en mängd faktorer och några av de som (Fagerlund, 1992) anger presenteras nedan:

- Exponeringens kloridkoncentration
- Transporthastighet för klorider
- Kloridbindningskapacitet
- Kritisk kloridnivå/kloridtröskelvärde

Klorider kan således bindas kemiskt till cementpastan. Den faktor som huvudsakligen påverkar förmågan att binda klorider är cementets kemiska sammansättning (C3A-, C4AF-, alkaliinnehållet) och mängden katjoner ( $\text{OH}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ) som konkurrerar om de plaster där kloridjoner kan bindas. Ökad C3A-halt och sänkt alkalinnehåll ger båda ökad kloridbindning. Tillsats av mineraliska tillsatsmaterial som t ex silika och flygaska ökar kloridbindningen. De kloridjoner som inte binds till cementpastan är de fria kloriderna som alltså är de som påverkar korrosionsprocessen. En principskiss över kloridinitierad korrosion visas i Figur 11.



Figur 11 Schematisk skiss för kloridinitierad korrosion (Fagerlund, 1992)

Kloridinitierad korrosion sprider sig inte alltid jämnt över armeringsjärnet utan ses ofta koncentrerat till vissa områden, kan se ut som gropfrätning i armeringen eller så kan armeringen vara helt av i vissa sektioner men vara mer eller mindre opåverkad i andra, se Figur 12.



Figur 12 Gropfrätning i armering orsakad av klorider. Armering uttaget från en kaj i norra Norge, foto (B. Arntsen)

För att mäta kloridhalten i betong kan man antingen borra ut betongkärnor, kapa dessa i de sektioner man är intresserad och undersöka kloridinnehållet, alternativt borrar man ut betongkaks i det område/sektioner som ska undersökas, förslagsvis kring armeringen. Det finns ett flertal standarder för detta t ex SE-EN 14620:2007, ASTM C1218, ASTM C1152.

Gemensamt för alla dessa skador ovan är fukten ( $H_2O$ ) dvs vattnet. Kan konstruktionerna skyddas mot fukt eller avlastas kommer nedbrytningsprocessen att avstanna eller fördröjas.

Sammanfattningsvis kan följande slutsats dras

- Utan fukt inga frostsador
- Utan fukt inga saltfrostsador
- Utan fukt ingen armeringskorrosion
- Utan fukt ingen AKR
- Utan fukt ingen kalkurlakning
- Utan fukt ingen ökning av mikrosprickor
- Behandlad betong, inga syraangrepp.

I med detta kan man konstatera att det hjälper ej bara att laga ut befintliga skador utan en skyddande behandling är också nödvändig för att erhålla en funktionell och långvarig renovering.

I Tabell 1 listas orsaker till olika symptom. Det förstås då också att det krävs såväl en tydlig metodik som kunskap för att kunna kartlägga eventuella skador hos en betongkonstruktion.

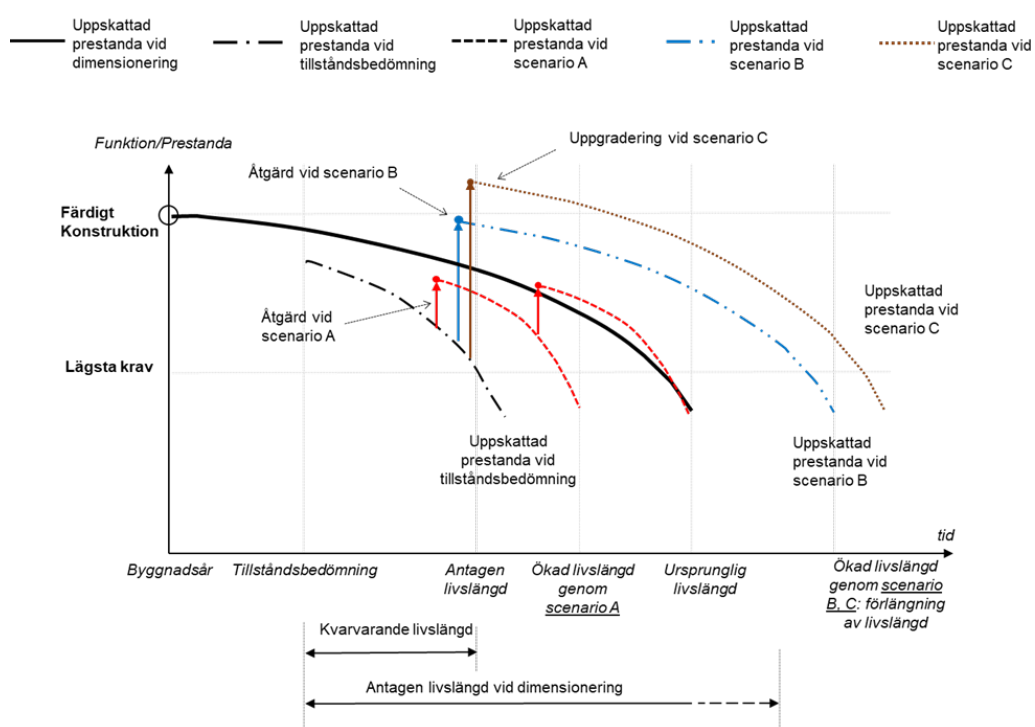
Tabell 1 Orsaker och symtom till skador hos betongkonstruktioner

Orsaker ⇒	Krympning (torkning)	Armeringskorrosion	Frostsprängning/sprickor	Alkalireaktioner	Upplösning av salter	Sulfatattacker	Syraattacker	Saltattacker	Temperaturbelastning	Plastisk krympning	Plastiska sättningar	Hög härdningstemperatur	Frysning i ung betong	Defekter vid gjutning	Överlast i tidigt skede	Överlast i bruksgränstillstånd
Spjälkning		•		•				•	•							
Spjälkning längs med armering		•														
Delaminering	•	•	•					•	•							
Vittring/sönderfall			•			•	•	•	•				•			
Sprickor längs med armering		•								•	•					
Diagonala/lutande sprickor												•				•
Godtyckligt förekommande sprickor	•		•						•	•		•	•		•	•
Tvärgående sprickor												•			•	•
Mörka och fuktiga sprickor				•	•											
Krackelering	•		•	•		•		•	•	•						
Sprickor med utfällning		•		•	•											
Kalk/Salt utfällning					•											
Rostutfällning		•														
Gelutfällning (CSH)				•												
Tomrum i bruk eller betong (Honeycomb)														•		
Nedböjning/deformation														•	•	•
Förskjutning/sättning														•	•	•
Kantresning/krökning	•															•
Krossning																•

# TILLSTÅNDSBEDÖMNING AV BETONGKONSTRUKTIONER

## Allmänt

Tillståndsbedömningen har som syfte att kartlägga status, reparationsbehov och tillse att tillräcklig säkerhet finns angående fortsatt drift och konstruktionens bärförmåga. I Figur 13 visas schematiskt en konstruktions förändring över tid – där man förutsätter att material bryts ner eller att t ex laster förändras över tid. I Figur 13 visas konstruktionens funktion/prestanda på y-axeln och tid på x-axeln. Vi antar att konstruktion har en enligt dimensionering godkänd funktion/prestanda när den byggts och att efter en viss tid uppnår den lägsta godtagbara krav. Dessa krav kan vara olika, men vanligtvis refererar man till säkerhet och en nivå man inte ska understiga. Den heldragna kurvan visar ett antaget scenario där vi har den uppskattade livslängden från början. En tillståndsbedömning genomförs och här visar den att den uppskattade livslängden var betydligt kortare, den svarta streck-prickade kurvan.



Figur 13 Antagen process för nedbrytning av betongkonstruktioner, (ISO 16311-1)

När det beslutas att en åtgärd ska genomföras, kan man välja mellan olika strategier, scenario A visar en mindre men fler åtgärder över tiden för att åstadkomma den uppsatta livslängden. Den blå streck-prickade kurvan, scenario B, visar då en större insats som förlänger livslängden över den från början antagna. Fortfarande med samma prestanda (t ex bärförmåga). I scenario C uppgraderar vi konstruktionen och erhåller såväl högre prestanda som längre livslängd. Tillståndsbedömningen är således viktig för att ta fram en så korrekt åtgärd som möjligt. Med fördel kan man dela in bedömningen in i tre nivåer enligt:

Nivå 1 – Enkel tillståndsbedömning

Nivå 2 – Utvidgad tillståndsbedömning, och

Nivå 3 – Omfattande tillståndsbedömning

Vad som rekommenderas att ingå i de olika nivåerna beskrivs nedan samt sammanfattas i Tabell 2. Denna indelning baserar sig på norsk standard och har visat sig vara lämplig för de allra flesta undersökningar.

### Nivå 1 – Enkel tillståndsanalys

Här utför man en värdering av tillståndet utifrån visuella observationer, eventuellt tillsammans med täckskiktetsmätning och registrering av karbonatiseringsdjup. Vanligen görs undersökningen utan ställning. De viktigaste verktygen för denna analys är fotografering/filmning och man genomför en generell registrering av sprickor, täckskiktets tillstånd, sättningar, förskjutningar, rostutfällningar etc. Man jämför med tidigare analyser och planerar även för analys på högre nivå. Kan också värdera behov gällande förebyggande insatser.

### Nivå 2 – Utvidgad tillståndsanalys

En utvidgad tillståndsanalys omfattar en visuell undersökning av hela konstruktionen. Vanligtvis med hjälp av ställning eller lift. Här är det viktigt att finna orsaken till skadorna, göra en kartläggning av skadeomfattning och undersöka om skadeomfånget förväntas öka. En nivå-2 undersökning omfattar normalt mätning av karbonatiseringsdjup, täckskiktetsmätning, kloridinhåll, mätning av sprickvidder, registrering av bom, vidhäftning mot betong, friläggning av delar av armeringen. I vissa fall även potentialmätning, mätning av armeringskontinuitet, eventuellt mätningar av deformationer och sättningar. Informationen används för att ställa samman underlag för projektering och även för underhållsplanläggning.

### Nivå 3 – Omfattande tillståndsanalys

Samtliga insatser under nivå 2. Dessutom en djupare undersökning av de nedbrytningsmekanismer som kartlagts under Nivå 2 samt hållfasthetsprovning. Vanligtvis genomför man även här en beräkningskontroll för delar av eller hela konstruktionen baserat på de genomförda tillståndsanalyserna. I vissa fall kan mätutrustning installeras på konstruktionen för att följa förändringar över tid vilka i sin tur ger ytterligare information åt tillståndsanalysen. Ofta använder man sig i tillägg av olika metoder för oförstörande provning för att kartlägga konstruktionens tillstånd.

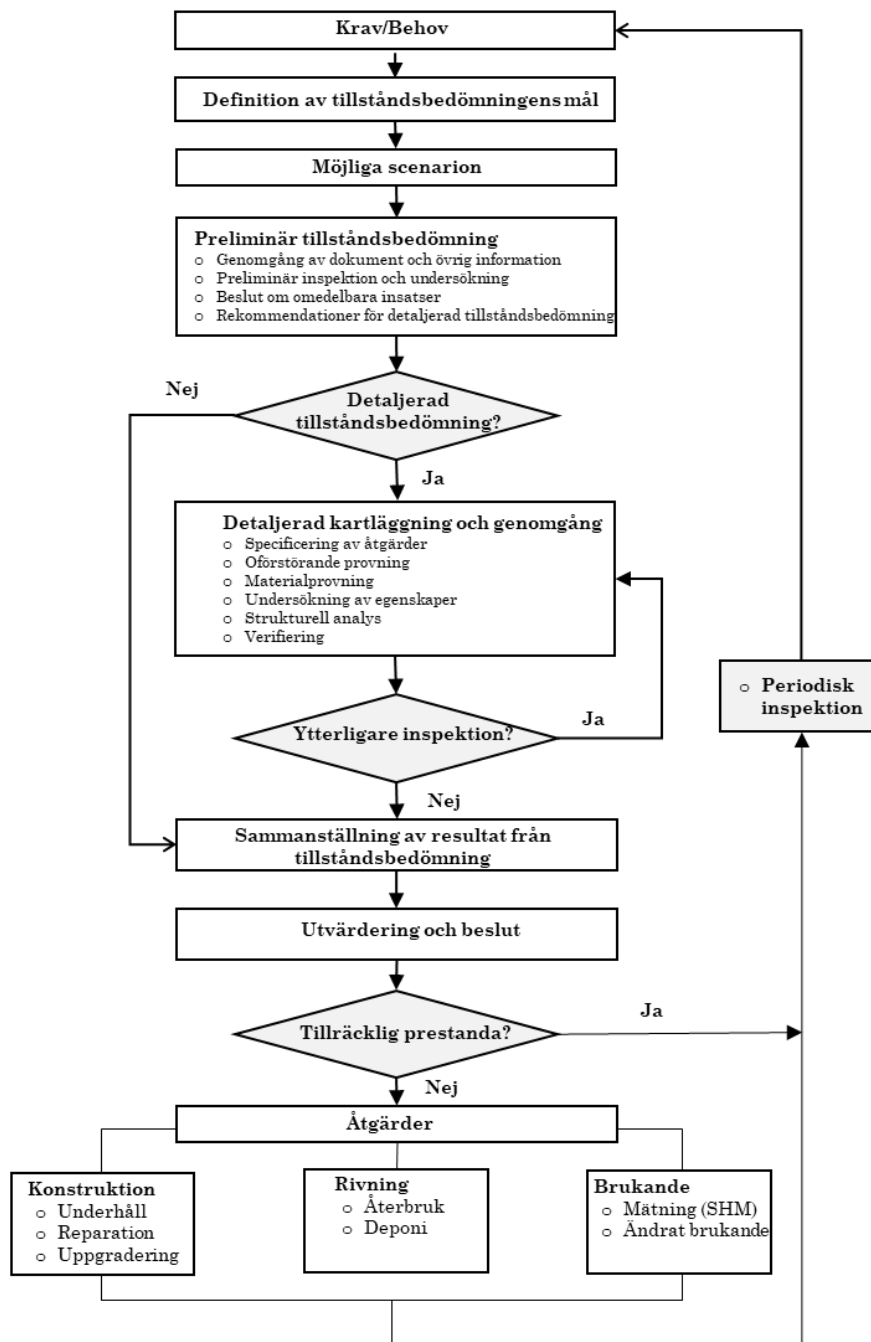
De olika nivåerna ska ses som riktlinjer, det är således inte vattentäta skott mellan de olika nivåerna utan man måste först och främst ta hänsyn till det objekt man ska undersöka. Vilket då innebär att allt som oftast kombineras undersökningen av olika parametrar och dess analysnivå. I Figur 14 visas schematiskt ett flödesschema med de generella stegen för en tillståndsbedömning av anläggningskonstruktioner baserat på internationell standard (ISO 16311-2, ISO 13822). Flödesschemat i Figur 14 gäller betongkonstruktioner i allmänhet, gällande spännarmerade konstruktioner kan man behöva vara mer specifik, vilket beskrivs nedan i kommande avsnitt. Här beskrivs då rekommendationer på vad som ska göras i planeringsskedet, vilken utrustning som rekommenderas samt hur rapporteringen bör genomföras. Därtill visas en option gällande verifiering av vad man sett i fält. Anledningen att det är en option är att man inte alltid vill frilägga spännarmeringen, bl a beroende på omgivande miljö. Undersökningen sammanfattas i en delrapport. Detta ska också alltid beslutas av ansvarig hos ägaren, t ex Trafikverket. Efter resultaten utvärderats, t ex kloridinhåll, kan fortsatta undersökningar behöva genomföras. Slutligen sammanfattas arbetet i en slutrapport, i vissa fall skrivs slutrapporten direkt utan mellanliggande delrapport. En viktig del i en tillståndsbedömning har visat sig vara undersökning genom oförstörande provning.

Tabell 2 Parameter att undersöka samt tillhörande analysnivå

Parameter att undersöka	Analysnivå		
	1	2	3
Visuell undersökning	X	X	X
Täckskikt	X	X	X
Karboniseringsdjup	X	X	X
Kloridinnehåll	(X)	X	X
Potentialmätning (EKP)		X	X
Friläggning av armering		X	X
Mätning av sprickor och sprickdjup		X	X
Bomkontroll	(X)	X	X
Vidhäftning		X	X
Elektrisk motstånd		((X))	((X))
Kontroll av spännarmering		((X))	((X))
Tryck- och draghållfasthet			((X))
Fiberinnehåll (Endast för fiberarmerade konstruktioner)			((X))
Ultraljud			((X))
Permeabilitetsmätning			((X))
Korrosionshastighet			((X))
Relativ fuktighet			X
Temperatur			((X))
Dimensionskontroll - geometri			X
Provb belastning, delar av eller hela konstruktionen			((X))
Armeringskontroll		X	X
Sättningar, deformationer		((X))	X

X: Alltid, (X): I vissa fall, ((X)): Kräver specialutrustning och är mer omfattande





Figur 14 Flödesschema gällande tillståndsbedömning, baserat på (ISO 16311-2, 13822)

För att säkerställa att de i BaTMan-handboken formulerade kraven beträffande broars säkerhet och funktion uppfylls genomförs regelbundna inspektioner, skadutredningar och vid behov bärighetsberäkningar. Inspektioner utförs av specialiserade broinspektörer och syftar till att klargöra broars tillstånd. Resultatet från inspektionerna ligger senare till grund för utredning och bedömning av hur broars tillstånd förändras över tid. Konstruktionsdelar bedöms efter fyra definierade tillståndsklasser (Trafikverket, 2015):

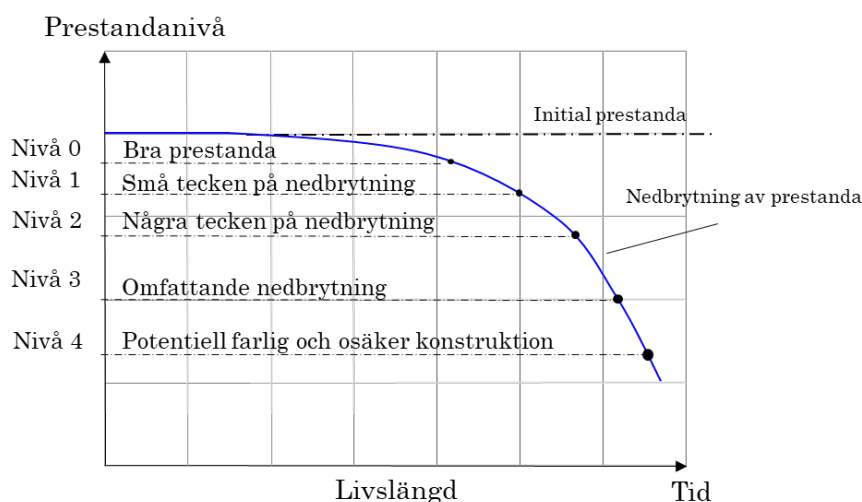
TK0 – Bristfällig funktion bortom 10 år, vilket innebär att skadan utreds bortom 10 år. Eftersom huvudinspektionsintervall är vart 6:e år tas ett nytt beslut om skadetillståndet vid nästa inspektionstillfälle. Därför betraktas denna tillståndsklass som en översyn och uppföljning.

TK1 – Bristfällig funktion inom 10 år, vilket innebär att skadan utreds inom 10 år. Eftersom huvudinspektionsintervall är vart 6:e år tas ett nytt beslut om skadetillståndet vid nästa inspektionstillfälle. Därför betraktas denna tillståndsklass som en översyn och uppföljning.

TK2 – Bristfällig funktion inom 3 år, vilket innebär att skadan utreds inom 3 år. Om tillståndsklassen fortsätter vara 2 innebär det att en åtgärd bör utföras senast inom 3 år.

TK3 – Bristfällig funktion vid inspektionstillfället, vilket innebär att skadan bör utredas inom 3 månader. Om tillståndsklassen fortsätter vara 3 bör en åtgärd utföras snarast.

För att bedöma tillstånden på brons samtliga konstruktionselement utför inspektören vid behov mätningar av brister med de mätmetoder som finns specificerade i BaTMan. Några exempel på vanligt förekommande brister är sprickor i betong och sprutbetong, förlorad vidhäftning för sprutbetong och sprickor i stålkonstruktion. Skicket på de konstruktionsdelar som är belägna under jord eller på annat sätt är oåtkomliga, anses kontrolleras indirekt då överliggande bank, slänter, fyllningar, anslutande konstruktionsdelar och kopplingar ses över. I samband med inspektion kan det också vara lämpligt med någon typ av klassificering av prestanda, ett sätt rekommenderas i (ISO 16311-2, 2014) och presenteras i Figur 15 och Tabell 3 nedan.



Figur 15 Principiell illustration av prestanda som funktion av tid, baserat på (ISO 16311-2, 2014)

Tabell 3 Prestandanivåer baserat på (ISO 16311-2, 2014)

Prestandanivå	Förklaring
Nivå 0 – Bra prestanda	Inga synliga tecken på nedbrytning, men initieringsfasen gällande karbonatisering och även inträngning av klorider har påbörjats.
Nivå 1: Små tecken på nedbrytning	Påbörjande tecken på nedbrytning. Man kan notera skador vid inspektionstillfället men hastigheten på nedbrytningen är okänd.
Nivå 2: Några tecken på nedbrytning	Måttliga visuella tecken på nedbrytning. Man kan notera skador vid inspektionstillfället, men hastigheten på nedbrytningen är okänd.
Nivå 3: Omfattande nedbrytning	Synliga tecken på omfattande nedbrytning. Nedfallande betongbitar och delaminering men konstruktionen är brukbar och det är ingen fara för säkerhet.
Nivå 4: Potentiell farlig eller osäker konstruktion	Tydliga tecken på nedbrytning, risk finns för reducerad säkerhet och omedelbara åtgärder måste tas.

Såväl klassificeringen från Trafikverket och den enligt ISO-standard, kräver mycket erfarenhet och kunskap av den personal som genomför inspektionen. Det räcker inte enbart med att kunna bedöma skador och deras ursprung, man behöver också vara relativt kunnig gällande konstruktion och effekten av en skada beroende på var den uppstått.

Tillbaka till de svenska broarna. Huvudinspektionen är den mest omfattande inspektion som görs och kräver relativt de andra mer planering för att genomförandet ska ske utan komplikationer. Inspektionen genomförs minst en gång vart sjätte år på samtliga av Trafikverkets broar. Den första huvudinspektionen genomförs innan byggnadsverket tas i drift (Trafikverket, 2015). Syftet med huvudinspektionen är att undersöka om det förekommer några brister som inom en tioårsperiod kan ha negativ inverkan på brons funktion eller säkerhet. Inspektionen syftar även till att bedöma huruvida en eventuellt ej åtgärdad skada kan medföra förhöjda förvaltningskostnader över tid. Samtliga åtkomliga konstruktionselement och angränsande/anslutande delar inspekteras okulärt på handnära avstånd. Några exempel på angränsande delar är slänter, fyllningar och vägbankar.

Den inspektör som genomför huvudinspektionen ska ta ställning till huruvida en särskild inspektion bör genomföras för att säkerställa brons säkerhet och bärighet samt undvika förhöjda förvaltningskostnader inom en tioårsperiod. En sådan inspektion avser kontrollera förloppet av aktuella nedbrytningsprocesser och slitage på miljö, berg, armering, betong, svetsförband, nitar/skruvar, tätskikt samt bottenprofiler. Inspektören gör även en bedömning om kompletterande särskild undervattensinspektion bör genomföras av samma skäl. De grundläggande kunskaps- och erfarenhetskrav som ställs på inspektören avser:

- Akademisk utbildning, personen ska vara utbildad ingenjör.
- Trafikverkets inspektionsmetodik, inspektören ska antingen ha tillämpat denna praktisk under flera år eller ha utbildats teoretiskt.
- Användandet av aktuella mätmetoder.
- Erfarenhet kring mätning och bedömning av broars fysiska och funktionella tillstånd.
- Prognostisering av broars beständighet genom analys av skadeutvecklingar och nedbrytningsprocesser.
- Skadeåtgärder.

Utöver dessa grundläggande krav ställs särskilda kunskaps- och erfarenhetskrav beroende på vilken typ av konstruktion som ska inspekteras. För betong- och stålkonstruktioner är kravet att ha kännedom om Trafikverkets regelverk samt aktuella betong- och stålbestämmelser. En ofullständig huvudinspektion som inte kan genomföras vid samma tillfälle godkänns så länge den slutförs under det kalenderår de inleddes.

Allmän inspektion utförs primärt som uppföljning till de bedömningar som gjordes i samband med den senast genomförda huvudinspektionen av ännu ej åtgärdade skador. Under inspektionen genomförs även en övergripande koll för att upptäcka och bedöma eventuella nyuppkomna skador. De skador som skulle kunna orsaka förhöjda förvaltningskostnader, reducerad bärighet eller bristande trafiksäkerhet om de ej uppdagas innan nästkommande huvudinspektion dokumenteras. För mindre skador som ej anses få sådana följder görs bedömning vid nästkommande huvudinspektion. Allmän inspektion ska genomföras av personal som uppfyller grundkraven för huvudinspektion (Trafikverket, 2015).

Särskild inspektion görs när det bedöms föreligga ett behov av mer underlag för bedömning av ett konstruktionselements tillstånd. Särskilda mätningar som kräver utrustning och kunskap som inte förväntas vara på plats vid huvudinspektionen krävs vid dessa inspektioner. Två exempel på dessa mätningar är ultraljudsprovning för inspektion av svetsar på stålkonstruktioner och detaljerade utredningar av berg. Särskild inspektion utförs av personal som uppfyller grundkraven för huvudinspektion samt besitter den specialkompetens och erfarenhet som är nödvändig för att genomföra undersökningen (Trafikverket, 2015).

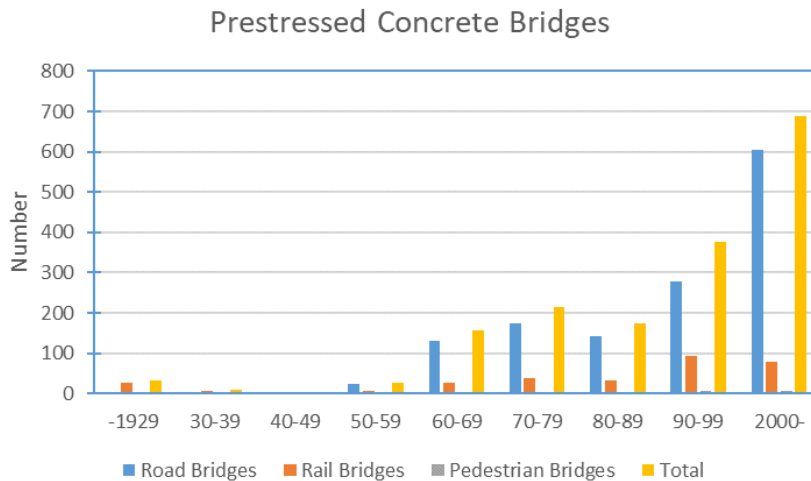
En utmaning med spännarmerade betongbroar är möjligheten att inspektera kvalitén och funktionen hos befintliga spännsystem utan att göra fysisk åverkan. Det behövs således metoder för oförstörande provning som inte enbart kartlägger spänn- och slakarmeringens placering, utan också hålrum samt brott och möjlig korrosion i kablar. I Figur 16 och Tabell 4 visas samtliga förspända broar i Trafikverkets regi samt i Tabell 5 dess åldersfördelning. Åldersfördelningen är viktig eftersom normer och utrustning uppvisade barnsjukdomar, t ex var klorider tillåtna i injekteringsbruket före 1968 och de tidigare tunna foderrören ersattes med tjockare ca 1978. Det betyder att man borde ha väl genomförda tillståndsbedömningar för spännarmerade broar byggda före 1980. Hur detta ska genomföras täcks dock inte upp av gällande regelverk<sup>[14]</sup>. Huvuddelen av dem, ca 400 stycken, förvaltas av Trafikverkets och flera av dessa utgör viktiga kommunikationslänkar, t ex Essingeleden i Stockholm. Det finns dock även spännarmerade betongbroar med andra förvaltare, t ex Stockholms stad, så total antalet spännarmerade broar torde uppgå till mer än 2000 st.

Tabell 4 Spännarmerade broar förvaltade av Trafikverket (BaTMan)

	Antal	Medellängd, [m]	Totallängd, [km]
<b>Vägbroar</b>	1364	96	131
<b>Järnvägsbroar</b>	308	111	34
<b>Gångbroar</b>	14	50	0.7

Tabell 5 Åldersfördelning för spännarmerade broar förvaltade av Trafikverket (BaTMan)

Öppningsår	-1929	30-39	40-49	50-59	60-69	70-79	80-89	90-99	2000-
<b>Vägbroar</b>	4	3	3	23	131	173	143	279	605
<b>Järnvägsbroar</b>	28	7	1	5	26	39	31	93	78
<b>Gångbroar</b>					1	2		5	6
<b>Totalt</b>	32	10	4	28	158	214	174	377	689



Figur 16 Åldersfördelning och antal spännarmerade broar i förvaltning av Trafikverket (BaTMan)

Trafikverkets inspektionsrutiner täcker indirekt undersökning med oförstörande provning, detta i samband med särskild inspektion. Utmaningen här är att en inspektion av spännarmerad betongbros utsida inte kartlägger pågående nedbrytningsprocesser inne i t ex foderrör. Inspektionsrutinerna behöver uppdateras där spännarmerade broars spännsystem undersöks med oförstörande provning under de allmänna inspektionerna vart 6:e år.

## Tillståndsbedömning av spännarmerade betongkonstruktioner

För tidigare nämnts för spännarmerade betongbroar är defekter inte alltid synliga och det är viktigt med metodiks utredning för dolda defekter där prioriteringar lämpligtvis görs beroende på hur viktig bron anses vara i infrastruktursystemet. En grundlig skrivbordsstudie och planering är avgörande. Det är opraktiskt och oekonomiskt att exponera alla dolda byggnadsdelar för inspektion och många konkurrerande faktorer måste beaktas innan någon undersökning genomförs. Frågorna som måste ställas är:

- Är byggnadsdelen kritisk för konstruktionens säkerhet?
- Vilka är konsekvenserna av fel på byggnadsdelen?
- Kan byggnadsdelen exponeras på ett säkert sätt?
- Kommer en exponering av byggnadsdelen leda till skador på konstruktionen?
- Kommer byggnadsdelen att skadas om den exponeras?
- Kommer exponering av byggnadsdelen att leda till långsiktiga hållbarhetsproblem med konstruktionen?
- Är det ekonomiskt att exponera byggnadsdelen?
- Vilken inverkan skulle utredningen få på anläggningens drift?

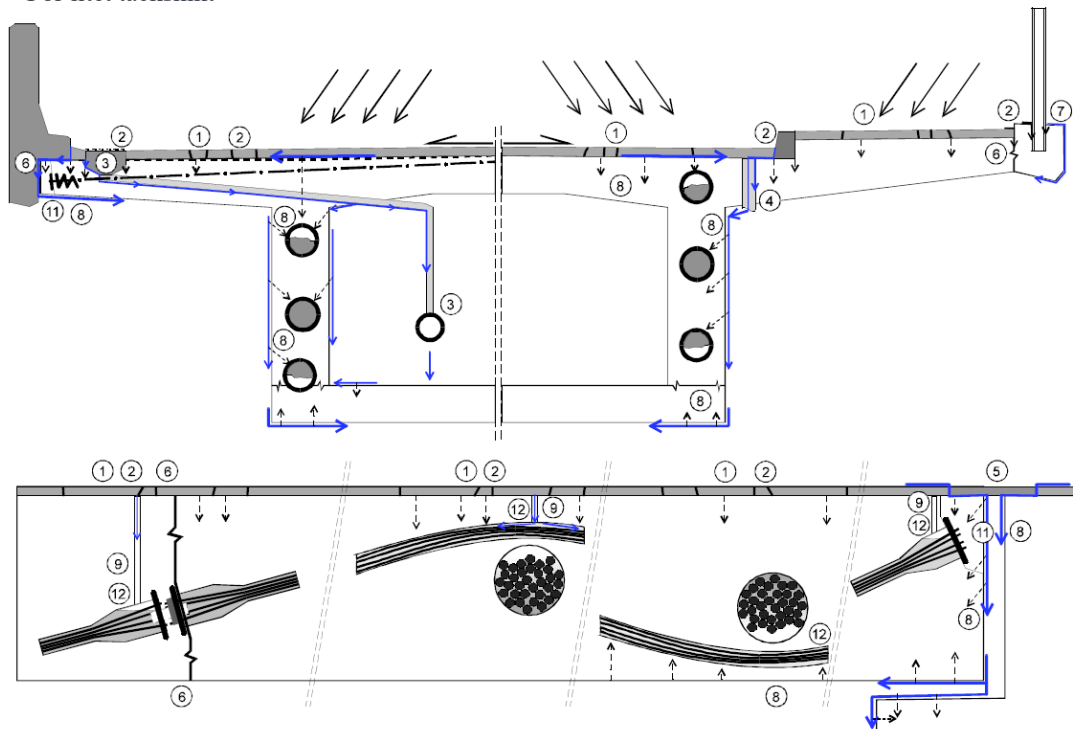
Dessutom kan en broägare ha specifika begränsningar som inte anges här och som måste beaktas vid bedömningen. Utredning av dolda fel kan antingen utföras som specialinspektion eller arbetas in i de normala inspektionsrutinerna. Det förra bör övervägas där risken för fel på en dold byggnadsdel med betydande konsekvenser sannolikt uppstår före nästa besiktning (normal). Om det inte är möjligt att inspektera alla dolda byggnadsdelar inom den erforderliga cykeln eller normala inspektioner bör de med störst risk prioriteras. I visas faroscenarier för förspännande stål för en typisk lådbalkbro. Möjliga defekter i figuren ges av ett nummer som förklaras nedan (Matt, 2000)

### Skador i yttre barriär

- 1 Defekt slitlager (t ex sprickor)
- 2 Saknat eller defekt tätskikt
- 3 Defekt dränering
- 4 Felaktig placerad dränering
- 5 Läckande expansionsfogar
- 6 Spruckna eller skadade gjutfogar
- 7 Försänkningar för t ex elektricitet
- 8 För litet tätskikt

### Skador på spännkablar och skyddssystem

- 9 Missad injektering i luftning. Läckage i foderrör pga skador
- 10\* Troligen normalt inga hålrum i lågpunkter som anges i bilden (kommentar)
- 11 Undermålig gjutning
- 12 Hålrum i foderrör, förankringar, kopplingar



Figur 17 Färoscenarier för spännarmering i en typisk lådbalkbro. Indikation på potentiellt svaga punkter där vatten (möjligt med klorider) kan komma åt spännkablar och orsaka korrosion (Matt, 2000).

Men för andra brotyper kan det också finnas andra färoscenarier. Detta har inte undersökts i denna rapport men föreslås i framtida studier. Generellt för varje typ av spännarmerad konstruktion med sitt speciella skyddskoncept kan vatten, eventuellt kloridförorenat, potentiellt nå spännstålet. Nyckelfrågan är: var kommer aggressivt vatten i kontakt med konstruktionen och hur rinner det av? Dessutom ger en noggrann visuell inspektion av betongytorna information om potentiella skador på det ospända stålet och spända armeringen. De visuella indikatorerna kan inkludera:

- Vattenflöde
- Missfärgning (t.ex. rostutslag)
- Spjälkning, delaminering
- Sprickor
- Råttbon
- Nedbrytning genom frostsador
- Läckage i skarvar etc.

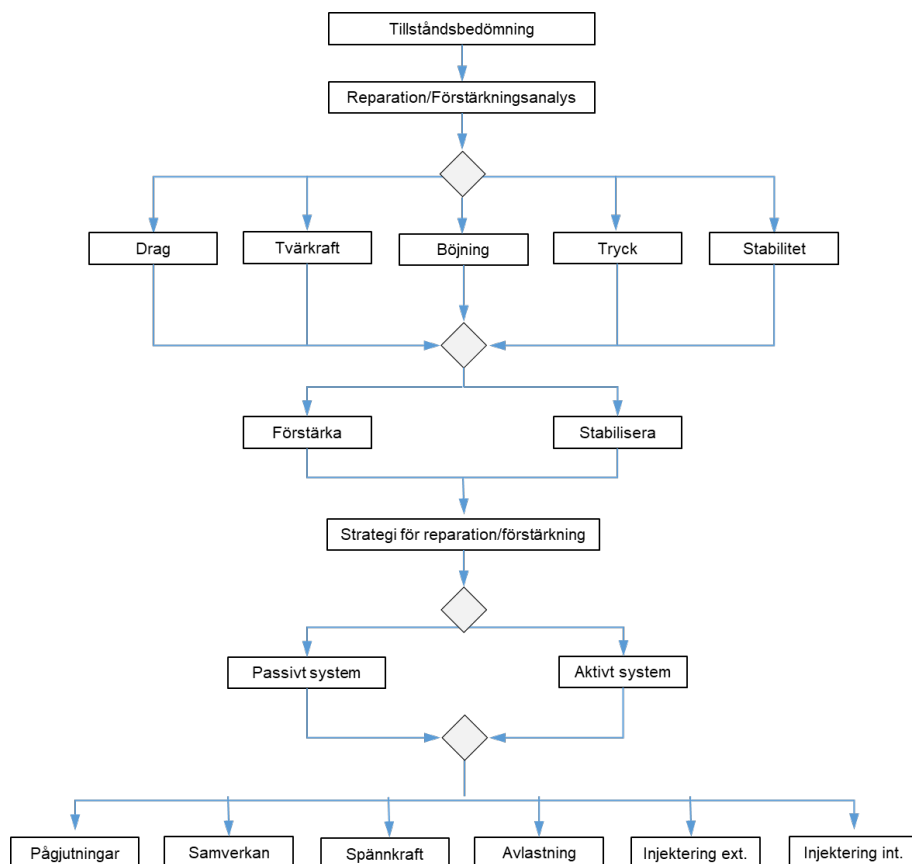
# REPARATION OCH FÖRSTÄRKNING AV BETONGKONSTRUKTIONER

## Allmänt

När en betongkonstruktion visar sig ha otillräcklig bärförmåga, eller stabilitet, kan det vara möjligt att modifiera strukturen med hjälp av olika stabiliserings- och förstärkningstekniker. Skillnaden mellan stabilisering och förstärkning är något grumlig och används i vissa fall synonymt. Stabilisering kan definieras som processen att stoppa en viss oönskad situation från att fortskrida. Till exempel kan sättningen av konstruktionen stabiliseras genom injektering för att stoppa ytterligare sättningar. Förstärkning hänvisas normalt till som processen att tillföra kapacitet till en del av eller hela konstruktionen, till exempel genom att applicera till extra förstärkning av t ex kolfiberlaminat till undersidan av en balk. I vissa fall innebär processen en kombination av att stoppa en oönskad situation och samtidigt öka kapaciteten. En struktur kan behöva förstärkas av många anledningar, till exempel för att förbättra sin bärförmåga i:

- Drag
- Tryck
- Tvärkraft
- Böjning

I redovisas ett generellt flödesschema för reparation/förstärkning av betongkonstruktioner eller dess byggnadselement.



Figur 18 Allmän reparations- och förstärkningsstrategi för betongkonstruktioner, baserad på (Emmons, 1993)

## Pågjutningar

Pågjutning görs normalt med ytterligare betong och oftast armeringsstål på en befintlig konstruktionsdel. Balkar, plattor, pelare och väggar. Kan vid behov förstöras för att öka styvheten eller bärförmågan. I de flesta fall fästs pågjutning mekaniskt eller genom dymligar till den befintliga betongen för att skapa en monolitisk del. Sprutbetong med eller utan fiber räknas också till pågjutning.

## Samverkan

Att skapa samverkan mellan olika byggdelar är en metod där normalt andra material än betong skapar samverkan med ett befintligt betongelement för att tillföra styvhet eller bärförmåga. Stål eller fiberkompositer är vanligt är de använda materialen för denna teknik. Dessa material kan tillverkas för att uppfylla nästan alla konfigurationskrav. Lastöverföring i samverkanslementet åstadkommes genom användning av lim, injekteringsbruk och mekaniska förankringssystem.

## Spännkraft

Efterspänning är en teknik som används för att ge betongen en tryckkraft. Spänningen ger elementet en omedelbar och aktiv lastbärande förmåga. Placering av spänningskomponenterna kan åstadkommas antingen internt i elementet eller externt till elementet. Spänningskomponenter är vanligtvis stålplåtar, kompositlaminat eller stavar, spännlinor eller stänger. Spänning tillförs komponenterna genom att man spänner upp förstärkningen, förankrar, tar bort spännkraften och överför tryckspänningen till betongen. Efterspänning förbättrar betongelementets ta upp last och minskar därtill sprickvidder och deformation. Efterspänningstekniken kan också användas för att eliminera oönskade förskjutningar i element och för att förvandla diskontinuerliga element till kontinuerliga element

## Avlastning

Stressreducering eller avlastning, är en teknik som minskar påkänningar i en del av eller hela konstruktionen. Några av de vanligaste metoderna för avlastning inkluderar upptagning av nya expansionsfogar, införandet av nya pelare eller stöttor. Andra mer radikala tekniker innebär att delar av strukturen tas bort. Det enklaste metoden att minska påkänningar är att reducera belastningen i de fall det är möjligt.

## Intern injektering

Intern injektering är placeringen av ett flytbart material in i en önskad diskontinuitet, såsom en spricka i betongelementet, det flytbara materialet kommer att härda och anta konstruktiva egenskaper. Invändig injektering används för att reparera interna sprickor, råttbon eller andra hålrum. De vanligaste materialen som används för invändig injektering är polymerer och cementbaserade material.

## Extern injektering

Extern injektering är placeringen av ett pumpbart material utanför konstruktionen, vanligtvis inom den omgivande grunden eller jorden eller vid gränsytan mellan konstruktionen och jorden. Injekteringsmaterialen kan användas antingen för att ge nödvändig lastöverföring mellan konstruktionen och marken, eller för att förhindra oönskade sättningar. De flesta material som används för extern injektering är cementbaserade.



I Tabell 6 ges en översikt över stabiliserings- och förstärkningsteknikerna och hur väl de kan tillämpas på förspända betongbroar i allmänhet.

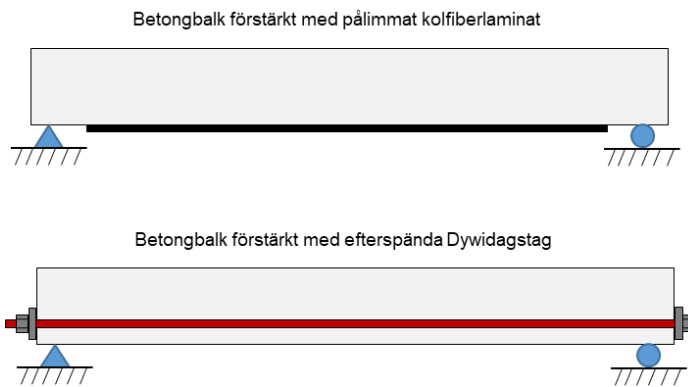
Tabell 6 Stabiliserings- och förstärkningstekniker

<b>Teknik</b>	<b>Beskrivning</b>	<b>Applicerbar till spännarmerad betong</b>
Pågjutningar	Styvhet och/eller lastkapacitet. Passiv förstärkning.	I vissa sektioner i samband med extern yttre spännkraft.
Samverkan	Styvhet och/eller lastkapacitet. Passiv eller aktiv förstärkning. Kan vara svårt att skapa aktiv förstärkning.	Kan användas separat eller i kombination med andra metoder
Spännkraft (Efterspänning)	Aktiva system för att öka bärförmåga eller minska deformationer/nedböjning.	Kan användas både för förstärkning i tvärkraft och i böjning.
Avlastning (Spänningsreducering)	För att ta bort spänning/töjning. Också system för att minska upplagslängder etc.	Möjlig vid speciella tillämpningar och för mindre broar.
Intern injektering	Injektering med polymerer eller cementbaserade produkter.	För att öka styvhet och integritet samt beständighet. Inte för direkt förstärkning.
Extern injektering	Injektering för större hålrum och för stabilisering. I första hand i samband med upplag/grundläggning.	För stabilisering. Inte direkt för förstärkning eller reparation av överbyggnaden.

## Passiv och aktiv förstärkning

Förstärknings- och stabiliseringstekniker anses generellt vara antingen passiva eller aktiva, beroende på hur förstärkningstekniken påverkar konstruktionen som helhet. Tekniker där förstärkning inte bidrar till bärförmågan förrän ytterligare last (rörlig eller statisk) appliceras eller/och tills ytterligare deformationer inträffar benämns passiva. Det finns många situationer där ytterligare deformationer inte är acceptabla, dvs. förstärkningen måste omedelbart delta i lastupptagningen. Dessa förstärkningar kallas aktiva. Aktiva system kräver antingen förspänning av de reparerade byggnadselementen eller tillfälligt avlägsnande av lasterna (både rörliga och statiska) från de befintliga elementen eller en kombination av de två. Aktiva system kan jämföras med elastiska hängslen som används för att hålla upp byxor. Om hängslen spänns upp omedelbart (aktiva), kommer byxorna att stanna i sitt vertikala läge. Å andra sidan (passiv) om hängslen placeras löst eller utan uppspänning, kommer byxorna att falla vertikalt tills tillräcklig spänning uppstår i hängslen för att stå emot byxans vikt.

Passiva system fungerar bra när ökade laster förväntas. Till exempel kan uppgradering av en bro för att klara tyngre belastningar kräva endast ett passivt system. Men om en del överbelastad kan det enda valet vara att använda en aktiv teknik som omedelbart kommer att minska påkänningen av åtminstone en del av egenvikten. Aktiva system kräver betydligt större insatser och är mer kostsamma. Därför måste man avgöra från fall till fall vad som kan anses vara mest lämpligt. I Figur 19 visas två principiella förstärkningstekniker, en passiv och en aktiv.



Figur 19 Passiv respektive aktiv förstärkning

## Reparation och förstärkning av spännarmerade betongbroar

### Allmänt

Broelement av spännarmerad betong kan utsättas för oavsiktlig skada på grund av påkörningar, bristande underhåll eller brand. Detta förutsätter då att broelementet har varit korrekt dimensionerat från början. Dessutom kan miljömässig nedbrytning av betong och stål med tiden påverka den totala bärförmågan. Därtill kan behov av högre axellaster och ökade trafikvolymmer innebära behov av förstärkningsåtgärder.

Metoder för reparation och förstärkning av spännarmerade betongbroar beror således på den bakomliggande orsaken och de framtida behoven. I många situationer kan en kombination av reparations- och förstärkningsåtgärder behövas. Som tidigare nämnts är det viktigt att orsaken till behovet är tydlig och kartlagt. Normalt utförs reparationer för att återställa den ursprungliga prestandanivån och är relaterad till bruksgränstillståndet (SLS). Förstärkning/uppgredning syftar dock på att förbättra prestandanivån och är oftast relaterad till lastkapacitet i brottngränstillståndet (ULS). Reparation och förstärkning kan även utföras vid utmattning och för nedböjningar och sprickbredder. Detta diskuteras dock inte nedan. Det är viktigt att göra reparationen/förstärkningsåtgärden utifrån ett klassificeringsschema

I de fall det krävs att återställa den ursprungliga prestandan hos en spännarmerad konstruktion på grund av till exempel linbrott eller korrosion i efterspänningssystemet betraktas detta normalt som en reparationsåtgärd, men diskuteras här under förstärkningsavsnittet.

### Förstärkning

Genom att förstärka en konstruktion ökar prestandan. Trots detta kan förstärkningsmetoder som diskuteras i detta avsnitt användas för såväl reparationer som förstärkande åtgärder. Förstärkningsmetoder kan också delas upp i passiva och aktiva förstärkningssystem som tidigare diskuterats.

Från litteraturen finns ett antal studier där olika förstärkningstekniker har tillämpats på förspända betongelement. Ett mycket omfattande och detaljerat arbete har presenterats av (Schnellenbach m.fl., 2016) där olika förstärkningsmetoder för gamla förspända broar diskuteras. Andra omfattande rapporter är (NHRP, 1985), (Harris m.fl., 2009, 2012) och för extern förspänning, (Nordin, 2005, 2006). Nedan diskuteras de huvudsakliga förstärkningsmetoderna som har hittats för förspända betongbroar.

## Extern efterspänning

Extern efterspänning åstadkoms med hjälp av armeringsstänger eller linor som är förankrade med konsoler eller konsoler (vanligen kallade "bolsters") som gjuts eller monteras på balken; vanligtvis på balkens sida (även ibland på undersidan). Även system med kolfiberlaminat eller kolfiberstavar har använts. Stålstavarna, eller linorna spänns med en domkraft mot bolstret eller förankringen. Design av externa efterspända reparationssystem är relativt okomplicerat med hjälp av en enkel plansektionsanalys. Förankringarna av bolstren kräver emellertid betydande uppmärksamhet. Dessa element är "störda regioner" utsatta för stora koncentrerade krafter. Dessutom måste tillräcklig skjuvkapacitet längs gränssytan mellan bolstret och befintlig betongkonstruktion kunna tillgodoses för att överföra erforderliga krafter. Effektiv överföring av skjuvkrafter kräver ofta att själva bolstren efterspänns (tvärs) mot balken för att påverka adekvata friktionskrafter längs gränssytan. Slutligen måste utformningen av bolstren och gränssnittet beakta de moment som induceras av de excentriska efterspänningskrafterna.

Ett idealiskt material för extern efterspänning bör inte bara ha hög hållfasthet utan det måste också förbli inom elastiskt område tills relativt höga spänningar uppnås. Dessutom måste den visa tillräcklig duktilitet och goda förankrings/vidhäftningsegenskaper, låg relaxation och hög motståndskraft mot utmattning och korrosion. Extern förspänning, både för nya och befintliga konstruktioner, har visat sig vara en effektiv teknik. (Picard m.fl.,1995) listade följande fördelar:

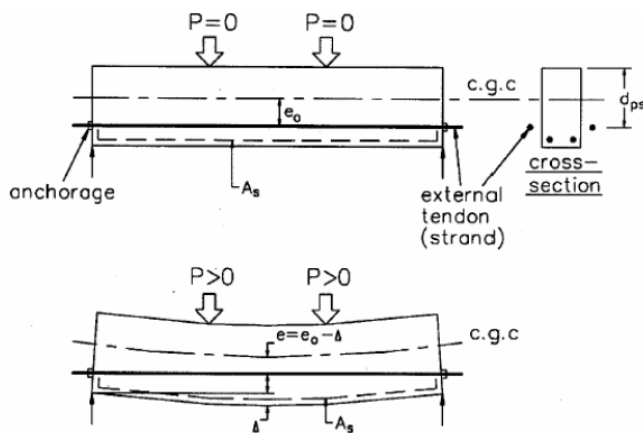
- Gjutning av nya konstruktioner förbättras då det inte finns några eller få linor och stänger i sektionen
- Betongsektionens mått kan reduceras på grund av mindre utrymmesbehov för invändig armering.
- Profiler av yttre linsystem är enklare och lättare att kontrollera under och efter installationen.
- Injekteringen förbättras tack vare en bättre visuell kontroll av utförandet.
- Externa linor och stänger kan tas bort och bytas ut om korrosionsskyddet på de externa spännarmeringen tillåter frigörande av förspänningskraften.
- Friktionsförlusterna minskar avsevärt eftersom yttre linor och stänger är kopplade till konstruktionen endast vid avlänkning- samt i förankringszonerna.
- Huvudbyggnadsverksamheten, betong och förspänning, är mer oberoende av varandra; därför minskar utförandets inflytande på strukturens övergripande kvalitet.

Det är också viktigt att förstå teknikens svagheter. Följande nackdelar bör hållas i åtanke (Picard m.fl., 1995):

- Externa placerade spännlinor och stänger är mer lättillgängliga än inre och är följaktligen mer sårbara för sabotage och brand.
- Externa spännlinor och stänger utsätts för vibrationer och därför bör deras fria längd begränsas.
- Avvikelse- och förankringszoner är besvärliga tillägg till tvärsnittet. Dessa element måste utformas för att stödja stora längsgående och tvärgående krafter.
- I avvikelsezonerna verkar stora skjuvkrafter på linor och stänger, detta måste man ta hänsyn till i dimensioneringen för att minska påkänningarna så mycket som möjligt och för att undvika skador på spännstålet.
- När det gäller invändiga injekterade spännlinor har långtidsbrott av ankarhuvuden begränsade konsekvenser eftersom förspänningar kan överföras till konstruktionen genom vidhäftning. När det gäller yttre spännlinor och stänger är beteendet hos ankarhuvuden mycket mer kritiskt. Därför bör ankarhuvuden noggrant skyddas mot korrosion.

- Vid brottgränstillstånd minskar linor och stänger bidrag till böjhållfastheten jämfört med inre injekterade linor och stänger. Spänningsvariationen mellan sprickbelastningen och brottbelastningen kan inte utvärderas endast vid den kritiska sektionen, vilket görs för inre spänsystem.
- I eventuellt brottgränstillstånd är förvarningen på grund av otillräcklig duktilitet ett stort problem för externt förspända konstruktioner.
- Den faktiska excentriciteten hos yttre spänsystem är generellt sett mindre jämfört med inre system.

Eftersom spänslinor och stänger är placerade utanför konstruktionen är anslutningen till konstruktioner vid avlänkare (deviatorer) och förankringar. Mellan dessa punkter är spänslinorna fria att röra sig i förhållande till sektionen av betongelementet. Om deviatorer inte används leder andra ordningens effekter på grund av förändrad excentricitet hos linor/stänger, se Figur 20, till lägre bärförmåga (Tan & Ng 1997). Användningen av avvikare längs konstruktionens spänsvidd kan effektivt minska dessa effekter, tester utförda av (Tan & Ng, 1997) visade att en enda avvikare vid sektionen med maximal avböjning resulterade i tillfredsställande service och slutligt belastningsbeteende



Figur 20 Andra ordningens effekter utan avlänkare (deviatorer), (Tan & Ng, 1997)

Extern efterspänning kan användas för såväl nya konstruktioner som för befintliga när förstärkning behövs. Användningen är inte begränsad till betongkonstruktioner. Alla material med rimlig tryckkapacitet kan förstärkas med yttre efterspänning. Tekniken har använts för olika typer av strukturer såsom:

- Broar
- Balkar i byggnader
- Takkonstruktioner
- Cirkulära konstruktioner som silor, reservoarer och skorstenar

I Figur 21 och Figur 22 visas exempel på betongbroar som har förstärkts på insidan med utanpåliggande spänsystem. För förstärkningsändamål är utvändigt efterspänning för balkbroar idag välkänd metod efter många års erfarenhet.



Figur 21 Extern efterspänning applicerad på broar med lådbalkar av betong Foton från en fransk bro på höghastighetslinjen till Marseille till vänster och en ungersk bro på den nya godslinjen genom Slovenien till Medelhavet (Foton av B. Paulsson)



Figur 22 Bilder från den nya järnvägsbron i Porto visar förberedelser för extra extern efterspänning, (Nova ponte ferroviaria sobre o Rio Douro no Porto) (Foton av B. Paulsson)

### Skarvning av spännlinor

Skarvning av spännlinor görs för att koppla ihop olika linor (Harris m.fl., 2009). Metoder för återskapa förspänningskraften i skarven görs genom förbelastning, uppvärmning eller genom mutterdragning, den sista metoden är vanligast, vilket i huvudsak gör skarven till en sorts spännskruv. Uppvärmning är en metod där linan värms upp, skarvdosan fästs vid linan och när linan tillåts svalna, drar den ihop sig, vilket introducerar spännkraften. Uppvärmning av konventionella höghållfasta spännstål anses inte vara en särskilt rationell metod för att ge någon rimlig förspänning: antingen på grund av a) att en för lång längd av linan måste värmas upp; eller b) att en kort längd av linan måste värmas till en hög temperatur. Den förra är opraktisk i en brobalk och den senare kommer att påverka linans materialegenskaper negativt. Uppvärmning rekommenderas inte. Kommersiellt tillgängliga skarvsystem har kopplingar anslutna till omvända gängade ankare; när kopplingen vrids, dras båda ankarna mot varandra, vilket inducerar en förspänning i den infästa linan, se Figur 23. Dessa system används normalt inte för interna spännsystem där finns det andra typer av skarvmetoder och system att tillgå.



Figur 23 Skarvning av spännlinor, (Harris m.fl., 2009)

### Extern förstärkning med ospänd kolfiberkomposit

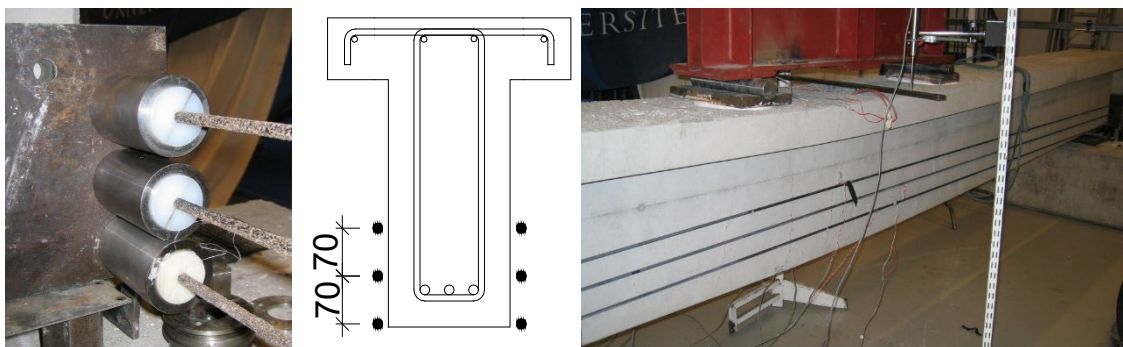
I denna metod appliceras en kolfiberkomposit på betongelementet som dragförstärkning. Kompositen appliceras med ett strukturellt lim och förspänns inte före montage. Sålunda är metoden att definieras som passiv och upptar tilläggslaster, vilket ofta är tillräckligt om dimensionering förs för brottgränstillståndet. Förstärkningstekniken är vedertagen och har använts på ett stort antal broar runt om i världen. I Figur 24 visas en färdig förstärkning med kolfiberlaminat av en vägbro utanför Karlstad i Sverige



Figur 24 Passiv förstärkning med kolfiberlaminat, (Foto B. Täljsten)

### Extern förstärkning med efterspänd kolfiberkomposit

Förspända eller efterspända (termerna används inkonsekvent i litteraturen) CFRP (Carbon Fibre Reinforced Polymer) förstärkning medför att förstärkningen blir aktiv från början och att den befintliga konstruktionsdelen avlastas. Det finns olika sätt att installera PCFRP (Prestressed CFRP)-system på. Antingen kan man spänna upp laminat som limmas mot betongelementet och förankra dessa alternativt så använder man sig av stänger som spänns upp på motsvarande sätt som för spännlinor av stål som förankras mot betongkonstruktionen. I Figur 25 visas genomförda försök vid Luleå tekniska universitet med uppspända kolfiberlinor.



Figur 25 Aktiv förstärkning med kolfiberlinor, (Bennitz, 2011)

Erfarenheter av denna typ av förstärkning är att det fungerar och ger motsvarande förstärkningseffekt som med ställinor. Dock är uppspanningsproceduren mer komplicerad. Dessutom är kolfiber som material linjärelastiskt, detta innebär att man förbrukar en del av duktiliteten i samband med uppspanning. Detta sker inte för system med stål då stålet kan flyta och har en väsentlig töjning vid brott.

## Sammanfattning av olika förstärkningstekniker

I Tabell 7 sammanfattas de ovan presenterade förstärkningsmetoderna i förhållande till några utvalda faktorer baserade på undersökning av (Shanafelt & Horn, 1980)

Tabell 7 Förstärkning värderade på urvalskriterier, baserat på (Shanafelt & Horn, 1980)

Tillståndsfaktor	Reparation/Förstärkningsmetod		
	Extern PT	CFRP	CFRP PT
Beteende vid brottlast	Väldigt bra	Väldigt bra	Väldigt bra
Överlast	Väldigt bra	Väldigt bra	Väldigt bra
Utmattning	Väldigt bra	Väldigt bra	Väldigt bra
Öka bärförmåga till icke skadade element	Väldigt bra	Väldigt bra	Väldigt bra
Avlastning krävs	Nej	I vissa fall	Nej
Tid för genomförande	Bra	Väldigt bra	Bra
Beständighet	Väldigt bra	Bra	Bra
Kostnad	Låg	Mellan	Mellan
Utseende	Störande	Väldigt bra	Störande

Varje reparations-/förstärkningsobjekt är dock unikt och en detaljerad utvärdering för det specifika projektet bör alltid göras.

# OFÖRSTÖRANDE PROVNING AV BETONGKONSTRUKTIONER

## Allmänt

Klassificering av oförstörande provningsmetoder kan göras på flera olika sätt, se t ex (Blanksvärd et. al, 2017, Rehman et. al., 2016), här har valts att dela upp oförstörande metoder i Visuella, mekaniska och akustiska, elektromagnetiska samt kemiska samt potentialmätning. Därtill finns det delvis förstörande provmetoder. Det finns ett flertal metoder som inte tas upp i denna rapport., urvalet har baserats på de mest kommande och de som från vår erfarenhet är mest användbar för att undersöka spännarmerade betongkonstruktioner.

### Visuella metoder

- Rena visuella metoder
- Kedjedrag/Bomstest
- 3D-skanning/lidar
- Drönare
- Videoskop
- Sprickmikroskop (presenteras inte i detalj)

### Mekaniska och akustiska metoder

- Akustisk emission (AE)
- Impact Echo (IE)
- Ultraljud Pulseko (MIRA)
- Ultraljud Pulshastighet (UPV)
- Impulse Response (IR)
- Studshammare

### Elektromagnetiska metoder

- Georadar(GPR)
- Täcksiktmetare
- Termografi (IR)
- Elektrisk resistivitet

### Kemiska och potentialmätning

- Halvcell potentialmätning (EKP)

### Delvis förstörande

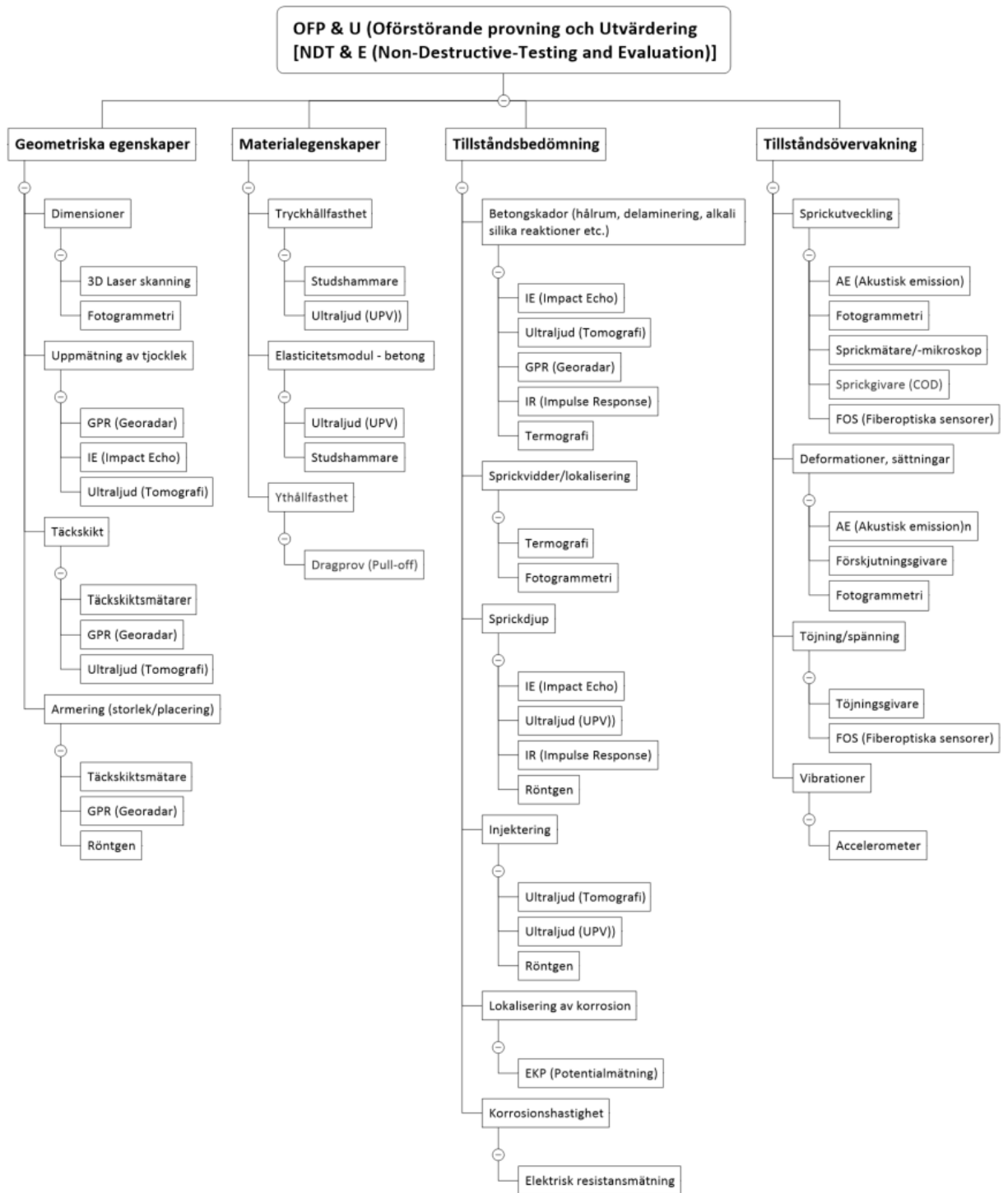
- Karbonatiseringsprov
- Kloridprov
- Tunnslipsanalys
- Vidhäftningsprov

### Övriga

- Radiografi - röntgen



Ett annat sätt är från ett praktiskt betraktelsesätt beroende på vilket problem man avser att lösa, se Figur 26 (Popescu m. fl., 2019), t ex geometri, materialegenskaper, tillståndsbedömning och tillståndsovervakning.



Figur 26 Förslag till struktur för att detektera skador hos bro- och anläggningskonstruktioner (efter Popescu et. al., 2019)

I Figur 26 har gjorts ett försök att identifiera viktiga parametrar med potentiell påverkan på en anläggningskonstruktions tillstånd och/eller parametrar som skulle möjliggöra en mer detaljerad tolkning av dess tillstånd.

Indelning görs i Geometriska egenskaper, vilket då omfattar såväl den yttre geometrin som den inre kartläggningen av t ex armeringens placering och täcksikt. Materialegenskaper som t ex tryckhållfasthet samt tillståndsbedömning är syftet är att kartlägga eventuella defekter hos konstruktioner som t ex sprickdjup, korrosion, håligheter etc. Därtill diskuteras tillståndsövervakning vilket avser att följa upp anläggningen över tid och med olika typer av sensorer följa förändringar.

För varje parameter i Figur 26, föreslås möjliga OFP-metoder. Det finns flera faktorer som måste beaktas vid utformningen av en bedömning med OFP. McCann och Forde (2001) klassificerade dessa faktorer enligt följande:

1. Erforderligt inträngningsdjup
2. Vertikal och lateral upplösning av de undersökta objekten
3. Kontrasten i fysikaliska egenskaper mellan de undersökta objekten och dess omgivning (t.ex. stål och betong)
4. Signal/brusförhållande för den undersökta fysiska egenskapen
5. Historiska metoder som används för konstruktion (byggnadsdokumentation)

För att kunna kartlägga anläggningskonstruktioner på bästa sätt kräva en kombination av olika OFP-metoder och det kan även krävas delvis förstörande provning. I Tabell 8 har användbarheten för OFP metoder som funktion av skador i betong ställts samman, se också Appendix C.

De metoder som i första hand är aktuella för att kartlägga problem med spännkablar i foderrör är då:

- Täcksiktsmätare
- GPR
- Ultraljud Tomografi (MIRA)
- Impact Echo
- Röntgen (ställer höga krav på säkerhet)
- Akustisk Emission (möjligen för kabelbrott)

men även metoder för att kartlägga materialegenskaper, sprickor och andra effekter av nedbrytning kan vara värda att beakta när spännarmerade betongkonstruktioner tillståndsbedöms. Detta gäller även metoder för att undersöka korrosion i slakarmeringen. Det ska också vara möjligt att undersöka eventuell pågående korrosion i spännarmering, men då måste foderröret öppnas upp.

Nedan diskuteras olika OFP metoder och deras lämplighet för spännarmerade betongkonstruktioner och speciellt möjligheten att detektera foderrör och håligheter i dessa, se även mer omfattande sammanställning av OFP metoder i Appendix A.

Tabell 8 Användning av oförstörande provning för att detektera defekter i betongkonstruktioner

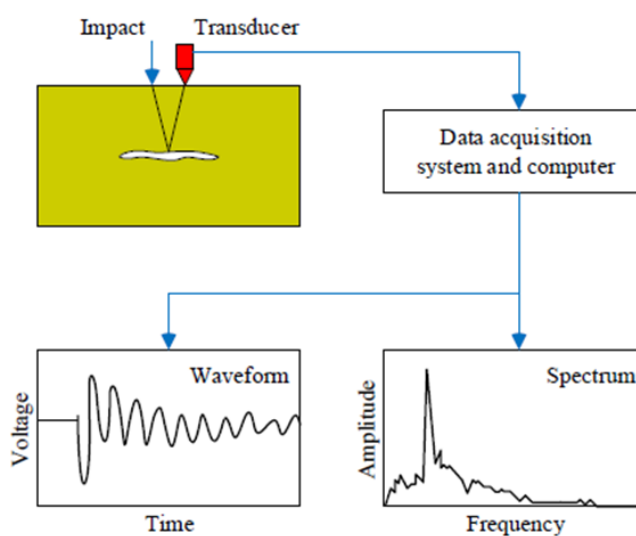
Identifierade defekter/parametrar som påverkar betongkonstruktionen	Troligen orsakat av dimensionering eller produktion											Troligen orsakat av nedbrytningsmekanismer/belastning										
	Tjockleksmätning	Täckskikt	Råttbon	Hålrum i foderrör	Lokalisering av armering och/eller foderrör	Otillräcklig injektering	Betong (Hållfasthet, elasticitetsmodul etc.)	Betongyta – kvalitet/status(karbonatisering/klorider)	Delaminering/spjälkning	Fuktinnehåll	Lokalisering ytsprickor	Mekanisk nedbrytning (Utmattning, överlast, sättningar)	Kemisk nedbrytning (ASR, syror etc)	Fysisk nedbrytning (Frostskador, nötning)	Sprickdjup	Brott i spännlinor	Aktiva sprickor	Kvarvarande tjocklek	Kvarvarande diameter	Armeringskorrosion		
<b>Visuell</b>																						
Visuell inspektion	•																					
Slag (hammare, kedjedrag)																						
3D-skanning/LIDAR	•																					
Drönare																						
Videoskop				(●)	(●)																	
<b>Mekaniska och akustiska OFP metoder</b>																						
Akustisk Emission (AE)																						
Impact Echo (IE)																						
Ultraljud Pulshastighet (UPV)	•																					
Ultraljud Pulseko (UPE)	•			(●)																		
Impulse Respons (IR)																						
Studsammare																						
<b>Elektriska och elektromagnetiska metoder</b>																						
GPR (Georadar)	•	•		(●)																		
Täckskiktsmätare		•																				
Termografi																						
Elektrisk resistivitet																						
<b>Kemiska och potentialmetoder</b>																						
Elektrokemisk potentialmätning (EKP)																						
<b>Mindre förstörande metoder</b>																						
Karbonatiseringsprov/Kloridprov																						
Tunnshipsanalys																						
<b>Övrigt</b>																						
Röntgen (Höga krav på säkerhet)	•	•	•	•	•																	
Provbelastrning/Betongkärnor/Vidhäftning	•						•				•		•		•		•					

• Direkt, (●) Indirekt

## Mekaniska och akustiska metoder

### Impact Echo (IE)

IE-metoden innebär att man träffar ytan av det område som ska undersökas med en liten stöt- eller impulshammare och identifierar den reflekterade vågenergin med en förskjutnings- eller accelerometersmottagare monterad på ytan nära islagspunkten. Reflexionerna av spänningstågen från interna defekter, materialgränssnitt eller andra anomalier fångas upp av givare på testytan. Eftersom stöten genererar en hög energipuls och kan tränga djupt in i betongen, är IE-metoden särskilt lovande för att identifiera defekter i betongkonstruktioner. Den producerar ett bättre signal/brusförhållande än andra ultraljudstekniker på grund av dess låga dämpning i sammansatta material som betong, (Krüger & Grosse, 2007), Friese m.fl., 2009). I Figur 27 registrerar en givare ytförskjutningar som orsakas av flera reflektioner av vågorna mot tiden. Dessa förskjutningssignaler omvandlas därefter till frekvensdomänen (FFT).



Figur 27 Förenklat diagram över IE-metoden (från [www.ndt.net](http://www.ndt.net))

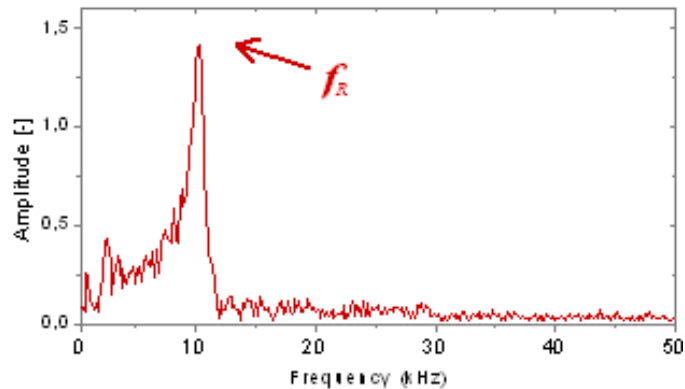
Djupet av eventuella interna defekter eller gränssnitt kan bestämmas genom att analysera den inkommande signalen och dess karakteristiska frekvensspektrum (FFT) med hjälp av följande enkla ekvation:

$$(1) d = \frac{v_p}{2f_R}$$

där  $v_p$  är P-vågens hastighet och  $f_R$  är den uppmätta frekvensen. Djupet till en defekt kan illustreras med exemplet i Figur 28 med den uppmätta hastigheten av 4350 m/s i betongen:

$$(2) d = \frac{v_p}{2f_R} = \frac{4350}{2 \cdot 10} = 0.22m$$

erhålls då ett djup av 0.22 m till defekten



Figur 28 Exempel på IE analys

Minsta detekterbara storleken på defekter varierar beroende på defektens djup. Det är en mycket effektiv testmetod för ett djup från 0,1 m upp till ca 1,2 m, (Helmerich & Niederleithinger, 2007). Denna metod används vanligtvis för tjockleksbestämning, lokalisering av delaminering, hålrum, inhomogeniteter, såväl som håligheter i foderrör. I sammanfattas fördelar och begränsningar för IE-tekniken.

Tabell 9 IE-teknikens möjligheter och begränsningar

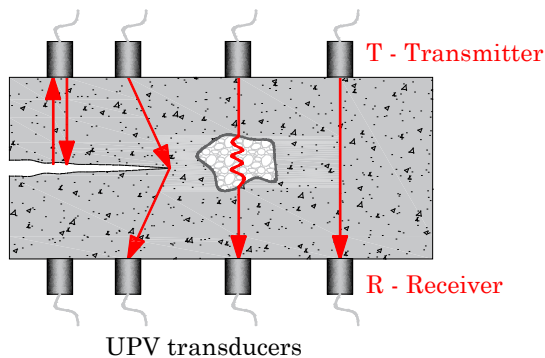
Defekter	IE kan inte lokalisera defekter i spännrådar i interna eller externa foderrör. IE kan lokalisera tomrum och vatteninfiltration i foderrör med måttlig noggrannhet. IE kan också lokalisera bristfälligt injekteringsbruk, hålrum och vatteninfiltration i externa HDPE (high-density polyethylene) foderrör med måttlig noggrannhet
Placering av foderrör	Används för att lokalisera placering av foderrör i betong. Har använts för att lokalisera håligheter i externa foderrör.
Typ av foderrör	Tillämpbart på foderrör av metall såväl som icke metall
Effekt av täcksikt	Resultat påverkas av betongens täcksikt. Mycket tjockt täcksikt > 70-80 mm kan påverka mätningen negativt.
Påverkan av flera lager av foderrör	Foderrör i "skugga" kan vara svåra att erhålla resultat från.
Påverkan av tät armering	Tät armering påverkar mätningen negativt
Korrosion	Ingen möjlighet att detektera korrosion
Krav på tillgänglighet	Området som krävas är normalt 0.5 x 0.5 m med en tät indelning. Beroende på skadans storlek kan man behöva gå ner till rutnät kring 5 x 5 cm. Större defekter är enklare att hitta.

### Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) och Ultrasonic Pulse Echo (UPE)

Ultraljudspulshastighetsmetoden (UPV) är en oförstörande metod som används för att utvärdera tillståndet hos betong. Bland de parametrar som kan karakterisera betongens tillstånd är: betongens tryckhållfasthet, inre defekter, sprickor etc. Principen för metoden består i att mäta tiden för en ultraljudspuls färd genom ett känt avstånd, t.ex. genom betongen som testas i Figur 29.

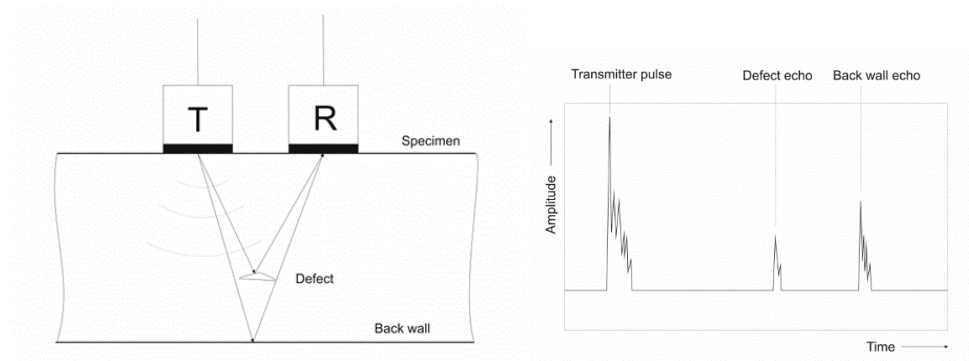
Genom att tillämpa ultraljudspulshastighetsmätning styrs pulsfrekvensen av longitudinella vibrationer genom betongen. De huvudsakliga applikationsområdena är:

- Homogeniteter i betongelement
- Förekomst av sprickor, håligheter eller andra defekter
- Sprickdjup
- Förändringar i betongkonstruktionen som kan uppstå under livslängden
- Kvalitet på betong i förhållande till standardkrav
- Indikativa värden för betongens tryckhållfasthet och elasticitetsmodul



Figur 29 Ultraljudspulshastighetsmätning i betongelement (www.ndt.net)

Metoden kräver åtkomst från båda sidor av elementet och därför kan detta i vissa situationer vara en nackdel. Ny teknik har utvecklats, det vill säga ultraljudspulseko (UPE), baserat på den ursprungliga metoden. Med ultraljudspulseko är det nu möjligt att undersöka objekt där åtkomsten är begränsad till en enda sida. UPE består av överföring (T) av ultraljudspulser till betong som reflekteras av materialdefekter eller av gränssnitt mellan områden med olika densiteter och/eller elasticitetsmoduler. En mottagare (R) kopplad till ytan tar emot de reflekterade vågorna. Punktmätningar kombineras för att visualisera reflektionen. Det är värt att notera att utbredningen av ultraljudsvågor begränsas av skikt som innehåller luft, t.ex. betong med stora mängder luftporer och med mycket täta armeringsjärn. Denna metod används för inspektion av den inre strukturen av armerad och/eller förspänd betong, samt placering av armerings- och spännkablar, håligheter och dålig kompaktering, se en principskiss i Figur 30.



Figur 30 Förenklat diagram över UPE-metoden (från www.ndt.net)

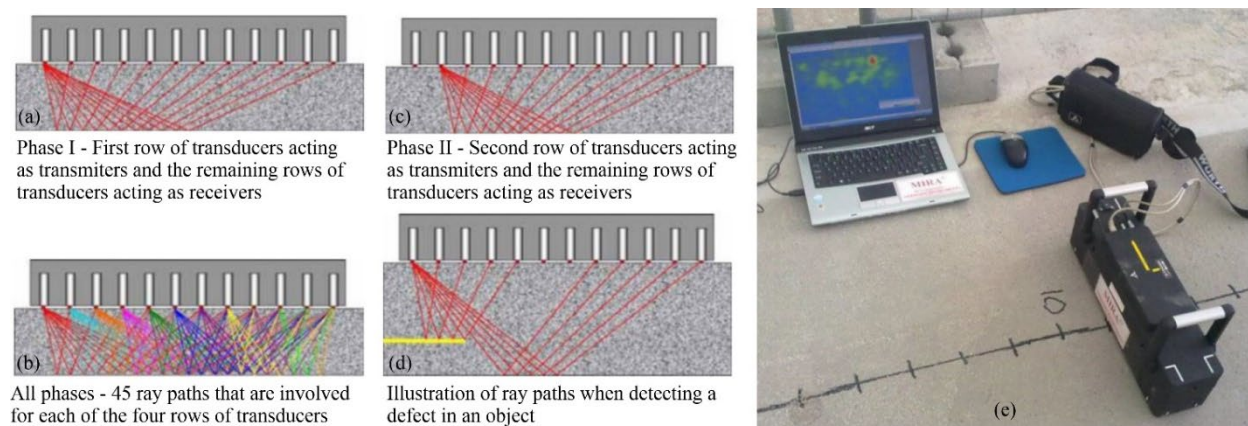
När UPE metoden används kan man inte förlita sig på ett mätvärde för att dra slutsatser om skador, sprickdjup eller lokalisering av armering. Ofta måste flera mätningar vidtas för trovärdiga resultat. Vid mätning av sprickdjup görs ofta 5 mätningar och medelvärde samt standardavvikelse redovisas. I Tabell 10 sammanfattas möjligheter och begränsningar för UPV samt UPE-tekniken.

Tabell 10 UPV samt UPE teknikens möjligheter och begränsningar

Defekter	UPV och UPE kan inte lokalisera defekter i spännrådar i interna eller externa foderrör. UPV och UPE kan lokalisera tomrum och vatteninfiltration i foderrör med måttlig noggrannhet. UPV och UPE kan också lokalisera bristfälligt injekteringsbruk, hålrum och vatteninfiltration i externa HDPE (high-density polyethylene) foderrör med måttlig noggrannhet.
Placering av foderrör	Kan vara tidsödande att hitta foderrör i betong. Måste vara ganska säker på var foderöret är placerat.
Typ av foderrör	Tillämpbart på foderrör av metall såväl som icke metall
Effekt av täcksikt	Resultat påverkas av betongens täcksikt. Mycket tjockt täcksikt > 70-80 mm kan påverka mätningen negativt.
Påverkan av flera lager av foderrör	Foderör i "skugga" kan vara svåra att erhålla resultat från.
Påverkan av tät armering	Tät armering påverkar mätningen negativt
Korrosion	Ingen möjlighet att detektera korrosion
Krav på tillgänglighet	Området som krävas är normalt 0.5 x 0.5 m med en tät indelning. Beroende på skadans storlek kan man behöva gå ner till rutnät kring 5 x 5 cm. Större defekter är enklare att hitta.

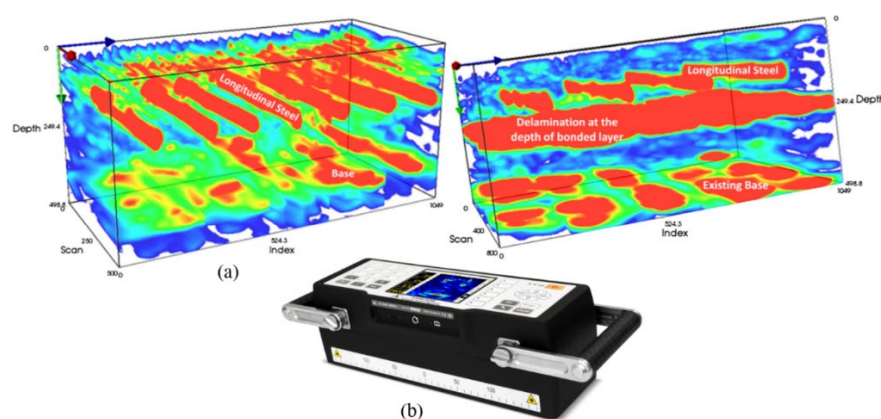
## Ultraljud Tomografi

En mer utvecklad ultraljudsmetod är en metod som ofta benämns som MIRA. MIRA är dock ett varunamn och det finns även liknande utrustning som fungerar på ungefär samma sätt, se t ex ([www.screeningeagle.com](http://www.screeningeagle.com)). Metoden bygger på ultraljudsskjuvvågstomografi. Metoden är baserad på ett lågfrekvent ultraljudssystem som kan upptäcka inre defekter i armerad betong såsom hålrum och delaminering. MIRA är baserad på ultraljuds-pitch-catch-metoden och använder en antenn som består av en rad torrpunktskontaktgivare, som avger skjuvvågor i betongen. En fördel med att använda MIRA är dess skanningsdjup, som penetrerar upp till 1 m i kraftigt armerade betongkonstruktioner och upp till 2 m i lågt armerade betongkonstruktioner. Styrenheten inuti antennen exciterar en rad av omvandlare och de andra raderna av omvandlare fungerar som mottagare.



Figur 31 Skanning av defekter med MIRA-instrument: (a-d) arbetsprincip; (e) Komponenter i MIRA-systemet, (Choi m.fl., 2016)

Fas I i Figur 31 visar den första raden av omvandlare som fungerar som sändare och de återstående raderna av omvandlare som fungerar som mottagare. Förflyttning till den andra raden där nu mottagaren fungerar som sändare visas i Fas II, här exciteras nästa rad av givare och de andra raderna till höger fungerar som mottagare. Denna process upprepas tills var och en av de 10 raderna av givare har fungerat som sändare, se Figur 31 a) - c). Om det finns ett tillräckligt stort gränssnitt mellan betong och luft (en defekt) inuti elementet, kommer en del av den utsända vågen att reflekteras av defekten som illustreras i Figur 31d). Komponenterna i MIRA-systemet presenteras i Figur 31 e) och består av ett fasstyrt antensystem, en bärbar dator med MIRA-mjukvara (mjukvaran är baserad på SAFT - Synthetic Aperture Focusing Technique) och en kraftenhet. För att utföra en skanning lägger användaren ut en serie parallella skanningslinjer på den yta som ska undersökas. Signalerna som fångas av antennen överförs automatiskt till datorn, där SAFT-algoritmen används för att rekonstruera en 3D-modell av betongens inre struktur. Resultaten illustreras som en färgkarta där de röda områdena indikerar intensiva vågreflektioner, dvs närvaro av olika materialgränssnitt (såsom stål, luft etc.), se Figur 32. I Tabell 11 UPE Tomografi teknikens möjligheter och begränsningar redovisas möjligheter och begränsningar med ovan beskrivna system.



Figur 32 Ultraljudsskjuvståg tomografi: (a) 3D MIRA-resultat (Choi m.fl., 2016) och (b) MIRA Tomographer

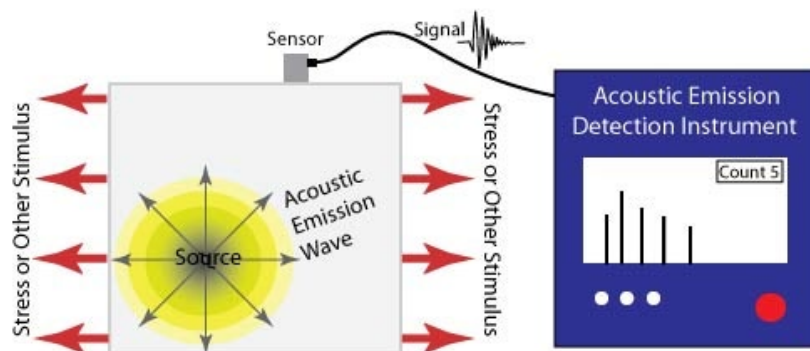
Tabell 11 UPE Tomografi teknikens möjligheter och begränsningar

Defekter	UPE MIRA används i första hand för betongkonstruktioner. MIRA kan inte lokalisera defekter i spännrådor i interna foderrör. MIRA kan lokalisera tomrum bristfälligt injektering och vatteninfiltration i foderrör med bra noggrannhet.
Placering av foderrör	Foderrör hittas med GPR. Processen för att gå över foderröret är sedan relativt snabb.
Typ av foderrör	Tillämpbart på foderrör av metall såväl som icke metall. Tillämpbar på foderrör placerade i betongen
Effekt av täcksikt	Täckskiktet påverkar ej nämnbart
Påverkan av flera lager av foderrör	Foderrör i "skugga" kan vara svåra att erhålla resultat från.
Påverkan av tät armering	Tät armering påverkar mätningen negativt
Korrosion	Ingen möjlighet att detektera korrosion
Krav på tillgänglighet	Området som krävs är utrustningens storlek och ytan bör vara plan. Man jobbar sedan i 10 cm segment längs foderröret.



## Akustisk emission (AE)

Akustisk emission (AE) hänvisar till genereringen av transienta elastiska vågor som produceras av en plötslig omfördelning av spänning i ett material, t ex propagering av sprickor i betong. När en struktur utsätts för en extern påverkan (förändring i tryck, belastning eller temperatur) utlöser lokala källor frigöring av energi, i form av spänningsvågor, som utbreder sig till ytan och registreras av sensorer, se Figur 33



Figur 33 Förenklad funktion av AE-metoden (från [www.nde-ed.org](http://www.nde-ed.org))

En akustisk testmetod involverar en serie av enstaka sensorer (minst 4) eller en rad sensorer fästa på ytan på en konstruktion (Kaiser & Karbhari, 2004). Ultraljudssignaler som frigörs genom sprickbildning registreras. Information, såsom brusamplitud, energi, varaktighet och spricktyp (sprickbildning, delaminering, sprickbildning) kan fångas. Aktiva sprickor kan identifieras och lokaliseras innan sprickan kan mätas. Med ökad skadebild i betongen förändras reflektionstiden. Inga signaler uppstår när sprickan inte är aktiv, dvs när den inte propagerar under belastning. Filtrering av buller från trafik, befintliga sprickor etc. är nödvändigt.

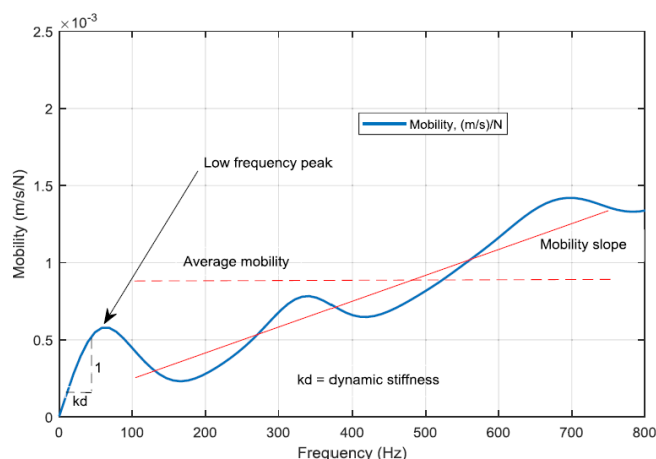
Akustisk emission skiljer sig från de flesta andra oförstörande provningsmetoder (OFP) i två avseenden. Den första skillnaden hänför sig till signalens ursprung. Istället för att tillföra energi till föremålet som undersöks, lyssnar AE helt enkelt efter den energi som frigörs av föremålet. AE-tester utförs ofta på konstruktioner under drift, eftersom detta ger tillräcklig belastning för att sprida defekter och utlösa de akustiska emissionerna. Den andra skillnaden är att AE handlar om dynamiska processer, eller förändringar, i ett material. Detta är särskilt meningsfullt eftersom endast aktiva egenskaper (t.ex. spricktillväxt) påverkas. Förmågan att skilja mellan propagerande och avstannande defekter är betydande. Det är dock möjligt att sprickpropagering inte upptäcks helt om belastningen inte är tillräckligt hög för att orsaka en akustisk händelse. Dessutom ger AE-testning vanligtvis en omedelbar indikation på bärförmåga eller risken för brott hos en byggnadsdel. Andra fördelar med AE inkluderar snabb och fullständig volymetrisk inspektion med hjälp av flera sensorer, permanent sensormontering för processkontroll och inget behov av att plocka isär och rengöra ett prov. Tyvärr kan AE-system endast kvalitativt mäta hur mycket skada som finns i en struktur. För att få kvantitativa resultat om en dels storlek, djup och övergripande acceptans, är andra OFP-metoder (ofta ultraljudstestning) nödvändiga.

Tabell 12 AE-teknikens möjligheter och begränsningar

Defekter	AE kan inte urskilja statiska defekter, men kan användas under belastning för att upptäcka pågående defekter. Skulle t ex kunna vara brott i spännlinor.
Placering av foderrör	Ja
Typ av foderrör	Inte tillämbart
Effekt av täcksikt	Inte tillämbart
Påverkan av flera lager av foderrör	Inte tillämbart
Påverkan av tät armering	Inte tillämbart
Korrosion	Kan inte upptäcka korrosion, men ska kunna upptäcka brott i kablar på grund av korrosion över tid
Krav på tillgänglighet	Behöver tillgänglighet för sensorerna, och många sensorer kan behövas för stora konstruktioner.

### Impulse Response (IR)

Impulse response använder sig av en stöt som ger en relativt låg påkänning, vilket åstadkoms av en instrumenterad hammare med gummispets, för att skicka spänningsvågor genom det elementet/konstruktionsdel som ska undersökas. Stöten får elementet att vibrera i ett böjningsläge och en geofon placerad intill islagspunkten, mäter hastighet och amplituden på den reflekterande vågen. Det resulterande hastighetsspektrumet divideras med slagkraftspektrumet för att erhålla rörligheten som en funktion av frekvensen. Genom Fouriertransformation analyseras information och härleds därefter till 4 parametrar (genomsnittlig rörlighet (average mobility), rörlighetslutning (mobility slope), dynamisk styvhet (dynamic stiffness) och hålrumsförhållande (void index)) som används för integritetsutvärdering av det undersökta området representerat visuellt med konturplottar. I Figur 34 visas 3 av de 4 parametrarna grafiskt (Sajid & Chouinard, 2019). Här framgår tydligt genomsnittlig rörlighet, vilket beräknas som medelvärdet mellan frekvensspannet 100 – 800 Hz. Den dynamisk styvheten beräknas av lutningen på kurvan mellan 0 – 40 Hz och den sk rörlighetslutningen är bästa möjliga kurvanpassning. Hålrumsindex beräknas som förhållande mellan toppen på kurvan vanligtvis under 100 Hz och den genomsnittliga rörligheten. IR är inte direkt tillämplig för att hitta hålrum i foderrör, men är en kraftig metod för att kartlägga t ex delamineringar. I Tabell 13 visas teknikens möjligheter och begränsningar med tanke på spännarmerade konstruktioner.



Figur 34 Typiskt diagram över rörligheten som funktion av frekvens, (Sajid & Chouinard, 2019)

Tabell 13 IR-teknikens möjligheter och begränsningar

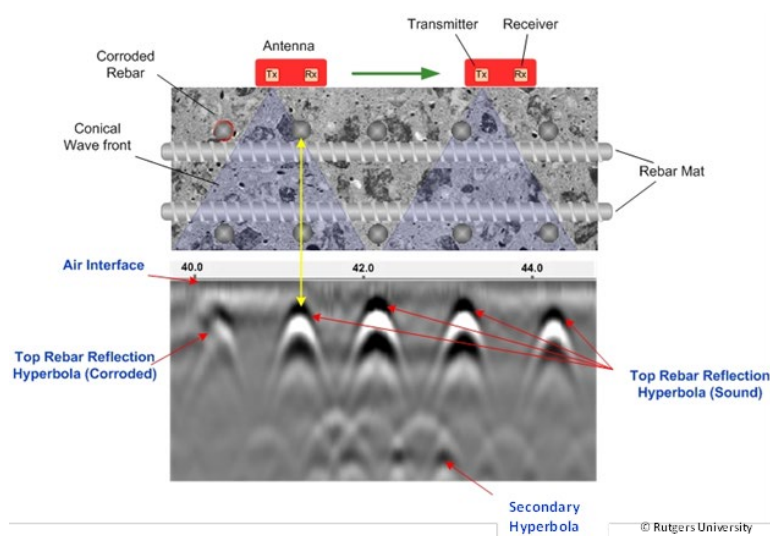
Defekter	IR används i första hand för att hitta delamineringar samt hålrum i betong.
Placering av foderrör	Nej
Typ av foderrör	Inte tillämbart
Effekt av täcksikt	Inte tillämbart
Påverkan av flera lager av foderrör	Inte tillämbart
Påverkan av tät armering	Inte tillämbart
Korrosion	Inte tillämbart
Krav på tillgänglighet	Behöver åtkomst för hammarslag och geofon, normalt undersöks ytor mer än 1 m <sup>2</sup> .

## Elektromagnetiska metoder

### Georadar (GPR)

Denna metod applicerar elektromagnetiska vågor genom att en eller två antenner förs över betongytan. Det är viktigt att notera att om variationen i de olika materialens dielektriska egenskaper är låg, kommer endast en liten mängd energi att reflekteras. Till exempel kan elektromagnetiska vågor inte penetrera något metallskikt. Formen på konstruktionselementen (t.ex. armeringsjärns diameter) eller materialinhomogeniteter är svåra eller inte alls möjliga att uppskatta. Denna metod används ofta för inspektion av den inre strukturen av byggnadselement gjorda av armerad eller efterspänd betong samt murverk, för att upptäcka och lokalisera inhomogeniteter (hålrum, metall- eller träinneslutning), tjocklek på strukturer som endast är åtkomliga från en sida, intern struktur av komplexa element, samt i vissa fall för att bestämma fukthalten och dess fördelning. I Figur 35 visas ett exempel på användningen av GPR.

Utvärderingen av resultaten är mycket beroende av befintliga algoritmer och användargränssnitt. Möjligheterna och begränsningarna för GPR-inspektionstekniken diskuteras i Tabell 14 GPR-teknikens möjligheter och begränsningar.



Figur 35 Georadar (GRP) (<https://fhwaapps.fhwa.dot.gov>)

Tabell 14 GPR-teknikens möjligheter och begränsningar

Defekter	GPR kan upptäcka defekter i betong. GPR kan inte upptäcka defekter i spännlinor i externa foderrör av HDPE (High Density Polyethylene). Den kan upptäcka tomrum i externa HDPE-foderrör med måttlig noggrannhet, men kan inte kvantifiera tomrummets volym. Den kan också upptäcka skadad injekteringsbruk och vatteninfiltrationsdefekter i externa HDPE-kanaler med låg noggrannhet. GPR kan inte upptäcka linor- eller defekter i externa foderrör av metall, kan inte heller detektera hålrum eller eventuella defekter för spännlinor i interna foderrör. Kan detektera placering av interna foderrör.
Placering av foderrör	Används för att lokalisera placering av foderrör i betong. Har använts för att lokalisera håligheter i externa foderrör.
Typ av foderrör	Tillämpbart på foderrör av metall såväl som icke metall
Effekt av täcksikt	Effekten av täcksiktet är beroende av skanningsfrekvensen. För höga frekvenser (~500–3000 MHz) kan penetrationsdjupet vanligtvis överstiga 600 mm. Signalen störs dock av tät armering.
Påverkan av flera lager av foderrör	GPR kan ha svårt att lokalisera foderrör i skugga på grund av de stora reflektionerna från spännarmering och foderrör närmast ytan.
Påverkan av tät armering	Närvaron av stål reflekterar starkt de elektromagnetiska vågorna, vilket starkt påverkar GPR:s förmåga att lokalisera foderrör, särskilt i förankringsområdena.
Korrosion	Kan eventuellt upptäcka korrosion, men måste ha större ytor, stor osäkerhet. Svårt att utvärdera.
Krav på tillgänglighet	Området som krävs för GPR-skanning är beroende på typ av GPR. För markkopplad GPR-inspektion krävs att enhetens hjul är i fysisk kontakt med konstruktionen för att säkerställa att hjulen vrider sig som också fungerar som avståndsmätare. Skapandet av en 3D-bild kräver antingen en 0,5 x 0,5 m eller 0,5 x 1,2 m manuellt tillgänglig testyta. Testning inom förankringsområdet ger vanligtvis inte användbar information på grund av den stora volymen av den starkt reflekterande förstärkningsburen som finns i förankringszonerna. Skanning för många utrustningar görs såväl som en linjeskanning som en areaskanning.

## Täckskiktsmätare

Ett lågfrekvent magnetfält appliceras på betongkonstruktionens yta; förekomsten av armering förändrar magnetfältet, och en mätning av denna förändring ger information om armeringens placering. Täckmätarundersökningar ingår i de flesta tillståndsbedömningar av byggnader eller anläggningskonstruktioner i betong. Undersökning med täckskiktsmätare kan också lokalisera huvud- och sekundärarmering för att bestämma dimensioner, avstånd mellan armering, för att bestämma minsta täckskiktets tjocklek och dess variation, och täckningsvariabilitet över ett element. I Figur 36 visas typiskt användning samt utrustning för täckskiktsmätning och i Tabell 15 har möjligheter och begränsningar sammanställts.



Figur 36 Användning av täckningsmätare, från (<http://www.proceq.com>)

Tabell 15 Möjligheter och begränsningar för täcksiktmetare

Defekter	CM kan inte upptäcka defekter i betong
Placering av foderrör	CM kan detektera foderrör beroende på avstånd till röret, ca < 150 mm
Typ av foderrör	Om det är önskvärt att detektera foderröret, är CM endast tillämpbar på metalliska foderrör.
Effekt av täcksikt	Täckskiktets tjocklek påverkar metodens noggrannhet
Påverkan av flera lager av foderrör	Inte tillämpbart
Påverkan av tät armering	I kraftigt armerade områden kan armeringsplacering och armeringens dimension vara svårt att utvärdera.
Korrosion	Inte tillämpbart
Krav på tillgänglighet	Utrustningen är normalt handhållen och kommer lätt åt de flesta områden. Men för stora ytor kan metoden vara tidskrävande.

# LABORATORIEFÖRSÖK

## Inledning

Avdelningen för Byggkonstruktion vid Luleå tekniska universitet har en lång tradition när det gäller att tillståndsbedöma och förstärka befintliga betongkonstruktioner. Brukandet av oförstörande provningsmetoder har dock varit begränsat. Intresset av olika tekniker för tillståndsbedömning initierades genom det genom EU-finansierade projektet Sustainable Bridges mellan åren 2004 och 2008 där en av arbetsområdena bl a omfattade oförstörande provning. Det skulle dock dröja till 2019 innan vi började undersöka tekniker mer strukturerat, (Hammarström, 2019) med ett uppföljande projekt gällande oförstörande provning av betongbroar (Hedlund, 2020). Dessa projekt visade på styrkan i tekniker för oförstörande provning. Projektet lyfte även upp en del frågeställningar och tydliggjorde behovet av att kombinera olika tekniker beroende på den defekt som skulle undersökas. I samband med dessa arbeten uppkom ett antal frågetecken gällande spännarmerade broar och eventuella problem med hålrum i foderrör och korrosion hos spännkablar där en bro undersöktes i Norge, (Karlsson m. fl. 2020) där resultatet från denna undersökning redovisas i appendix.

I detta avsnitt redovisas resultat i huvudsak från examensarbetet utfört av (Hedlund, 2020) då detta även ligger till grund för problematiken med hålrum i foderrör. I samband med denna undersökning tillverkades en provkropp i betong försedd med olika defekter att undersöka med OFP. Nedanredovisas också kortfattat försök med GPR på för den anpassade provkroppar från (Hammarström, 2019).

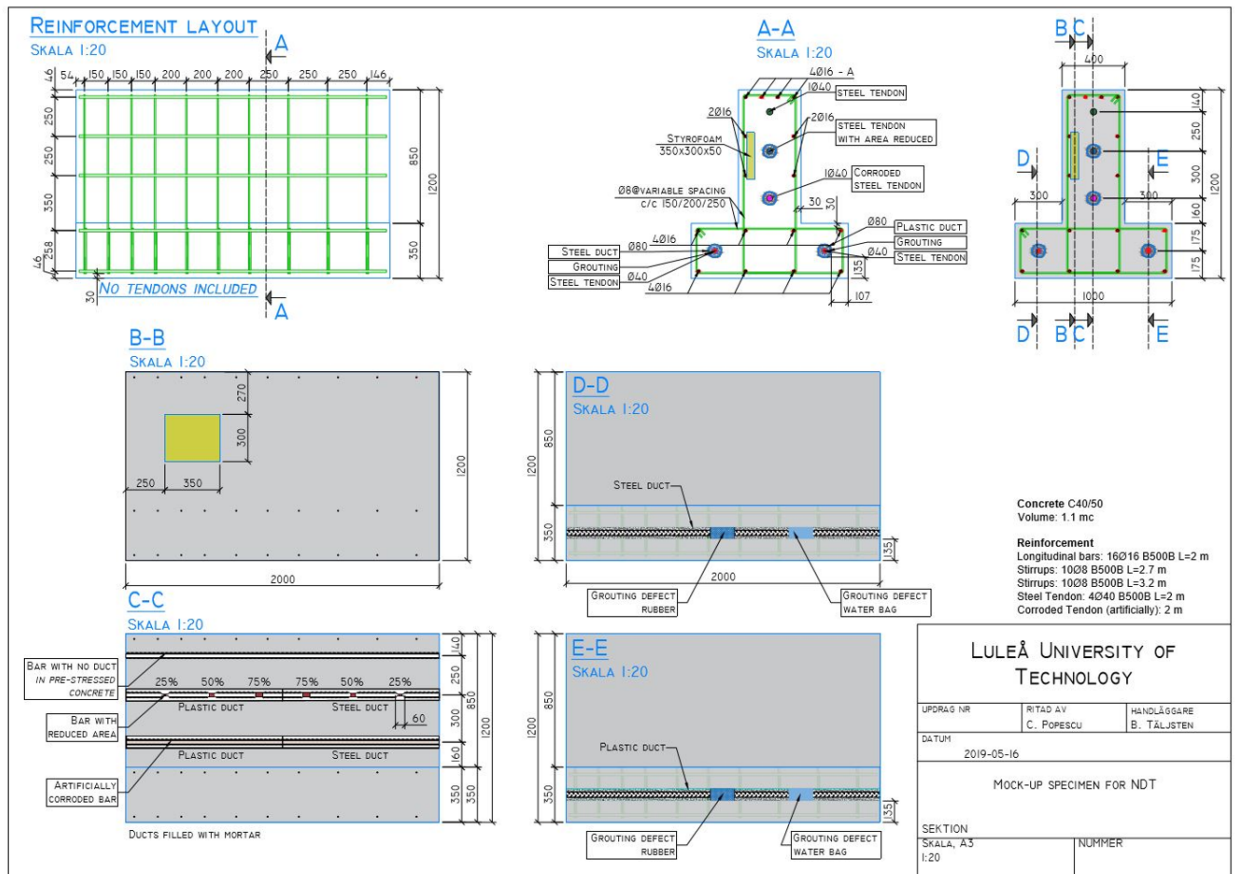
## Begränsningar

Som i de flesta projekt kan omfattningen på undersökningar behöva begränsas, så även i detta fall. Trots en relativt stor provkropp (Mock-Up) så visade det sig att den hade behövt vara ännu större för att OFP teknikerna skulle komma till sin rätt, dessutom var det alltför många defekter på små ytor. I tillägg till detta hade universitetet begränsad tillgång till OFP utrustning. I samtliga fall användes ospänd armering, även i foderrör. Vidare var det inte möjligt att skapa riktigt korrosion på armering utan detta simulerades genom att minska diametern. Nåväl, lärandet från undersökningen var stort och detta har därefter byggts på genom ett flertal projekt i fält vilka bl a redovisas i kommande avsnitt.

## Mock-Up

### Allmänt

I Figur 37 visas provkroppen som använts i försöken. Provkroppen är utformad som en upp-och-nedvänd T-balk med 2.0 m längd, och höjden 1,2 m. Underflänsen är 350 mm hög och bredden på livet 400 mm. Betongen som användes var en C30/37 med tryckhållfastheten  $44.2 \pm 1.6$  MPa efter 28dygn provade på cylindrar, detta indikerar dock att betongklassen var närmare C35/45. Genomgående används stålqualität B500B. Dimensioner på armeringen framgår av ritningen i Figur 37.



Figur 37 Provkropp för oförstörande provning av defekter, (Hedlund, 2020)

Följande parametrar avsågs att undersökas:

- Armerings placering och betongens täckskikt
- Foderrörs placering och hålrum samt vatten i foderrör
- Skillnad mellan foderrör i stål och i plast
- Korrosion hos armering – modellerat som minskad diameter hos armering
- Defekter som motsvara delaminering med hjälp av polystyren
- Betongens hållfasthet och elasticitetsmodul
- Sprickdjup för en annan preparerad provkropp

De utrustningar som används vid försöket var:

Profometer 650 AI - Profometern fungerar som en metalldetektor som använder virvelströmpulsinduktion för att detektera metall. Dessa strömmar som induceras av armeringen och skapar sitt eget magnetfält och den resulterande förändringen i spänningen används för att mäta avståndet till armeringen. Utrustningen kan ses som en något mer avancerad täckskiktstämätare.

Studshammare - RockSchmidt hammare används för att uppskatta styrkan hos ett material. Ofta är det nödvändigt att först jämna till ytan med en slipsten. Minst 10 stötar bör göras i en serie och avståndet mellan stötar bör vara minst kolvens bredd. Det är också viktigt att hålla hammaren vinkelrätt mot testytan. Resultatet kalibreras i tabell och ger en uppskattning av tryckhållfastheten.

Ultraljudspulshastighet (UPV) - Pundit PL-200 ultraljudspulshastighet kan användas för många olika ändamål. Denna enhet använder högfrekventa ljudvågor genom materialet och ultraljudsvågornas olika hastighet beror på betongens densitet. Man kan också med denna teknik registrera sprickbredd samt uppskatta tryckhållfasthet och E-modul hos betongen.

Ultraljud tomografi – MIRA – avancerad ultraljudsutrustning som kan användas för att kartlägga hålrum i foderrör, tjocklek hos betongkonstruktioner och även delamineringar. Utrustningen hade lånats in från Invator AB och var ny vid tillfället vilket medförde att utrustningen inte kunde utnyttjas fullt ut.

Impact Echo (IE) – Docter - används för att detektera håligheter och delamineringar, denna metod är relativt avancerad och kräver erfarenhet från den personal som genomför undersökningen.

Som kan noteras är den bredd på utrustning som använts begränsad, bl a var önskemålet även att en GPR (georadar skulle användas), dock var den tillgängliga för stor för provkroppen så resultatet var väldigt bristfälligt. Dock hade andra provkroppar undersökts tidigare med GPR (Hammarström E., 2019). De presenterade fältprovningarna kan dock delvis kompensera för brister i utrustning på laboratorienivå.

### Tillverkning av Mock-Up

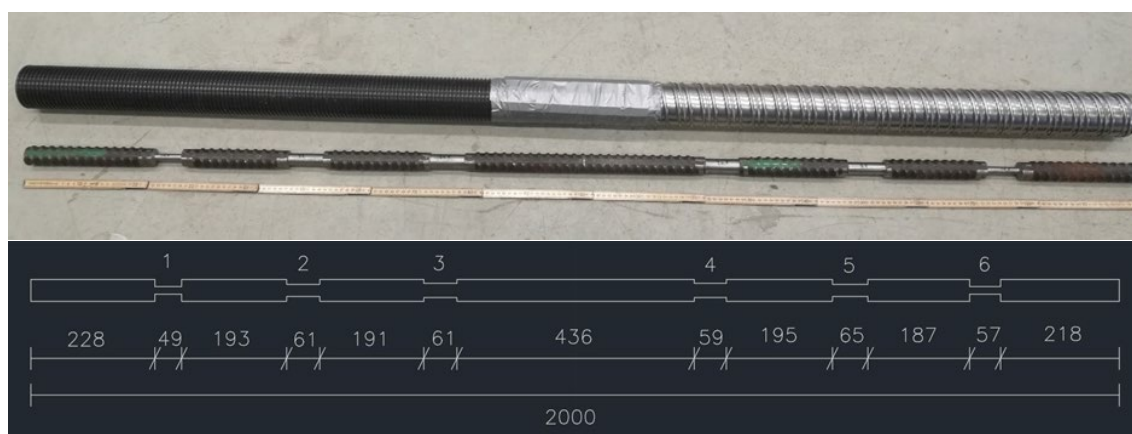
I Tabell 16 har en kort sammanställning av tillverkningen av provkroppen ställts samman i form av foton och kommentarer. Det bör nämnas att i samband med gjutningen skapades en utbuktning i livet på grund av formtrycket. Foderrören hade diameter 80 mm i vilka stålarmering, B500B, med diameter 40 mm placerades centriskt. Armeringen svarvades i sektioner till mindre diameter för att simulera korroderad armering, tvärsnittsminskning samt utbredningen av denna redovisas i Tabell 16. Ett foderrör kombinerades med plåt och plast, den andra från ovansidan sett. Vidare simulerades håligheter och delaminering med ingjuten polystyren dessutom undersökes effekt av placering av vatten i foderröret. Samtliga 4 foderrör injekterades med ett ospecificerat cementbruk. Defekters placering framgår av ritningen i Figur 37.

### Laboratorieförsök med GPR

För GPR-mätningarna har Quantum Mini från USRadar använts. Quantum Mini ger skanningar på 1000 MHz och 2000 MHz samtidigt, vilket gör det möjligt att både ge en högupplöst skanning nära ytan och en lågupplöst skanning längre ned. Det anges att man med 1000 MHz-antennen kan nå ett djup av 1,8 meter, men i fält kan det variera beroende på situation och material, t ex fuktighet och densitet. Funktionen med dubbla frekvenser gör det lättare att tolka resultat och ökar enhetens mångsidighet för olika betongkonstruktioner. Enheten måste ha kontakt med underlaget, vilket i optimala fall ger liten eller ingen störning av ytan. Avståndet för skanningen mäts genom ett av bakhjulen. Apparaten konstrueras möjliggör vertikala mätningar samt mätningar på något lutande ytor. Enheten tillhandahåller också ett laserinriktningssystem, vilket säkerställer ett enkelt sätt att följa linjer längs ett rutnät. Enheten har en inbyggd dator som möjliggör komplex efterbearbetning under skanning men det är också möjligt att exportera data till en dator för vidare efterbearbetning, (USRadar, 2018). I Figur 38 visas den enhet som använts i försöken och i visas den platta som har undersökts, b x h x t = 1.0 x 4.4 x 0.3. Endast armeringens placering undersöktes, se Figur 39. Undersökningen följde ett schema, där specifika linjer på plattan följdes, se Figur 40.



Tabell 16 Tillverkning av provkropp – fotocollage med kommentarer



Armering med delvis avtunnad diameter för att simulera korroderad armering



Ingjuten defekt i form av polystyren



Ingjuten defekt för att simulera delaminering



Ingjuten behållare med vatten. Injekterat foderrör kan noteras i vänster hörn



Armeringskorg



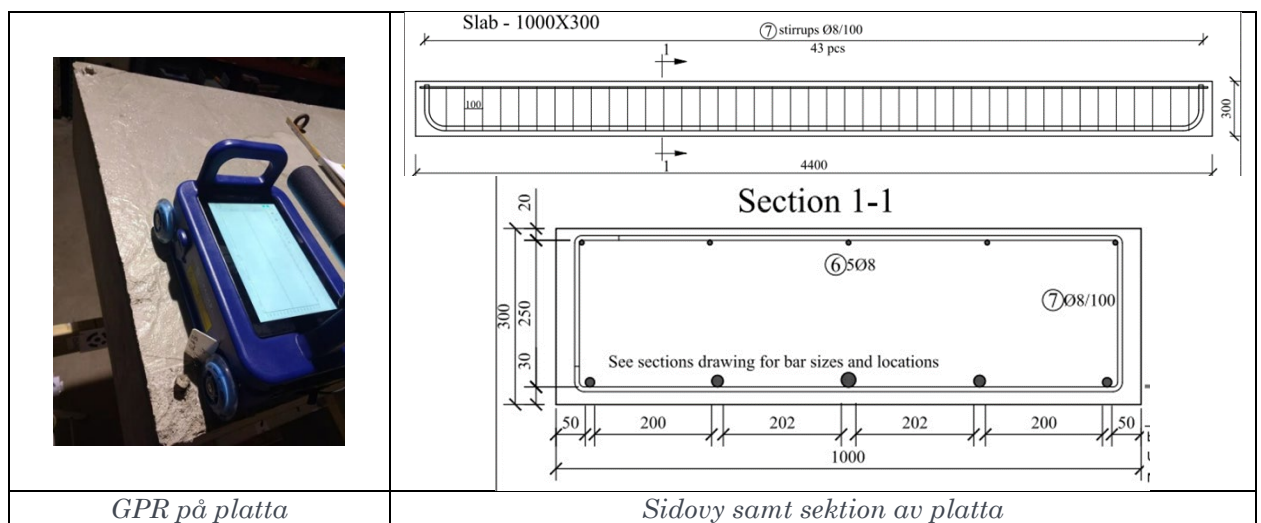
Montering av armeringskorg samt foderrör



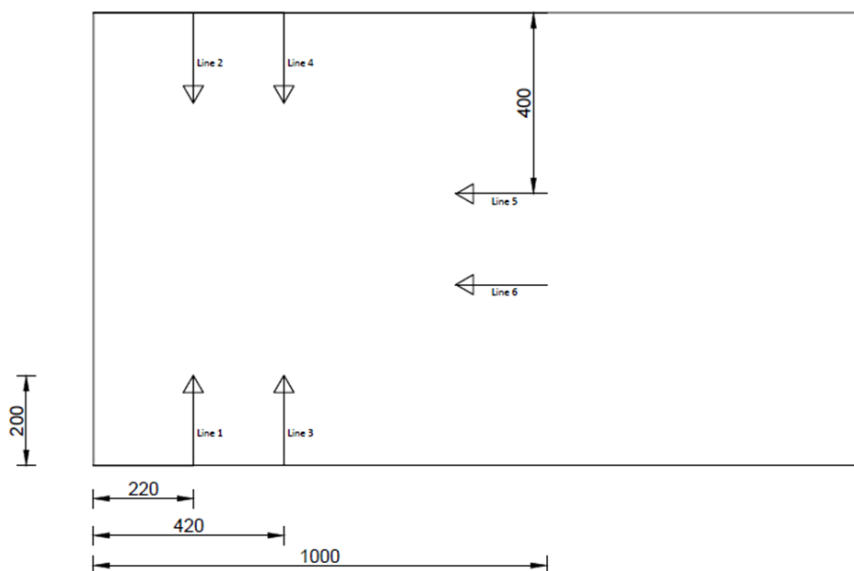
Färdig provkropp



Figur 38 GPR Quantum Mini, (USRadar, 2018)



Figur 39 Provplatta som undersöktes med GPR (Georadar), (Hammarström, 2019)

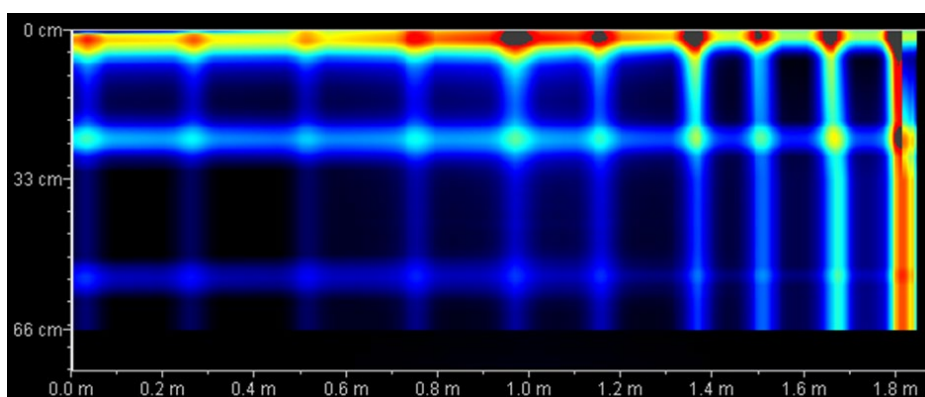


Figur 40 GPR:n följde de 6 specifika linjerna ovan, (Hammarström, 2019)

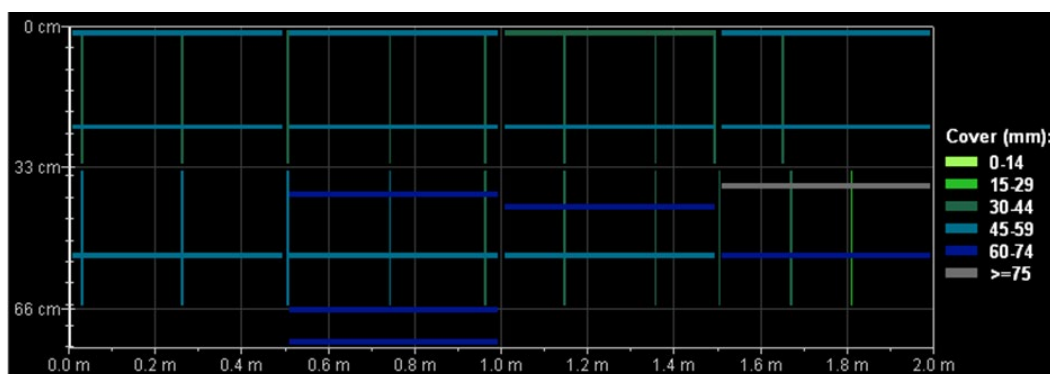
Varje pil indikerar en läsning framåt i pilens riktning. Två tester i motsatta riktningar på varje sida gjordes tvärs över bredden för att ordentligt täcka hela längden, av praktiska skäl måste testerna börja ca 20-30 cm från kanten beroende på GPR:ns storlek. På grund av symmetri gjordes tester bara på ena halvan av plattan.

## Resultat

Resultatet från laborieförsöken med Mock-Up:en samt betongplatta kan sammanfattas enligt följande: Resultatet av mätningarna av armerings- och täckskiktetsmätningarna med Profometern är sammanfattningsvis bra. Vissa värden är lite avvikande men det råder ingen tvekan om hur armeringen är placerad. Korslinjemätningarna visar en korrekt bild av armeringen i T-balken, vilket också framgår av Figur 41. Armeringens täckskikt framgår också tydligt i Figur 42.



Figur 41 Armeringens placering i T-balkens liv, (Hedlund N., 2020)



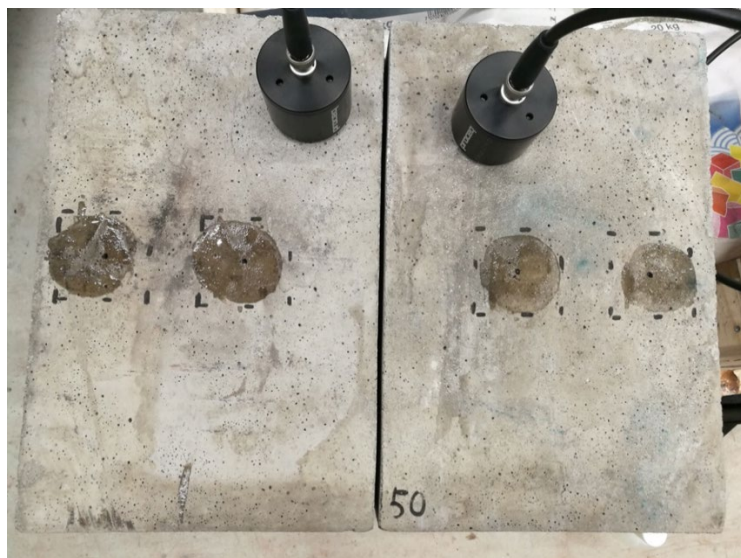
Figur 42 Armeringens täckskikt i T-balkens liv, (Hedlund, 2020)

Jämför man dock det verkliga täckskiktet med det som redovisas av täckskiktetsmätaren är det dock inte helt överensstämmande utan avvikelserna är ca  $\pm 10\%$ . Om detta beror på noggrannhet hos mätutrustningen eller den verkliga placeringen är inte helt klart eftersom det uppstod en förskjutning i gjutformen i samband med gjutning och armeringen har inte frilagts.

Betongens tryckhållfasthet mättes dels med studshammare dels med ultraljud. Den verkliga hållfastheten mätt på cylindrar vid 28d var som tidigare nämnts  $44.2 \pm 1.6$  MPa. Mätning med ultraljud gav  $43.5 \pm 0.6$  MPa mätt i 4 punkter samt med studshammaren, mätt på 18 punkter, ca  $45.0 \pm 2.0$  MPa enligt ASTM C805. Det betyder att såväl ultraljud som studshammare i det aktuella fallet var i god överensstämmelse med de verkliga provresultaten från tryckprov på betongcylindrar. När det gäller E-modulen så provades inte den i laboriet utan endast med ultraljud.

Resultatet från denna mätning gav ett värde på  $29.3 \pm 1.6$  GPa, tabulerade värden för E-modul för betong C30/37 respektive C34/45 till mellan 33 – 34 GPa så värdet skiljer sig något åt även om det är i samma härad.

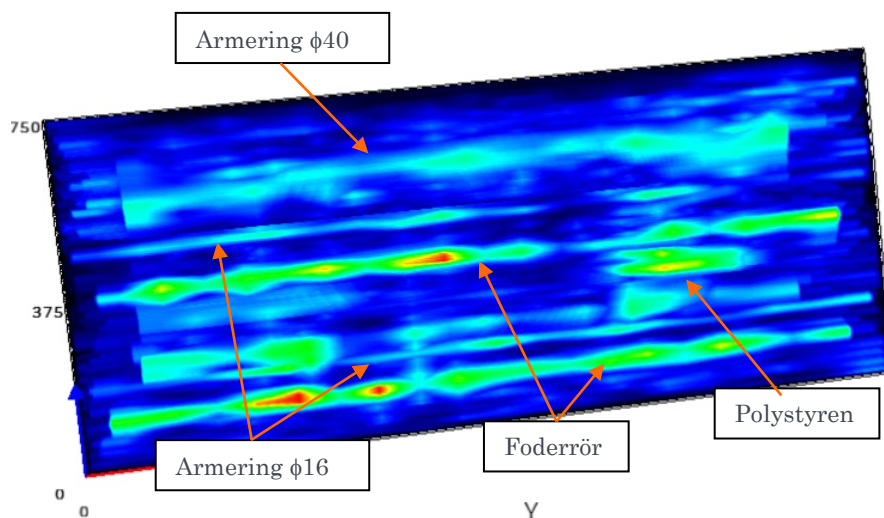
Med ultraljudsutrustningen Pundit PL-200 mättes sprickdjupet på en befintlig provkropp med en förtillverkad spricka med sprickdjupet 50 mm, se Figur 43



Figur 43 Provkropp med sprickdjup av 50 mm, (Hedlund, 2020)

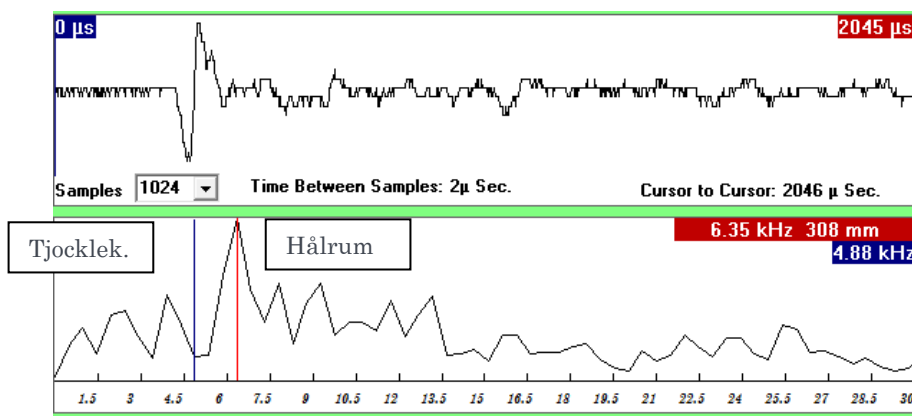
Provkropp med sprickdjup av 50 mm, (Hedlund, 2020) användes. Denna provkropp är inte optimal, dels är den något liten för att sonda ska kunna placeras korrekt, mätningen görs vid två placeringar, där sonda placeras 10 respektive 20 cm från spricka och 5 avläsningar genomförs, dels störs signaler från ränderna på grund av storleken. I detta fall behövde sonda placeras 8 respektive 16 cm från varandra för att få plats. Orsaken till att denna provkropp användes var att den fanns tillgänglig i labbet och syftet i första hand var att prova utrustningen och dess funktion. För övrigt följs standard ASTM C1383 vilket förenklat innebär att man mäter tiden det tar för ljudvågen att färdas från sändare till mottagare, dvs mellan sonda. Ju djupare spricka desto längre tid. Mätningen med ultraljud gav resultat mellan 41 – 45 mm där det verkliga värdet var 50 mm. Det är inte helt överensstämmande men med tanke på felkällorna så kan det anses accepterbart.

Vidare mättes defekter med tomografi – MIRA. Denna utrustning är relativt avancerad och inkörningstiden i samband med provning i labbet var något kort. Dock kunde vi tydligt registrera flera defekter och foderrör men den mindre artificiella hålrummen var svåra att lokalisera, se Figur 44. Med tanke på att detta var den första gången vi applicerade denna teknik är resultaten bra.



Figur 44 Resultat från MIRA, mätning i livet, (Karlsson m.fl., 2020)

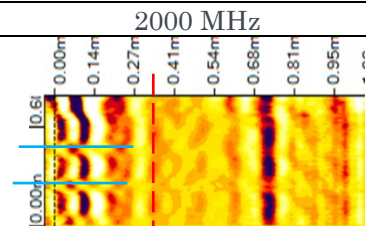
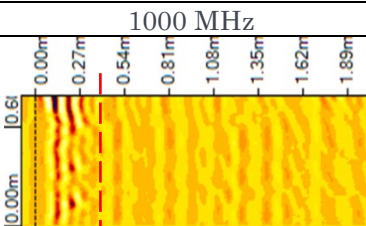
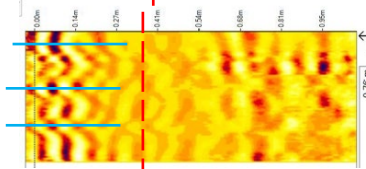
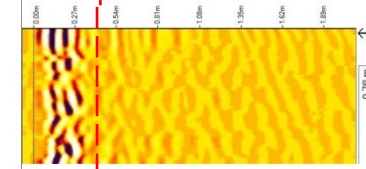
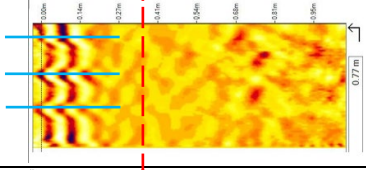
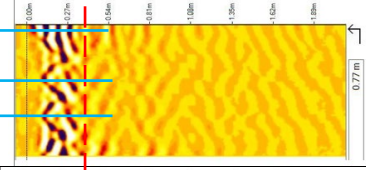
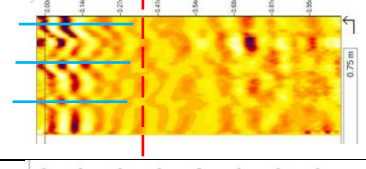
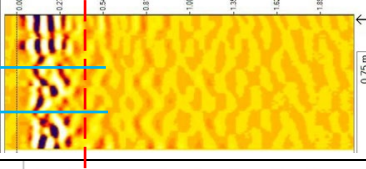
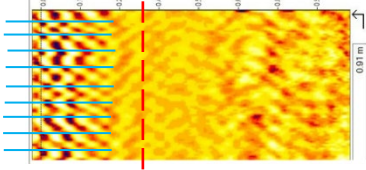
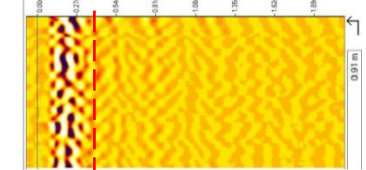
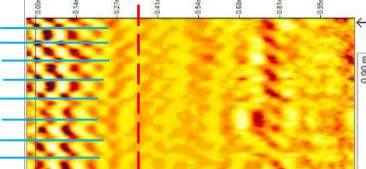
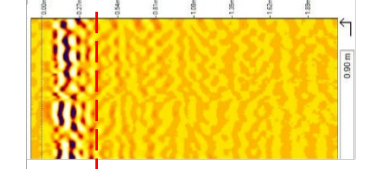
Resultaten från IE (Impact Echo) var väldigt intressant och här var det möjligt att lokalisera hålrum, i alla fall när vi visste var de fanns. Denna utrustning är avancerad och har en inkörningströskel vilket innebär att relativt mycket tid behövs läggs ner för att förstå hur provningen skulle genomföras och hur resultaten skulle tolkas. I Figur 45 visas resultatet från en mätning där ett av hålrummen har kunnat lokaliseras.



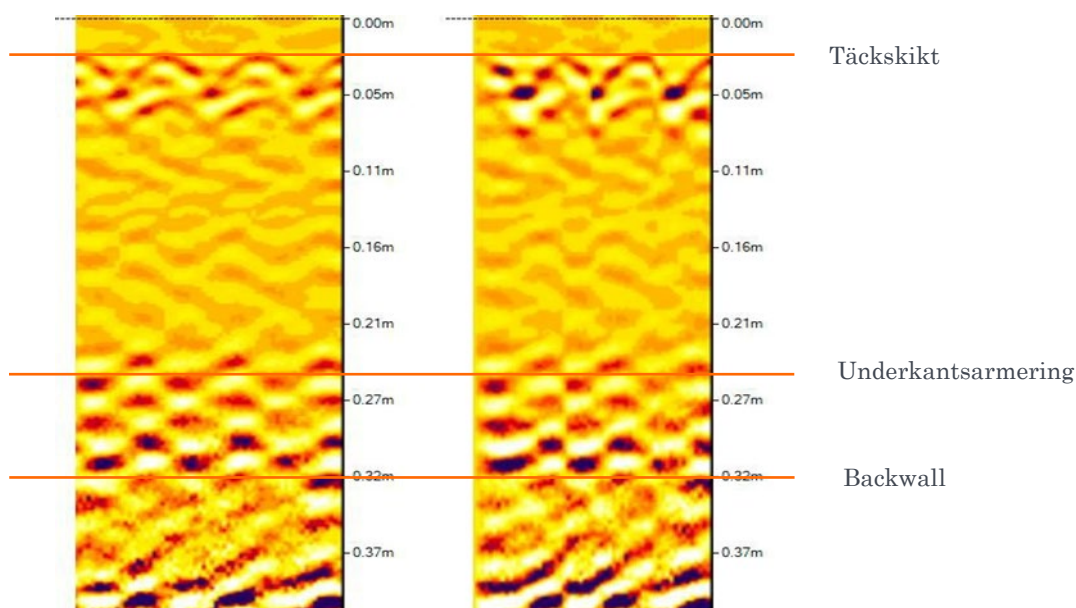
Figur 45 Resultat från IE med en registrerad defekt på 308 mm, (Karlsson m. fl., 2020)

Resultatet från undersökning med georadar (GPR) gjordes på en separat betongplatta, (Hammarström, 2019). Resultaten är generellt en besvikelse även om det gick att lokalisera armeringen i samtliga linjer 1-6, se Tabell 17, där överkanten på plattan är till vänster. Det framgår inte tydligt längden på mätningarna. Tjockleken på plattan är dock 300 mm så värden över detta skall bortses ifrån, därav den röda streckade linjen i varje skanning. Prov gjordes såväl för bandvidden 2000 som för 1000 MHz. Ju högre frekvens desto kortare vågor och desto tydligare skall armeringen närmast ytan framkomma, lägre frekvens skall ge bättre signaler längre ner i konstruktionen. I Figur 39 ses tvärsnittet av den studerade plattan.

Tabell 17 Lokalisering av armering över samtliga linjer 1-6, (Hammarström, 2019)

Linje	2000 MHz	1000 MHz	Kommentar
1			<u>Längsarmering</u> Skanning från ca 150 mm in till ca 750 mm. Man ska då kunna notera 3 stänger, 2 kan noteras. Går inte att notera något för 1000 MHz.
2			<u>Längsarmering</u> Skanning från ca 150 mm till 900 mm, här kan 3 stänger noteras för 2000 MHz
3			<u>Längsarmering</u> Skanning från ca 150 mm till 900 mm, här kan 3 stänger noteras för 2000 MHz. Även för 1000 MHz kan armeringen noteras.
4			<u>Längsarmering</u> Skanning från ca 150 mm till 900 mm, här kan 3 stänger noteras för 2000 MHz. Även för 1000 MHz kan armeringen noteras.
5			<u>Tvärkraftsarmering</u>
6			<u>Tvärkraftsarmering</u>

Baksidan av plattan skall normalt ge en stark reflektion, sk "backwall". Det är svårt att konsekvent notera detta där den streckade linjen finns – för prov 1 - 4. På 270 mm skall även underkantsarmeringen kunna noteras, detta kan göras för 1000 MHz skanning, men inte för 2000 MHz, det är dock svårt att kartlägga avståndet mellan underkantsarmeringen. Överkantsarmeringen skall noteras på ca 20 mm från överkant med ett cc-avstånd på ca 200 mm, detta kan också noteras för skanningarna 1 – 4, se de blåa linjerna. Även tvärkraftsarmeringen kan noteras, här ser vi 8-9 stänger över de skannade 900 mm, cc-avståndet är ca 100 mm. De generella kommentarerna från försöken md GPR är att den utrustning som användes inte är lämplig för den relativt lilla plattan, dock var det den enda som fanns tillgänglig. Upplösningen är medioker och det är svårt att kartlägga placering av armering. Underkantsarmeringen är i det närmaste omöjlig att detektera om man inte vet var den är belägen. Därtill är täckskikten svåra att kartlägga. Dock var det möjligt att post-processa data från den aktuella GPR skannern vilket då kunde tydliggöra såväl täckskikt som tjocklek på bjälklaget, se Figur 46. Dessa skanningar är gjorda för 1000 MHz, och det går att notera ett täckskikt på ca 20 mm, även backwallen syns på ca 320 mm, något större än verklig. Även underkantsarmeringen går att notera på ca 250 - 270 mm, om man vet var den är placerad.



Figur 46 Tjocklek och täckskikt av bjälklag, (Hammarström, 2019)

Sammanfattningsvis har försöken med de olika utrustningarna varit mycket värdefull och lärandet har varit stort. Ett antal misstag på grund av okunnighet kan noteras bl a att Mock-Up:en skulle varit större och defekterna tydligare, möjligen att provkroppar med olika defekter skulle ha tillverkats. Därtill kunde noteras brist på utrustning vilket försvårade utvärderingen. Sammantaget har dock dessa försök lett till en bättre möjlighet att kartlägga betongkonstruktioner i fält och belyst vilka utrustningar som är mest lämpliga att använda, vilket också redovisas i kommande avsnitt.

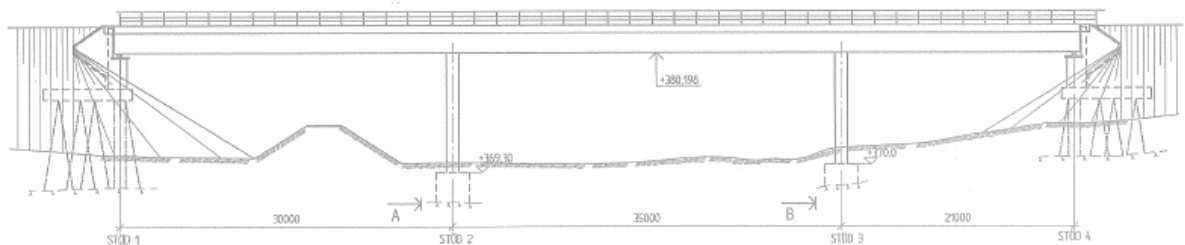
# FÄLTTILLÄMPNINGAR

## Inledning

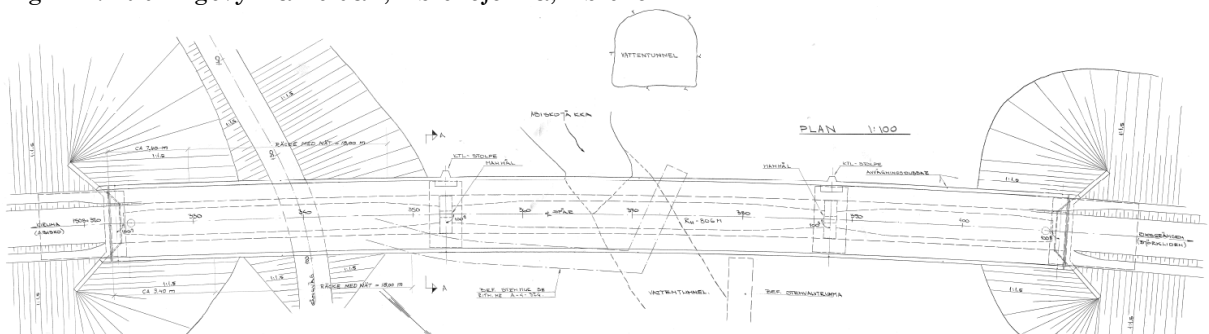
### Bro över Abiskoajokka

#### Bakgrund

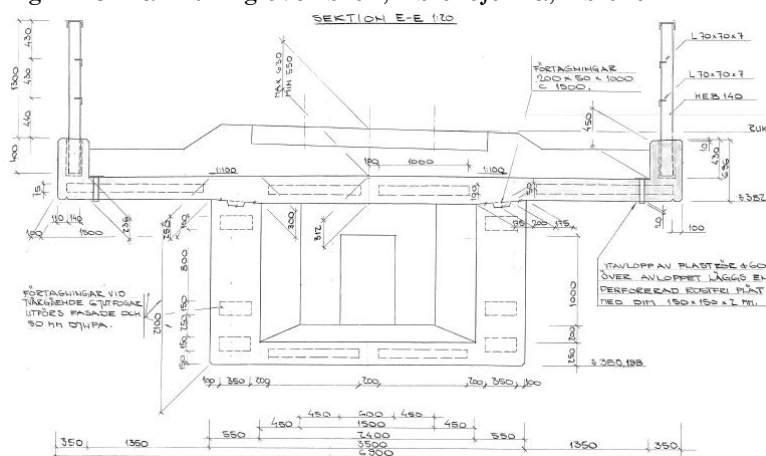
Bro 3500-2142-1 över Abiskoajokka i Abisko, spänner totalt över 86 m i tre spann, med en krökning av radien 806 m, i längderna 30 m, 35 m och 21 m från det östra lagerstödet. Den är spännarmerad med totalt 12 spännanordningar, av typ 44Ø6 BBRV, per sida av brolådan. och är del av Malmbanan mellan Luleå och Narvik. I Figur 47 och Figur 48 nedan kan bron ses från sidan och från ovan. I Figur 49 framgår tvärsnittet på bron. Notera att brotvärsnittet får en större dimension vad gäller brolådans liv(väggar) samt brolådans under fläns(golv) när lådan passerar pelarstöden motsvarande stöd 2 och 3 från Figur 47.



Figur 47 Ritningsvy från sidan, Abiskoajokka, Abisko



Figur 48 Planritning över bron, Abiskoajokka, Abisko



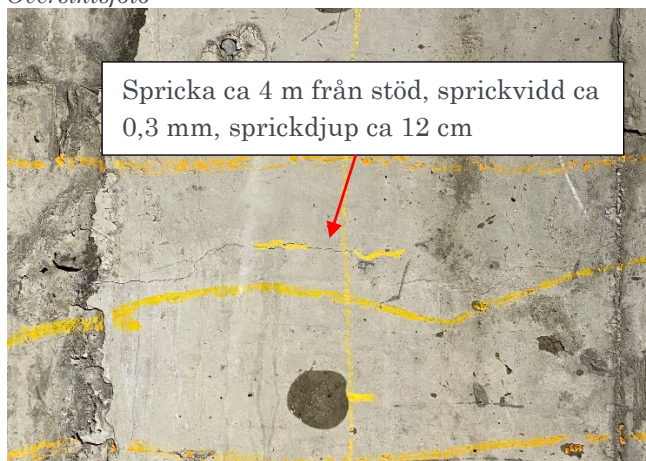
Figur 49 Sektionsritning genom bron, Abiskoajokka, Abisko



Byggstart för bron var 1978 och de största lastpåkänningarna fås från malmtågen då bron är en del av Malmbanan som sträcker sig från Kiruna i Sverige, till Narvik i Norge. Sprickor i livet har noterats och undersökningar har rapporterats, bl a från WSP 2016 där en gedigen sprickkartering har genomförts. Det föreligger oklarheter gällande när sprickorna uppkom samt dess orsak. Mätutrustning har installerats på bron och sprickrörelser samt accelerationer har mätts mellan 2019 och 2021. Resultaten från mätningen rapporteras inte här, men visar på att sprickorna är stabila och tillväxer inte vare sig beroende på temperatur eller tåglast. Detta avsnitt redovisar oförstörande provning på bron, omfattande kartläggning av täcksikt, sprickdjup, samt placering av spännkablar och eventuella hålrum i foderrör. Detta fältprojekt är ett av de första efter oförstörande prover på Mock-Up hade genomförts vid laboratoriet vid Luleå tekniska universitet och skall i första hand ses som ett utvecklingsprojekt för att kartlägga och praktiskt hantera olika utrustningar för oförstörande provning och i andra hand användning av denna utrustning för tillståndsbedömning. I Figur 50 visas ett översiktsfoto av bron och tillsammans med typiska sprickor i spann 1 mot stöd 2 för det norra livet.



*Översiktsfoto*



*Sprickor i Norra livet ca 4.0 m från stöd 2*

**Figur 50** Översiktsfoto samt sprickor i liv, bro över Abiskojojokka

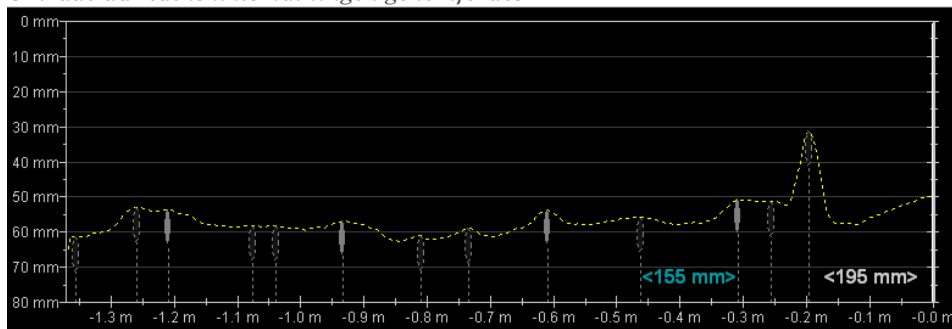
## Oförstörande provning

### Täckskiktsmätning

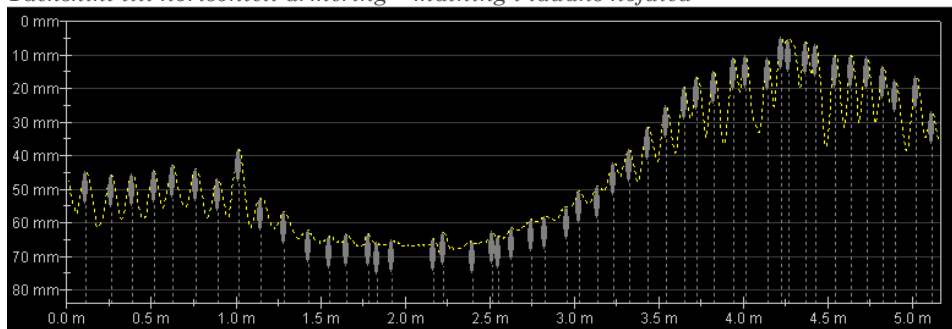
Täckskiktsmätning genomfördes i samtliga spann och såväl i liv som flänsar. Här redovisas dock endast mätning i spann 1 från stöd 2 och riktning väster (mot Luleå) och norra livet, se område och riktning i Figur 51. Det är också dessa sektioner som de mest framträdande sprickorna registrerats, dvs där livet ändra tvärsnitt. Den utrustning som använts för täckskiktsmätningen är Profometer 650 AI från Proceq, se Figur 52



Område där täckskiktsmätningen genomfördes



Täckskikt till horisontell armering – mätning i lådans höjded



Täckskikt till vertikal armering – mätning i lådans längsled

Figur 51 Täckskiktsmätning i spann 1 vis stöd 2 riktning mot Luleå (Väster)

Från resultatet med täckskiktsmätaren framgår det att c-c avståndet för den vertikala armeringen är ca 300 mm och för den vertikala armeringen ca 100 mm. Vad som dock kan noteras är att täckskiktet för den horisontella armeringen ligger på ca 30 – 60 mm, där de flesta armeringsjärn är placerade kring ca 55 mm. För den vertikala armeringen är variationen större och går från ca 10 – 70 mm – speciellt i snittet ca 4 – 4.5 m från stöd 2 är täckskiktet endast ca 10 mm.



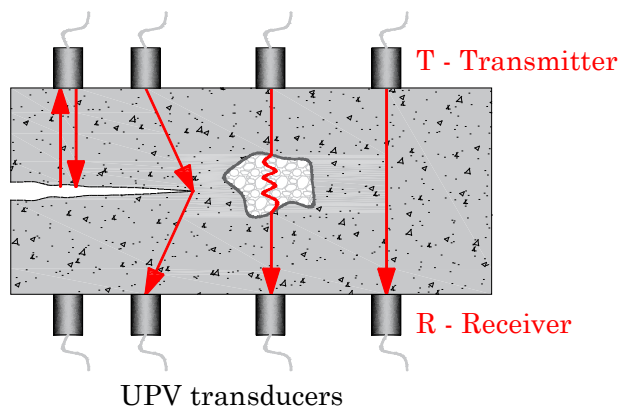
Figur 52 Proceq Profometer 650 AI ([www.screeningeagle.com](http://www.screeningeagle.com)).

### Mätning av sprickdjup

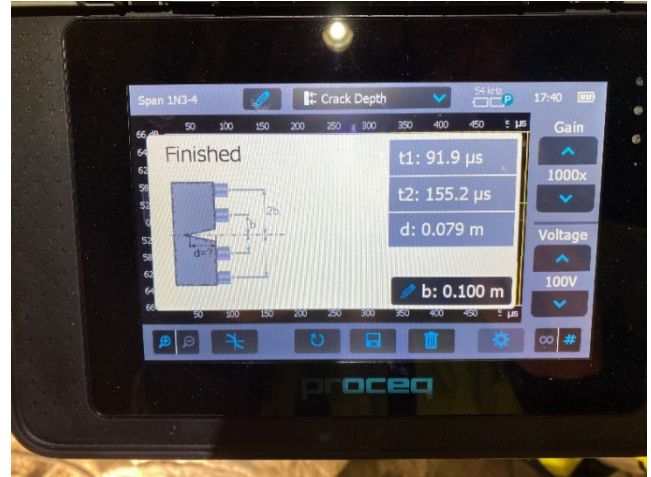
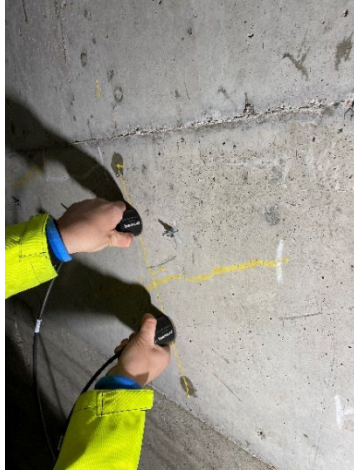
Detta delprojekt täcker identifiering av sprickor och mätning inom utvalda områden av sprickdjup samt elasticitetsmodul hos betongen med hjälp av ultraljud.

#### *OFP utrustning och metod*

Den oförstörande provningen (OFP) av sprickor och E-modul genomfördes med en Pundit PL-200 från Proceq. Utrustningen fungerar på så sätt att den sänder ut ultraljudspuls som färdas genom betongen eller studsar mot sprickor eller håligheter. Den kan registrera sprickdjup och E-modul och även ojämnheter parallellt med ytan. Principen framgår av Figur 53 där man mäter den tid som en ultraljudspuls färdas genom en känd tjocklek. I Figur 54 visas praktiskt hur mätningen utförs samt ett typiskt resultat.



Figur 53 Ultraljudspulsmätning i ett betongelement



Figur 54 Sprickdjupsmätning och resultat – vi ser att sprickdjupet i detta fall är 79 mm

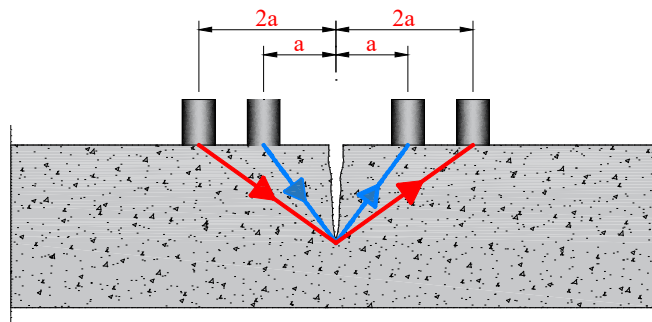
### Sprickdjup

Sprickdjupet har bestämts längs existerande sprickor som fanns i varje spann. Mätningen utfördes i område med största sprickvidder, och om detta inte var möjligt, i områden där betongytan var slät och där det var lätt att komma åt.

Två cirkulära handhållna givare, 54 kHz, monterades på instrumentet, de ses i Figur 54 till vänster. En fungerar som sändare och den andra som mottagare. Transittiden av ultraljudsvågorna registrerades på två olika platser enligt ett speciellt förfarande, se Figur 55, och sprickdjupet beräknades i enlighet med standarden (BS 1881:Part 203). Bestämning av sprickdjupet kan då utföras genom oförstörande provning med den så kallade "time-of-flight" tekniken. Denna teknik innebär att spänningsvågor genereras på ena sidan av sprickan, där tiden från sändning till mottagning registreras på motsatta sida av sprickan, se figur 3. Sprickdjupet kan sedan beräknas enligt ekvation (1).

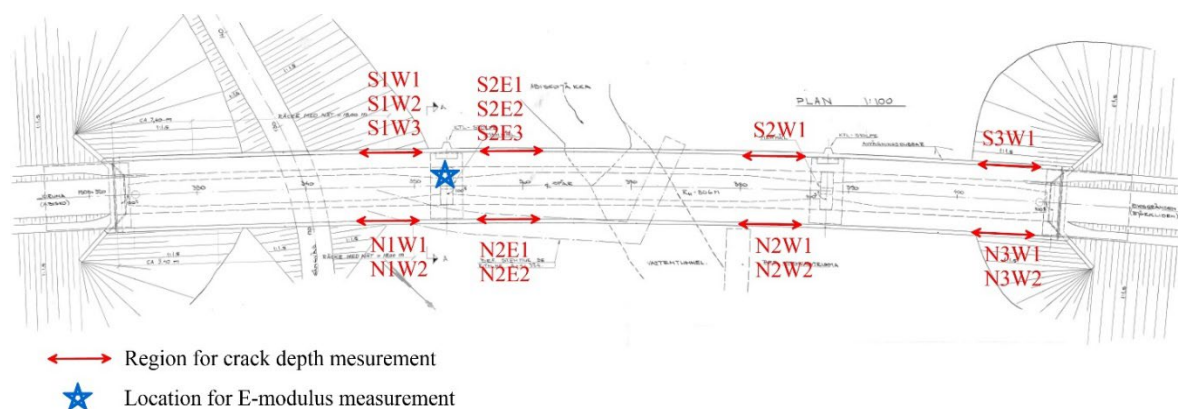
$$d = a \sqrt{\frac{4t_1^2 - t_2^2}{t_2^2 - t_1^2}} \quad (1)$$

Här anger  $d$  sprickdjupet,  $t_1$  transittiden för den första positionen med längd  $a$  i figur 3,  $t_2$  transittiden för den andra positionen med längd  $2a$  i Figur 55. För att resultatet av mätningen ska bli bra krävs noggrant förarbete. Detta innebär slipning av betongytan för att erhålla en slät och jämn yta. Därefter mäter man upp distanserna  $a=50$  mm, samt  $2a=100$  mm. I de punkter som man mätt upp appliceras akustisk mätgel – därefter påbörjas mätningen och slutligen erhålls sprickdjupet direkt i instrumentet, se figur 2.



Figur 55 Principen för sprickdjupsmätning. Två positioner krävs.

Områden där sprickdjupsmätningarna genomfördes visas i Figur 56. Namnkonventionen refererar till balkarnas (livens) position, dvs N:Norra eller S:Söder och numret på spannet, 1, 2 eller 3 samt den individuella sprickmätningen. Till exempel mätpunkt S2W1 motsvarar sprickdjupsmätningen för en spricka lokaliserad i andra spannet på södra balken och på spannets västra sida. Här var det endast möjligt att göra mätningar på en spricka.



Figur 56 Utsatta mätpunkter

### *Betongens elasticitetsmodul*

Uppmätning av betongens e-modul genomfördes på betongväggen över det första stöden mellan första och andra spannet. Både P- och S-vågor uppmättes, S-vågor med 54 kHz givaren och P-vågor med 40 kHz torrpunkts skjuvvågsgivare (Dry-Point Shear Wave transducer). Instrumentet beräknar E-modulen i realtid. E-modulen mättes upp i tre olika punkter i samma område, se figur 4, den blåa stjärnan. Här har vi antagit en densitet hos betong av 2 400 kg/m<sup>3</sup> och avståndet (tjockleken på väggen) mellan givarna var 1,2 m. När man mäter E-modul måste givarna placeras mot varandra, dvs genom betongen. Detta var orsaken till varför betongväggen över stöd valdes – den var lätt att komma åt.

### *Resultat från mätningarna*

#### Sprickdjup – Södra balken

Mätresultat från sprickdjupsmätningarna för den södra balken (livet) redovisas i Tabell 18.

Resultaten visar på ett minsta sprickdjup av ca 30 mm och ett maximalt sprickdjup på ca 170 mm. Det minsta sprickdjupet uppmättes i det andra spannet medan det största i det första spannet.

#### Sprickdjup Norra balken

Mätresultat från sprickdjupsmätningarna i den norra balken (livet) redovisas i Tabell 19. Resultaten visar på ett minsta sprickdjup av ca 50 mm och ett maximalt sprickdjup på ca 110 mm. Det minsta sprickdjupet uppmättes i det andra spannet medan det största i det första spannet. Detta motsvarar det som mätes för den södra balken. Sprickdjupen var i medeltal mindre för den norra balken i jämförelse med den södra.

Tabell 18 Sprickdjupsmätningar för den södra balken (livet) avrundat till 10-tal

Mätning	Resultat (mm)	Benämning	Datum och tid
<b>Spann 1 – södra balken -spricka #1 - #3   W</b>			
Sprickdjup	100	S1W1-1	2020-04-18 11:29
Sprickdjup	130	S1W1-2	2020-04-18 11:30
Sprickdjup	170	S1W1-3	2020-04-18 11:31
<b>Medelvärde</b>	<b>130</b>	<b>S1W1</b>	
Sprickdjup	210	S1W2-1	2020-04-18 11:36
Sprickdjup	190	S1W2-2	2020-04-18 11:38
Sprickdjup	130	S1W2-3	2020-04-18 11:39
Sprickdjup	150	S1W2-4	2020-04-18 11:40
<b>Medelvärde</b>	<b>170</b>	<b>S1W2</b>	
Sprickdjup	130	S1W3-1	2020-04-18 11:43
Sprickdjup	120	S1W3-2	2020-04-18 11:44
Sprickdjup	120	S1W3-3	2020-04-18 11:44
Sprickdjup	130	S1W3-4	2020-04-18 11:45
<b>Medelvärde</b>	<b>120</b>	<b>S1W3</b>	
<b>Spann 2 södra balken sprick #1   W</b>			
Sprickdjup	30	S2W1-1	2020-04-17 18:55
Sprickdjup	30	S2W1-2	2020-04-17 18:57
Sprickdjup	30	S2W1-3	2020-04-17 18:58
Sprickdjup	20	S2W1-4	2020-04-17 19:02
Sprickdjup	40	S2W1-5	2020-04-17 19:07
<b>Medelvärde</b>	<b>30</b>	<b>S2W1</b>	
<b>Spann 2 – södra balken - spricka #1 - #3   E</b>			
Sprickdjup	100	S2E1-1	2020-04-18 10:12
Sprickdjup	60	S2E1-2	2020-04-18 10:18
Sprickdjup	50	S2E1-3	2020-04-18 10:19
Sprickdjup	50	S2E1-4	2020-04-18 10:21
<b>Medelvärde</b>	<b>60</b>	<b>S2E1</b>	
Sprickdjup	40	S2E2-1	2020-04-18 10:26
Sprickdjup	80	S2E2-2	2020-04-18 10:29
Sprickdjup	50	S2E2-3	2020-04-18 10:31
Sprickdjup	40	S2E2-4	2020-04-18 10:33
<b>Medelvärde</b>	<b>50</b>	<b>S2E2</b>	
Sprickdjup	60	S2E3-1	2020-04-18 10:39
Sprickdjup	90	S2E3-2	2020-04-18 10:40
Sprickdjup	50	S2E3-3	2020-04-18 10:41
Sprickdjup	90	S2E3-4	2020-04-18 10:43
Sprickdjup	60	S2E3-5	2020-04-18 10:45
<b>Medelvärde</b>	<b>70</b>	<b>S2E3</b>	
<b>Spann 3 – södra balken – spricka #1   W</b>			
Sprickdjup	50	S3W1-1	2020-04-18 11:00
Sprickdjup	80	S3W1-2	2020-04-18 11:01
Sprickdjup	70	S3W1-3	2020-04-18 11:02
Sprickdjup	80	S3W1-4	2020-04-18 11:03
<b>Medelvärde</b>	<b>70</b>	<b>S3W1</b>	

Tabell 19 Sprickdjupsmätningar för den norra balken (livet) avrundat till 10-tal

Mätning	Resultat (mm)	Benämning	Datum och tid
<b>Spann 1 - norra balken - spricka #1 - #2   W</b>			
Sprickdjup	60	N1W1-1	2020-04-18 11:49
Sprickdjup	40	N1W1-2	2020-04-18 11:50
Sprickdjup	110	N1W1-3	2020-04-18 11:52
Sprickdjup	110	N1W1-4	2020-04-18 11:57
Sprickdjup h	100	N1W1-5	2020-04-18 11:58
<b>Medelvärde</b>	<b>80</b>	<b>N1W1</b>	
Sprickdjup	130	N1W2-1	2020-04-18 12:03
Sprickdjup	110	N1W2-2	2020-04-18 12:06
Sprickdjup	90	N1W2-3	2020-04-18 12:07
Sprickdjup	100	N1W2-4	2020-04-18 12:07
Sprickdjup	100	N1W2-4	2020-04-18 12:07
<b>Medelvärde</b>	<b>110</b>	<b>N1W2</b>	
<b>Spann 2 - norra balken - spricka #1 - #2   W</b>			
Sprickdjup	60	N2W1-1	2020-04-17 18:14
Sprickdjup	50	N2W1-2	2020-04-17 18:17
Sprickdjup	40	N2W1-3	2020-04-17 18:21
Sprickdjup	60	N2W1-4	2020-04-17 18:24
<b>Medelvärde</b>	<b>50</b>	<b>N2W1</b>	
Sprickdjup	80	N2W2-1	2020-04-17 18:28
Sprickdjup	40	N2W2-2	2020-04-17 18:30
Sprickdjup	50	N2W2-3	2020-04-17 18:44
Sprickdjup	60	N2W2-4	2020-04-17 18:46
Sprickdjup	80	N2W2-5	2020-04-17 18:47
<b>Medelvärde</b>	<b>60</b>	<b>N2W2</b>	
<b>Spann 2 - norra balken - spricka #1 - #2   E</b>			
Sprickdjup	90	N2E1-1	2020-04-18 09:44
Sprickdjup	70	N2E1-2	2020-04-18 09:46
Sprickdjup	60	N2E1-3	2020-04-18 09:48
<b>Medelvärde</b>	<b>70</b>	<b>N2E1</b>	
Sprickdjup	80	N2E2-1	2020-04-18 09:57
Sprickdjup	60	N2E2-2	2020-04-18 09:58
Sprickdjup	100	N2E2-3	2020-04-18 10:01
Sprickdjup	70	N2E2-4	2020-04-18 10:04
<b>Medelvärde</b>	<b>80</b>	<b>N2E2</b>	
<b>Spann 3 - norra balken - spricka #1   W</b>			
Sprickdjup	90	N3W1-1	2020-04-18 11:08
Sprickdjup	20	N3W1-2	2020-04-17 18:16
Sprickdjup	90	N3W1-3	2020-04-18 11:11
Sprickdjup	90	N3W1-4	2020-04-18 11:12
<b>Medelvärde</b>	<b>70</b>	<b>N3W1</b>	
Sprickdjup	100	N3W2-1	2020-04-18 11:16
Sprickdjup	100	N3W2-2	2020-04-18 11:17
Sprickdjup	80	N3W2-3	2020-04-18 11:18
Sprickdjup	90	N3W2-4	2020-04-18 11:19
<b>Medelvärde</b>	<b>90</b>	<b>N3W2</b>	

### Betongens elasticitetsmodul

Resultaten från mätningen av betongens E-modul redovisas i Tabell 20. Medelvärdet på E-på mätningarna uppgick till 40.8 GPa med ett medelvärde på tvärkontraktionstalet på 0.23.

Tabell 20 Resultat från uppmätning av betongens E-modul, densitet 2 400 kg/m<sup>3</sup>

Mätning	Resultat (GPa)	Benämning	Datum och tid	Tvärkontraktionstal
E-Modul	39.0	Support1_E1	2020-04-18 14:47	0.23
E-Modul	38.3	Support1_E2	2020-04-18 14:55	0.23
E-Modul	45.0	Support1_E3	2020-04-18 14:56	0.24
<b>Medelvärde</b>	<b>40.8 ± 3.7</b>			<b>0,23</b>

### Slutsatser från ultraljudsmätningarna – sprickdjup och elasticitetsmodul

UPV-tekniken användes för att undersöka sprickdjup hos utvalda sprickor i järnvägsbron över Abiskojärka. Det största uppmätta sprickdjupet i undersökningen uppgick till 170 mm, men det var också flera sprickor som var större än 100 mm. Detta betyder att sprickdjupet är väsentligt i förhållande till tjockleken på väggen som i de uppmätta områdena varierar mellan ca 400 – 550 mm. Sprickvidden i sin tur är dock väldigt begränsad och tidigare mätningar ger vid handen att den understiger 1.0 mm på samtliga platser. Oroande är dock att dessa sprickor förekommer trots att konstruktionen är spännarmerad. Den uppmätta elasticitetsmodulen uppgick till ca 41 MPa vilket indikerar på en bra betong i betongklass överstigande C50/C60. Dock har för få områden uppmätts för att detta ska kunna anses gälla hela bron.

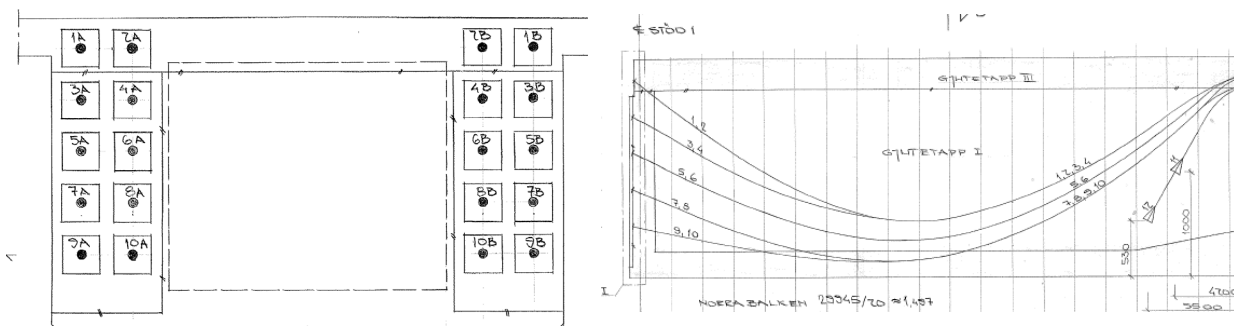
### GPR och ultraljud

Järnvägsbron över Abiskojärka är en spännarmerad lådbro i tre spann. Att kartlägga spännkablar placering är relativt enkelt, att däremot kartlägga eventuella defekter är komplicerat. I detta delprojekt undersöker vi möjligheten att kartlägga eventuella defekter hos spännkabelsystemet. Undersökningen är inte fullständig utan täcker endast en mindre del, det västra spannet mot upplaget. Den utrustning som använts för undersökningen är:

- Täcksiktmetare (proseq Profoscope+)
- GPR Proseq GP 8000
- Ultraljud (Ultrasonic Pulse Echo – MIRA)

### Kort beskrivning av undersökt sektion

Den sektion som undersöktes visas i Figur 57, totalt finns 10 spännkablar i detta snitt – även kablarnas utbredning framgår av denna figur där den vänstra sidan är österut. Kablarna A är söderut och kablarna B norrut. Anledningen att denna sektion valdes är att det är tillräckligt komplicerat för att prova mättekniken samtidigt som delar av tvärsnittet är enkelt att komma åt. Endast kablar B undersöktes.



Figur 57 Undersökt tvärsnitt

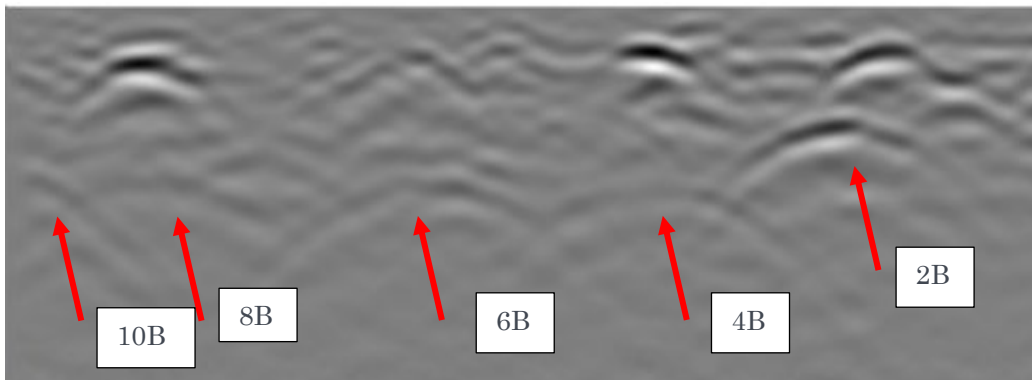


### Genomförd mätning

De olika mätinstrumenten användes dels för att lokalisera foderrör och kablarnas placering, GPR, dels för att kartlägga slakarmeringens placering och tjockleken på täckskiktet, täckskiktsmätaren, samt för att mer noggrann kartlägga foderrören och eventuella defekter som t ex hålrum, ultraljudsmätning med MIRA. Ett ytterligare instrument som kunnat användas är Impact Echo – detta instrument kan kartlägga håligheter än mer i detalj och slutligen kan man borra upp och verifiera/undersöka i samband med endoskop. Täckskiktmetaren visade att täckskiktet till slakarmering varierade mellan ca 40 upp till 60-70 mm i undersökt spann. Fokus är dock i detta fall foderrör och spännkablar. Bron har endast skannats från insidan av brolådan.

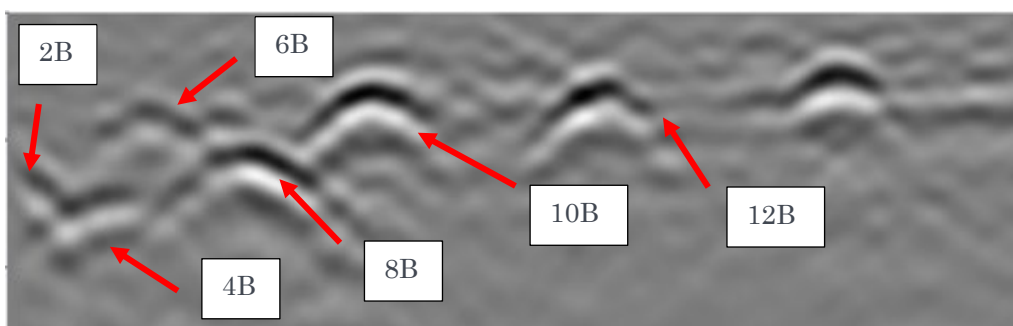
### Resultat från GPR

Den första skanningen utfördes på den norra balken ca 2 meter från det östra upplaget, här ska man kunna komma åt att hitta alla 5 kablar i höjdded (10 totalt per sida). Enligt ritningarna är kablarna/foderrören närmast insidan placerade på ett djup av ca 150 mm samt ytterligare 5 kablar på ett djup av ca 400 mm från insidan. Tjockleken på balken/livet är ca 550 mm. Mätning med GPR gav att de inre kablarna/foderrören kunde lokaliseras, fyra på avståndet 150 mm och den översta på 120 mm. Det yttre lagret av spännkablar kunde inte lokaliseras med GPR:n eftersom dom var placerade för djupt, se också Figur 58.



Figur 58 Resultat från mätning med GPR i snittet ca 2 m från det östra upplaget

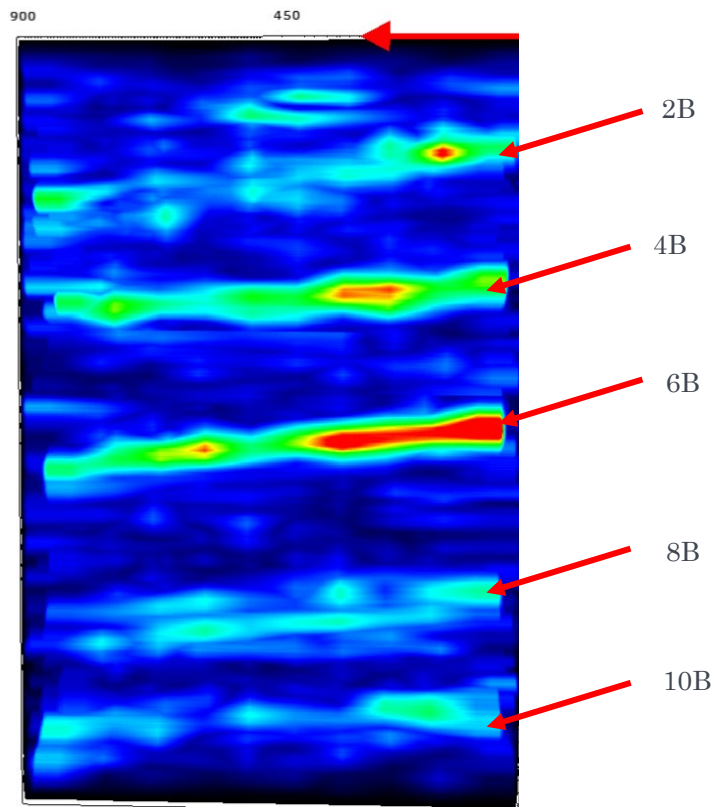
Ytterligare en mätning genomfördes på avståndet ca 17.5 meter från upplaget. I ett snitt där kablarna börjar gå upp i plattan. Resultatet från denna mätning redovisas i Figur 59. Här var det betydligt mer komplicerat att finna rätt position hos kablarna då kablarna har dragits ut i horisontalled samt att nya kablar 11B och 12B har kommit till i tvärsnittet. Det är dock klart att GPR är ett kraftfullt verktyg att kartlägga spännkablar/foderrörs placering i tvärsnittet. I det aktuella fallet hade kompletteringsmätningar i fler snitt hjälpt till med att kunna följa de enskilda kablarna tydligare. Därtill, om man haft ställning på utsidan, hade det varit relativt enkelt att kartlägga de yttre kablarna/foderrören.



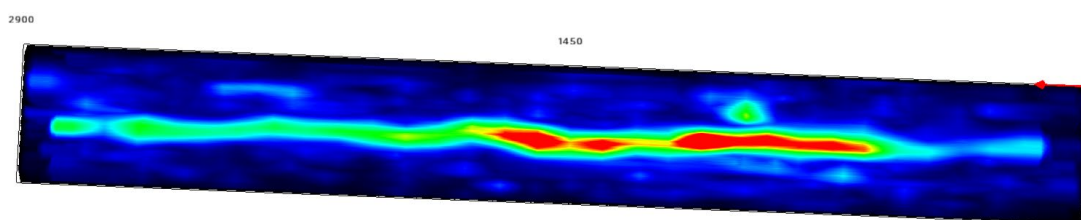
Figur 59 Resultat från mätning med GPR i snittet ca 17.5 m från det östra upplaget

## Mätning med Ultrasonic Pulse Echo (MIRA)

När skanning med GPR var avslutad utfördes även en skanning med UPE tekniken i samma snitt. Här skannades kablarna med start 2 meter från det östra upplaget och totalt ca 1.5 meter, dvs till 3.5 meter från upplaget. Samtliga fem kablar kunde lokaliseras, se Figur 60. I kabel/foderrör 6B kan vi notera en trolig håligheter, se också figur 3.5. Dock har den inte verifierats då ingen öppning av foderröret skulle ske.

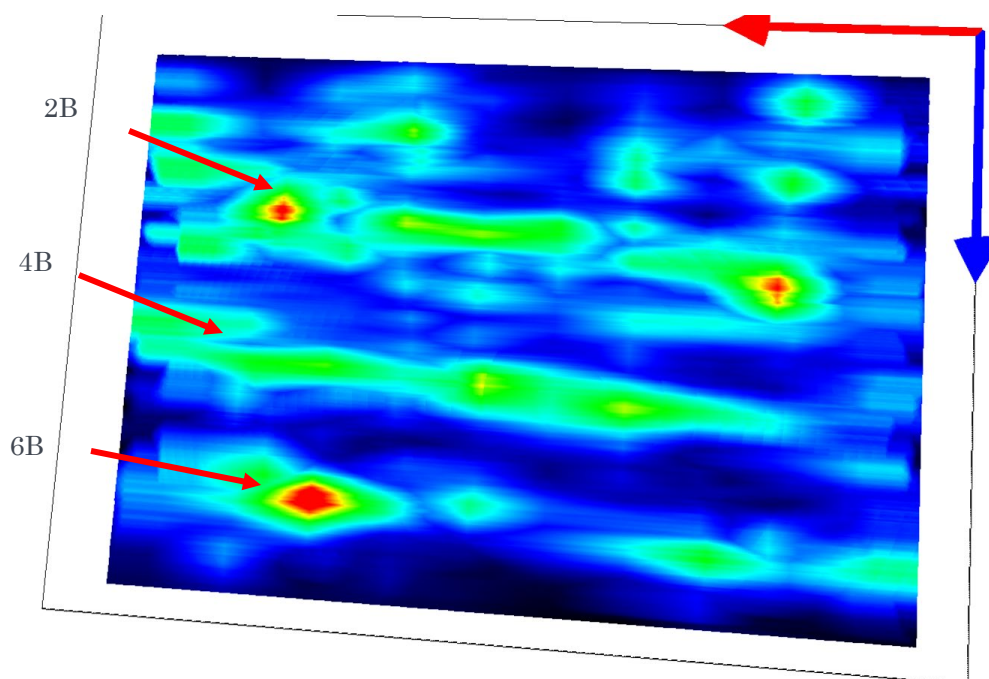


Figur 60 Spännkablar/foderrör skannade ca 2 meter från östra upplaget och ca 1.5 meter österut



Figur 61 Spännkabel/foderrör 6B skannat från förankring/upplag och 3 meter mot det västra

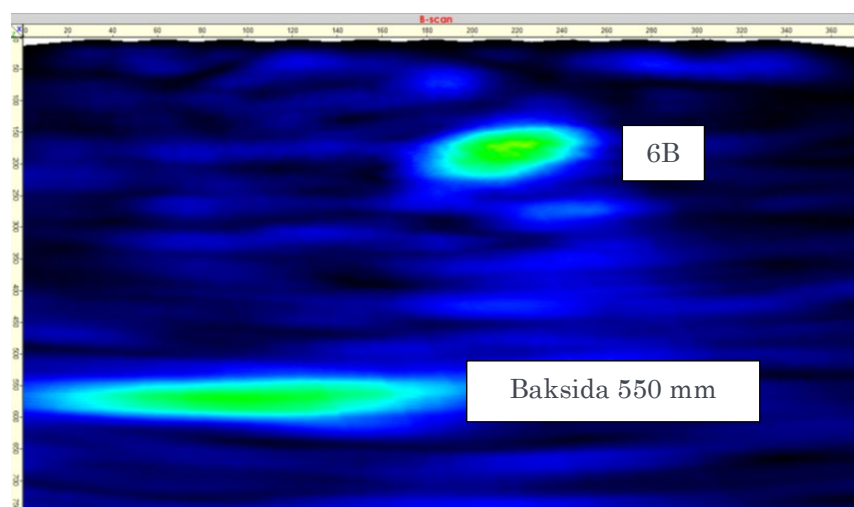
Utöver detta genomfördes även en skanning av de övre kablarna vid sektion ca 17.5 meter från det östra upplaget. Här fanns inga tecken på håligheter i dessa foderrör, se Figur 62.



Figur 62 Spännkablar/foderrör i norra balken vid snittet ca 17.5 m

### *Slutsatser från GPR och UPE mätningarna*

En utförda preliminära oförstörande undersökningen av foderrör och spännkablar visar på värdet med det angreppssätt som presenterats. GPR:n kartlägger kablar/foderrörs placering och ytterligare skanning med UPE (MIRA) har kartlagt möjliga håligheter i ett foderrör. Begränsningar i undersökningen föreligger dock, dels så klarar GPR:n inte mer än ca 300 – 400 mm i djup. UPE:n klarar upp till ca 1 meter, men i detta fall så hamnade den bakre raden av kablar i skugga bakom den främre så de var inte möjliga att lokalisera. UPE:n kunde även kartlägga tjockleken på balken/livet, se Figur 63. Kombinationen av dessa metodiker är dock kraftfull och vi tror om även Impact Echo används skulle de lokaliserade håligheter kunna förtydligas ytterligare. Det bör också nämnas att handhavandet av utrustningen kräver specialistkunskaper, speciellt när flera metoder kombineras. Därtill tar arbetsproceduren med UPE:n lång tid



Figur 63 Baksida och kabel/foderrör 6B

## Sammanfattning bro över Abiskojoikka

Oförstörande provning har genomförts med täckskiktsmätare, ultraljud och radar. Sprickdjup har kartlagts. Därtill har en liten del av spännkabelsystemet undersökts.

Slutsatserna från denna mätning ger vid handen att det är relativt stora sprickdjup i några sektioner, upp till 170 mm samt att täckskikten i de undersökta områdena variera mycket, i vissa fall från 10 – ca 80 mm-

Kartläggning av spännkablar visar att i det studerade snittet har vi i en kabel otillräcklig injektering vilket medför hålrum.

Slutsatsen från den relativt begränsade undersökningen är att kartläggning med oförstörande provning är värdefull och kan ge nödvändig information t ex i samband med klassningsräkning och tillståndsbedömning av befintliga anläggningar.

# Herøysund Bru

## Bakgrund

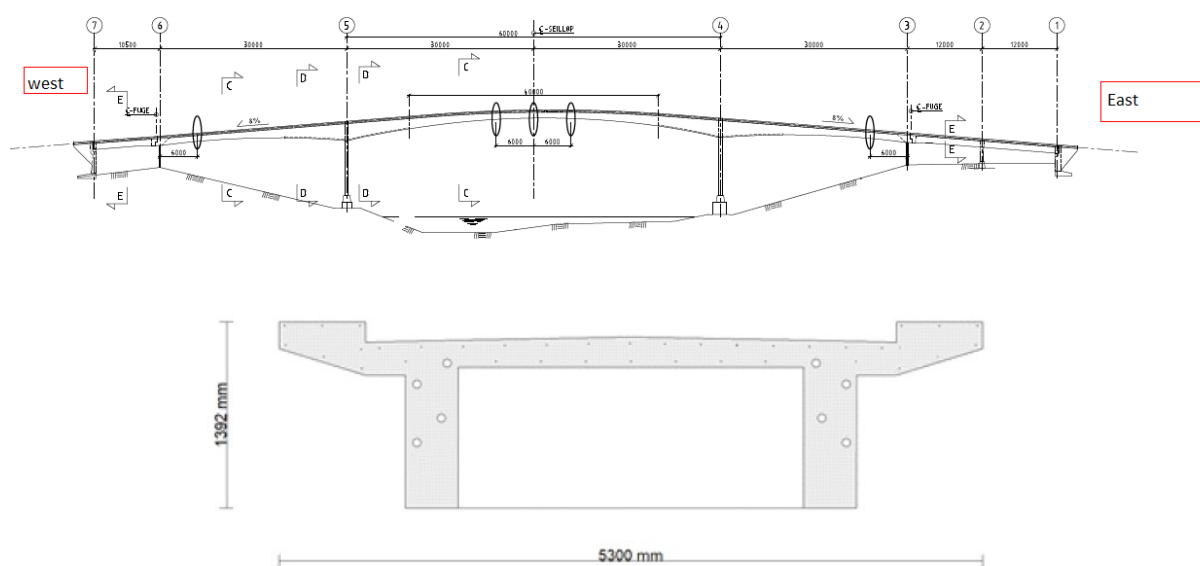
Herøysundsbron på västkusten i Nordland Fylke i Norge har genomgått betongreparationer med fokus på armeringskorrosion. I samband med detta upptäcktes tomrum i foderrör och även korrosion hos spännarmering. För att säkerställa säkerheten på bron beslöts att kartlägga hålrum och defekter i foderrör. Flera riskområden pekades ut av ansvarig konstruktör och en oförstörande undersökning genomfördes i dessa områden. Detta avsnitt beskriver processen för detta och resultatet från undersökningen. Arbetet genomfördes under vecka 4, 2020. I Figur 64 visas ett foto av bron.



Figur 64 Foto av Herøysundsbron, foto B. Täljsten

## Målsättning

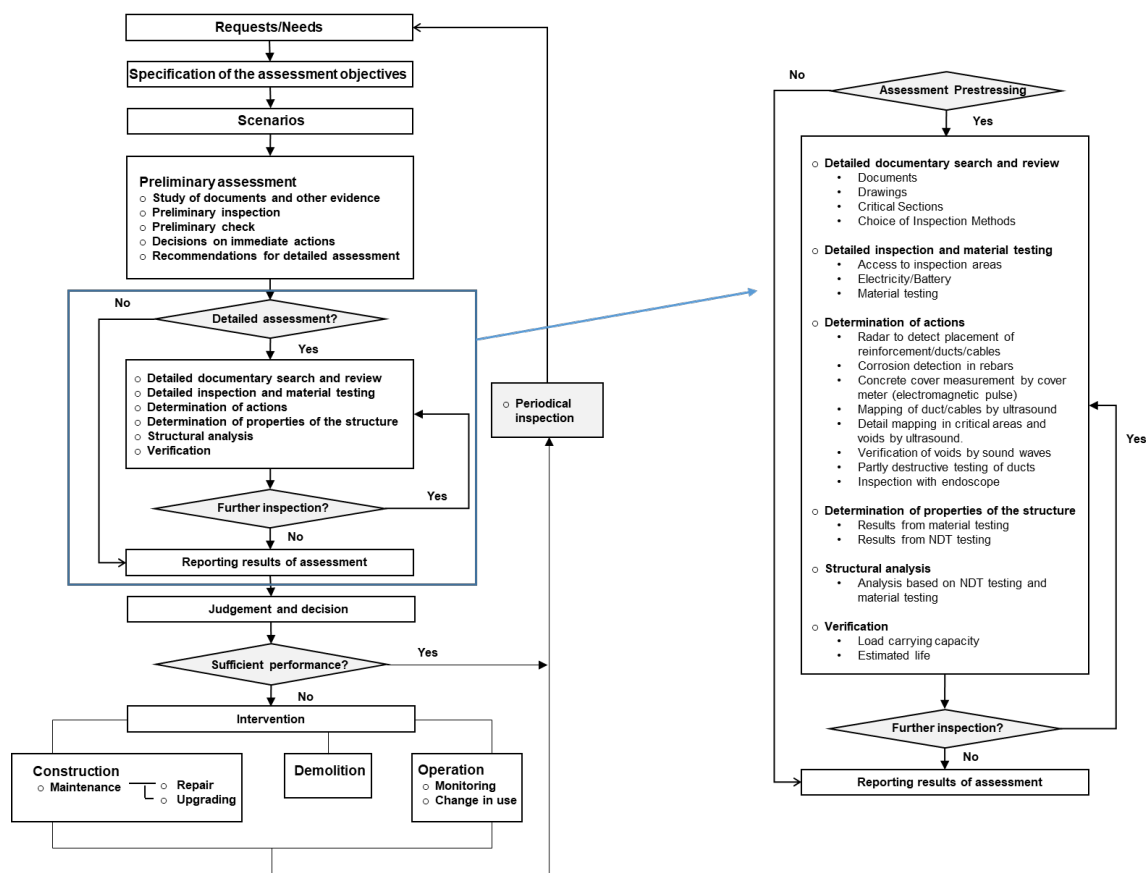
Herøysundsbron ligger mellan öarna Syd och Nord-Herøy vid den norska västkusten i Nordland fylke. Bron byggdes 1966 och har en total längd på 154 meter, med den största spännvidden 60 m. De två balkarna på norra och södra sidan har vardera fyra efterspända kablar med förankringarna placerade vid stöd 6 i väster och stöd 3 i öster. Varje kabel har två skarvar placerade ca 15 meter på var sida om mitten av bron. Balkarna är 400 mm tjocka och 1000 mm höga från botten till brodäckets undersida. En sidovy och tvärsnitt i sektion C-C visas av bron i Figur 65.



Figur 65 Sidovy och sektion av Herøysundsbron

Omfattningen av inspektionen med hjälp av oförstörande provning (OFP) var att fastställa hålrum i foderrören i de områden som konstruktören hade pekat ut, dessa bedömdes vara kritiska snitt. I projektet följde vi en strikt procedur som presenteras i Figur 66. Här är det viktigt att först göra en detaljutredning av problemen och de problem som ska utredas, detta ligger sedan till grund för de metoder som bör användas i utredningen. Baserat på detta bestämde vi oss för att använda en kombination av olika OFP-metoder enligt nedan:

- Täcksiktsmätare
- GPR (Georadar)
- Tomografi (Ultraljud)
- Impact Echo (IE)
- Visuell inspektion/borring och videoskop



Figur 66 Procedur för att undersöka defekterna i Herøysunds bro

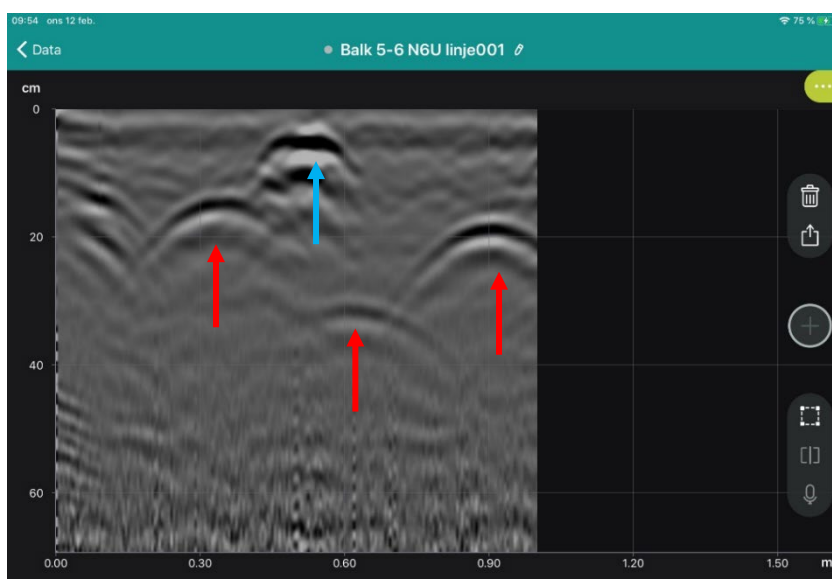
De olika teknikerna har presenterats tidigare och dess funktion upprepas inte här, det bör dock nämnas att det behövs stor erfarenhet när dessa metoder kombineras för att undersöka hålrum och defekter i foderrör. Dessutom är det svårt att avgöra graden av injektering i kanalen och OFP-metoderna behöver ofta kombineras med delvis destruktiv testning, det vill säga ett hål behöver borrar i foderröret och närmare undersökning med till exempel videoskop kan behövas.

Resultaten från OFP undersökningen, som presenteras i detta avsnitt, ger en bra översikt över tomrummen i de undersökta områdena. Vi kunde identifiera var hålrummen fanns och även storleken på hålrummen. I nästa avsnitt beskrivs provningsproceduren.

## Provningsproceduren

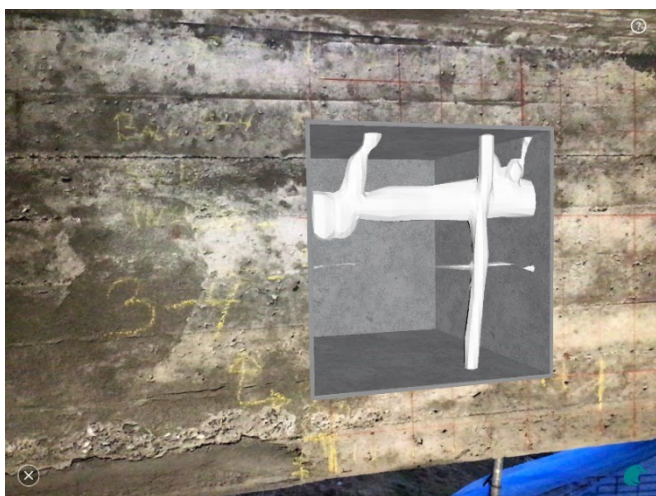
Det bör nämnas att detta var det första projektet i fält där målsättningen var att lokalisera håligheter vilket i början skapade utmaningar gällande angreppssätt och metodik, den metodik som beskrevs i Figur 66 är relativt generell och alla delar visar sig inte tillämpliga eller ens nödvändiga i detta projekt.

För att lokalisera tomrum i kanalen använder vi flera olika metoder, var och en av dem med sin unika fördel. Täcksiktmetaren används först för att lokalisera armeringsjärnen och mäta täcksiktet. Detta är nödvändigt för att kalibrera GPR:n och se till att inställningarna för denna är korrekta. GPR kan även den användas för att lokalisera armeringsjärn och täcksikt, men i detta fall användes den i huvudsak för att lokalisera foderrören. Denna lokalisering ligger sedan till grund för ultraljudsmätningen. I Figur 67 visas resultat efter kartläggning av foderrör med GPR. De röda pilarna markerar foderrörens placering. Den blåa pilen anger placering av slakarmering.



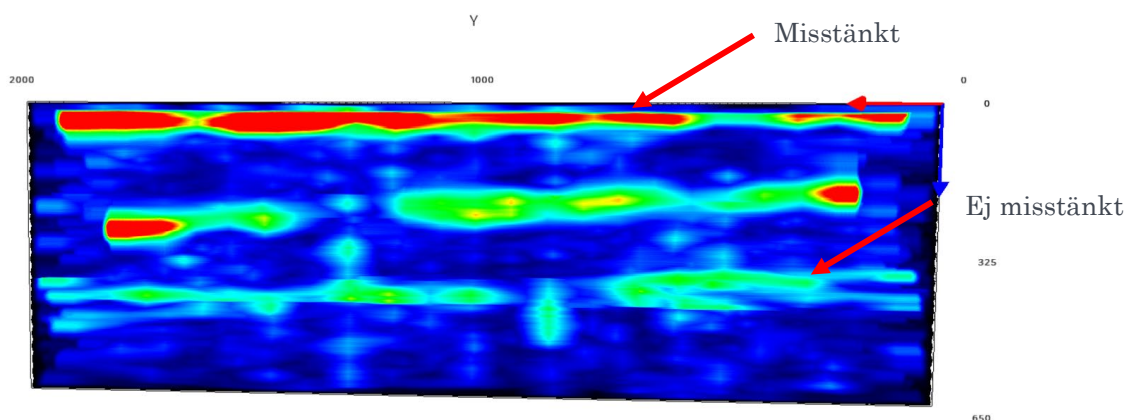
Figur 67 Lokalisering av foderrör

I Figur 68 visas en 3D visualisering av det övre foderröret och slakarmeringen. Denna typ av visualisering kan ibland vara till hjälp för att tydligare förstå armeringens placering, men ofta är det svårt att få denna visualisering tillräckligt bra med den mjukvara som utrustningen tillhandahåller.



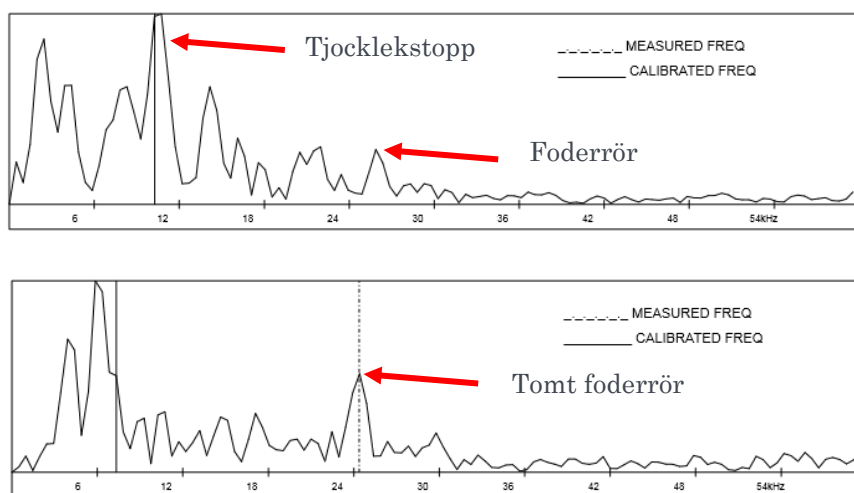
Figur 68 3D-visualisering

När foderrörens djup och placering är verifierad vet man med stor noggrannhet var ultraljudet skall appliceras. Denna metod används för att hitta misstänkta områden med hålrum inuti foderrören. Efter mätning i fält måste resultaten postprocessas och därför är det viktigt att mätningarna görs på korrekt plats och i rätt omfattning för att undvika onödiga och tidskrävande kompletteringar. I fältförsöket utfördes skanningar från båda sidor av de undersökta brobalkarna. Detta gjordes för att vi ville vara säkra på att signalerna överensstämmer med varandra och att vi fick tillfredsställande överlappande resultat. I Figur 69 visas typiskt resultat efter skanning och postprocessing av data. Områden med stark signal, röd färg, tyder på hålrum med svag signal, grön färg, frånvaro av densamma.



Figur 69 Skannade foderrör med ultraljud

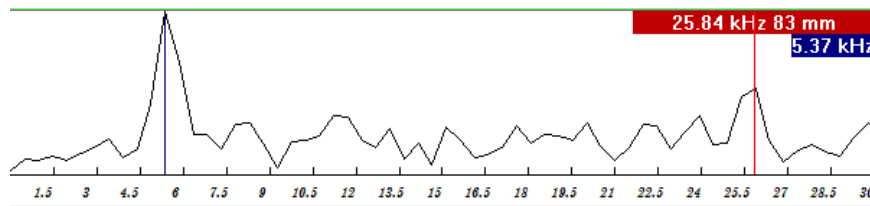
Efter skanning med ultraljud lokaliseras misstänkta och icke-misstänkta områden i foderrören. För att ytterligare undersöka de misstänkta områdena används Impact Echo (IE) för att bekräfta resultaten. Med IE letar vi efter onormala frekvenser på foderrörets djup och skillnader i frekvensspann för tjocklek. I Figur 70 visas exempel på prov utförda på ett Mock-Up prov och i samt exempel på tester utförda på den undersökta bron.



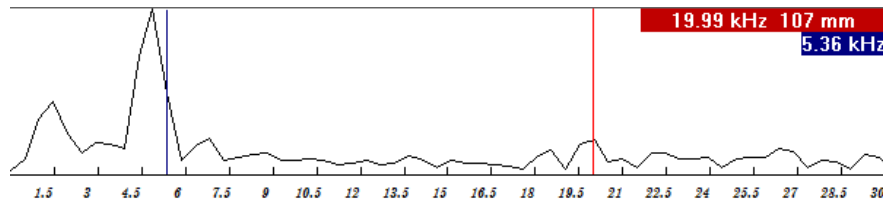
Figur 70 Frekvenstopp i ett injekterat respektive inte injekterat foderrör provat på Mock-Up.

I Figur 71 och Figur 72 visas IE prover på två olika foderrör i Herøysundsbron, ytterligare resultat redovisas nedan.





Figur 71 Frekvenstoppar för ett injekterat foderrör, 2S



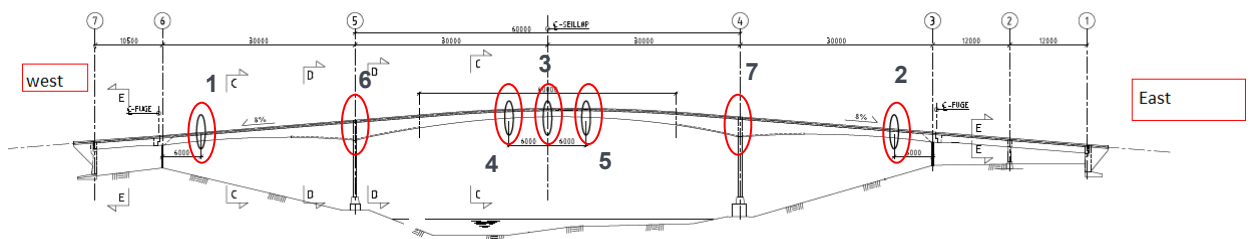
Figur 72 Frekvenstoppar för ett icke injekterat foderrör, 3SC

När resultaten från IE bekräftade misstanken vi fick från ultraljudsundersökningen, genomförde vi verifierades detta i fyra olika områden. Totalt inspekterades fyra olika foderrör visuellt därav två med saknad injekteringsbruk och två med full injektering.

## Provområden

### Översikt

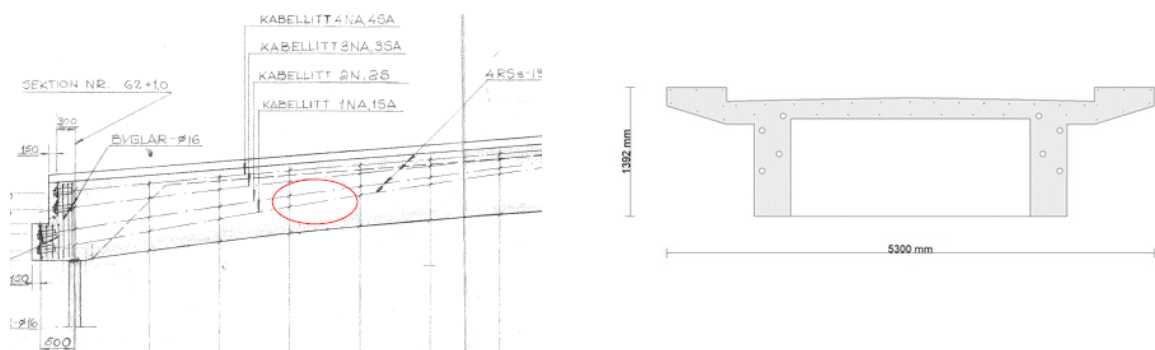
De områden som undersöktes hade valts ut av konstruktör och är utmärkta i Figur 73. Totalt undersöktes 7 områden. Brons stöd, 1-7, framgår också i Figur 73.



Figur 73 Översikt av provområden

### Stöd 6, norra och södra balken

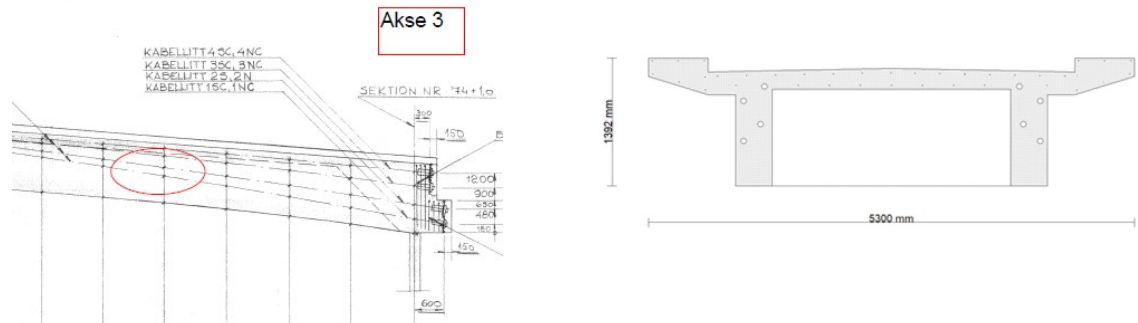
Undersökningen gjordes 5 meter från västra stödet. Foderrören var placerade 400, 600 och 900 mm från balkens underkant. Foderrör 4 var placerat i brodäck och kunde inte nås för inspektion. Foderrören följer en parabel. I Figur 74 visas en sidovy samt tvärsnitt av den undersökta brosektionen.



Figur 74 Placering av foderrör, sidovy samt tvärsnitt

### Stöd 3, norra och södra balken

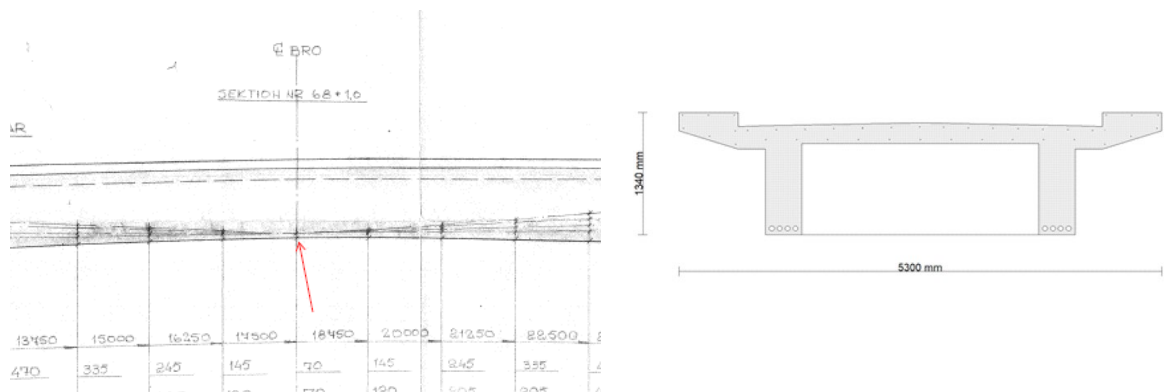
Undersökningen gjordes 5 meter från östra stödet. Foderören var placerade 400, 600 och 900 mm från balkens underkant. Foderrör 4 var placerat i brodäck och kunde inte nås för inspektion. I Figur 75 visas en sidovy samt tvärsnitt av den undersökta brosektionen



Figur 75 Placering av foderör, sidovy samt tvärsnitt

### Mittspann, norra och södra balken

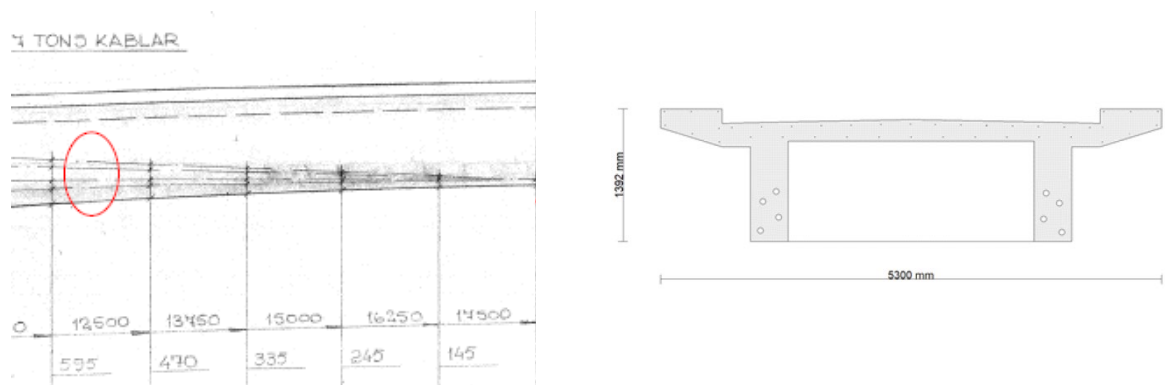
Undersökningen gjordes mitt på bron och 2 meter åt var sida om stödet. Foderören var placerade i botten av balken och samtliga foderrör var åtkomliga för inspektion, i Figur 76 visas en sidovy samt tvärsnitt av den undersökta sektionen.



Figur 76 Placering av foderör, sidovy samt tvärsnitt

### Mittspann, norra och södra balken mot stöd 5

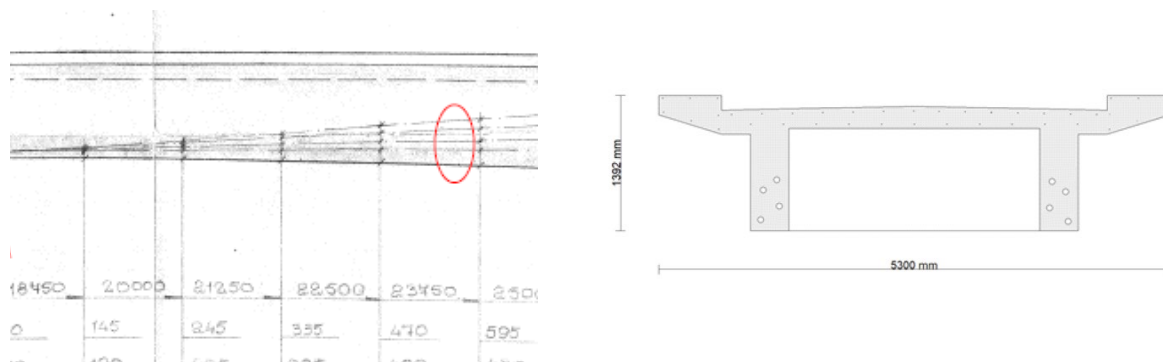
Undersökningen gjordes 6 meter från mitten av bron mot västra stödet. Foderrören var placerade ca 200, 300, 400 och 600 mm från underkanten av balkarna. Alla fyra foderrör var tillgängliga för inspektion inom detta område. I Figur 77 visas en sidovy samt tvärsnitt av den undersökta sektionen.



Figur 77 Placering av foderör, sidovy samt tvärsnitt

### Mittspann, norra och södra balken mot stöd 4

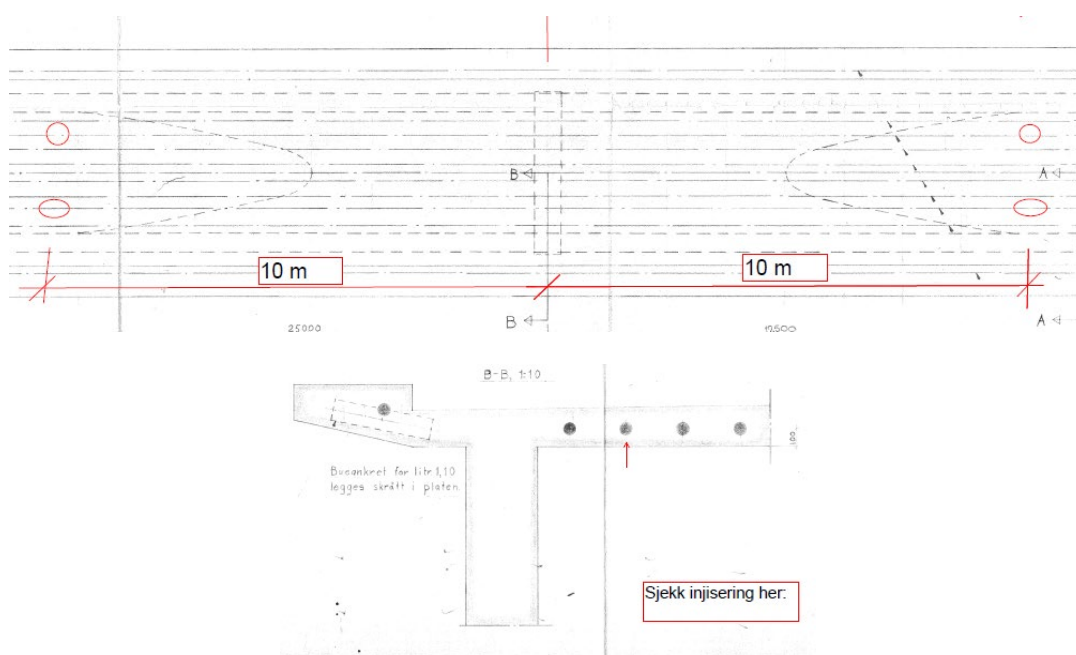
Undersökningen gjordes 6 meter från mitten av bron mot öster och stöd 4. Foderören var placerade cirka 200, 300, 400 och 600 mm från underkant av balkarna. Alla fyra foderrör var tillgängliga för inspektion inom detta område. I Figur 78 visas en sidovy samt tvärsnitt av den undersökta sektionen.



Figur 78 Placering av foderrör, sidovy samt tvärsnitt

### Brodäck, stöd 4

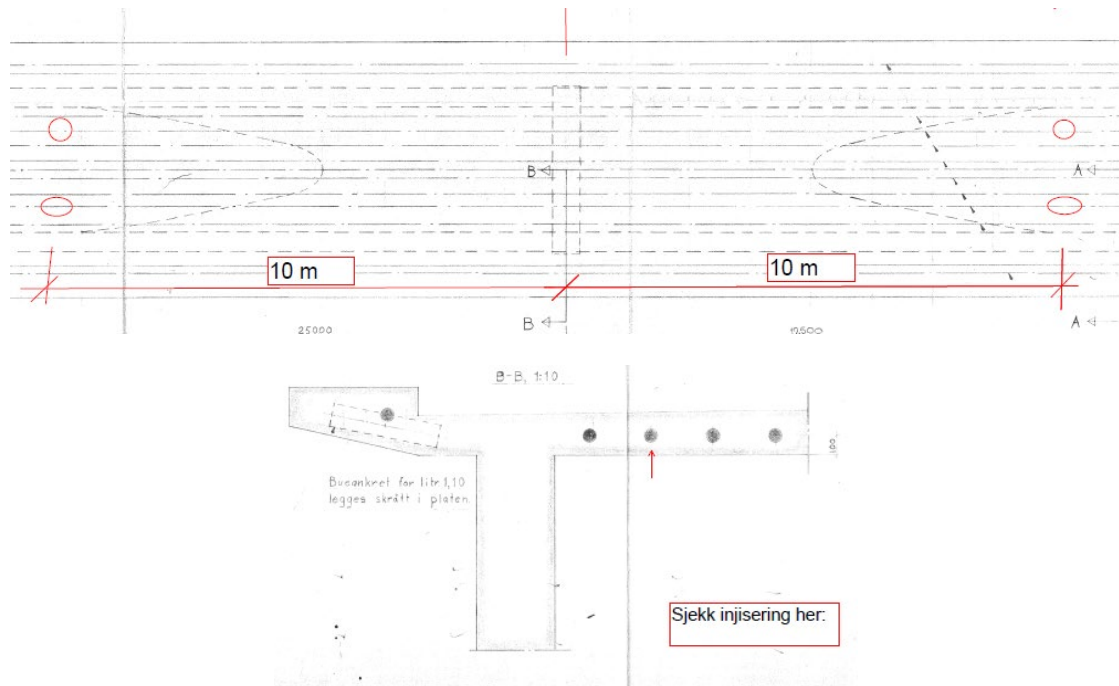
Undersökningen gjordes i två foderrör, 10 meter från stöd 4 mot vardera sidan. Foderrör 12Ö22 låg på däckets södra sida och 7Ö17 på norra sidan. I Figur 79 visas en plan av brodäcket samt tvärsnitt av halva bron, snitt B-B.



Figur 79 Placering av foderrör, plan samt tvärsnitt, del av brodäck

### Brodäck, stöd 5

Undersökningen gjordes i två foderrör, 10 meter från stöd 5 mot vardera sidan. Foderör 12Ö22 låg på däckets norra sida och 7Ö17 på södra sidan. I Figur 80 visas en plan av brodäcket samt tvärsnitt av halva bron, snitt B-B.



Figur 80 Placering av foderrør, plan samt tvärsnitt, del av brodäck

## Resultat från oförstörande provning

### Sammanställning från samtliga undersökta foderrör

Undersökningen visade på ett lyckat resultat med god noggrannhet för att hitta tomrum i foderrör. I några av de undersökta områdena syntes inga spår av tomrum i foderrören. Detta bekräftades i fyra områden med borrhål och dessutom kunde brott i tre kablar noteras i ett foderrör (3SC), se Figur 81. Resultatet från undersökningen visade att samtliga 8 foderrör saknade injekteringsbruk i något avsnitt. Även de undersökta kablarna i brodäcket saknade partiellt injekteringsbruk.



Figur 81 Kablar i foderrör 3SC med kabelbrott

I Tabell 21 har resultatet från undersökningen sammanställts. Det kan noteras att majoriteten av de undersökta sektionerna har tomrum, partiellt eller delvis.

Tabell 21 Sammanställning av oförstörande provning gällande hålrum i foderrör

	Stöd 6		Stöd 5		Bromitt		Stöd 4		Stöd 3	
Norra balken	4NA	N/A	100%	4NB	50%	4NB	100%	4NC	N/A	
	3NA	0%	100%	3NB	50%	3NB	50%	3NC	0%	
	2N	0%	0%	2N	50%	2N	0%	2N	0%	
	1NA	0%	100%	1NB	50%	1NB	0%	1NC	25%	
Södra balken	4SA	N/A	100%	4SB	50%	4SB	100%	4SC	N/A	
	3SA	100%	100%	3SB	25%	3SB	0%	3SC	100%	
	2S	25%	100%	2S	25%	2S	0%	2S	0%	
	1SA	0%	0%	1SB	50%	1SB	0%	1SC	0%	

1NC	Hålrum verifierat genom borring	0%	Injekterat
3SC	Hålrum verifierat genom borring, brott i 3 kablar	25/59/75%	Delvis injekterat
2S	Injektering konfirmerat genom borring	100%	Saknar injektering
1SC	Injektering konfirmerat genom borring		

Foderrör 3SC saknar injektering från förankring stöd 3 och åtminstone 6 m mot stöd 4

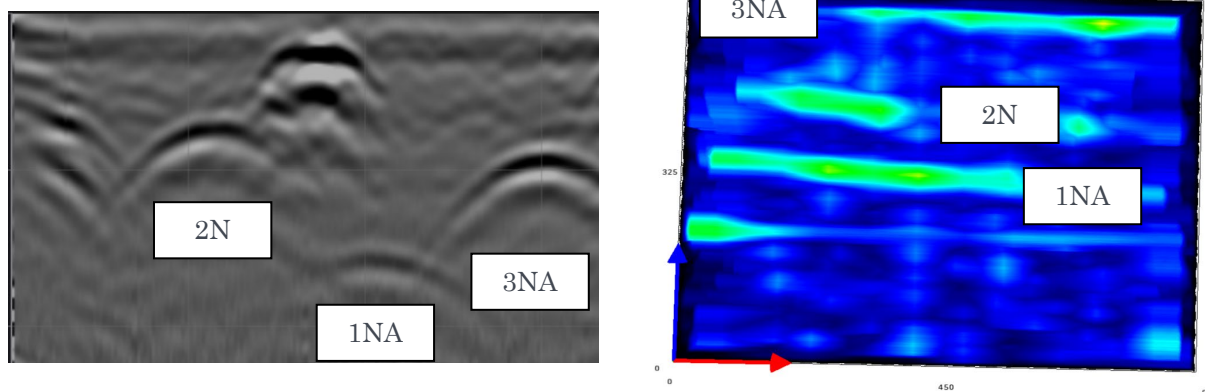
Nedan har resultaten från de olika undersökningarna med GPR och ultraljud ställts samman. Resultaten från

### Stöd 6

#### Norra balken

Undersökning gjordes vid den norra balken mellan 5-6 meter från stöd 6 mot öster, i detta område fanns endast tre foderrör tillgängliga för provning. Foderrör 4NA låg i brodäcket och inga mätningar kunde göras. Resultaten från GPR och ultraljudsmätningarna har sammanställts i Figur 82, i denna figur är avläsningen med GPR roterad 90°. Inget av foderören 1NA, 2N och 3NA visade tecken på att injekteringsbruket saknades, sammanfattningsvis:

- 1NA: Inga hålrum
- 2N: Inga hålrum
- 3NA: Inga hålrum

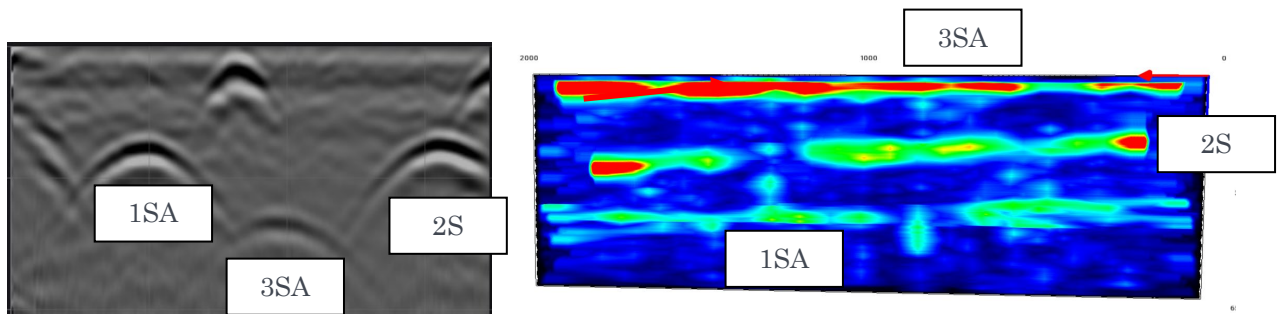


Figur 82 Resultat från stöd 6, norra balken

#### Södra balken

Undersökningen gjordes vid den södra balken mellan 5-7 meter från stöd 6 mot öster, i detta område fanns endast tre foderrör tillgängliga för provning. Foderör 4SA låg i brodäcket där inga mätningar kunde göras. Resultatet från GPR och ultraljudsmätningarna har sammanställts i Figur 83, även i denna figur är GPR avläsningarna roterade 90°. Denna undersökning visade på saknad injekteringsbruk i foderören, sammanfattningsvis:

- 1SA: Inga hålrum
- 2S: Små hålrum i foderröret
- 3SA: Saknat injekteringsbruk på en längd av ca 2 m



Figur 83 Resultat från stöd 6, södra balken

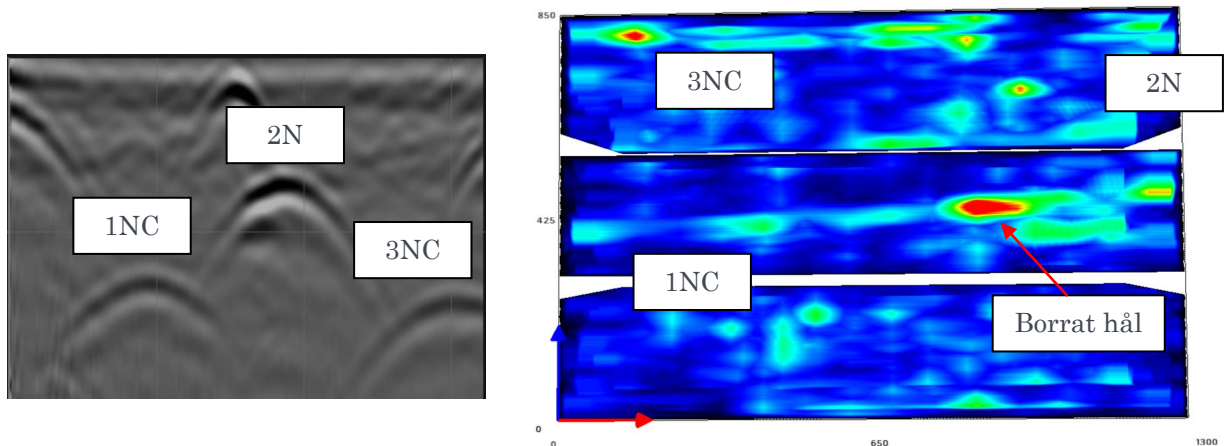
### Stöd 3

#### Norra balken

Undersökningen utfördes vid den norra balken mellan 5-6,5 meter från stöd 3 åt väster, i detta område fanns endast tre foderrör åtkomliga för undersökning. Foderrör 4NC var placerat i brodäcket och inga mätningar kunde göras. Resultatet från GPR och ultraljudsmätningarna har sammanställts i Figur 84, även i denna figur är GPR avläsningarna roterade 90°.

Foderrör 1NC hade ett lokalt område med en längd på ca 200 mm där vi fick misstänkta utslag. För att kunna tolka resultatet togs ett borrhål för visuell kontroll i foderröret. Borrhålet bekräftade våra misstankar eftersom ett lokalt område med saknad injekteringsbruk i kanalen hittades, se Figur 85. Sammanfattningsvis:

- 1NC: Lokalt hålrum utan injekteringsbruk, ca 200 mm utbredning
- 2N: Inga hålrum
- 3NC: Inga hålrum



Figur 84 Resultat från stöd 3, norra balken

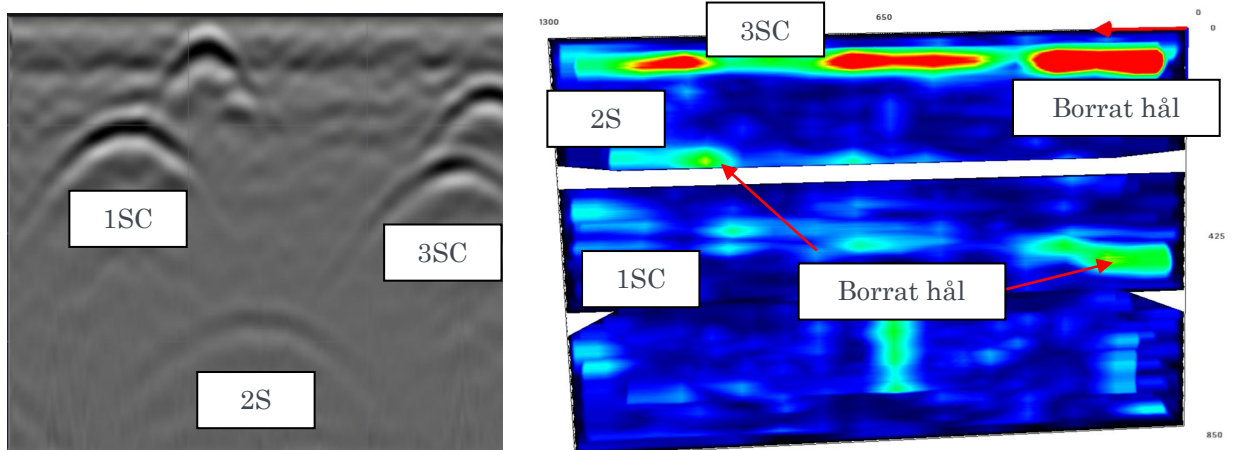


Figur 85 Hålrum i foderrör 1NC

### Södra balken

Undersökningen utfördes vid den norra balken mellan 5-6,5 meter från stöd 3 åt väster, i detta område fanns endast tre foderrör åtkomliga för undersökning. Foderrör 4SC var placerat i brodäcket och inga mätningar kunde göras. Resultatet från GPR och ultraljudsmätningarna har sammanställts i Figur 86, även i denna figur är GPR avläsningarna roterade 90°.

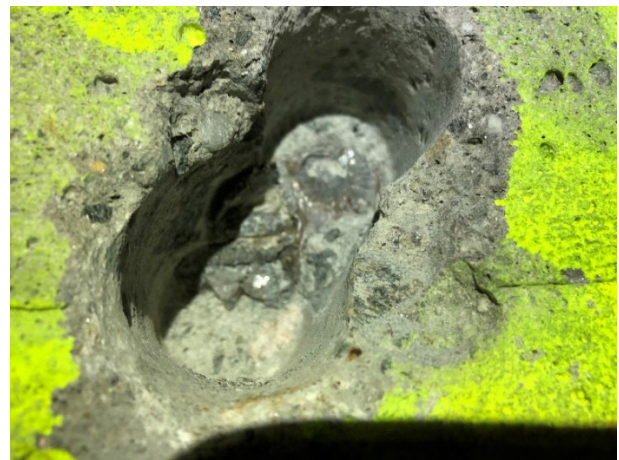
Foderrör 1SC och 2S visade inga tecken på att injekteringsbruket saknades. Detta bekräftades med borrning och visuell kontroll i båda foderrören, se Figur 87.



Figur 86 Resultat från stöd 3, södra balken



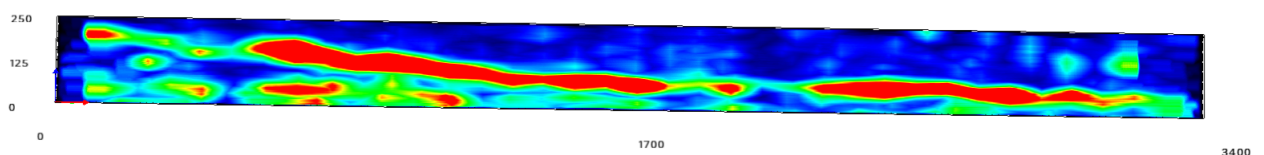
Foderrör 1SC – verifierad injektering



Foderrör 2S – verifierad injektering

Figur 87 Foderrör 1SC och 2S med verifierad injektering efter borrning

Foderrör 3SC visar saknad injektering över hela mätlängden. För att öka kunskapen kring mätmetodiken genomfördes en mer omfattande skanning för foderrör 3SC från förankringen och 6 meter mot stöd 4. Resultaten visade att foderröret saknade injekteringsbruk över hela längden, se Figur 88. I detta foderrör borrades hål upp och tre brott på spännlinorna kunde noteras, se Figur 89.



Figur 88 Foderrör 3SC saknade injekteringsbruk i hela det undersökta området – förankringar till höger



Figur 89 Uppborrat hål i foderrör 3SC med brott i spännlinor

Sammanfattningsvis:

- 1SC: Inga hålrum
- 2S: Inga hålrum
- 3SC: Saknad injektering över undersökta 6 m, 3 verifierade linbrott

### Bromitt

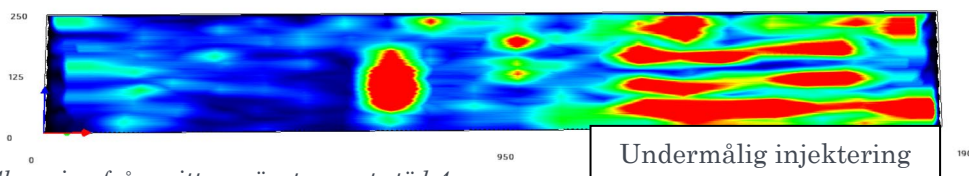
Samma metodik som för de tidigare balkarna har använts nedan. Dock genomfördes inga GPR skanningar eftersom ultraljudet i detta fall applicerades över balkarnas bredd.

### Norra balken

I mitten av bron är samtliga kablar placerade i balkarnas underkant. Mätningarna på norra balken gjordes från mitten av bron och 2 meter åt vardera sidan, dvs totalt 4 m undersöktes. Den oförstörande provningen visade att den första metern åt vardera hållet från mittsnittet var samtliga foderrör injekterade, men den nästkommande metern åt vardera hållet saknade injekteringsbruk, detta kan också ses i Figur 90.

Undermålig injektering

Skanning från mitten, höger, mot stöd 5



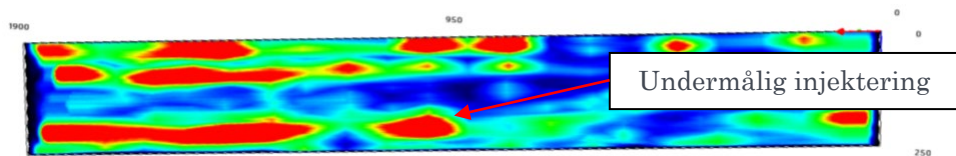
Skanning från mitten, vänster, mot stöd 4

Figur 90 Skanning i mittsnittet, norra balken

### Södra balken

Mätningarna på södra balken gjordes på motsvarande sätt som för den norra balken från mitten av bron och 2 meter åt vardera sidan, dvs totalt 4 m undersöktes. Den oförstörande provningen visade att även foderrören på den södra sidan var undermåligt injekterade. I detta fall var dock en kabel injekterad. Undermålig injektering noterades på den andra metern från mittsnittet mot stöd 5 samt i den första metern från mittsnittet mot stöd 4, se Figur 91.





Skanning från mitten, höger, mot stöd 5



Skanning från mitten, vänster, mot stöd 4

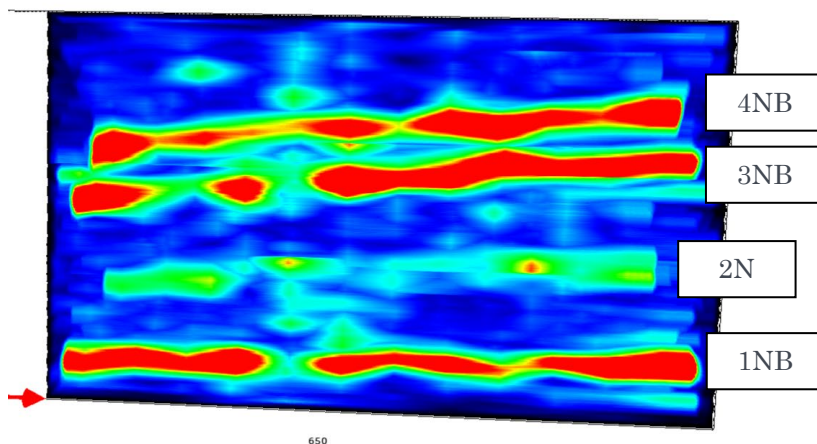
Figur 91 Skanning i mittsnittet södra balken

Eftersom skanningarna i mittsnittet visade på bristande injektering i foderören för samtliga kablar beslutades att utöka undersökningen i mittsnittet. Detta presenteras nedan.

### Norra balken mot spann 5

Undersökningen genomfördes i norra balken, 6-7,5 meter mot stöd 5 från mitten av bron. I det här området kunde samtliga fyra foderrör lokaliserars. Foderrör 2N var injekterat inom provområdet, men däremot saknade kablarna 1NB, 3NB och 4NB samtliga skydd i form av injekteringsbruk på hela den undersökta längden av 1,5 m, se också Figur 92. Sammanfattningsvis:

- 1NB: Saknade injektering, 1,5 m
- 2N: Inga hålrum i foderrör
- 3NB: Saknade injektering, 1,5 m
- 4NB: Saknade injektering, 1,5 m

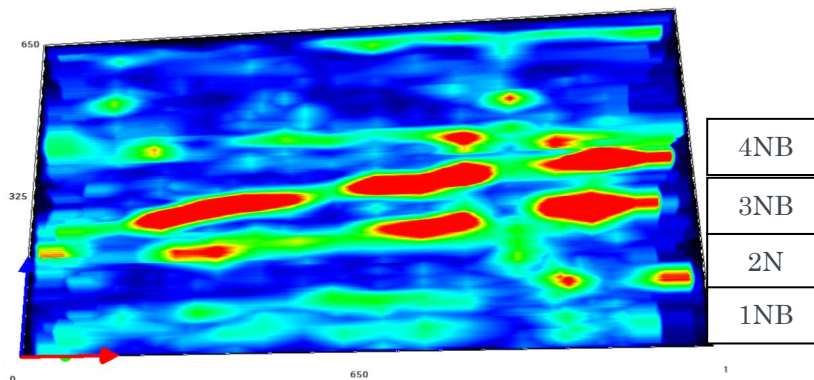


Figur 92 Skanning med ultraljud från 6-7,5 m från mittsnittet mot stöd 5

### Norra balken mot spann 4

Undersökningen genomfördes i norra balken, 6-7,5 meter mot stöd 4 från mitten av bron. I det här området kunde samtliga fyra foderrör lokaliserars. Foderrör 1NB och 2N var injekterade i det undersökta området däremot saknades injektering på hela den undersökta längden för foderrör 4NB. Kabel 3NB saknade injekteringsbruk på delar av det undersökta området, se också Figur 93. Sammanfattningsvis:

- 1NB: Inga hålrum i foderrör
- 2N: Inga hålrum i foderrör
- 3NB: Delvis saknad injektering över undersökta 1,5 m
- 4NB: Saknad injektering, 1,5 m

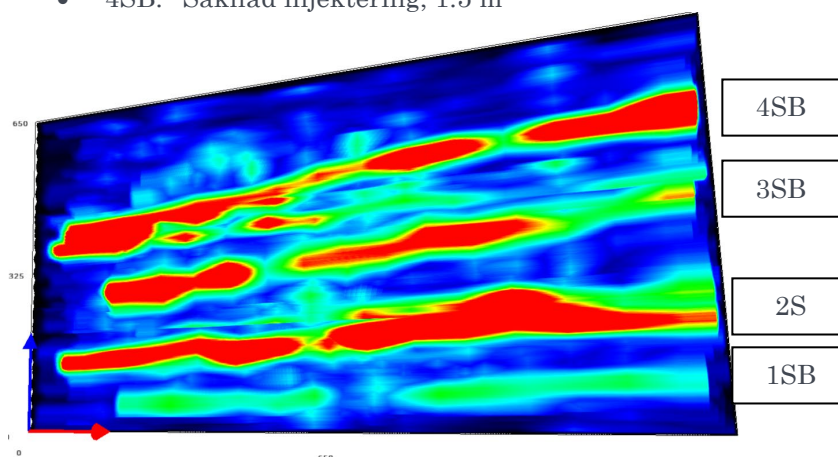


Figur 93 Skanning med ultraljud från 6-7,5 m från mittsnittet mot stöd 4

### Södra balken mot spann 5

Undersökningen genomfördes i södra balken, 6-7,5 meter mot stöd 5 från mitten av bron. Samtliga foderrör kunde lokaliseras i detta område. Foderrör 1SB var injekterat de övriga saknade injekteringsbruk i det undersökta området, se också Figur 94. Sammanfattningsvis:

- 1SB: Inga hålrum i foderrör
- 2S: Saknad injektering, 1.5 m
- 3SB: Saknad injektering, 1.5 m
- 4SB: Saknad injektering, 1.5 m

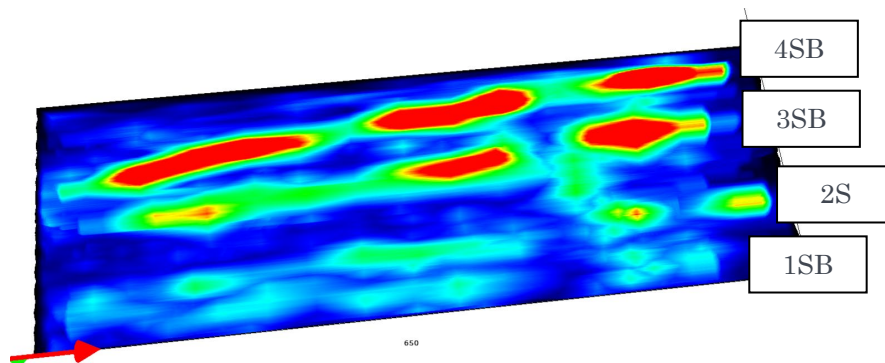


Figur 94 Skanning med ultraljud från 6-7,5 m från mittsnittet mot stöd 5

### Södra balken mot spann 4

Undersökningen gjordes i den södra balken, 6-7,5 meter mot spann 4 från mitten av bron, samtliga foderrör kunde lokaliseras. Foderrör 1SB samt 2S var injekterade, foderrör 3SB saknade injekteringsbruk lokalt och foderrör 4SB var inte injekterat inom undersökt område, se även Figur 95. Sammanfattningsvis:

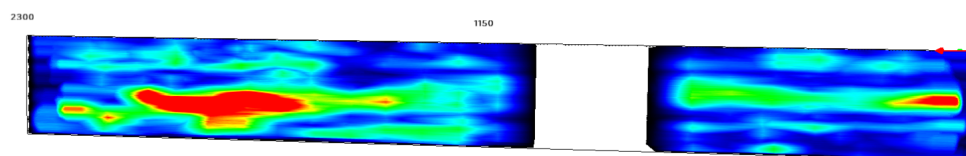
- 1SB: Inga hålrum i foderrör
- 2S: Inga hålrum i foderrör
- 3SB: Delvis saknad injektering över undersökta 1.5 m
- 4SB: Saknad injektering, 1.5 m



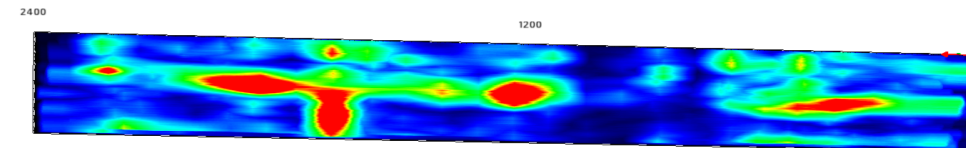
Figur 95 Skanning med ultraljud från 6-7.5 m från mittsnittet mot stöd 4

### *Brodäck över stöd 4*

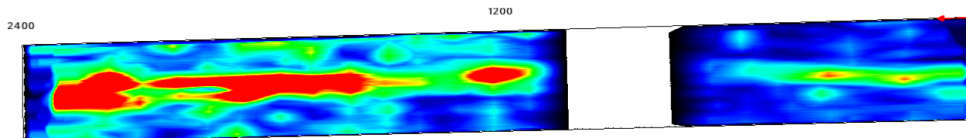
I brodäck över stöd 4 skannades 2 kablar med ultraljud, 7Ö17 samt 12Ö22. Skanningarna startade 10 m från stöd mot öster respektive väster, se Figur 79 och vardera kabel skannades 2.5 m, i Figur 96 redovisas resultat från skanningen. Samtliga skanningar visade på omfattande brist i injektering, injekteringsgraden beräknas till ca 50%. Det är dock möjligt att injekteringsbruk saknas över hela längden och även för de kablar som inte undersöktes.



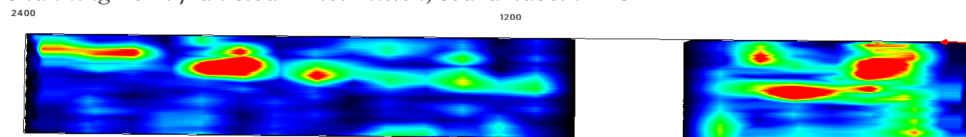
Skanning 10 m från stöd 4 mot mitten, norra kabeln 7Ö17



Skanning 10 m från stöd 4 mot stöd 3, norra kabeln 7Ö17



Skanning 10 m från stöd 4 mot mitten, södra kabeln 12Ö22

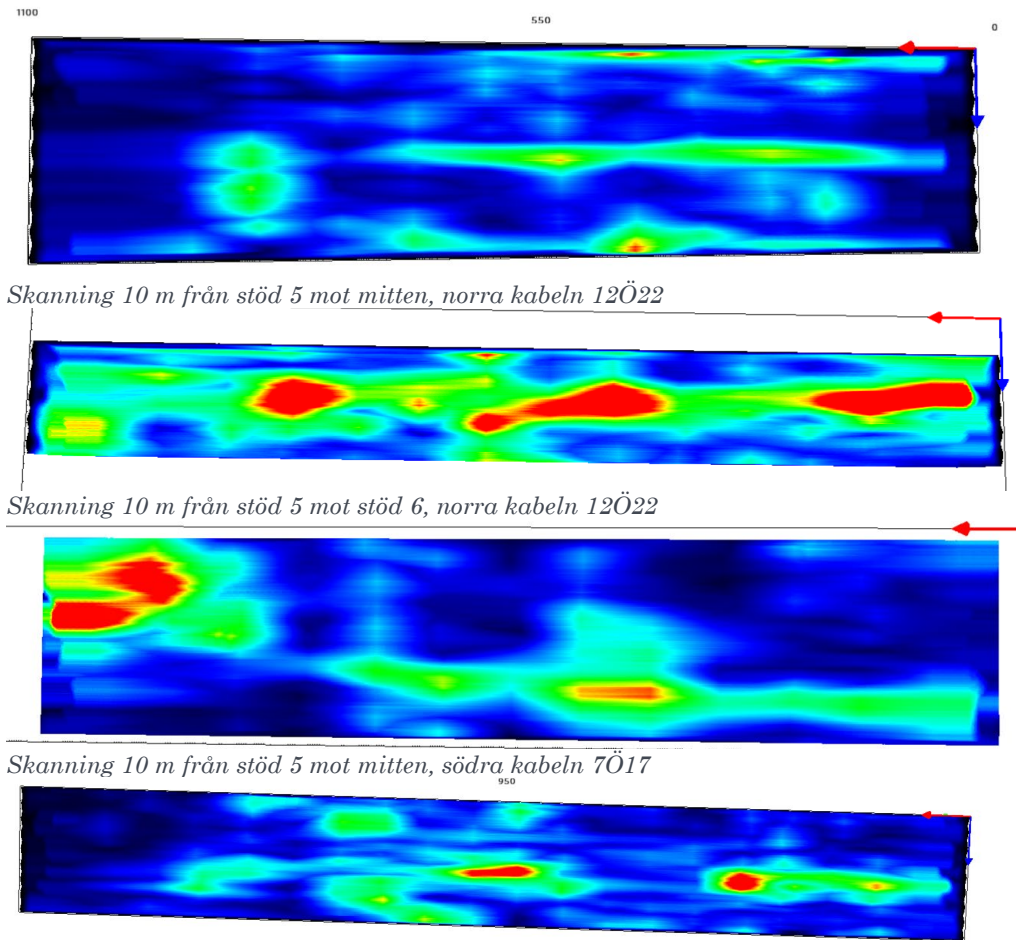


Skanning 10 m från stöd 4 mot stöd 3, södra kabeln 12Ö22

Figur 96 Skanning av brodäck, stöd 4

### *Brodäck över stöd 5*

I brodäck över stöd 5 skannades 2 kablar med ultraljud, 12Ö22 samt 7Ö17. Skanningarna startade 10 m från stöd mot öster respektive väster, se Figur 79 och vardera kabel skannades 1.5 m, i Figur 97 redovisas resultat från skanningen. Skanningarna mot mitten visade inte på någon saknat injekteringsbruk i foderrören. Skanningen mot sidospännet – mot stöd 6, visade dock att injekteringsbruk saknades på hela den undersökta längden av 1.5 m för de båda undersökta foderrören.



Skanning 10 m från stöd 5 mot stöd 6, södra kabeln 7Ö17  
 Figur 97 Skanning av broäck, stöd 5

### Kommentarer och slutsatser till undersökningen av Herøysund Bro

Det är tydligt att ett projekt av den här storleken behöver en detaljerad planering för att lyckas. Det är inte bara åtkomst till anläggningen som är viktig utan även andra praktiska detaljer som tillgång till ljus och el. Utöver detta är det av yttersta vikt att befintliga handlingar studeras innan man anländer till platsen och att områden som ska undersökas beslutas i förväg. I det här projektet använde vi en vecka, 3 personer, för utredningen, och ändå kunde vi bara täcka en liten del av bron i detalj. Vi följde uppsatt flödesschema, med vissa anpassningar till det befintliga objektet. Den oförstörande provningen visade att de saknades injekteringsbruk i många av de undersökta foderrören, vilket också verifierades genom borrning och friläggning. I samband med detta kunde det också noteras att spännkablar var av och att omfattande korrosion pågår.

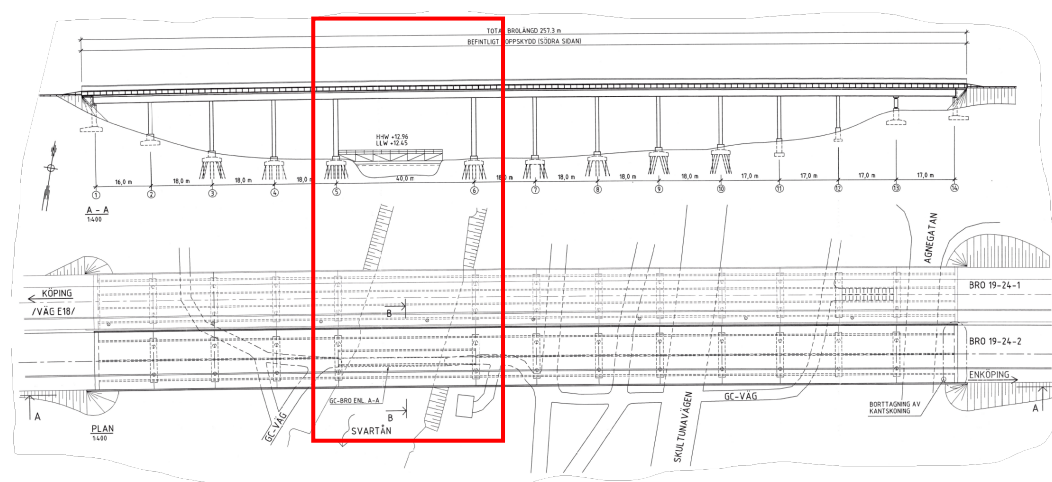
Det viktigaste i detta projekt var att det gick att kombinera olika utrustningar för att detektera skador. Dock var det svårt att lyckas helt kartlägga hålrum med impact echo, troligen beroende på vår förhållandevis bristande rutin och erfarenhet.

Det bör också nämnas att efter inspektionen förstärktes bron med kolbierlaminat och ett mätsystem installerades för övervakning och ökad säkerhet dessutom begränsades trafikmängd och vikt på bron. Under 2023 byggs det nu en ny bro på plats och den befintliga skall rivas.

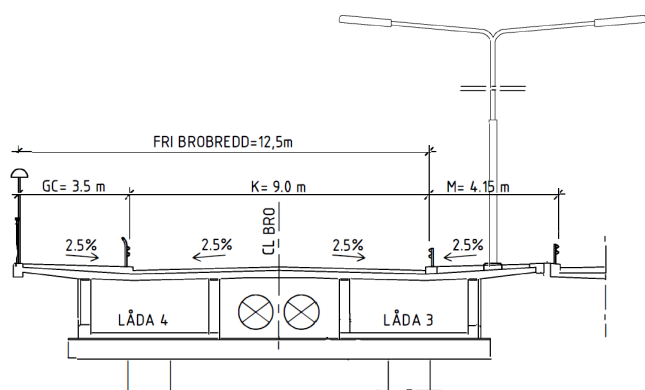
# Vallbybron Västerås

## Bakgrund

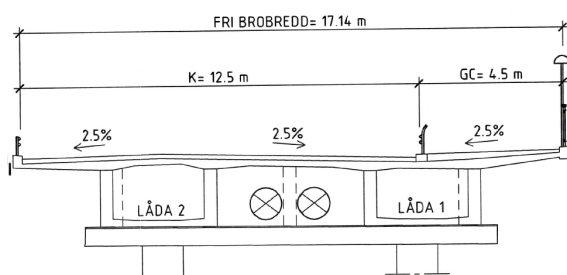
Vallbybron i Västerås består av två spännarmerade balkbroar och är belägna längs E18 i Vallby, Västerås gående över Svartån. Broarna utsträcker sig i väst-östlig riktning, en planritning av broarna visas i Figur 98. Broarna undersöktes i området över Svartån mellan stöd 5 och 6 och tvärsnitt av broarna i denna sektion, norra bron, BRO 19-24-1, samt ett tvärsnitt av den södra bron, BRO 19-24-2, visas i Figur 99 respektive Figur 100. Den norra bron är byggd 1960 och den södra 1975. Båda tvärsnitten är dubbla lådbalksbroar. Det kan också noteras att den fria brobredden skiljer sig åt i de båda fallen, där den äldre bron har en fri brobredd av 12,5 m och den nyare 17,14m, dock ligger mittremsan på den senare bron så det faktiska brobredden är ungefär densamma för båda broarna.



Figur 98 Planritning av BRO 19-24-1 och 19-24-2



Figur 99 Sektion av BRO 19-24-1 – riktning mot Enköping



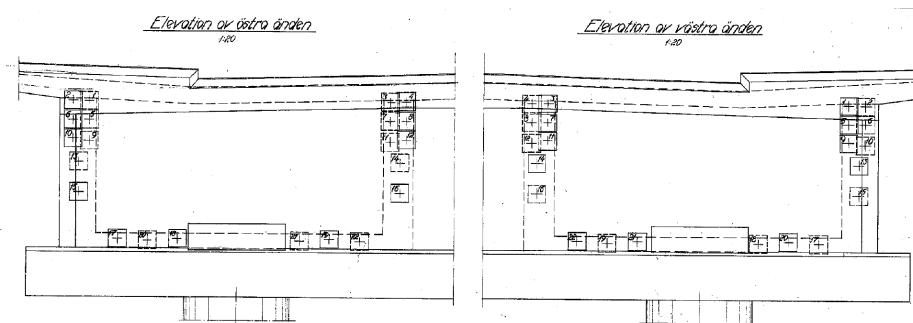
Figur 100 Sektion av BRO 19-24-2 – riktning mot Enköping

I Tabell 22 ges en kort sammanfattning över material och geometri för Vallbybroarna. Broarna är snarlika och de båda konstruktörerna har använt sig av spännsystem BBRV med trådar  $\phi 6$ , kvalitet och antal skiljer sig åt med det gör även spännkablar placering över tvärsnittet.

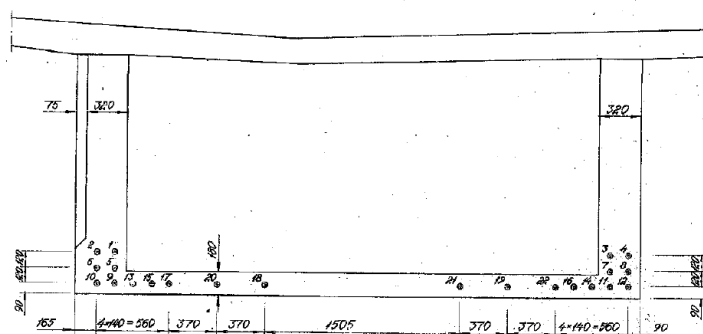
Tabell 22 Kort fakta över Vallbybroarna

Bro	19-24-1	19-2-4-2
Byggnadsår	1960	1975
Byggnadstyp	Balkbro spännarmerad betong	Balkbro spännarmerad betong
Antal spann	13, varierande längd	13, varierade längd
Spännvidd	257,3 m	257,3 m
Fri brobredd	12,5 m inkl. GC	17,14 m inkl. GC
Material i överbyggnad	Betong Btg I Std K400, grupp a, T, vattentät. Slakarmering Ks40	Betong Btg I Std K400 (framgår inte på översända ritningar) Slakarmering Ks40
Spännarmering	BBRV, 32 trådar $f_6$ mm i varje kabel. St 140/170 KP/mm <sup>2</sup>	BBRV, 44 trådar $f_6$ i varje foderrör, St 150/175 KP/mm <sup>2</sup>
Konstruktör	Kreügers	Kjessler & Mannerstråle AB

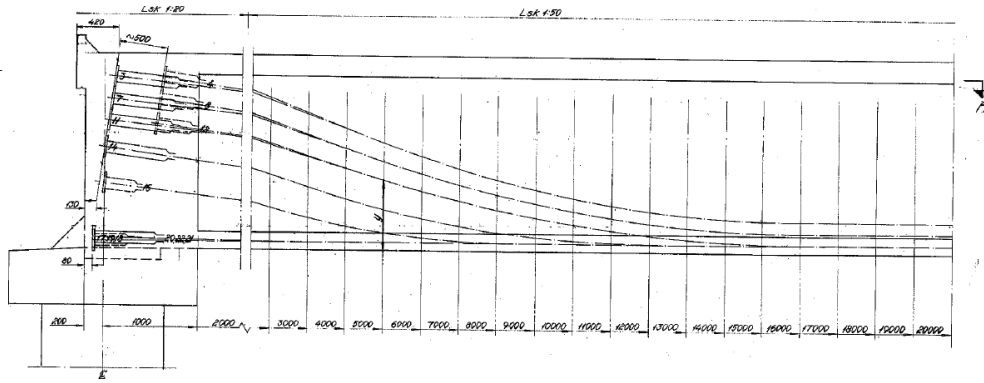
I Figur 101 visas en elevation av östra och västra änden för BRO 19-24-1 och i Figur 102 visas en sektion av mittsnittet. I Figur 103 visas spännkablar fördelning i vertikalplan från östra och västra änden över mittsnitt. På motsvarande sätt visas sektioner för BRO 19-24-2, där Figur 104 visar plan och längdsektion för spännkablar och tvärsnittet visas i snitt E44, Figur 105 och Figur 106 för snitt F44 och G44 samtliga mot Enköping.



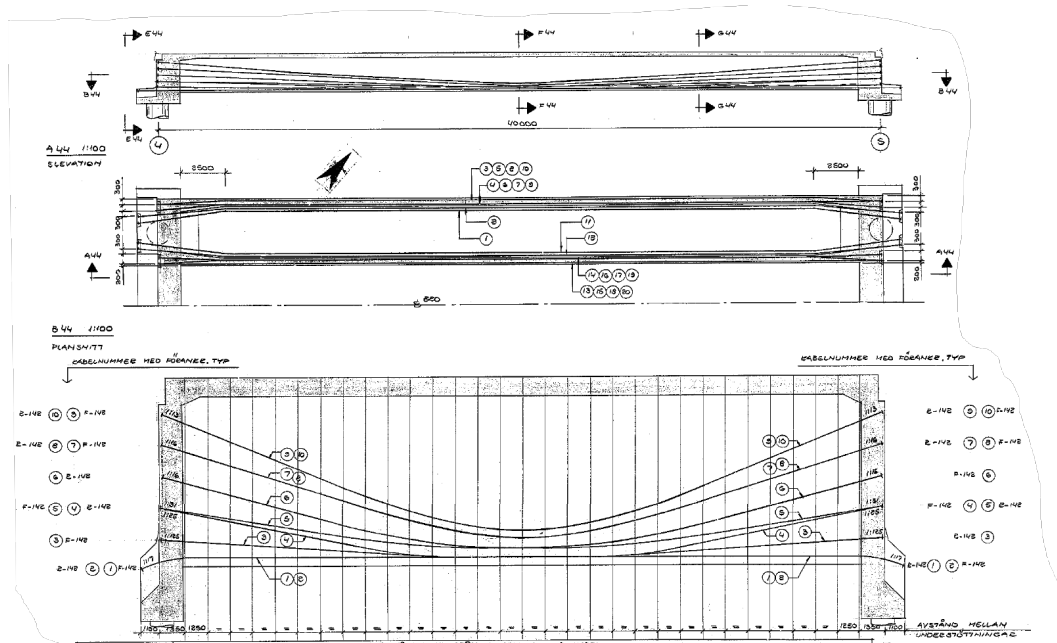
Figur 101 Sektioner Öster, Enköping och väster, Köping för BRO 19-24-1



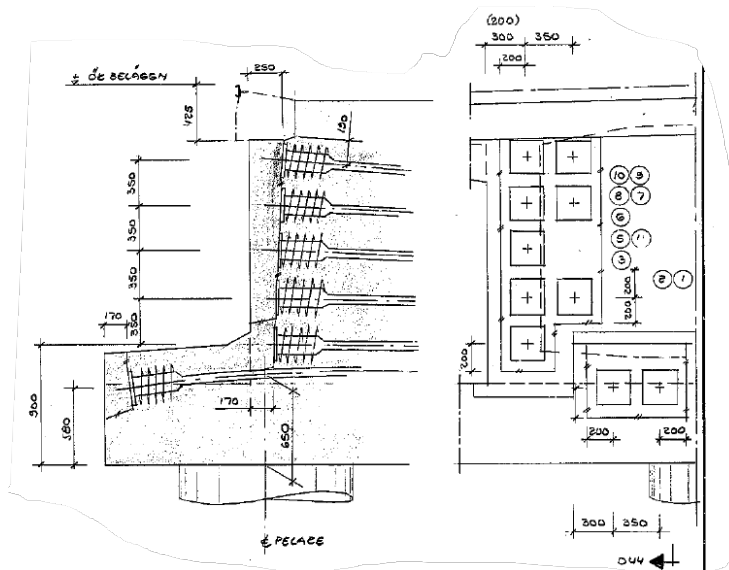
Figur 102 Sektion av mittsnitt för BRO 19-24-1



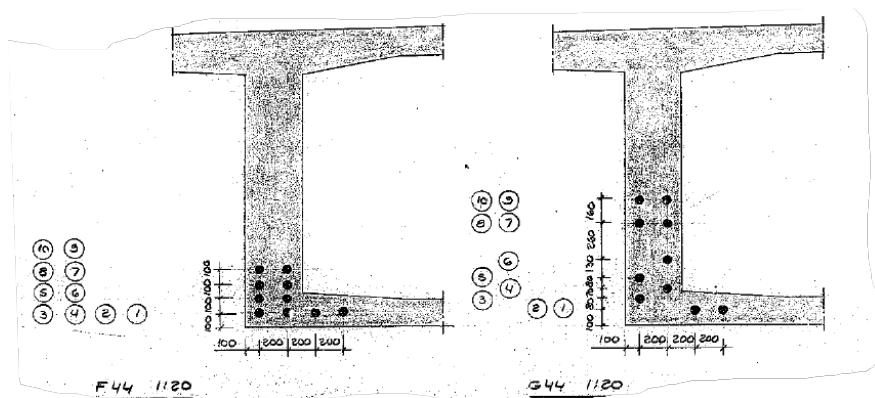
Figur 103 Spännkablers vertikala fördelning i längsled för BRO 19-24-1



Figur 104 Spännkablers fördelning i broåda för BRO 19-24-2



Figur 105 Sektion E44 mot Enköping



Figur 106 Sektionerna F44 och G44 mot Enköping

## Inspektion av spännkablar

### Procedur för inspektion

Inspektionen av Vallbybroarna utfördes under vecka 37, 2022. Innan inspektion hade vederbörliga dokument gått igenom. I överenskommelse med beställaren utfördes inspektionen från insidan av bron. Temperatur vid genomförande var ca 10-14 °C. Eltillförsel ordnades med mobilt elverk. Inspektionen har genomförts på följande sätt; först gicks samtliga tillhandahållna dokument igenom, arbetet planerades upp innan inspektionen påbörjades, t ex genomfördes platsbesök för att kartlägga tillgänglighet. Åtkomst till bro erhöles genom monterade trappor och avbärarplan. Tidigare kom man åt insidan av brolådorna genom manluckor från ovasidan. Inspektionen påbörjades genom att en visuell genomgång av samtliga brolådor genomfördes, anteckningar om rostutfällningar, vattenläckage eller onormala skador gjordes.

De undersökta områdena kartlades med LIDAR för att underlätta detaljkontroll vid senare skede. Därefter vidtog den oförstörande provningen där placering av foderrör (och slakarmering) kartlades med georadar (GPR). Kablarnas utsträckning markerades i de områden som undersökningarna gjordes. Spännkablar i livet i båda brospannen, ca 4-6 m från stöd, för samtliga lådor kartlades, dvs 8 stycken. Därtill undersöktes 1 kabel i nedre bropanelplatta i låda 2. Orsaken till att denna kabel valdes ut var att området var kraftigt angripet av klorider och slakarmeringen hade omfattande korrosionsangrepp. Efter GPR skanning genomförde skanning med tomografi (MIRA). Skanning görs över 10 cm segment längs de utmärkta kablarna, denna data processas därefter för att skapa 3D bilder av undersökt område. Samtlig undersökning utfördes från insidan av brolådorna.

Verifiering av skanning gjordes genom borrhning och friläggning av kablar. Först kartlades avstånd och placering av såväl slakarmering som foderrör extra noggrant i de områden som undersöktes. Borrhning gjordes därefter med hammarborr  $\phi 16$  mm in till foderrör, extra kontroll gjordes med videoskop. Därefter genomfördes en kärnborrhning,  $\phi 100$  mm, in till ca 1 cm från foderröret. Foderröret frilades och därefter öppnades det upp. Prover av injekteringsbruket togs ut för undersökning av klorider. Hålet lagades sedan upp i tre steg; 1) noggrann rengöring, 2) tätning med epoxi och 3) igengjutning med betong. Totalt tog inspektionen på plats 4 dagar med 3 personer. Inspektionen har följt förfarandet beskrivet i avsnitt 1 och kan anses uppfylla Nivå 1 och Nivå 2.



## Visuell inspektion

Vid den visuella inspektionen undersöker man förekomsten av sprickor, synliga skador orsakade av armeringskorrosion och bomknackning för att lokalisera delamineringar. En stor del av de synliga skadorna kan påverka resultaten för oförstörande provningen negativt, t ex i områden där man har omfattande och synlig bom i betongen, kraftigt synlig pågående korrosion som medför ojämna och skrovliga ytor det kan därför vara mer effektivt att fokusera på platser utanför dessa områden.

Förutom inspektionen planeras skanningarna i detalj och de olika områdena namnges för att veta var provningarna genomförts. Visuella inspektionen av Vallbybroarna begränsade sig till områdena kring inspektionszoner, dvs de fyra brolådorna samt östra och västra ändarna.

## LIDAR

Fördelen med en LIDAR-skanning är att man kan vrida och vända på det skannande området när man sitter på kontoret och gå igenom tillståndsbedömningen efteråt mer i detalj om man skulle behöva.

I jämförelse med foto så erhåller man en 3D presentation och större känsla av att man befinner sig på platsen. Nackdelen är i samband med presentation i rapportform att informationen är svårt att förmedla. Nedan har specifika områden valts ut från skanning i respektive låda i östra – mot Enköping respektive västra – mot Köping valts ut.

### *Låda 1 öster respektive väster*

I Figur 107 kan noteras att vatten har runnit in från manluckan i den östra sidan. Detta vatten är i normalfallet endast regnvatten, men under den kalla årstiden följer klorider med från tösalter. Den västra sidan är torr. Inga skador i betongen kunde noteras brolåda 1 och uttagna kloridnivåer i plattan understiger kritiska nivåer för korrosion, se Tabell 23.



Figur 107 Brolåda 1, östra respektive västra sidan

### *Låda 2 öster respektive väster*

I Figur 108 visas LIDAR-skanning för brolåda två, öster respektive väster. Den västra sidan var torr och inga skador noterades, dock uppvisade den östra sidan omfattande läckage från manluckan och därtill omfattande korrosionsangrepp på armeringen under luckan, men också tvärs underflänsen. Kloridhalterna översteg även gränsvärde för kloridinitierad korrosion, se Tabell 23.



Figur 108 Brolåda 2, östra respektive västra sidan

### *Låda 3 öster respektive väster*

Brolåda 3, se Figur 109, har även den vatten på underflänsen genom manluckans läckage. Den västra sidan var torr. Kloridhalterna i lådan understeg gränsvärde för kloridinitierad korrosion, se Tabell 23



Figur 109 Brolåda 3, östra respektive västra sidan

### *Låda 4 öster respektive väster*

Brolåda 4, se Figur 110, visade även den på läckage genom manlucka och väster sida var torr. Kloridhalterna understeg kritisk nivå för kloridinitierad korrosion, se Tabell 23.



Figur 110 Brolåda 4, östra respektive västra sidan

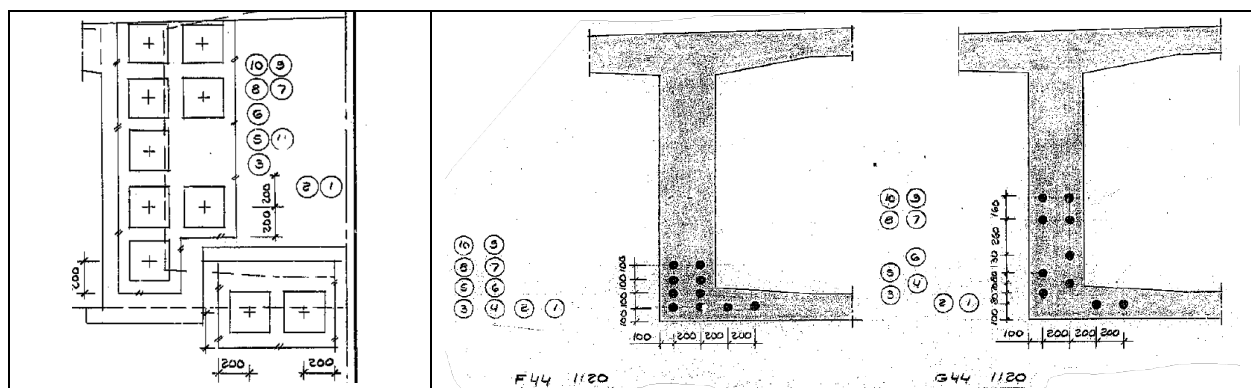
## Oförstörande provning

### Allmänt

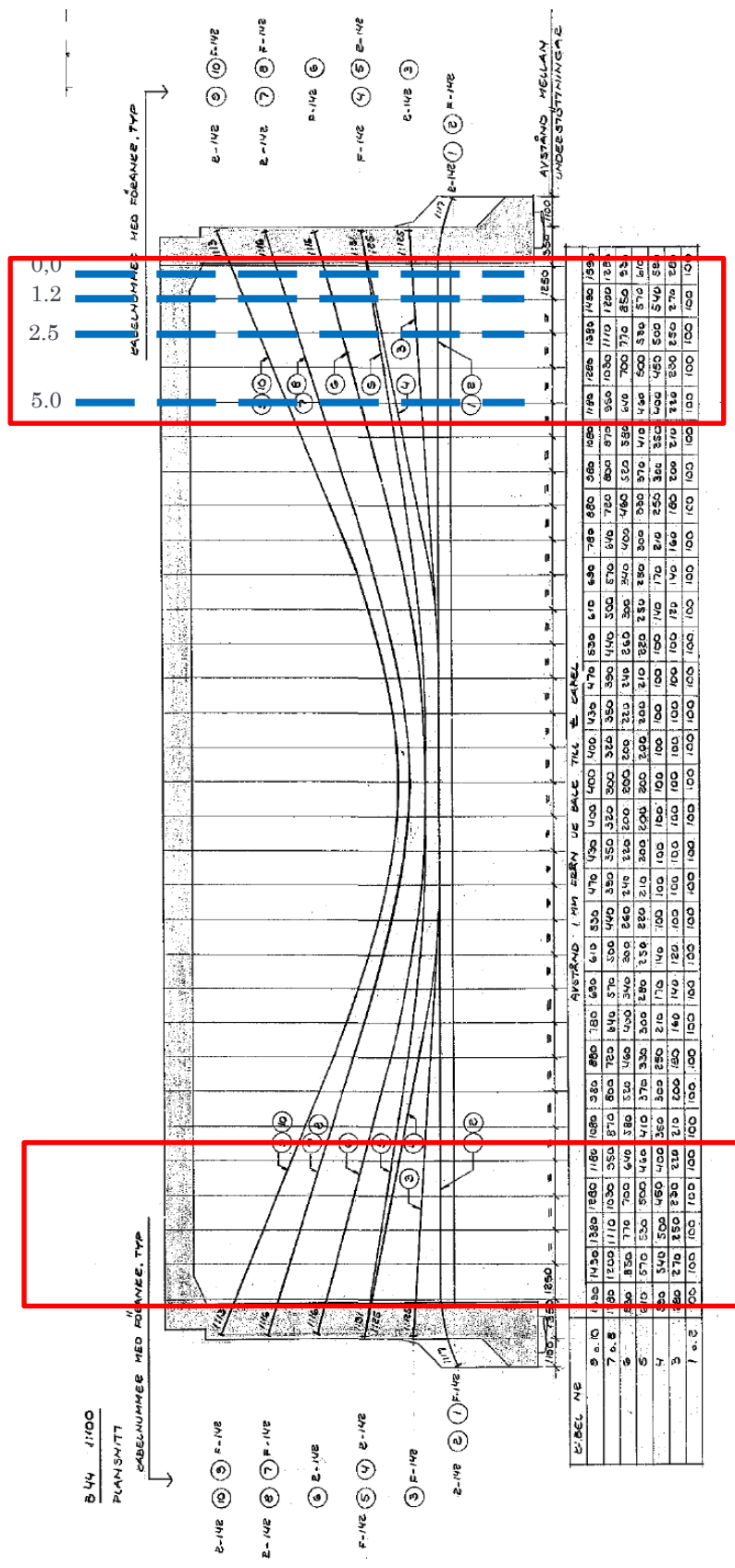
Vid en oförstörande provning är planeringen av inspektionen en stor del av ett lyckat resultat. Vid planeringen upprättas en provningsprocedur där val av metoder, i vilken ordning de skall göras och i vilka konstruktionsdelar framgår. Denna procedur används vid inspektionen för att systematiskt kunna gå igenom de delar som är relevanta för konstruktionens bärförmåga och status. Vid inspektion av spännkablar fokuseras de områden där störst risk föreligger för undermålig injektering. Erfarenhetsmässigt är det områdena närmast förankringszonerna och även vid lågzonerna på kablarna. Lågpunkter mitt i spannet är oftast svåra att skanna från insidan eftersom kablarna är placerade i underflänsen. För en fullständig skanning måste även utsidan beakta. I fallet med Vallbybroarna har ingen skanning av lågpunkter eller utsida utförts.

### Ground Penetrating Radar (GPR)

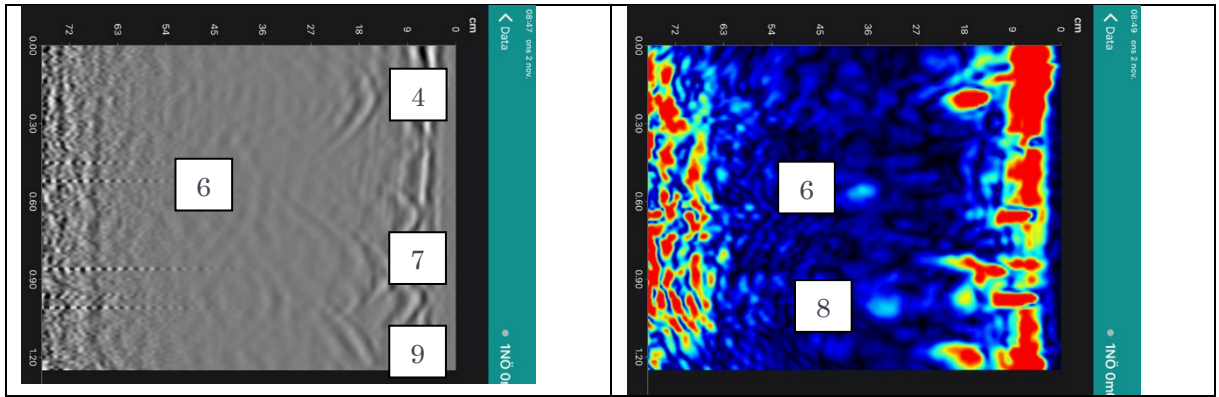
GPR ger en snabb och noggrann bild över hur armeringen är placerad inne i de olika konstruktionsdelarna och samtidigt som skanningen genomförs markeras intressanta områden ut, i detta fall spännkablarna. Vi får reda på vilket djup de är placerade och vi får reda på hur konstruktionen är uppbyggd. Denna information kan vi sedan jämföra med ritningarna för att se om det finns några avsteg från ritningen som kan påverka konstruktionen negativt. Förutom detta får vi även reda på relevant information som slakarmeringens placering och läge, dvs. c/c-mått och täckande betongskikt. Normalt genomför man ett stort antal GPR skanningar dels för övergripande förståelse dels för detaljerad kartläggning. I Figur 113 till och med Figur 116 visas typiska skanningar i Vallbybron, här representerat av brolåda 1 och den nordöstra sidan där kablarna har följts över en sträcka på ca fem meter. I figurerna visas två representationer, en radarkurva visas och en där reflektioner av armering och baksidan av sektionen visas. Genom att skifta mellan dessa representationer kan det ibland bara enklare att hitta de foderrör/kablar man letar efter. Observera att skanningarna är vända upp och ner. Som tidigare nämnts kan det ibland vara svårt att detektera armering/foderrör/kablar om de armeringslager närmast ytan är väldigt tätt placerat. Likaså är det svårt om inte säga omöjligt att detektera foderrör/kablar som är placerade direkt bakom varandra, de hamnar i skugga av den ytligt liggande kabeln. I Figur 111 visas olika sektioner längs brolådan, sektion D44 som är vid insidan av den östra (och västra) kortsidan i låda 1. I Figur 112 visas utsträckningen av kablarna längs bron.



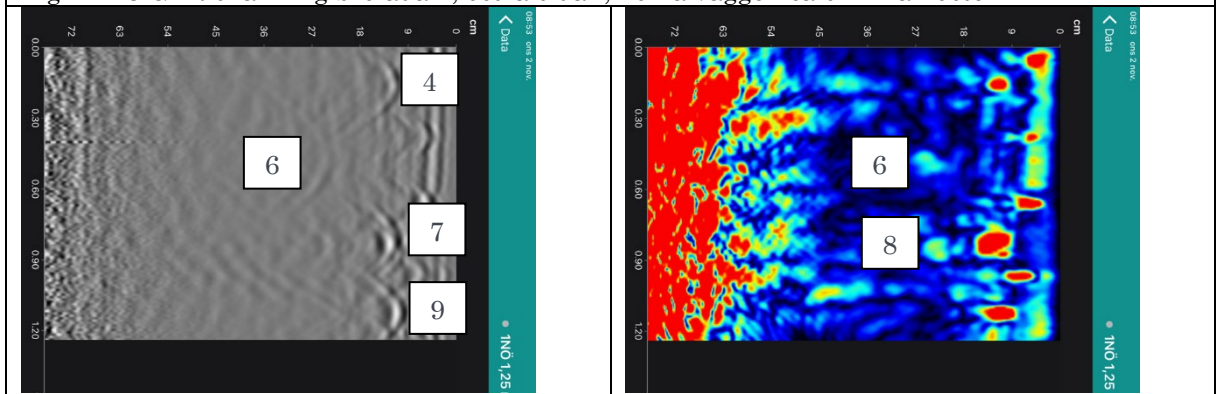
Figur 111 Sektioner, Sektion nära upplag, sektion i mitten och mellanliggande sektion(er)



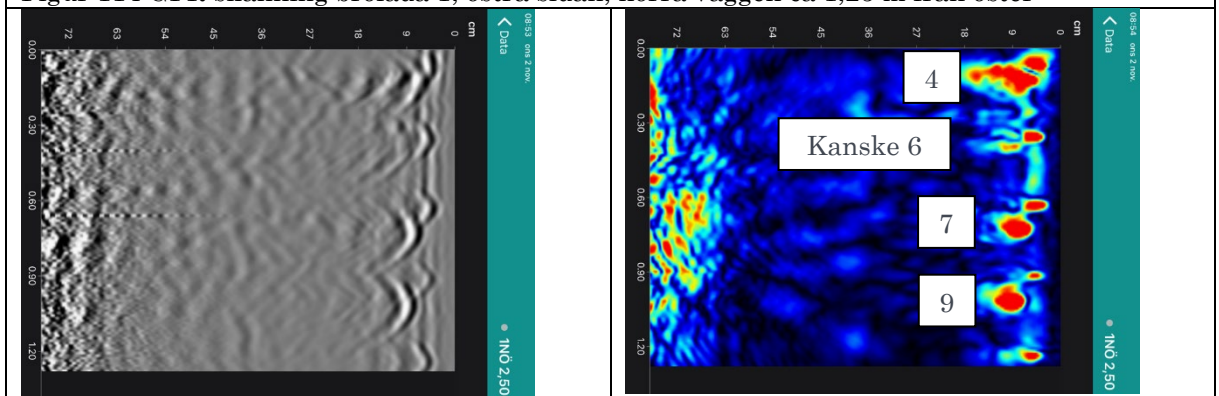
Figur 112 Kablars utsträckning i broåda 1 samt de områden som skannats.



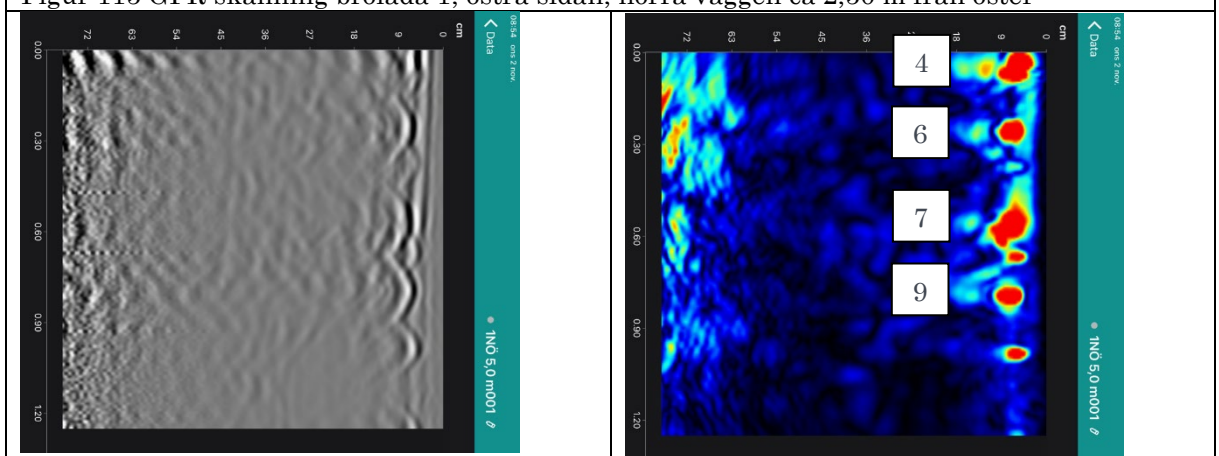
Figur 113 GPR skanning brolåda 1, östra sidan, norra väggen ca 0 m från öster



Figur 114 GPR skanning brolåda 1, östra sidan, norra väggen ca 1,25 m från öster

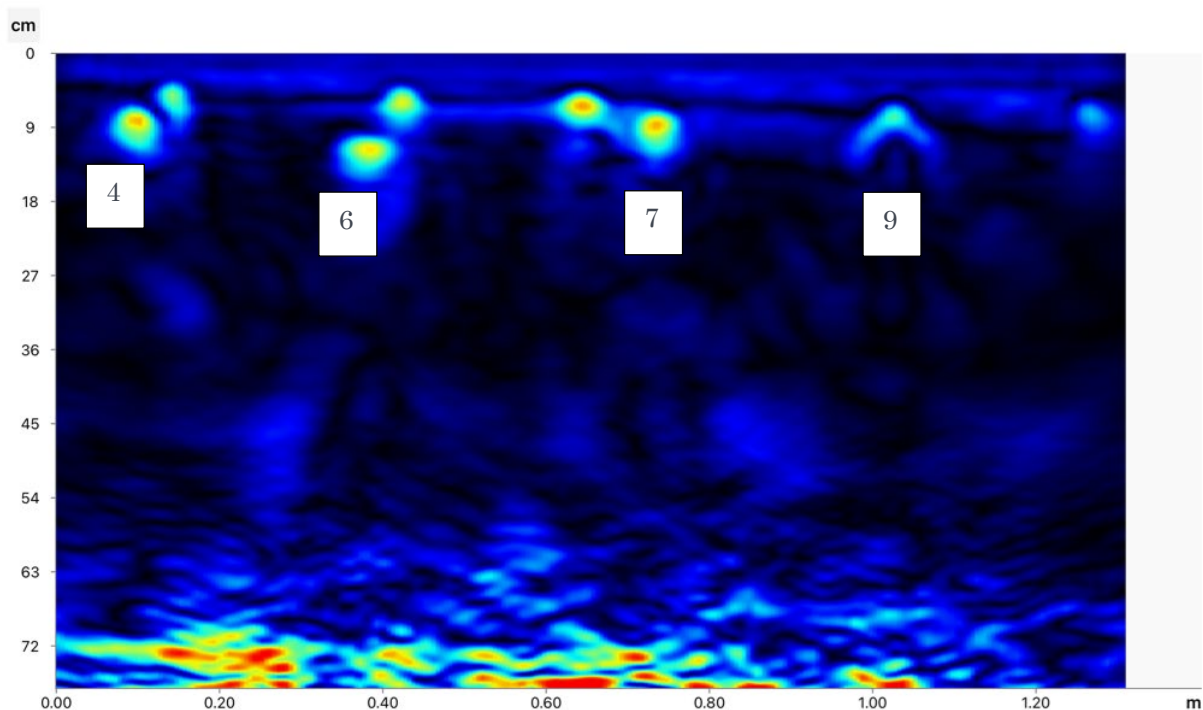


Figur 115 GPR skanning brolåda 1, östra sidan, norra väggen ca 2,50 m från öster



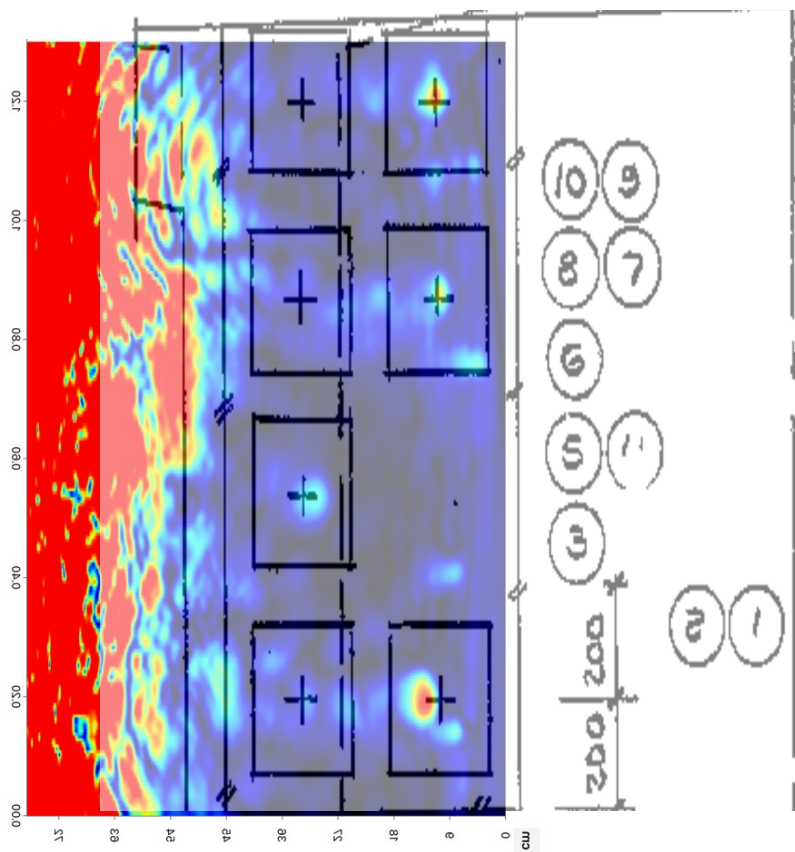
Figur 116 Skanning brolåda 1, östra sidan, norra väggen ca 5,00 m från öster

I ovanstående skanningar framgår spännarmeringen tydligt, i alla fall i de flesta fall, och det är relativt enkelt att följa kabeln. Det går också att notera över dessa fyra skanningar att kabel 6 förflyttar sig från att varit placerad i ytterkant till att flytta sig in mot innersidan, detta syns tydligt i snitt 2.0 m brolåda 1 NO där kabel 6 nästan ligger i nivå med de övriga tre kablarna. Kabel 9 syns knappt då den ligger i skugga av ovanliggande armeringsjärn, se Figur 117.

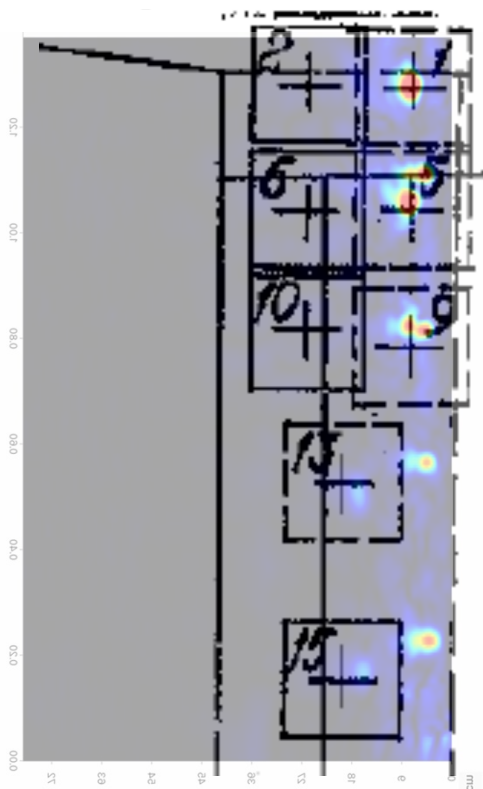


Figur 117 Brolåda 1 NO, 2 meter från stöd. Här ser vi att kablarna ligger mera i linje och kabel 6 nästan ligger i nivå med de övriga 3 kablarna. Kabel 9 syns knappt då den skuggas av överliggande armeringsjärn

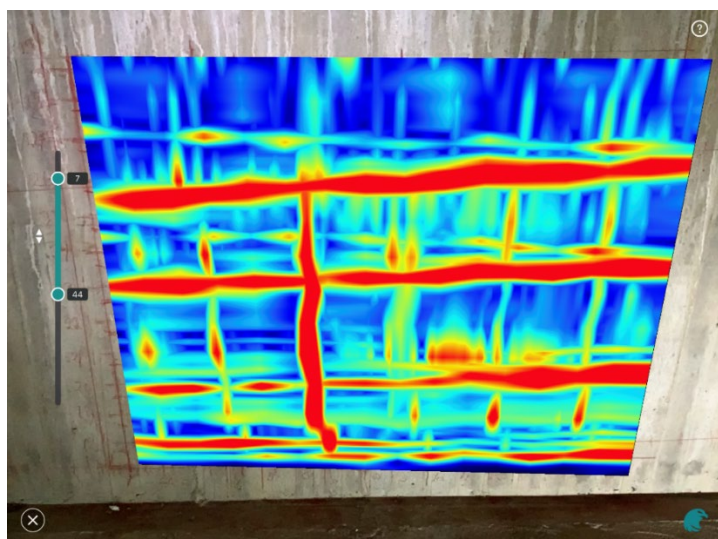
Speciellt intressant vid utvärdering är att överlagra skanningen på ritningen. Detta har bl a gjorts i låda 1 NO i sektion 0 m där kabel 4, 7 och 9 undersöktes närmare, se Figur 118. Kabel 5, 8 och 10 ligger dolda bakom de övriga och kunde inte lokaliseras med GPR:n. Motsvarande presentation har även gjorts för brolåda 3, se Figur 119. Här noteras att kabel 1, 5 och 9 framträder tydligt medan, medan 2, 6 och 10 inte kan lokaliseras. Dock framträder kabel 13 och 15, om ändock svagt. Två areaskanningar har också genomförts, i Brolåda 2 södra väggen mot Köping (V) och i brolåda 4 södra väggen mot Enköping (Ö). I båda dessa bilder framgår tydligt foderrör och slakarmering, se Figur 120 och Figur 121.



Figur 118 Brolåda 1, NO, Kabel 4, 7 och 9 undersöktes



Figur 119 Brolåda 3 NV, Kabel 1, 5 & 9 undersöktes och kabel 2,6 & 10 ligger dolda bakom de första och kunde inte lokaliserars



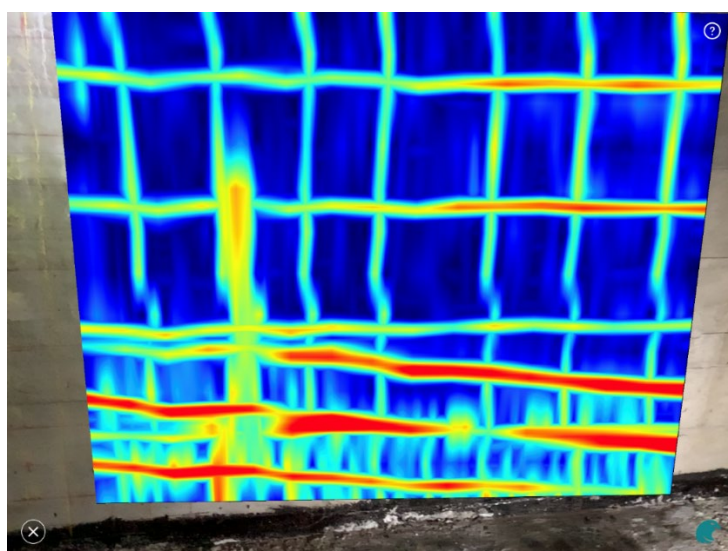
**Spännkabel 9**

**Spännkabel 7**

**Spännkabel 6**

**Spännkabel 4**

Figur 120 Areaskanning, Brolåda 2, SV



**Spännkabel 1**

**Spännkabel 5**

**Spännkabel 9**

Figur 121 Areaskanning Brolåda 4, SÖ

### Skanning av spännkablar med Ultraljud (tomografi)

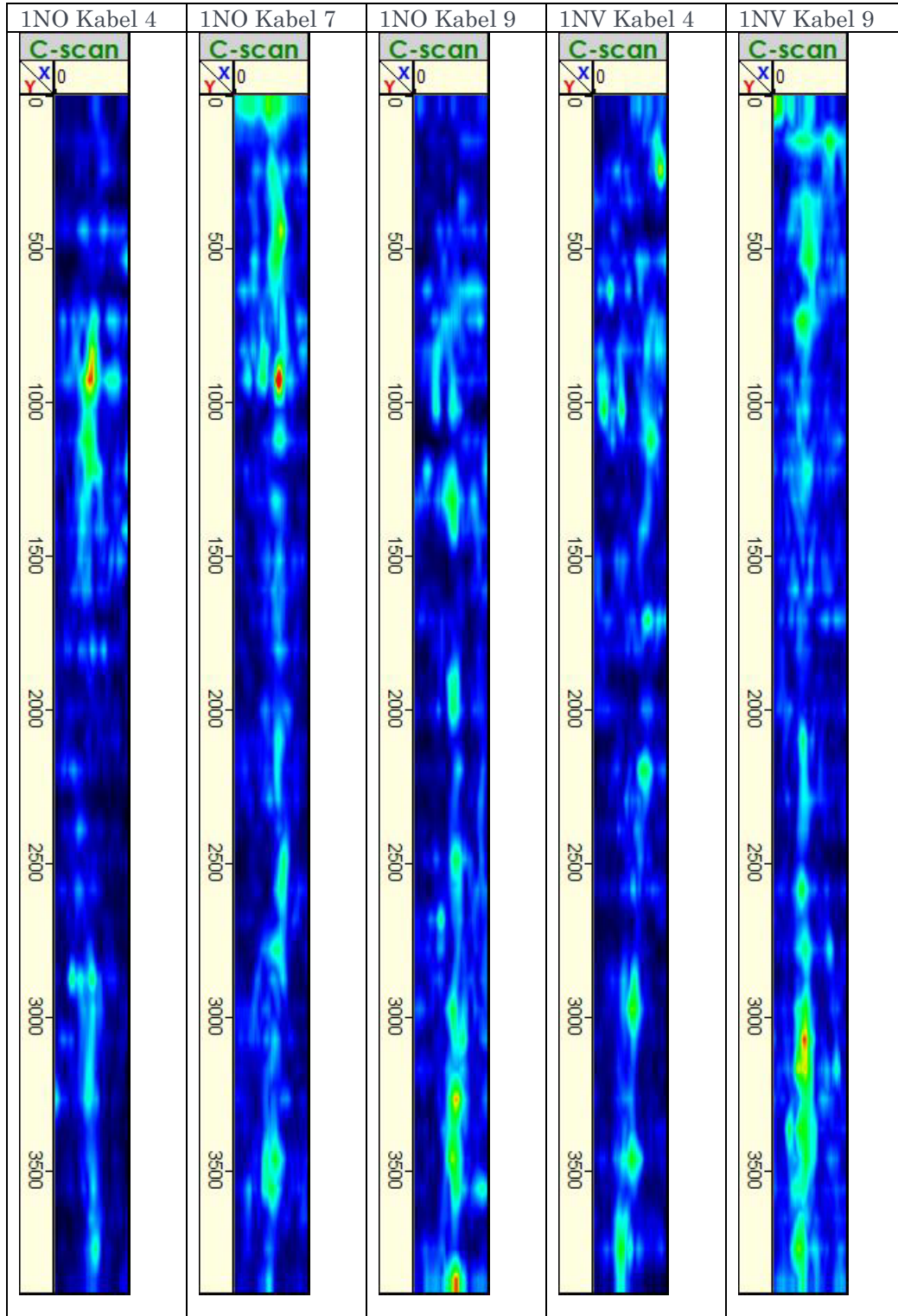
När spännkablar placering märkts ut kan därefter mätningar med ultraljud påbörjas. Detta instrument, MIRA, används för att undersöka om det finns håligheter eller betong med undermålig kvalitet, i eller i anslutning till spännkablar. Totalt skannades 34 stycken kablar fördelat på de 4 olika brolådorna. Totalt mättes upp 136 meter vilket innebär ca 1400 skanningar. Resultaten från skanningarna med ultraljud visas i Figur 122 till och med Figur 129. Erfarenhetsmässigt är de största riskerna för hålrum i kablarna närmast förankringarna då dessa är placerade i högzonerna. Denna inspektion har därför fokuserat på områdena från stöden och 4-5 meter in mot centrum av brolådorna.

För ett otränat öga kan det vara svårt att dra slutsatser från dessa ultraljudsskanningar, men vid undermålig injektering eller hålrum visar sig detta som större röda områden i spännkablar, de små röda områden som syns i mätningarna nedanför är inte några tecken på hålrum.

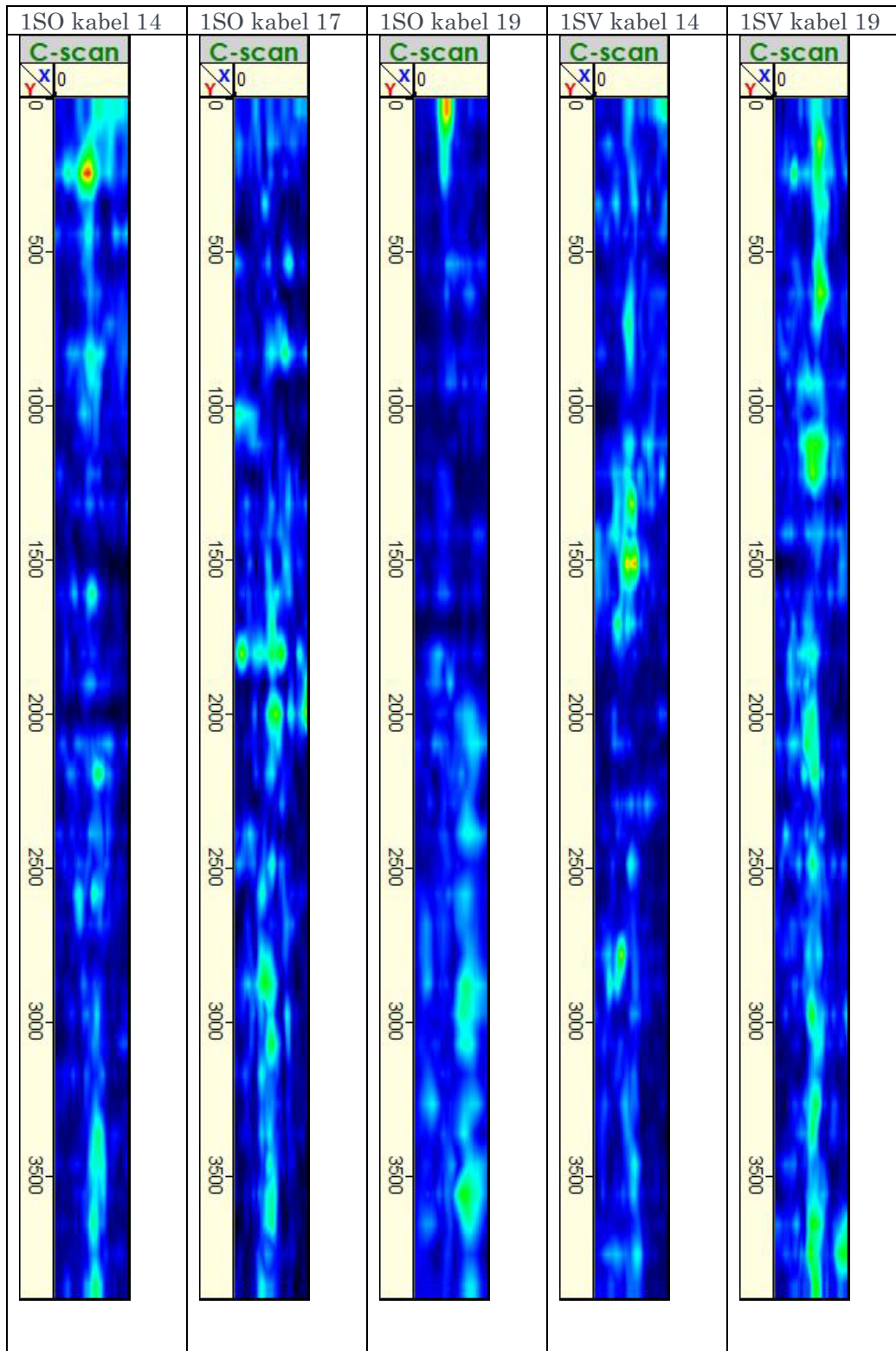
Undersökningen visade då att det inte förekommer några hålrum i spännkablar.

För att verifiera detta togs tre områden upp där kablar frilades, därtill togs injekteringsbruk ut för vidare undersökning gällande kloridinhåll.

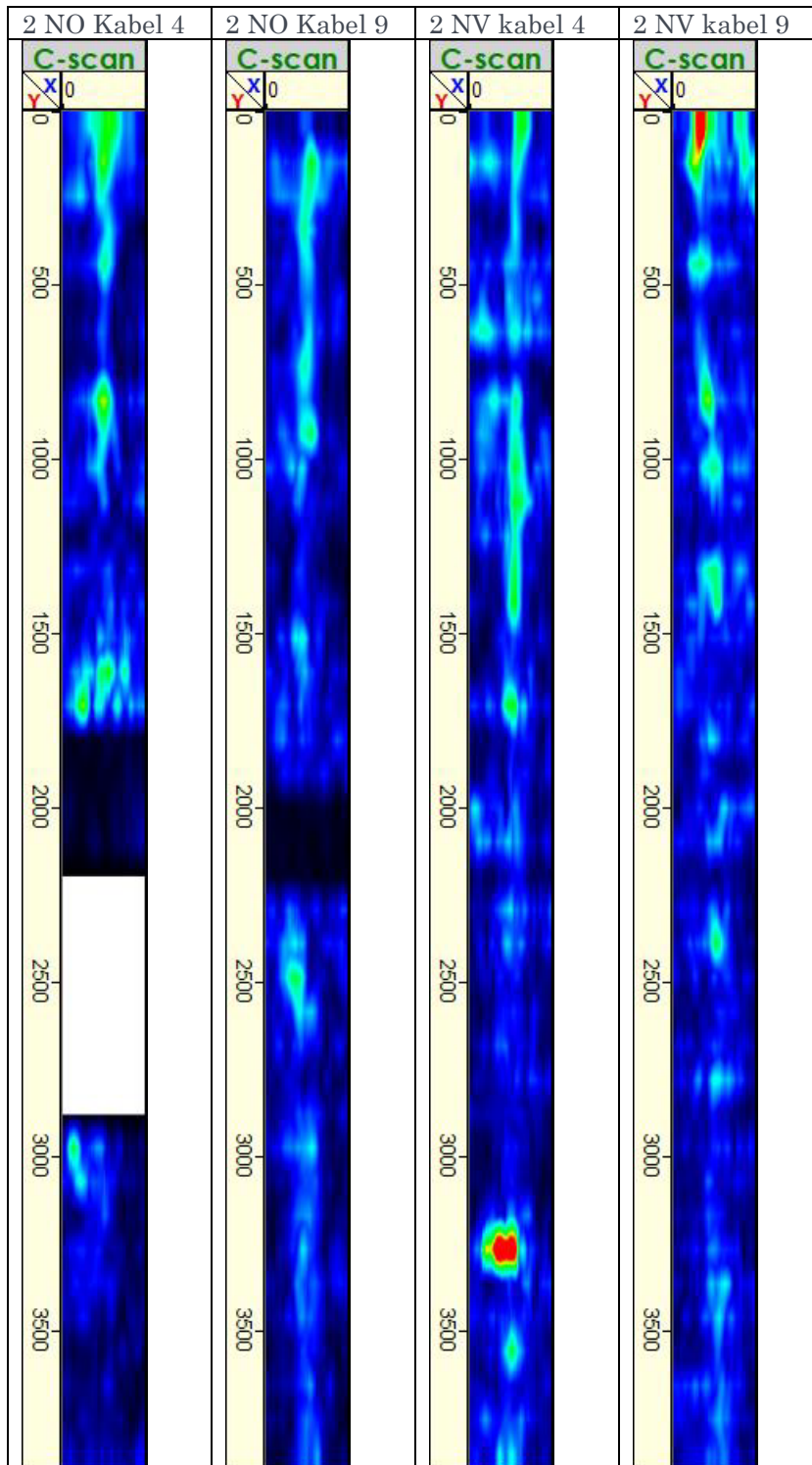




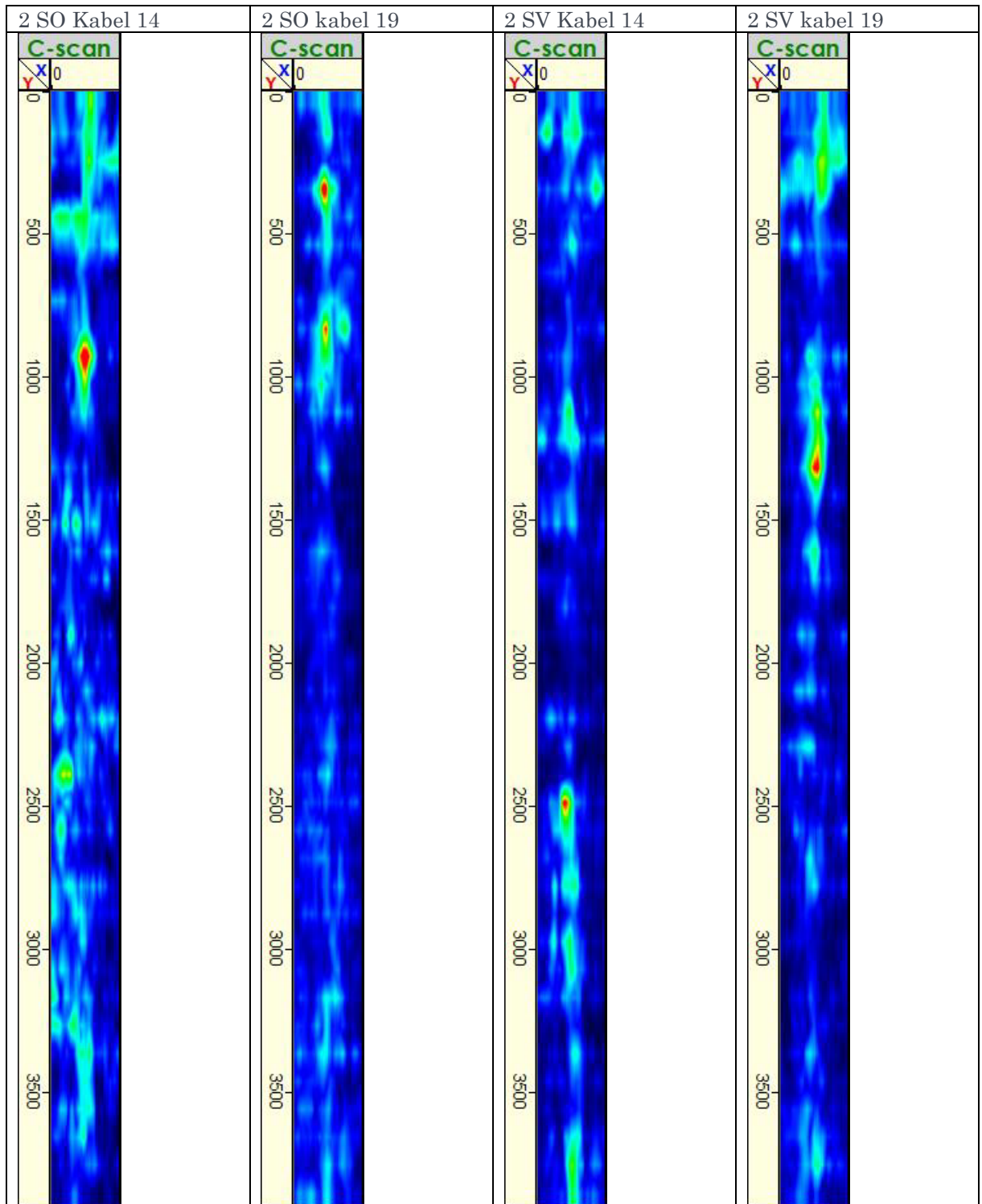
Figur 122 Ultraljudsmätningar Brolåda 1, Norra sidan



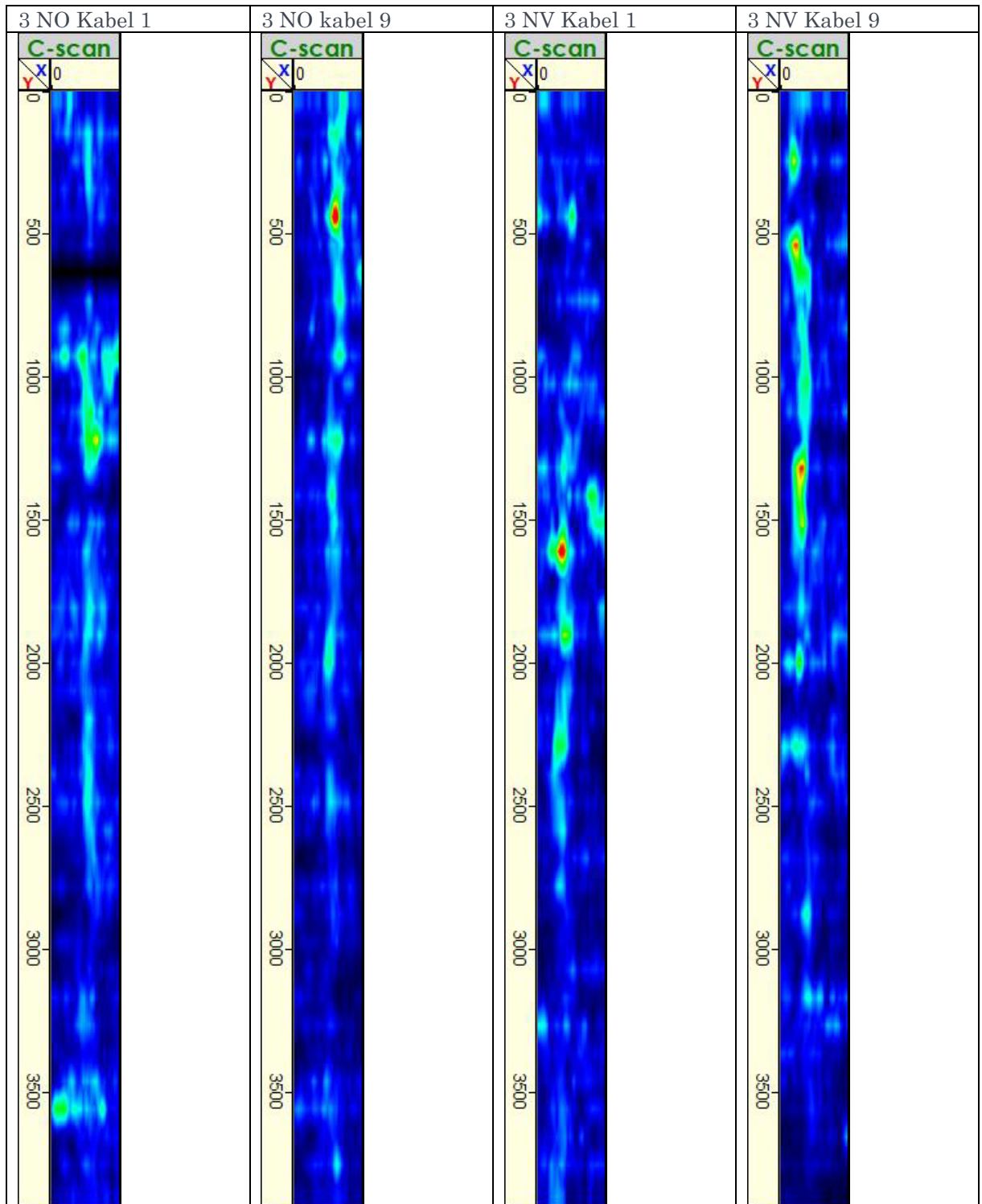
Figur 123 Ultraljudsmätningar Brolåda 1, Södra sidan



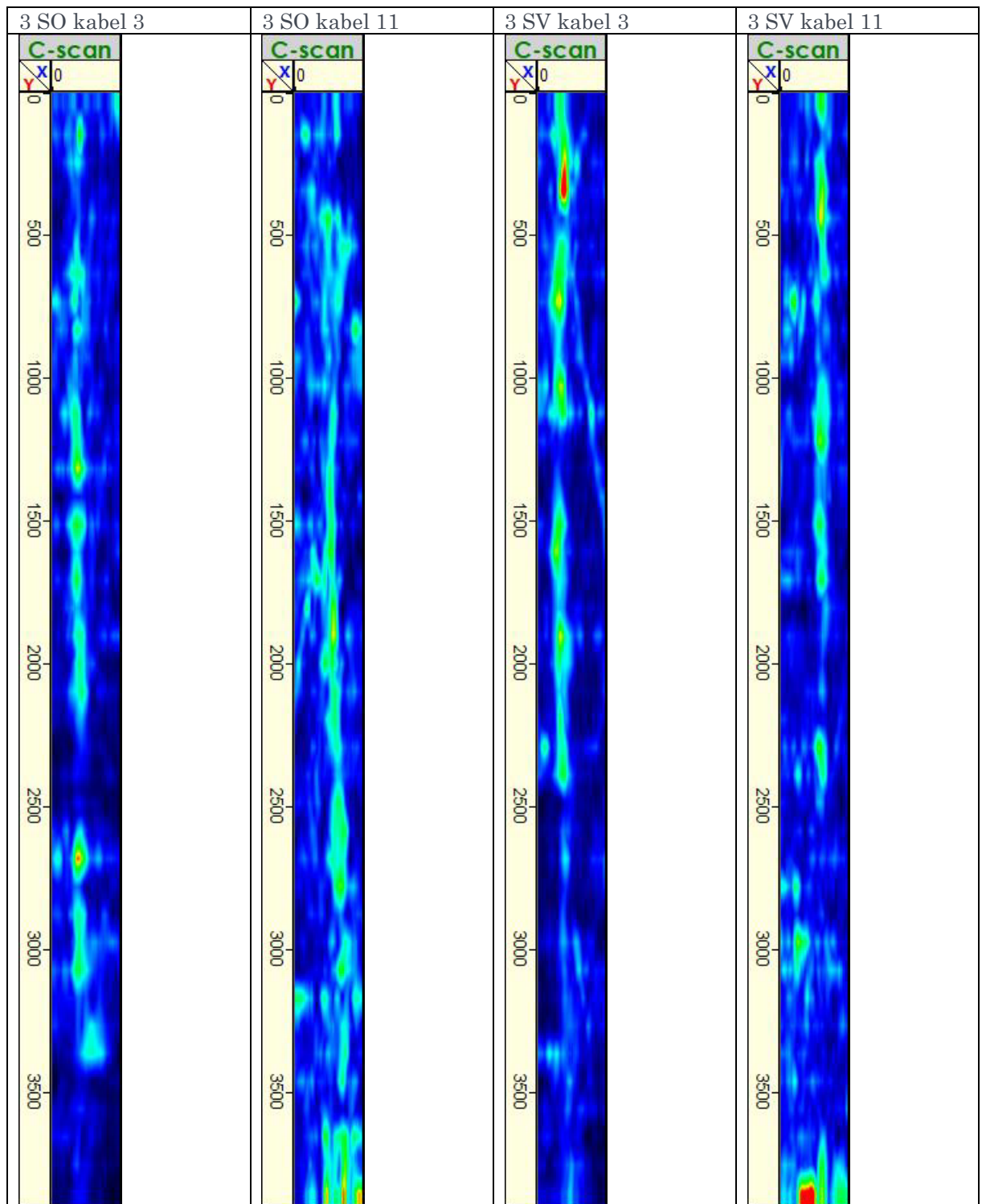
Figur 124 Ultraljudsmätningar Brolåda 2, Norra sidan



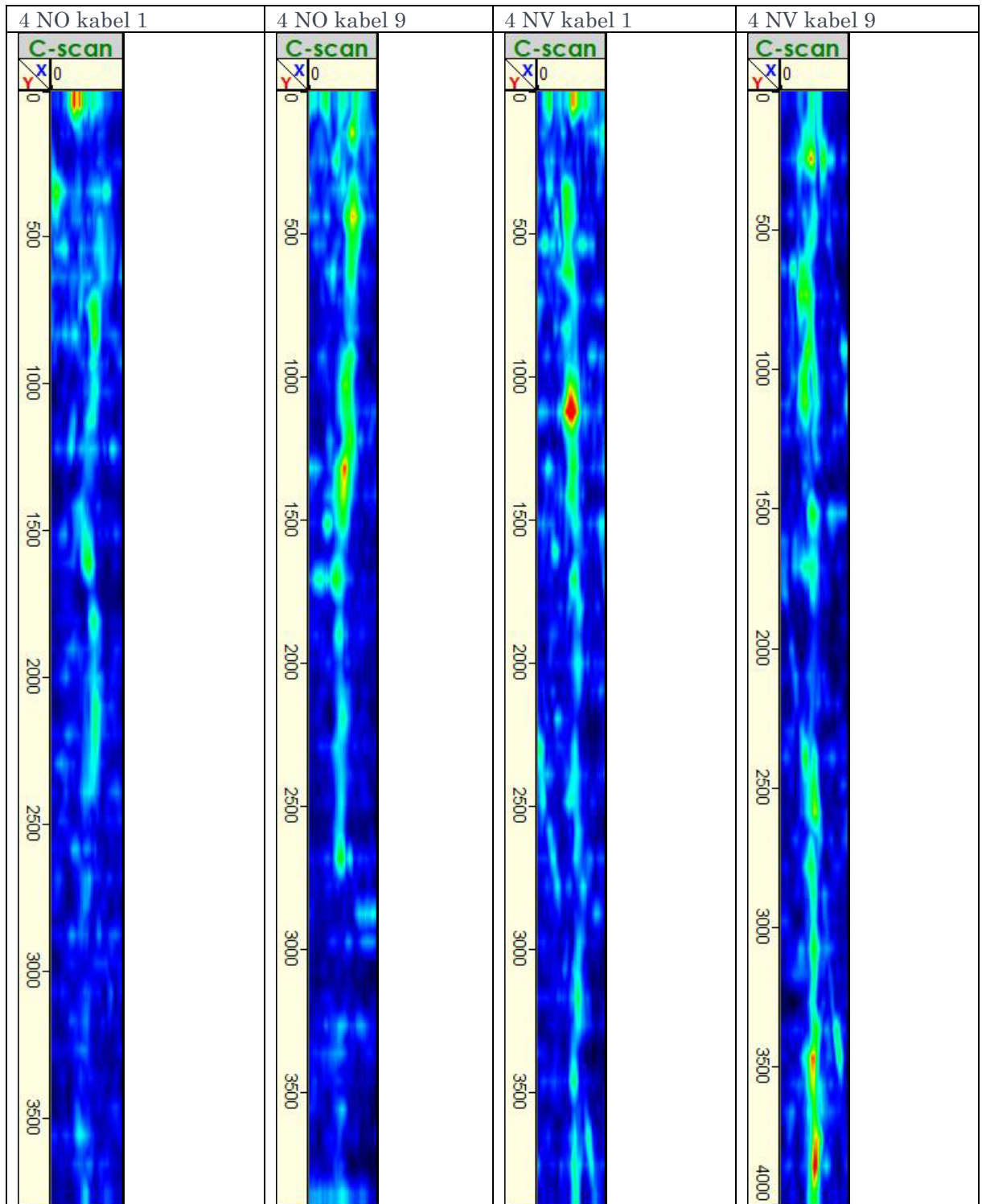
Figur 125 Ultraljudsmätningar Brolåda 2, Södra sidan



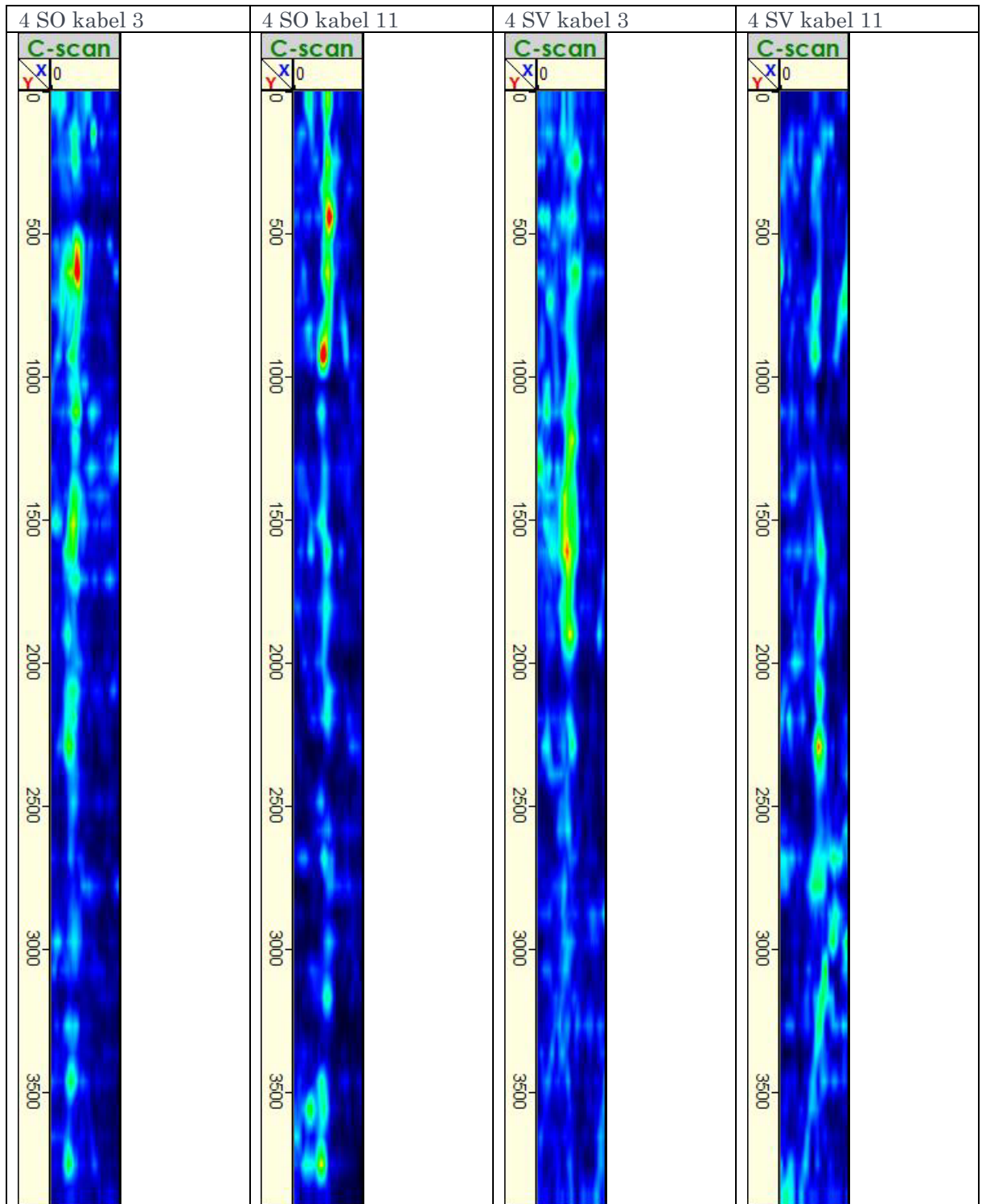
Figur 126 Ultraljudsmätningar Brolåda 3, Norra sidan



Figur 127 Ultraljudsmätningar Brolåda 3, Södra sidan



Figur 128 Ultraljudsmätningar Brolåda 4, Norra sidan



Figur 129 Ultraljudsmätningar Brolåda 4, Södra sidan



## Övriga provtagning

Övrig provtagning var kärnborrning samt uppmätning av kloridinnehåll.

### Kärnborrning

För att verifiera resultaten från ultraljudsskanningen öppnades det upp tre områden för närmare undersökning. Områdena kartlades med såväl GPR som täcksiktmetare innan borrning, dels för att kartlägga slakarmeringen så den inte borrades av, dels för att kartlägga exakt placering av foderrör, både i vertikal och horisontell riktning samt djup från ytan. När detta var gjort användes en slagbormaskin med borr  $\phi 16$  för att borra hål in till foderröret, videoskop används för verifiering.



*Montering av kärnborrningsutrustning*



*Borrning in till ca 10-15 mm från foderrör*



*Öppnande av foderrör*



*Inspektion av frilagda spännkablar*



*Tätning/lagning med epoxi*



*Igengjutning med betong*

Figur 130 Sekvenser i samband med friläggning av spännkablar

Därefter monterades kärnbörningsutrustningen, borrh  $\phi 100$  mm användes. De foderrör som valdes ut var placerade på ca 90 mm från ytan. Ungefär 10-15 mm från foderröret avslutades kärnbörningen. Här avlägsnades då betongen försiktigt genom bilning. När väl foderröret var framme öppnades det upp och kablarna frilades och inspekterades. I samband med utförd inspektion togs injekteringsbruk ut för kloridprov. Efter avklarad inspektion skyddades området som öppnats upp med tvåkomponents epoxi och därefter gjöts hålet igen med betong motsvarande ca C30/37. I Figur 130 visas de olika sekvenserna från borrning till lagning. I Figur 131 visas de frilagda kablarna från LIDAR skanningar från de olika provområdena.

Totalt kärnborrades 3 hål, 2 där vi kunde befara att klorider trängt in på grund av omfattande läckage och 1 hål där området såg torrt och bra ut. Dessa områden var brolåda 2 östra sidan mot södra väggen där omfattande korrosion kunde noteras i slakarmeringen, brolåda 1 östra sidan norra väggen där betongen såg bra ut samt och i brolåda 4 östra sidan och södra väggen, se även Figur 131.



*Brolåda 2 SO Golv*

*Brolåda 1 NO*

*Brolåda 4 SO*

Figur 131 LIDAR Skanning av de tre hålen som öppnades upp

Korrosion noterades på utsidan av foderröret placerat i brolåda 2 SO i golvet. För övrigt kunde ingen korrosion noteras på vare sig foderrör eller de frilagda spännkablarna.

### Kloridprover

Total togs det ut 43 kloridprover på olika platser i brolådorna samt från injekteringsbruket, se Tabell 23. Totalt sett var det låga nivåer av klorider där kritiskt kloridinnehåll normalt definieras som % Cl- i förhållande till cementvikt överstigande 0.3% för vanlig armering och 0.1% för spännkablarna. I Tabell 23 har betongvikten räknats om till cementvikt där vi antagit cementhalt på ca 16% i betongen. I Tabell 23 har nivåer under denna gräns markerats med grön och nivåer över med rött. Nivåer på gränsen anges med gul färg. Provtagning har gjorts på samma nivå som olika kablar därav beteckningarna t ex 1 SÖ 16 anger brolåda 1 mot östra stödet på södra sidan och kabel 16. Proven i samtliga fall har tagits mellan 1.5 -2.0 m från brolådans kortsida. Djupet är innanför slakarmeringen med utanför foderrören, dvs ca 40 – 60 mm in från ytan. Därtill togs borrhkärnor,  $\phi 20$ , men kärnborrh ut där kloridhalten utvärderades i höjd och djup vid spännkablarna, se prov 39-43.

I brolåda 2 nordost var höga kloridhalter förväntade då detta område var skadat på grund av långvarig armeringskorrosion orsakat av tölsalter och vatten från farbanan ovanifrån. Vi kan också notera att det finns relativt höga kloridhalter i det injekteringsbruk som togs ut från underflänsen, 0.263%, och detta överstiger även kritisk halt för spännkablarna. Detsamma gäller det prov som togs ut i låda 4 och kabel 11, här är kloridhalten hög, 0.831%, och överstiger med råge tillåten halt.

Tabell 23 Kloridprover från Vallbybroarna

Nr	% Cl- cem vikt	Placering	Kommentar	Nr	% Cl- cem vikt	Placering	Kommentar
1	0,038	1SÖ16		18	0,038	3 SÖ 11	
2	0,025	1SÖ17		19	0,056	3 SÖ 14	
3	0,019	1SÖ19		20	0,200	3 SÖ 16	Gränsnivå
4	0,019	1NÖ4		21	0,025	3 NÖ 1	
5	0,019	1NÖ6		22	0,044	3 NÖ 5	
6	0,025	1NÖ7		23	0,044	3 NÖ 9	
7	0,025	1NÖ9		24	0,019	3 NÖ 13	
8	0,044	2SÖ14		25	0,025	3 NÖ 15	
9	0,025	2SÖ16		26	0,019	4 SÖ 3	
10	0,025	2SÖ17		27	0,019	4 SÖ 7	
11	0,025	2SÖ19		28	0,013	4 SÖ 11	
12	1,825	2NÖ4	Kritisk nivå	29	0,025	4 SÖ 14	
13	0,563	2NÖ6	Kritisk nivå	30	0,038	4 SÖ 16	
14	0,381	2NÖ7	Kritisk nivå	31	0,031	4 NÖ 1	
15	0,100	2NÖ9	Gränsnivå	32	0,025	4 NÖ 5	
16	0,031	3SÖ3		33	0,019	4 NÖ 9	
17	0,025	3SÖ7		34	0,031	4 NÖ 13	
35	0,038	4NÖ15					
36	0,263	2SÖ	Underfläns injektering (vit) i hålet – injekteringsbruket undersöktes				
37	0,831	4SÖ	Injektering kabel 11 (grå) i hålet – injekteringsbruket undersöktes				
38	0,050	2NÖ	Injektering kabel 4 (vit) i hålet – injekteringsbruket undersöktes				
39	0,044	1SÖ	Borrkärna, djup 9 cm ca 50 cm upp från underfläns, mellan kabel 4 och 6, i uttagen borrkärna ca 1.5 från insida kortsida, $\phi$ 20 mm				
40	0,013	2NÖ	Borrkärna, djup 9 cm ca 50 cm upp från underfläns, mellan kabel 4 och 6 i uttagen borrkärna ca 1.5 från insida kortsida, $\phi$ 20 mm				
41	0,019	3SÖ	Borrkärna, djup 9 cm 30 cm upp från underfläns, mellan kabel 14 och 16, ca 1.5 m från insida kortsida, $\phi$ 20 mm				
42	0,025	4NÖ	Borrkärna, djup 9 cm 30 cm upp från underfläns, under kabel 9, ca 1.5 m från insida kortsida, $\phi$ 20 mm				
43	0,013	2NÖ	Kabel 4 vid foderrör 11 cm djup				

## Sammanfattning och förslag till fortsatt arbete

### Allmänt

Metodiken att kartlägga och inspektera befintliga spännkablar fungerar bra och är relativt effektiv. I det aktuella fallet har samtliga foderrör och spännkablar undersökts från insidan av lådorna, dvs. inga kablar placerade mot utsidan har undersökts. Endast kablar i liv och begränsat i underflänsen har undersökts. Fokusområden har varit ca 0-5 meter från östra (Enköping) respektive västra (Köping) upplagen.

Inga hålrum kunde detekteras i samband med undersökningen dock har kloridhalter nära och över kritiska nivåer dokumenterats i brolåda 2 i bottenflänsen samt i brolåda 4 SO, kabel 11. Dock noterades ingen korrosion i kablarna. Tre prov togs ut av injekteringsbruket i brolåda 2SO i bottenplattan samt i livet i 4SO och 2NO, det såg ut som om det var två olika typer av injekteringsbruk som använts där den i brolåda två var vitaktig och i brolåda 4 grå. I bottenplattan för brolåda 2SO samt i livet i brolåda 4SO uppmättes kloridhalter överstigande de kritiska.

# FÖRSLAG SAMT RIKTLINJER GÄLLANDE OFÖRSTÖRANDE PROVNING AV BETONGKONSTRUKTIONER

## Tillståndsanalys av betongkonstruktioner i allmänhet

Standarder och riktlinjer för att genomföra tillståndsanalys av betongkonstruktioner är viktiga för att säkerställa lika praxis vid konstruktion, utförande, dokumentation och rapportering av tillståndsanalyser. Det närmaste vi kommer en standard för tillståndsanalys av betongkonstruktioner är (ISO 16311-2). Denna är dock inte alltid praktiskt tillämpbar och troligen av den orsaken har organisationer som Trafikverket och Vegvesendet i Norge tagit fram egna riktlinjer för inspektion och rekommendationer. Det har inte varit vårt syfte att ersätta dessa utan målet är att ge rekommendationer när det gäller undersökning med oförstörande provning och så särskilt för spännarmerade betongkonstruktioner. Hur detta kan göras beskrivs nedan, men först presenteras övergripande tillståndsanalys för betongkonstruktioner.

Tillståndsanalyser krävs för att kunna planera och genomföra nödvändiga åtgärder för att ta hand om och bevara betongkonstruktioner för framtiden och för att upprätthålla en tillfredsställande konstruktionssäkerhet och hållbarhet. Att genomföra en tillståndsanalys är också viktigt för att säkerställa integriteten hos betongkonstruktioner med historiskt värde som är värda att bevara för framtiden

Tillståndsanalys av betongkonstruktioner kan med fördel utföras även om det inte finns några tecken på skador på konstruktionen, eftersom det då kan upptäckas om begynnande nedbrytning/skadeutveckling är på gång. På så sätt erhålls nödvändig kunskap om konstruktionens skick för att kunna genomföra förebyggande åtgärder för att stoppa eller bromsa utvecklingen av skada/nedbrytning. Sådana åtgärder blir normalt mycket billigare än omfattande reparationsarbeten. Dessutom blir effekten av förebyggande åtgärder mycket större för konstruktionens livslängd än omfattande reparationer, eftersom initieringstiden innan skador uppstår förlängs avsevärt. En tillståndsanalys i ett tidigt skede i haveriet blir inte heller så omfattande och dyrbar.

Syftet med en tillståndsanalys av betongkonstruktioner är att kartlägga konstruktionens skick med hänsyn till skadeorsak, skadeomfattning och skadeföljd som underlag för att kunna planera och genomföra nödvändiga skydds- och reparationsåtgärder för att bevara betongkonstruktion och se till att den kan fylla sin funktion.

Enligt SE-EN 1504-9 krävs att en tillståndsanalys genomförs innan skydds- och reparationsåtgärder genomförs. Nämda standard anger specifikt att en bedömning av skada och skadeorsak ska göras samt en bedömning av betongkonstruktionens förmåga att fylla sin funktion. Skadeomfattningen och sannolik framtida skadeutveckling ska bedömas och en bedömning ska göras av konstruktionsdelens eller konstruktionens återstående livslängd, om skydds- eller reparationsåtgärder inte genomförs.

Tillståndsanalysen ska utföras efter bästa yrkesmässiga bedömning och opåverkad av partsintressen av något slag. Det är mycket viktigt att de utredningar och bedömningar som görs i samband med en tillståndsanalys inte påverkas av band mellan den som utför tillståndsanalysen och de som har ett intresse av bygget. De som har intressen i bygget kan vara ägare till bygget, rådgivare, utförande entreprenörer eller leverantörer som varit inblandade under bygget.

Den som gör en tillståndsanalys ska informera och klargöra om någon koppling till andra intressen kan ha betydelse för ett smidigt genomförande av uppdraget. Man ska agera på ett sådant sätt att det inte kan råda någon tvekan om att uppdragsgivarens intressen tillvaratas. Det är mycket viktigt att det inte råder osäkerhet om huruvida bedömningar och rekommendationer i tillståndsrapporten är objektiva och opåverkade av partsintresse. Om det kan ställas frågor om kompetensen hos den som ska utföra tillståndsanalysen kan man antingen låta göra en kompetensbedömning eller så kan man avstå från uppdraget.

Det är också viktigt att den som utför tillståndsanalysen inte använder information som erhålls från uppdragsgivaren, resultat från tillståndsanalysen eller upprättad dokumentation i strid med uppdragsgivarens intressen. All användning av information som inhämtats genom en tillståndsanalys ska klargöras och godkännas av uppdragsgivaren.

Tillståndsanalysen ska utföras av kvalificerade personer som har nödvändig kompetens och erfarenhet av att utföra tillståndsanalyser av betongkonstruktioner och rehabiliteringsarbeten. Den som beställer utförandet av en tillståndsanalys ska se till att begära in kompetensdokumentation.

Den eller de som ska göra en tillståndsanalys av betongkonstruktioner ska tillsammans ha:

- kunskap om grundläggande betongteknik och nedbrytningsmekanismer
- kunskap om byggmetoder
- kunskap om olika förvaltningsstrategier
- kunskap och erfarenhet av olika undersökningsmetoder
- kunskap och erfarenhet av att genomföra tillståndsanalys
- kunskap och erfarenhet av olika metoder för skydd och reparation av betongkonstruktioner
- kunskap och förtrogenhet med standarder
- god förståelse för byggkonstruktion

Den eller de som ska göra en tillståndsanalys av kulturmärkta betongkonstruktioner ska också tillsammans ha:

- kunskap om byggnadsmaterial och kulturhistoria
- kunskap om kulturarvslagstiftningen
- kunskap och erfarenhet av tillståndsanalys och rehabilitering av kulturminnesmärkta och bevarandevärda byggnader

Följande kompetenskrav ställs på den som ansvarar för tillståndsanalysen:

Utbildning: Kandidat- eller magisterexamen i bygg och anläggning med konstruktionsämnen och/eller materialteknik

Kunskap: Kännedom och kunskap om de olika momenten i listan ovan som styrks med dokumenterad utbildning eller referenser.

Praktik: Minst 5 års erfarenhet av tillståndsanalys och genomförande av konkreta rehabiliteringsarbeten, dokumenterad med CV med lista över referensprojekt

I samband med tillståndsanalysen av bevarandevärda betongkonstruktioner rekommenderas att komplettera ovan nämnda praxiskrav med minst 3 referensprojekt.

Vid bedömning och kontroll av bärförmåga och konstruktionssäkerhet ska följande kompetenskrav uppfyllas:

Utbildning: Kandidat- eller magisterexamen i bygg och anläggning med konstruktionsinriktning.

Praktik: Minst 5 års erfarenhet av dimensionering av betongkonstruktioner dokumenterade med CV som listar referensprojekt.

Ovan nämnda krav hindrar inte att projektanställda som inte uppfyller kraven används. De angivna kompetenskraven gäller för den som ansvarar för tillståndsanalysen – uppdragsanavariog.

Ägare av betongkonstruktioner har mycket olika kompetens vad gäller tillståndsanalys och rehabilitering av betongkonstruktioner. Professionella ägare som Trafikverket, Vattenfall etc. har nödvändig expertis för att antingen själva genomföra tillståndsanalyser eller förbereda förfrågningar om förslag för att genomföra tillståndsanalyser. Det som däremot är en utmaning är att väldigt många ägare av betongkonstruktioner inte har denna kunskap och därmed inte heller förutsättningarna för att upprätta en tydlig offertförfrågan för att genomföra en tillståndsanalys. Resultatet är otillräckliga offertförfrågningar, vilket i sin tur gör att offerterna spretar och det kan vara svårt att få kontroll på kostnaderna. Om ägaren av betongkonstruktionen inte har nödvändiga kunskaper om tillståndsanalys av betongkonstruktioner bör ägaren söka hjälp för att upprätta en kompletterande offertförfrågan för att säkerställa att leverantörerna ger priser på samma grund, så att erbjudandena är jämförbara. En detaljerad beskrivning bör sedan upprättas för tillståndsanalysen, bl.a. omfattande:

- val av analysnivå
- kvalifikationskrav
- syftet med tillståndsanalysen
- tillgängligt grundmaterial (ritningar, tidigare rapporter, etc.)
- angivande av vilka konstruktioner eller delar av konstruktionerna som ska ingå i tillståndsanalysen
- omfattningen av typ av prover/analyser
- krav på genomförande och deadlines
- vad som tillhandahålls från ägaren t.ex. el, vatten, ställningar, tillträdeskrav, säkerhetsbestämmelser etc.
- lokala förhållanden som måste tas om hand vid tillståndsundersökningen (trafikflöde, bullerkrav, damm/föroreningar etc.). Arbetstidbegränsningar etc.

## Metodik

En tillståndsanalys kommer att bestå av flera faser – programfas, planeringsfas, utredningsfas, bedömningsfas och rapporteringsfas. Metodiken visas schematiskt i Figur 132. En bra arbetsmetodik säkerställer att arbetet och besluten fattas i rätt ordning och i tillräcklig omfattning från planering till rapportering,

### Programfas

I programfasen definieras syftet med tillståndsanalysen, tillståndsanalysens omfattning och analysnivå. Tillståndsanalys av betongkonstruktioner är inte entydigt definierad. När man gör en tillståndsanalys är det viktigt att se till att det finns en överensstämmelse mellan byggherrens/beställarens avsikt med tillståndsanalysen och inspektörens uppfattning om syftet till och orsaken med tillståndsanalysen.

Innan tillståndsanalysen påbörjas är det därför mycket viktigt att ramarna för tillståndsanalysen definieras med hänsyn till syfte och omfattning. En förbesiktning kommer ofta att vara lämplig för att kunna bedöma både syftet och omfattningen av tillståndsanalysen. Det är också viktigt att klargöra om det finns några kostnadsbegränsningar för att genomföra tillståndsanalysen, eftersom detta kan påverka omfattningen av t ex provtagningen.

Syftet med tillståndsanalysen kommer att avgöra omfattningen av både utredningar och bedömningar. Med omfattning tänker man i första hand på fysisk avgränsning, med andra ord om tillståndsanalysen ska göras på flera konstruktioner, hela konstruktionen eller delar av konstruktionen som t.ex. balkonger, bjälklag, brodäck etc. Omfattningen av tillståndsanalysen beror även på typ och antal prover/analyser. Syftet med en tillståndsanalys kan vara väldigt olika, som till exempel:

- allmän bedömning av tillståndet
- undersökning av om tidigare upptäckta skador har utvecklats ytterligare
- detaljerad kartläggning av tillståndet och beskrivning av aktuella avhjälpande åtgärder
- övergripande kartläggning av tillståndet som underlag för beredning, planering, budgetering och prioritering av underhålls- och förbättringsåtgärder för en portfölj av anläggningar/konstruktioner
- upptäckt av begynnande skadeutveckling och bedömning av behovet av förebyggande åtgärder
- Närmare undersökning av mekanismer för skada/nedbrytning som upptäckts på en lägre nivå
- upprättande av planer för vidare analyser på högre nivå
- kartläggning av tillståndet vid köp och försäljning eller vid värdering/värdering
- inhämtning av dokumentation i samband med rättsliga tvister

Vilka konsekvenser som ska bedömas i samband med tillståndsanalysen kommer att bero på syftet med analysen. Redan vid definitionen av uppgiften ska därför beslut tas om vilka konsekvenser som ska bedömas vid tillståndsanalysen.

Programfasen ska (bör) resultera i mandat eller program för tillståndsanalysen. Detta kommer att bidra till att den som beställer tillståndsanalysen och den som utför tillståndsanalysen har en gemensam uppfattning om vad tillståndsanalysen ska omfatta. Detta gör det också lättare att bedöma kostnader för tillståndsanalysen och du får jämförbara priser vid inhämtning av offerter.

## Planläggningsfas

Planeringsfasen omfattar allt förarbete som måste göras för att kunna genomföra tillståndsanalysen enligt gällande förutsättningar. Planeringsfasen kommer att innehålla:

- insamling av grundmaterial, t ex ritningar, tidigare genomförda analyser
- upprättande av en plan för genomförande av tillståndsanalysen
- bedömning av behov av utrustning för undersökning och åtkomst, vare sig det är ovan eller i vatten
- val av lokaliseringssystem
- bedömning av åtgärder för hälsa, säkerhet och miljö vid genomförande av tillståndsanalysen
- definition av en referensnivå för bedömning av tillståndsgraden
- tidsplan

Att få fram den mest relevanta informationen och dokumentationen om den befintliga betongkonstruktionen är viktigt, eftersom detta kan påverka val av undersökning/provtagning, provomfattning och provplats. Med god dokumentation kan urvalsstorleken i många fall minskas. I samband med kulturminnen är anskaffandet av historisk dokumentation mycket viktigt, eftersom det kommer att ha stor betydelse för valet av åtgärder för skydd och reparation.

Vid planering av undersökningar och analyser är det en fördel om man först kan få en överblick över skadetyper och orsaker och sedan besluta om nödvändiga undersökningar och provomfattning. Detta kommer att hjälpa till att säkerställa att undersökningen inte blir överdimensionerad.

Att upprätta en plan för att genomföra tillståndsanalysen är nödvändig för att den ska kunna genomföras på ett effektivt och säkert sätt. Detta innefattar bl.a. kartläggning och bedömning av alla lokala förhållanden som har betydelse för att genomföra tillståndsanalysen, såsom behov av tillträdesutrustning, provtagningsutrustning, säkerhetsåtgärder, underrättelse och meddelanden etc.

För att kunna dokumentera var skador har upptäckts på betongkonstruktionen eller var provtagning har utförts är det vanligtvis lämpligt att man inför fältarbetet har definierat ett lokaliseringssystem och upprättat registreringsformulär som diskuterats. I denna fas definieras även den referensnivå som ska läggas till grund för att bedöma tillståndsgraden.

Vid genomförande av tillståndsanalyser kan inspektören utsättas för betydande risk vid användning av olika utrustning och vid arbete på höjd, i och nära vatten, i trafikerade områden, nära kraftledning etc. Planeringsskedet ska därför innehålla en kartläggning av alla riskförhållanden och faropunkter och deras konsekvenser för de olika arbetsmomenten under tillståndsanalysen. Dessutom ska man bedöma och beskriva åtgärder för att avlägsna eller kontrollera identifierade risktillstånd.

Vid planering av tillståndsanalysen är en tidplan nödvändig. En överenskommelse ska träffas med beställaren för tiden och varaktigheten av besiktningen. Detta är särskilt viktigt när man analyserar tillståndet för anläggningar i områden med begränsad tillgång. Det kan vara industriområden eller längs järnvägen där man är beroende av stopp antingen i produktionen eller tågtrafiken för att kunna utföra fältarbetet.

I vissa fall kan det även finnas behov av att ha andra aktörer med sig vid tillståndskontrollen. Det kan vara byggherrens representant, antikvarie, ordningsvakt, klättrare, dykare, liftförare, entreprenör etc. Det kan också hända att en tillståndsbedömning tar flera dagar så att olika arbetsmoment utförs vid olika tidpunkter. I sådana fall är det nödvändigt att ha en detaljerad tidsplan för arbetet, som visar när och var de olika aktörerna ska vara närvarande. Ett bra schema gör tillståndskontrollen mer effektiv och du visar respekt för andras tid.

## Undersökningsfas

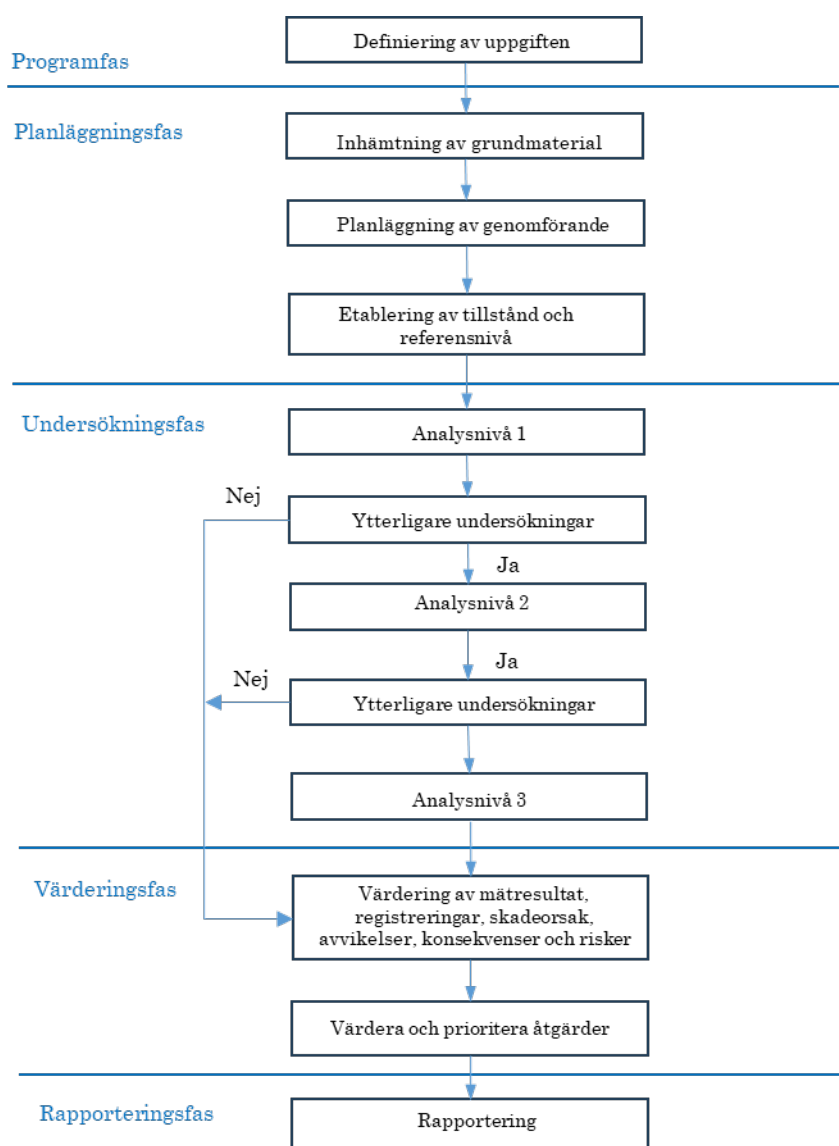
Undersökningsfasen omfattar allt fält- och laboratoriearbete samt en beskrivning av tillståndet. Registrering av tillståndet baseras först på okulär besiktning. Vid den visuella inspektionen registreras alla skador/skadesymptom - skadeomfattningens totala omfattning. Individuella skador kan klassificeras med en grad av tillstånd baserat endast på visuella observationer. Man måste då vara beredd på att tillståndsgraden måste korrigeras något när resultat från fält- och laborietester finns tillgängliga.



Denna fas kommer även att innefatta provtagning i fält samt provtagning för analys i laboratoriet. Typen av test och testets omfattning framgår av det förberedda testprogrammet. Aktuella metoder för undersökningar i fält och laboratorium har tidigare beskrivits i rapporten.

Vid den visuella besiktningen finns det risk för att förhållanden upptäcks som kräver att besiktningsprogrammet måste revideras. Det kan förekomma förändringar i det planerade upplägget och omfattningen av provtagningen. Ändringar ska vara klarlagda och godkända av beställaren innan ändringen genomförs.

Undersökningsfasen kan delas upp i flera steg beroende på hur man väljer att lägga upp undersökningarna. Detta styrs av bl.a tillgång till konstruktionen. Om det inte går att göra upprepade kontroller ska alla undersökningar och provtagningar göras tillsammans med risk för att få en för begränsad eller för omfattande undersökning. Omfattningen av laboratorieanalyser kan alltid anpassas efter undersökningen.



Figur 132 Metodik för tillståndsanalys

## Värderingsfas

I värderingsfasen sammanställs alla visuella observationer och alla mätresultat från fält- och laboratorieundersökningar så att eventuell skadeorsak, skadekonsekvens (grad av konsekvens) och risk kan bedömas. Utifrån detta görs sedan en bedömning av aktuella strategier för att hantera betongkonstruktionen så att den kan fylla sin funktion inom konstruktionens framtida brukande.

Valet av förvaltningsstrategi ska vägas mot konstruktionens livslängd. Förvaltningsstrategin kan vara att förhindra och minska ytterligare nedbrytning eller att förstärka, reparera eller skydda hela eller delar av konstruktionen. För val av åtgärder måste man överväga principen och tillhörande metoder för skydd och reparation av betongkonstruktionen.

För de avhjälpande åtgärderna i fråga kommer konsekvenserna av de olika åtgärderna att bedömas, såsom t.ex. tekniska, ekonomiska, underhållsmässiga, estetiska, miljömässiga och antikvariska konsekvenser.

Denna fas innehåller också en bedömning av konsekvenserna av skadan om åtgärdande inte genomförs. Dessutom kan det också bli aktuellt att bedöma betongkonstruktionens återstående livslängd med hänsyn till brukande.

Resultatet av bedömningsfasen blir en beskrivning av aktuella metoder för skydd och reparation av betongkonstruktionen med rekommendation om val av metod och tidpunkt för när åtgärder bör utföras.

## Rapporteringsfas

Utförd tillståndsanalys ska alltid dokumenteras med en rapport. Lägesrapporten ska bl.a. beskriva förutsättningar för tillståndsanalysen, registrerade skador, resultat av genomförda mätningar/undersökningar, konstruktionens skick, konsekvenserna av tillståndet, vald förvaltningsstrategi samt nödvändiga avhjälpande åtgärder med tillhörande kostnadsuppskattningar.

Tillståndsrapporten blir ett beslutsunderlag för uppdragsgivaren och kommer ofta också att ingå som ärendehandling vid ansökan om medel för att genomföra åtgärden. Dessutom kommer tillståndsrapporten att ligga till grund för vidare planering och byggherrens framtida förvaltning av konstruktionen.

## Analysnivå

Syftet med en tillståndsanalys är avgörande för både omfattningen av utredningar och bedömningar som ska göras. Därför definieras tre analysnivåer som sträcker sig från de enkla och visuella till de mer komplexa undersökningarna, se även inledningen i denna rapport. Även om (ISO 16311-2) har definierat två analysnivåer, har vi i denna publikation valt att definiera tre analysnivåer, eftersom detta har varit en etablerad praxis under många år i branschen. Tillståndsanalys av betongkonstruktioner görs därför på följande nivåer:

Nivå 1 – Enkel tillståndsbedömning

Nivå 2 – Utvidgad tillståndsbedömning, och

Nivå 3 – Omfattande tillståndsbedömning

Dessa har beskrivits ingående tidigare i rapporten och dess innehåll sammanfattas kortfattat här:

## Nivå 1 – Enkel tillståndsanalys

En enkel tillståndsanalys innefattar endast visuell undersökning av betongkonstruktionen. Syftet med en enkel tillståndsanalys kan vara:

- genomföra en rutininspektion för att antingen upptäcka begynnande skadeutveckling eller följa upp den fortsatta utvecklingen av befintliga skador
- undersökning om det har inträffat en allvarlig skada som kan påverka bärförmågan, trafiksäkerhet eller underhållet på kort sikt
- övergripande bedömning av tillståndet och möjliga orsaker till skada baserad på visuella inspektioner
- bedömning av behov av kompletterande utredningar och upprättande av plan för vidare analyser på högre nivå (med tillhörande kostnader)
- bedömning av behovet av förebyggande åtgärder
- underhållsplanering
- upprättande av grov kostnadsuppskattning för kompletterande utredningar eller rehabiliteringsbehov

## Nivå 2 – Utvidgad tillståndsanalys

En utökad tillståndsanalys innefattar en visuell undersökning av betongkonstruktionen kompletterad med en begränsad omfattning av mätningar och materialundersökningar. Syftet med en utökad tillståndsanalys kan vara:

- undersöka om konstruktionen uppfyller sin funktion
- kartläggning av skadeorsak, skadeomfattning och skadeföljd
- utredning av om skador fortfarande utvecklas - vidareutvecklas
- riskanalys
- bedömning av aktuella skydds- och reparationsåtgärder
- anskaffning av nödvändigt underlagsmaterial för projektering av skydds- och reparationsåtgärder
- bedömning av behovet av kompletterande utredningar
- upprättande av en plan för vidare analyser på högre nivå
- upprättande av detaljerade kostnadsberäkningar för relevanta skydds- och reparationsåtgärder samt eventuella kompletterande utredningar
- upprättande av en långsiktig budget för reparation och underhåll

## Nivå 3 – Omfattande tillståndsanalys

En omfattande tillståndsanalys innefattar normalt en mer detaljerad undersökning av delar av betongkonstruktionen där det på en lägre analysnivå har visat sig behov av både kompletterande och mer omfattande undersökningar. Tillståndsanalys på nivå 3 kommer normalt att innebära en större omfattning av mätningar och materialundersökningar. Syftet med en omfattande tillståndsanalys kan vara:

- grundligare kartläggning och undersökning av skador/nedbrytningsmekanismer som upptäckts på en lägre analysnivå
- kartläggning av skadans omfattning
- bedömning av skadeorsak och skadeföljd
- riskanalys
- bedömning och beskrivning av nödvändiga avhjälpande åtgärder
- kontroll av hela eller delar av konstruktionens bärförmåga

Vid omfattande tillståndsanalys görs en visuell kontroll på samma nivå som vid utökad tillståndsanalys (nivå 2). Närheten till betongkonstruktionen och användningen av tillträdesutrustning kommer att vara som för analysnivå 2.

I en omfattande tillståndsanalys genomförs en stor mängd mätningar och materialundersökningar, både destruktiva och oförstörande undersökningar. På analysnivå 3 används utredningsmetoder som kan medföra betydande ingrepp i konstruktionen, t.ex. vid materialprovtagning och friläggning. Det kan vara lämpligt att genomföra en betydande mängd laboratorieundersökningar som är både dyra och resurskrävande. En övergripande tillståndsanalys kommer att omfatta en utökad omfattning av mätningar och materialundersökningar som utförs på analysnivå 2. Dessutom kommer analysnivån även att kunna omfatta mätning av geometri som underlag för bedömning av bärförmåga/konstruktionssäkerhet

Om tillståndsanalyser utförda på lägre nivå har avslöjat skador som utgör risk för minskad bärförmåga (konstruktionssäkerhet) kan kontroll och bedömning av bärförmågan (konstruktionssäkerhet) ingå i omfattningen/utförandet av omfattande tillståndsanalys. Det måste då på förhand avtalas om att en sådan bedömning ska ingå i uppgiften för tillståndsanalysen.

På samma sätt som för övriga analysnivåer har inspektören en anmälningsskyldighet om tillståndsanalysen på nivå 3 visar på förhållanden eller skador som utgör en omedelbar fara för person-, trafik- och säkerhet för konstruktionens bärförmåga.

## Tillståndsanalys av spännarmerade betongkonstruktioner

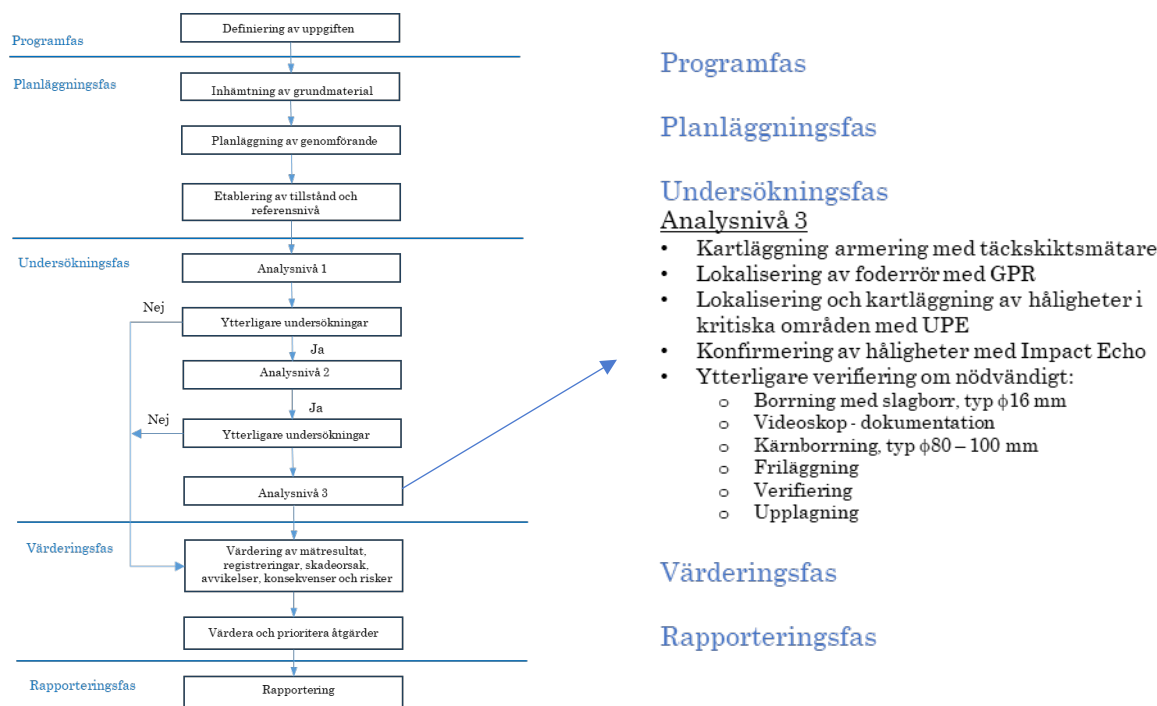
Det övergripande syftet med tillståndsanalysen är kartlägga tillståndet hos spännarmerade broar och då framför allt defekter som kan påverka bärförmåga, beständighet och säkerhet. Analysen är inriktad på att upptäcka defekter som inte kan noteras visuellt från utsidan, såsom:

- hålrum eller vatten i foderrör
- undermålig injektering
- brott i spännlinor
- pågående korrosion i spännlinor

De två förstnämnda klaras av idag med den teknik och de undersökningar som presenteras i denna rapport, de två sistnämnda kan idag endast verifieras genom att foderrör öppnas upp och spännlinor friläggs. Tillståndsbedömningen följer Figur 132 där en mer omfattande analys görs, dvs analys på Nivå 3, vilket visas i Figur 133. I ett första skede fokuseras på kritiska sektioner, dvs de sektioner som kan befaras ha skador beroende på spännsystemets uppbyggnad och placering, se Figur 17. Men hänsyn måste också ta till de snitt som konstruktören anses vara mest kritiska för broars säkerhet. Det kan också visa sig vid den visuella inspektionen att skador på fogar, kantbalkar eller andra delar i konstruktionen befaras påverka beständigheten för spännsystemet. De som genomför tillståndsanalysen av den spännarmerade betongkonstruktionen skall tillsammans ha följande kompetens i tillägg till den som generellt beskrivs för tillståndsanalys av betongkonstruktioner:

- kunskap om grundläggande betongteknik och nedbrytningsmekanismer
- kunskap om byggmetoder, speciellt hur broars spännsystem är uppbyggt
- konstruktionsteknisk kunskap om spännarmerade broar
- god erfarenhet och kunskap gällande de OFP metoder som används
- vara kunniga att utvärdera resultat och dra slutsatser från tillståndsanalysen
- förstå hur friläggningar av spännlinor och foderrör skall återställas efter verifiering

För övrigt gäller samma utbildnings, kunskap och praktikinivå som gäller för tillståndsanalys av betongkonstruktioner, t ex skall de som genomför tillståndsanalysen kunna visa på motsvarande referensprojekt.

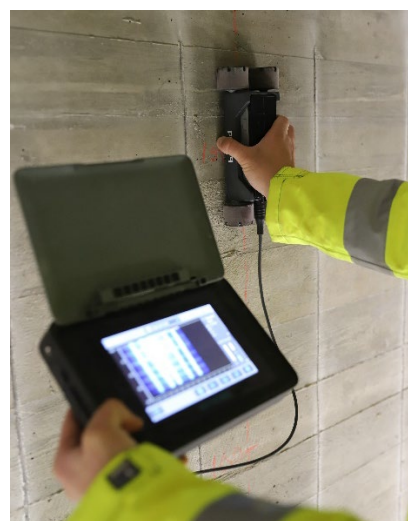


Figur 133 Förslag till tillståndsanalys av spännarmerade betongkonstruktioner

De steg som presenteras i Figur 133 har tidigare redovisats i presenterade fälttillämpningar i denna rapport med repeteras här för klarhet, se

### Steg 1: Täckskiktsmätning

För att få bästa möjliga förutsättningar för att lokalisera foderrör ska placering av slakarmeringen först identifieras. Det är särskilt viktigt att denna lokaliseras längs de områden på konstruktionen som ska undersökas eftersom slakarmeringen kan störa mätningen av såväl GPR som UPE. Detta görs lämpligtvis med en täckskiktsmätare, se Figur 134.



Figur 134 Uppmätning av täckskikt på en spännarmerad betongkonstruktion

Följ sedan dessa steg:

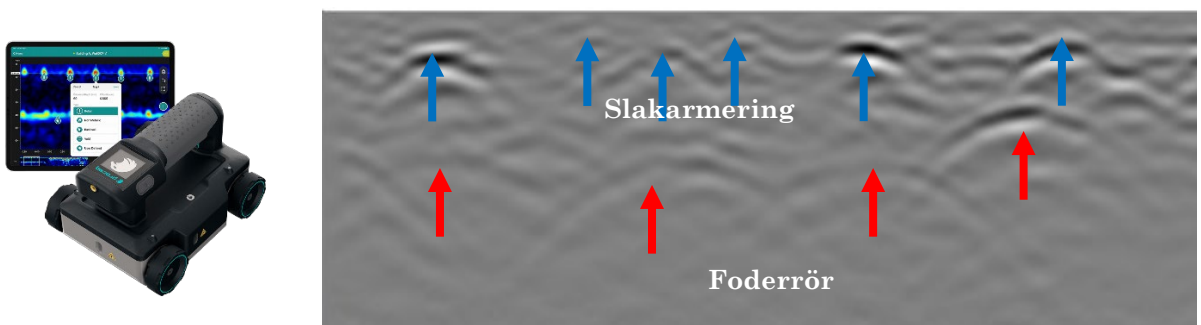
1. Gör inställningar enligt manualen från tillverkaren
2. Lokalisera armeringen i området för undersökningen → markera ut med krita eller annat
3. Gör anteckningar på betongens täcksjikt samt cc-mått och dimensioner om möjligt av armeringen

## Steg 2: Georadar (GPR)

Den enklaste och mest effektiva metoden för att lokalisera foderrör hos spännarmerade betongkonstruktioner är att använda GPR. Den kan lokalisera båda

foderör av metall och plast. GPR möjliggör en noggrann mätning av positionen i plan och på djupet av foderören.

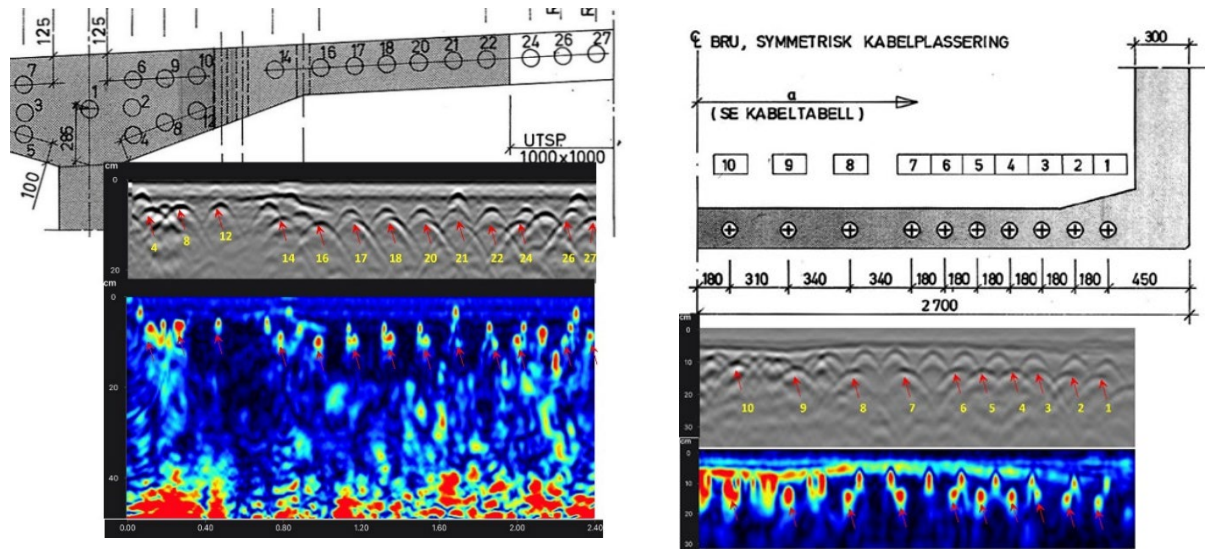
Med GPR är det inte alltid möjligt att skilja mellan slakarmering och fodror, signalerna liknar varandra. Dock kan man i samband med att studera konstruktionsritningar och med kunskaper om konstruktionen relativt enkelt klargöra vilka signaler som tillhör slakarmering respektive foderrör/spännarmering, se Figur 135. Här kan även noteras att bågarna är större för foderören, röda pilar, i jämförelse med bågarna för slakarmeringen, blå pilar.



Figur 135 Uppmätning av foderrörs- samt slakarmerings placering med GPR

GPR har normalt en djupgräns på 600 – 800 mm beroende på antenner och mängd slakarmering. En tät placerad armering minskar djupgränsen och om det ligger ett armeringslager direkt på ett rör av metall (t ex ett foderrör) kan detta vara svårt att lokalisera med GPR. Man kan i vissa fall lösa detta genom att skanna från motstående sida om det finns åtkomst. Det finns oftast två typer av övergripande inställning när det gäller skanning med GRP, det är linjeskanning – då man skannar tvärs armeringen över en strecka. Denna strecka kan vara mer än 10 m. Den andra är areaskanning – då skannar man ett förutbestämt rutnät och kartlägger ett specifikt område. Normalt mindre än 2 m<sup>2</sup>. Vid kartläggning av foderrör är det mest effektiva sättet att skanna tvärs dessa och med linjeskanning. Följ dessa steg:

1. Ställ in linjeskanning och se till att GPRn är kalibrerad för den betong som undersöks. Detta kan göras genom att dubbelkolla avstånd till slakarmering med täcksjiktsmätare sedan ställa in den dielektriska konstanten på GPR:n.
2. Genomför linjeskanningar tvärs foderrörets placering. Antal skanningar som behövs beror på foderrörets placering i tvärsnittet, men minst 3 st med avståndet 500 – 1000 mm rekommenderas.
3. Utvärdera resultatet i ipad/dator med den mjukvara som följer med GPR:n. Här kan man välja att använda ”vy med bågar” eller migrerad vy där armering och foderrör framträder som förstärkta signaler, se . Detta görs samtidigt som man genomför skanningen.
4. Markera ut foderörets eller foderrörens placering med krita eller liknande.



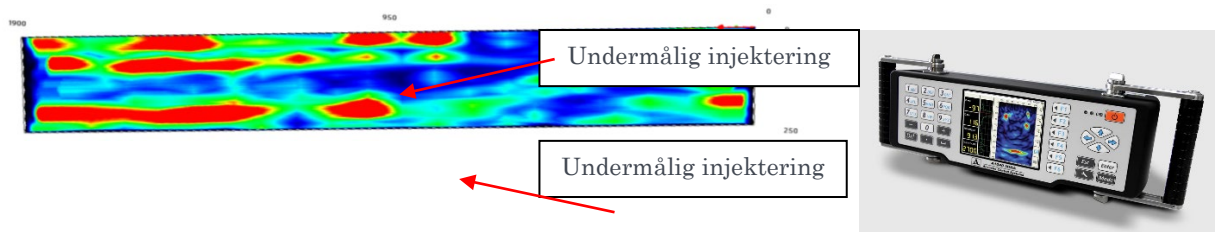
Figur 136 Exempel på vy med bågar eller migrerad vy.

### Steg 3: UPE – MIRA

Eftersom ultraljudssignaler inte transporteras i luft är innesluten luft i betong eller foderrör tydligt synligt. Många faktorer kan påverka signalerna och följaktligen kvaliteten på resultaten. Bland de viktigast är betongens kvalitet (inneslutning av luft, densitet, homogenitet), förekomst av delaminering, förekomst av armeringsjärn ovanför foderrör etc. Foderrör bakom armering eller bakom andra foderrör om de ligger parallellt skuggas och inga resultat kan erhållas.

Även om skanning med UPE-MIRA anses vara den snabbaste metoden för att upptäcka tomrum i kanaler är det en relativt tidskrävande metod som kräver en erfaren inspektör för att få fram och tolka resultaten. Bilder analyseras i efterhand, post-processas, med hjälp av datorprogram. En skanning med UPE består av flera olika segment som kallas B-skanningar. Resultaten från varje individuell skanning lagras som en skiva av den sektion som skannas. När detta sedan bearbetas i mjukvaran kommer flera B-skanningar sätts samman till en 3D-bild. Därför måste skanning göras längs hela det undersökta foderröret på ett systematiserat sätt. En nackdel med UPE är att ett foderrör utan hålrum kan vara svår att lokalisera under bearbetning, eftersom endast en mindre del av signalen som reflekteras från foderröret. Detta kan hanteras på plats genom att anpassa inställningarna eller i efterhand genom jämförelse med resultaten från GPR.

UPE- är den primära metoden för att lokalisera tomrum i foderrör. Instrumentet möjliggör en relativt snabb kartläggning av potentiella tomrum i foderrör över längre avstånd och/eller större ytor. I Figur 137 visas MIRA tillsammans med ett typiskt resultat från skanning av ett foderrör med hålrum. Det bör också nämnas att det kan finnas en risk att injekteringsbruk med lång densitet kan ge falska signaler, dvs. kan indikera hålrum. Detta är ett område som är oklart och mer forskning behövs.



Figur 137 Skanning av foderör där hålrum i dessa indikeras samt MIRA

Följande steg skall följas för skanning med UPE-MIRA:

1. Gör inställningar enligt manualen från tillverkaren.
2. Justera "Measuring Presets" (pulshastighet, analog- och tidsförstärkningskompensation) för att ställa in optimal signalstyrka före skanning. Gör justeringar medan givare är i kontakt med betongytan i ett område med solid betong och känd tjocklek på betongelementet. Om tjockleken är okänd, följ instruktionerna enligt tillverkarens manual för "kalibrering av pulshastighet".
3. Gör skanningar i längsgående riktning längs kanalen/kanalerna men med enheten i tvärriktningen. Detta görs var 10e cm längs den utsatta linjen, se Figur 138
4. Lokalisera och identifiera foderörets centrumlinje noggrant för ytterligare mätningar med Impact Echo (IE) och eventuell verifiering med borrhning.



Figur 138 Skanning längs foderrör – följ utsatt linje, skanning var 10 cm

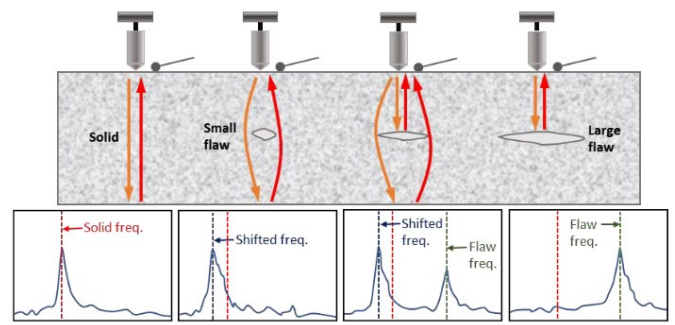
#### Steg 4: Impact Echo (IE)

Impact Echo involverar en stötanordning som träffar ytan av en konstruktion på en given plats och genererar akustiska vågor. Den reflekterade vågenergin registreras sedan av en mottagare (accelerometer) placerad i närheten. Träffen mot ytan producerar lågfrekventa spänningsvågor (P-våg) som överförs genom betongen och reflekteras tillbaka till mottagaren från elementets baksida (pelare, vägg, balk, etc.), eller från håligheter/annat. defekter. Svaret i tid omvandlas till ett frekvensbaserat svar genom att tillämpa algoritmer baserade på snabb Fouriertransform.

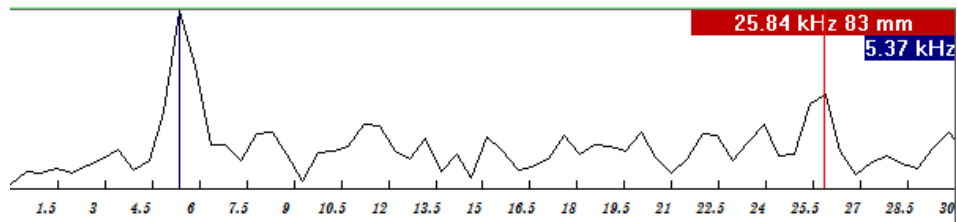
I Figur 139 visas DOCTer Impact-Echo., dess utrustningen och dess funktionsprincip. Mätningarna utförs efter analys av UPE-MIRA. Områden med misstankar om hålrum undersöks. Det man tittar efter är förskjutning i frekvens fällande tjocklek samt om det kommer upp ny högre frekvenser. Metoden kräver mycket av den som använder den och det kan vara svårt att verifiera de hålrum man noterat med UPE:n.

I Figur 140 visas typiska resultat från en bro där hålrum indikerades med MIRA och där Impact Echo indikerade på hålrum. Detta område har sedan verifierats genom att det öppnades upp.

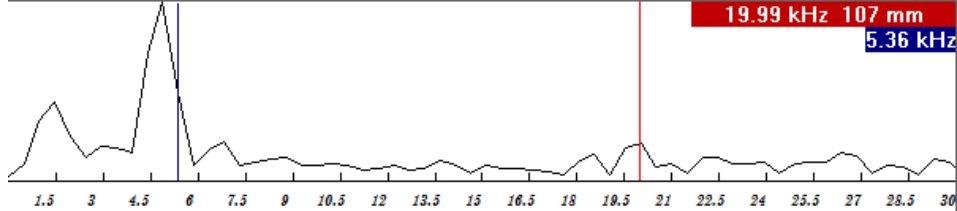




(a) (b)  
 Figur 139 DOCTer Impact Echo: a) Utrustning. och (b) arbetsprincip



Frekvenstopp i ett injekterat foderrör



Frekvenstopp i ett foderrör med hålrum, notera att frekvenstoppen har rört på sig  
 Figur 140 Frekvenstoppar hos ett injekterat respektive icke injekterat foderrör

Följande steg ska genomföras med Impact Echo (IE):

1. Gör inställningar enligt manualen från tillverkaren och enligt standard ASTM C-1383. (tjocklek, frekvens, våghastighet etc.)
2. Välj område med en slät yta för inspektion, annars slipa yta med slipsten, eventuellt damm sopas bort innan provning
3. Identifiera och lokalisera foderörets mittlinje och markering från UPE utvärderingen
4. Rita upp ett rutnät bestående av cirka 2 x 2 cm rutor längs det potentiella tomrummet och prova ut systematiskt längs foderöret
5. Om en sänkning i första noden (frekvens) noteras gör ytterligare prov med mindre stålkula för att detektera djupet till defekten.
6. Resultatet utvärderas i utrustningens bifogade mjukvara, se exempel i Figur 140.

### Steg 5: Friläggning och upplagning

Resultatet från den oförstörande provningen bör verifieras, åtminstone på några platser, med friläggning, då kan man också ta ut injekteringsbruk för kloridprov. När området identifierats som man ska frilägga borrar man först försiktigt med slagborr,  $\phi 16-20$  mm in till foderöret. Det är viktigt att man gör en extra kontroll av djupet till foderöret där man ska borra, lämpligtvis med GPR. När man träffat på foderöret genomföra man kärnbörning med  $\phi 80-100$  mm, ibland 150 mm beroende på hur djup foderöret är placerat. Man borrar in till ca 1-1.5 cm från foderöret, den sista friläggningen görs manuellt med t ex huggmejsel. Foderöret friläggs och kapas upp väldigt försiktigt, man viker bort plåten för att om det är möjligt kunna vika tillbaka den igen när man är klar med undersökningen. Här kan man också använda sig av videoskop både för att se när man borrar in till foderöret men också när man har öppnat upp och har evt. hålrum.

När man är färdig med inspektionen skall kablar och foderrör skyddas med epoxi och det uppborrade hålet gjutas igenom med betong, sekvensen för borrning, upptagning och reparation visas i



*Montering av kärnborrhingsutrustning*



*Borrning in till ca 10-15 mm från foderrör*



*Öppnande av foderrör*



*Inspektion av frilagda spännkablar*



*Tätning/lagning med epoxi*



*Igengjutning med betong*

Figur 141 Sekvenser i samband med friläggning av spännkablar

## Steg 6 Rapportering

Den genomförda tillståndsanalysen ska dokumenteras med en tillståndsrapport. Tillståndsrapporten ska beskriva analysantaganden, betongkonstruktionen, registrerade skador, konstruktionens skick, konsekvenserna av tillståndet, genomförda undersökningar samt nödvändiga/aktuella avhjälpande åtgärder med tillhörande kostnadsuppskattningar.

Det är önskvärt med en mest enhetlig struktur och uppbyggnad av tillståndsrapporter eftersom det kommer att bidra till att beställaren och den som utför tillståndsanalysen har en gemensam uppfattning om vad som förväntas levereras med en tillståndsrapport.

Tillståndsrapporten kan byggas upp med följande huvudstruktur:

## Sammanfattning

1. Introduktion
2. Grundmaterial
3. Genomförande av tillståndsanalysen
4. Visuella registreringar
5. Undersökningar och uppmätningar
6. Bedömning av tillståndet
7. Bedömning av åtgärder
8. Slutsats

## Referenser och källhänvisningar

## Bilagor

Tillståndsrapporten ska ha en kortfattad informativ sammanfattning som innehåller information om syftet med tillståndsanalysen, vilka undersökningar som har gjorts, resultatet av undersökningarna, en beskrivning av tillståndet och konsekvenserna, en beskrivning av skadeorsaken, behov av åtgärder och rekommenderade åtgärder. Syftet med sammanfattningen är att byggherren (och läsaren) snabbt, genom att bara läsa sammanfattningen, ska få inblick i vad tillståndsanalysen har innefattat, betongkonstruktionens skick och nödvändiga avhjälpande åtgärder. Sammanfattningen får inte innehålla ny information, bara en sammanfattning av de viktigaste punkterna från rapporten samt de viktigaste slutsatserna.

I sammanfattningen bör användningen av tabeller undvikas. Det ska inte heller finnas några diskussioner eller bedömningar i sammanfattningen. Sammanfattningen ska finnas på en egen sida utan kapitelnumrering. Även om sammanfattningen läses först bör den vara den sista som skrivs, för att säkerställa att sammanfattningen stämmer helt överens med rapportens innehåll.

# BEHOV AV FORSKNING OCH UTVECKLING

## Allmänt

En god förståelse av hur vår befintliga infrastruktur ska tas om hand är viktigt. Genom att förlänga livet på det vi har kan påverkan på såväl klimat som resursuttag minskas. För att detta ska vara möjligt behöver metodiken för tillståndsbedömning moderniseras och kompetensen förbättras för samtliga aktörer i byggbranschen. Nedan ges kortfattat de brister och de förbättringar som behövs enligt författarna till denna rapport. Allt behöver inte ske omedelbart, men författarna anser att det är nödvändigt med samsyn och samarbete för att en lyckosam förvaltningsprocess ska åstadkommas.

Man bör också ha i åtanke att det inte enbart räcker med att kunna tillståndsbedöma, man måste också ha konstruktionstekniks kompetens och en god förståelse för de material som använts inom betongbyggnad. Därtill är det en fördel om kunskap och erfarenhet även finns när det gäller att utföra reparations- och förstärkningsarbeten.

## Kompetensbehov

### Universitet och högskolor

Det bedrivs ingen strukturerad undervisning på någon av våra tekniska högskolor gällande tillståndsbedömning och oförstörande provning av infrastrukturkonstruktioner, detta trots att vi kan se ett ökat behov av ingenjörer som besitter denna kompetens. Det bedrivs en del forskning mätteknik och förstärkning samt även modellering för att förstå det konstruktiva beteendet över tid. Forskningen gällande oförstörande provning genomförs på grundnivå som examensarbeten. Det är nödvändigt att ett större grepp tas här, både när det gäller undervisning på grundnivå, men också forskningsmässigt där vi ligger långt efter omvärlden inom detta område. Följande föreslås:

Djupare förståelse för oförstörande metoder, deras möjligheter och begränsningar samt hur kombinationseffekter kan uppnås mellan olika tekniker. Dessa ska göras både teoretiskt och i praktiska laboratorieförsök.

Maskininlärning och AI algoritmer för att effektivisera utvärdering av den enorma mängd data som skapas i samband med kartläggning av t ex en bro. Vi ser från vårt arbete att det är mycket handpåläggning innan resultaten kan bli användbara.

Integrering av information i beslutsmodeller där indata används för att beräkna (uppskatta) resterande livslängd, bärförmåga (säkerhet) och kostnad för att bibehålla denna säkerhet.

### Konsulter och entreprenörer

Det finns väldigt få konsulter och entreprenörer idag som behärskar vad vi menar med tillståndsbedömning. Visst, många konsulter är duktiga att visuellt bedöma konstruktioner, men ofta faller det när åtgärder skall föreslås. Konsulter behöver ta ett större helhetsgrepp och utöka sin verktygslåda med oförstörande metoder, men framför allt vara tydligare i hur man tolkar de resultat man får fram och hur detta sedan översätts till praktiska lösningar. Det finns många specialistentreprenörer som är duktiga på rehabilitering (renovering och förstärkning) av betongkonstruktioner, men allt som oftast styr priset och det är inte ovanligt att entreprenören som slutligen får jobbet inte har den kompetens för att utföra ett bra rehabiliteringsarbete, det är inte ovanligt att korrosionsskador t ex uppkommer inom samma område man åtgärdat efter ett fåtal år.

Vi tror här att ökad utbildning kan hjälpa en del. Denna utbildning skulle delvis kunna tillhandahållas av högskolan.

## Beställare

Våra stora anläggningsägare är kunniga och är medveten om att ett behov av ökad satsning på förvaltningsprocessen behövs. Vi tror dock att man i ökandegrad skulle behöva satsa medel på forskning och utveckling inom detta område. Beställarna skulle behöva ta initiativet och samordna forskningen på ett centralt plan. Oavsett om det är en damm, bro eller ett kärnkraftverk som man vill förlänga livet på så att det liknande problemställningar. Vi kan se att det finns en stor suboptimera när det gäller att använda resurser på ett effektivt och genomtänkt sätt. Tar man t ex teknikerna för oförstörande provning går dessa att använda på samtliga typer av anläggningskonstruktioner och de frågeställningar som man inte har helt klart för sig är liknande oavsett vilken typ av konstruktion man undersöker.

Vi tror även här att en utbildningsinsats vore på sin plats där man kunde förklara möjligheter och brister med de tekniker som vi presenterat i denna rapport.

## DISKUSSION OCH SAMMANFATTNING

I det arbetet som presenterats i denna rapport diskuteras i första hand användningen av oförstörande provning för att tillståndsbedöma spännarmerade betongkonstruktioner. I andra hand diskuteras tillståndsbedömning av betongkonstruktioner i allmänhet och förlängning av vårt byggda bestånd. Det är otvetydigt att avsevärd minskad klimatpåverkan och resursuttag kan åstadkommas om vi förlänger livslängden på den byggda infrastrukturen. Detta är inte alltid möjligt på grund av såväl ekonomiska, samhällsmässiga som tekniska hänsynstaganden, men övergripande prioritet bör vara att ta vara på det vi redan har. Att tillse att våra broar är säkra har vi gjort så länge vi har byggt broar. Den dominerande metodiken för att efter tid se om något hänt är att göra visuella kontroller och om man noterar oväntade negativa defekter undersöks de ytterligare och där det behövs genomförs nödvändiga åtgärder. I vissa fall har även broar provbelastats för att se om man uppfyller kraven i bruksgränstillståndet. Allt detta är bra och generellt har det hjälpt oss att ha en säker infrastruktur. Det är dock klart att om det var möjligt att kartlägga pågående nedbrytning av konstruktionerna tidigare i nedbrytningscykeln skulle mindre behov av rehabilitering behövas. Detta har dock historiskt sett varit svårt då många av de skador som uppstår över tid är dolda inne i konstruktionerna och uppdagas inte förrän efter lång tid och kan då vara väldigt besvärliga och inte minst kostsamma att åtgärda. Idag finns det möjlighet att betydligt bättre tillståndsbedöma våra betongkonstruktioner. Den tekniska utvecklingen när det gäller oförstörande provning är både omfattande och snabb, dessutom förenklas utvärderingen av resultaten av den likaså snabba utveckling när det gäller datorkraft och mjukvara. Det är hög tid att oförstörande provningen blir en naturlig del av de regelbundna inspektioner som utförs, om inte varje år för broar, så åtminstone vart 6:e år samt att det stora och viktiga broarna ges prioritet.

I denna rapport har vi presenterat varför betong bryts ner över tiden, vad man kan göra åt det och framför allt hur man på ett effektivt och trovärdigt sätt kan bedöma en betongkonstruktions beständighet. Vi har presenterat ett flertal olika tekniker för oförstörande provning (OFP) och tillämpa många i labbet men framförallt i ett flertal fältprojekt. Huvudfokus i projekt har varit spännarmerade betongkonstruktioner och möjligheten att kontrollera defekter i foderrör. Eventuella defekter i form av hålrum och fukt/vatten kan leda till korrosion vilket i sin tur allvarligt kan försämra konstruktionens bärförmåga och livslängd. Vi har visat att om man kombinerar olika OFP tekniker så kan hålrum i foderrör detekteras. Det har visat sig att en kombination av georadar, ultraljud och Impact Echo är en framgångsfaktor. Vi har dock inte kunnat med våra undersökningar kartlägga brott i spännlinor eller pågående korrosion med mer än att foderrören öppnas upp. Vi har också presenterat en tydlig metodik för tillståndsbedömning som vi tror förbättrar denna process och gör den tydligare samt förenklar för beställare. När det gäller framtida forskning och utveckling behövs begränsningar och synergieffekter för oförstörande provningsmetoder kartläggas mer ingående. Vi har t ex sett tendenser i fält att falska utslag kan erhållas om densiteten på injekteringsbruket är lågt. Vi ser också begränsningar när det gäller skuggeffekter, dvs när foderrör är placerade bakom varandra. Vidare skulle det även behövas forskning gällande reparations- och förstärkningsmetoder för spännarmerade konstruktioner. En frågeställning är t ex om man finner ett hålrum, går då detta injektera? En annan är om spännkablar är av, kan man då förstärka utanpå konstruktionen och uppnå samma bärförmåga? Därtill behövs mer erfarenhet gällande tillståndsbedömningar i fält för att skapa ökad erfarenhet samt också för att få in fler aktörer på marknaden. Det är vår övertygelse att användandet av oförstörande provningsmetoder kommer att öka att vi på det sätt får en ökad förståelse av våra betongkonstruktioners beständighet och kvarvarande livslängd.

## REFERENSER

A.W. Herrmann, ASCE 2013 Report card for America's Infrastructure, IABSE Symposium Report, International Association for Bridge and Structural Engineering, 2013, pp. 9–10.

AASHTO Designation: T 358-151, Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.

AASHTO TP 95 (2011), "Standard Test Method for Surface Resistivity of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration." American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., U.S.A

ASTM C597 Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete

ASTM 805 Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete

ASTM C1152, Standard Test Method for Acid Soluble Chloride in Mortar and Concrete

ASTM C1202-10: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration

ASTM C1218, Standard Test Method for Water Soluble Chloride in Mortar and Concrete

Bagge N, Nilimaa J & Elfgren L, 2017, In-situ methods to determine residual prestress forces in concrete bridges, *Engineering Structures*, 135, 41-52

Bagge N, Plos M & Popescu C, 2018b, A multi-level strategy for successively improved structural analysis of existing concrete bridges: Examination using a prestressed concrete bridge tested to failure, *Structure and Infrastructure Engineering*,

Bagge N, Popescu C & Elfgren L, 2018a, Failure tests on concrete bridges: Have we learnt the lessons?, *Structure and Infrastructure Engineering*. 2018;14(3):292–319.

Bagge, Niklas, 2017, Structural Assessment Procedures for Existing Concrete Bridges. Experiences from failure tests of the Kiruna Bridge. Doctoral Thesis, Luleå University of Technology, ISBN 978-91-7583-879-3, 310 pp. <http://ltu.diva-portal.org/>

Bennitz A., (2011), Externally unbonded post-tensioned CFRP tendons: a system solution, PhD thesis at Luleå University of Technology, ISBN 978-91-7439-206-7, p198

Betonghandboken Material, 1994, Edt. Ljungkrantz C., Möller G. och Petersons N., AB Svensk Byggtjänst 1994.

Blanksvärd T., Hedlund H. och Popescu C., 2017, Icke-förstörande provning i samband med tillståndsbedömning – En förstudie, SBUF Rapport 12952, p 56, ([www.sbuf.se](http://www.sbuf.se))

BRIME (2001). "Bridge management in Europe." Final report, Bridge Management in Europe (BRIME) – 4th framework programme, Brussels, Belgium.

BS 1881-203, 1986, British Standard Part 203. Recommendations for measurements of velocity of ultrasonic pulses in concrete, p 23

Bögh C. & Nielsen J., 2015, Dansk Betonförening, *Betonghandboken*, 18 Betonkonstruktioner tillstånd, 2015, pp 42

- Calvi, Gian Michele; Moratti, Matteo; O'Reilly, Gerard J.; Scattarreggia, Nicola; Monteiro, Ricardo; Malomo, Daniele; Calvi, Paolo Martino & Pinho, Rui, 2018, Once upon a Time in Italy: The Tale of the Morandi Bridge, Structural Engineering International, 20 pp.
- Choi, P., et al., Application of ultrasonic shear-wave tomography to identify horizontal crack or delamination in concrete pavement and bridge. Construction and Building Materials, 2016. **121**: p. 81-91
- COST-345 (2004). "Procedures required for the assessment of highway structures." Final report, Cooperation in the field of scientific and technical research (COST), Brussels, Belgium, 182
- Elfgrén, L., 2015, Fatigue Capacity of Concrete Structures: Assessment of Railway Bridges, Research Report, Structural Engineering, Luleå University of Technology, 103 pp
- Emmons P.H., (1993), Concrete Repair and Maintenance Illustrated, problem Analysis, Repair Strategy, Techniques, ISBN 0-87629-286-4, pp314
- Fagerlund G., 1992, Betongkonstruktionens beständighet – en översikt, Cementa 3e Uppslagsverket
- Fischer O, Müller A, Lechner T, Wild M & Kessner K, 2014, Ergebnisse und Erkenntnisse zu durchgeführten Nachrechnungen von Betonbrücken in Deutschland, In German with English summary and captions). Beton- und Stahlbetonbau 109(2014). No 2, pp 107-127.
- Hammarström Erik, 2019, "Non-Destructive testing of concrete with ground penetrating radar", MSc project Luleå university of technology, pp 66, 2019.
- Harris K. A., Kasan J., Miller R. and Brinkman R., 2012, Guide to recommended practice for the repair of impact-damaged prestressed concrete girders, p 36,  
[http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/docs/NCHRP20-07\(307\)\\_AppendixA-GUIDE.pdf](http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/docs/NCHRP20-07(307)_AppendixA-GUIDE.pdf)
- Harris K.A., Kasan J. & Aktas C., (2009), Repair Methods for Prestressed Girder Bridges, Commonwealth of Pennsylvania Department of Transportation, Contract #510601, Report No. FWHA-PA-2009-008-PIT 006, p178
- Harris K.A., Kasan J. & Aktas C., (2009), Repair Methods for Prestressed Girder Bridges, Commonwealth of Pennsylvania Department of Transportation, Contract #510601, Report No. FWHA-PA-2009-008-PIT 006, p178
- Hedlund Nadja, 2020, "Non-destructive testing of concrete bridges, MSc project – Luleå university of technology, pp 117, 2020.
- Helmerich, R. and E. Niederleithinger, Sustainable Bridges – Assessment for Future Traffic Demands and Longer Lives. D3.16 NDT-Toolbox. 2007, Federal Institute for Materials Research and Testing, BAM: Berlin, Germany
- IAEA, Guidebook on non-destructive testing of concrete structures. 2002: Vienna, Austria
- ISO 16311-1:2014 Maintenance and repair of concrete structures — Part 1: General principles
- ISO 16311-2:2014 Maintenance and repair of concrete structures — Part 2: Assessment of existing concrete structures
- ISO 16311-3:2014 Maintenance and repair of concrete structures — Part 3: Design of repairs and prevention
- ISO 16311-4:2014 Maintenance and repair of concrete structures — Part 4: Execution of repairs and prevention



- Kaiser, H. and V.M. Karbhari, Non-destructive testing techniques for FRP rehabilitated concrete. I: a critical review. *Int. J. of Materials and Product Technology*, 2004. **21**(5): p. 349 - 384.
- Karlsson A., Holmqvist M., Jilderda P., Strand J., Johansson B-Å, Täljsten B., 2020, "Post tensioned Concrete Bridges – Study of methods for inspection, (Inspeksjon av etterspent armering i betongbruer, FoU-programmet Bedre Bruvedlikehold, Statesn Vegvesens Rapporter, Nr. 699, pp 186, 2020.
- Krüger, M. and C.U. Grosse, *Sustainable Bridges: Impact-Echo-techniques for Crack Depth Measurement*. 2007, Institute of Construction Materials, University of Stuttgart: Stuttgart, Germany
- Martin Friese, et al., *Non-destructive investigations in bridge constructions (Zerstörungsfreie Untersuchungen am Brückenbauwerk A1 Hagen/Schwerte)*. 2009, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM): Berlin.
- Matt P., (2000), "Durability of Prestressed Concrete Bridges in Switzerland" / 16th Congress of IABSE, September 2000
- McCann, D. M. and M. C. Forde (2001). "Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures." *NDT & E International* **34**(2): 71-84.
- NHRP 280, (1985), *Guidelines for evaluation and repair of prestressed concrete bridge members*, Transport Research Board, National cooperative highway reserach program, National Research Council, Wasington D.C., ISBN 0-309-04013-2, p 9
- Nilimaa J., Blanksvärd T., Al-Emranin M., Haghani R och Kliger R., *Innovativa metoder för förstärkning av befintliga konstruktioner med kompositmaterial – Förstärkning och brottbelastning av bro i full skala*, SBUF rapport 12849, 2015, pp112
- Nordin H., (2005), "Strengthening structures with externally prestressed tendons - Literature review", Technical Report, Luleå university of technology, 2005:06, ISSN 1402-1536, p84.
- Nordin, Håkan (2006). *Strengthening structures with externally prestressed tendons. Literature review*.
- Physical Acoustics. *Acoustic Emission (AE) Technology*. 2017 [2017.04.12]; Available from: <http://www.physicalacoustics.com/>.
- Picard A., Massicotte B. and Bastien J. (1995) "Relative Efficiency of External Prestressing" *Journal of Structural Engineering*, Vol. 121, No. 12, December 1995
- Pines D., and Aktan A. E., *Status of structural health monitoring of long-span bridges in the United States*, *Prog. Struct. Mater. Eng.* 4 (4) (2002) 372–380.
- Popescu C., Sas g. and Arntsen B., 2019, *Stable Dams: Condition Assessment and Inspection*, Norut Narvik, NTAS-F2019/16, p54
- Rehman S.K.U., Ibrahim Z., Memon S.A., and Jameel M., 2016, *Nondestructive test methods for concrete bridges: A review*, *Journal of Construction and Building Materials* 107 (2016) pp 57-86, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.011>
- Sajid S. and Chouindard L., 2019, *Impulse response test for condition assessment of concrete: A review*, *Journal Construction and Building Materials*, 211 (2019), 317-328

SAMARIS (2006). "State of the art report on assessment of structures in selected EEA and CE countries." Deliverable D19, Sustainable and Advanced Material for Road InfraStructure (SAMARIS), Brussels, Belgium, 104.

SB (2007a). Sustainable Bridges - Assessment for future traffic demands and longer lives, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne Wrocław, Poland.

Schnellenbach-Held M., Welsch T. & Fickler S., 2016, "Verstärkungen älterer Beton- und Spannbetonbrücken - Erfahrungssammlung Dokumentation 2016, Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bruderstraße 53, 514 27 Bergisch Gladbach, FE 15.0570/2012/NRB, p23

Shanafelt, G.O. and Horn, W.B. 1980. Damage Evaluation and Repair Methods for Prestressed Concrete Bridge Members, NCHRP Report 226. Transportation Research Board, 66 p

SS-EN 14629:2007 Betongkonstruktioner – Provning av produkter och system för skydd och reparation – Bestämning av kloridhalt i hårdnad betong

SS-EN 1504-9, Betongkonstruktioner - Produkter och system för skydd och reparation - Del 9: Allmänna principer för val av produkter och system

Tan K. and Ng C. K. (1997) "Effects of Deviators and Tendon Configuration on Behaviour of Externally Prestressed Beams", ACI Structural Journal, v 94, n 1, January–February 1997.

Trafikverket, 2015. Bro och tunnel management – Handbok

Trafikverket, 2016b. Vår verksamhet. [Online]. Tillgänglig via: <http://www.trafikverket.se/om-oss/var-verksamhet/>

## WEBBASERADE REFERENSER

<http://www.svenskkollektivtrafik.se/globalassets/partnersamverkan/dokument/om-oss/publikationer/rapport-fordubblad-marknadsandel-for-kollektivtrafik-2030-2016>

<https://www.giatecscientific.com/>

[www.ndt.net](http://www.ndt.net)

PROCEQ. Portable non-destructive instruments. 2017 [2017.04.12]; Available from: <https://www.proceq.com/>.

USRadar, 2018. usradar.com. [Online], Available at: <http://www.usradar.com/ground-penetrating-radar-products/3d-concrete-scanning-inspection-systems/quantum-mini-concrete-scanner/>

<https://myrenovationspecialist.com>

[www.mekaglobal.com](http://www.mekaglobal.com)

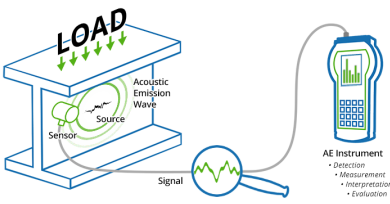
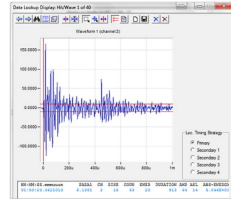
[www.fritzpak.com](http://www.fritzpak.com)

[www.structuralguide.com](http://www.structuralguide.com)

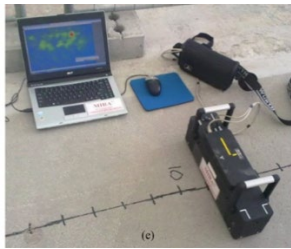
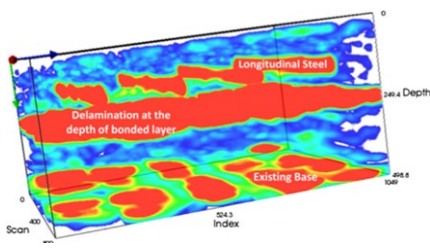
<https://fhwaapps.fhwa.dot.gov>



# APPENDIX A


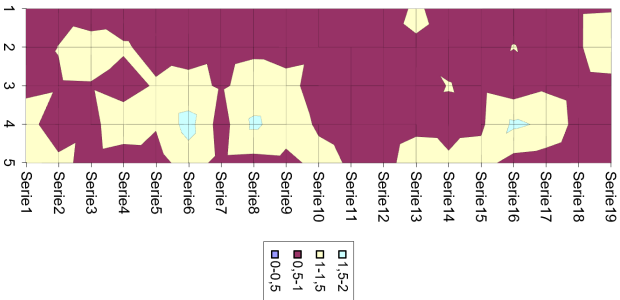
## Mekaniska och akustiska metoder

<b>Metod</b>	<b>Akustisk Emission (AE)</b>
<b>Tillämpning</b>	Detektering, bestämning och lokalisering av aktiva sprickor i (betong) konstruktioner, detektering av vidhäftning i kolfiberförstärkta konstruktioner.
<b>Beskrivning</b>	En serie av enstaka sensorer (minst 4) eller en rad sensorer är fästa på ytan av en struktur. Ultraljudssignaler som frigörs genom sprickbildning registreras. Information, såsom brusamplitud, energi, varaktighet, kännetecknar spricktypen. Aktiva sprickor kan identifieras och lokaliseras innan deras effekt är mätbar/synbar.
<b>Fysisk Princip</b>	Energiavgivning från sprickspetsen orsakar ett ljud, som kan tas emot av akustiska sensorer. Genom analys av kurvan som denna ljudsignal skapar kan man skilja mellan spricktyper. Källan till signalen kan identifieras genom skillnad i tid för ultraljudssignalens transport (time of flight).
<b>Begränsning</b>	Ultraljudssignalen ändrar responstiden med ökande uppsprickning av betongen. Inga signaler när sprickor inte är aktiva; filtrering av buller på grund av trafik, befintliga sprickor etc. är nödvändig. Detta kan göra utvärderingen komplicerad.
<b>Karaktärisering</b>	
Fysisk princip	<input type="checkbox"/> Visuell <input type="checkbox"/> Elektrisk/Elektromagnetisk <input checked="" type="checkbox"/> Akustisk <input type="checkbox"/> Kemisk
OFP/Förstörande	<input checked="" type="checkbox"/> OFP <input type="checkbox"/> Delvis förstörande <input type="checkbox"/> Förstörande
Kostnad utrustning	<input checked="" type="checkbox"/> Hög <input checked="" type="checkbox"/> Medel <input type="checkbox"/> Låg
Kompetens	<input checked="" type="checkbox"/> Hög <input type="checkbox"/> Medel <input type="checkbox"/> Låg
Krav på utförare	<input type="checkbox"/> Inspektör <input type="checkbox"/> Inspektör + specialist <input checked="" type="checkbox"/> Specialiserat lab
<b>Noggrannhet</b>	Kvalitativa resultat förväntas minska det detaljerade undersökta området med ca 20 %
<b>Utrustningskrav</b>	Datainsamling och analysystem (finns på marknaden), förförstärkare, sensorer, datormjukvara. Endast utbildade specialister.
<b>Fördelar</b>	Registrerar sprickor inuti betongkonstruktionen i realtid, innan deras effekt blir mätbar på ytan. Periodisk mätning möjlig för att hitta skillnaden mellan insamlade signaler över tid.
<b>Nackdelar</b>	Allvarliga defekter (nedbruten betong, tomrum, sprickbildning etc.) kan begränsa användbarheten.
<b>Tidsåtgång</b>	Snabb montering. Kan ge indikationer på konstruktionens kondition relativt snabbt, dock krävs expertis vid tolkning av resultat.
<b>Standardisering</b>	Ja till viss del
<b>Kommentarer</b>	Metod ej slutligt utvecklad och standardiserad, forskningsnivå (betong).
<b>Typisk tillämpning och resultat</b>	<b>Typiskt resultat</b>
	
<b>Referenser</b>	EN 1355/4, <a href="http://www.physicalacoustics.com/">http://www.physicalacoustics.com/</a>
<b>Sammanställd av:</b>	B. Täljsten
<b>Datum:</b>	2023-03-10

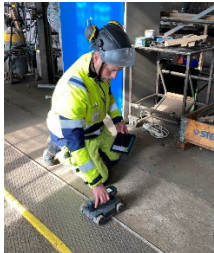
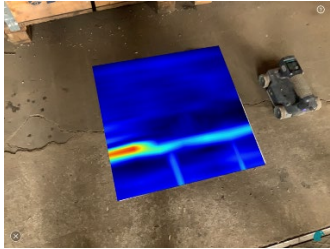
<b>Metod</b>	<b>Impact Echo (IE)</b>
<b>Tillämpning</b>	Bestämning av tjocklek av betongelement, lokalisering av delamineringar, hålrum, inhomogeniteter, tomrum i foderrör (verifiering)
<b>Beskrivning</b>	En stöt med hjälp av t ex en stålkula genererar en akustisk våg. Vågor utbreder sig, skador och gränssytor med olika akustisk impedans reflekterar dem. En mottager (transducer) registrerar förskjutningar i ytan orsakade av flera reflektioner som funktion av tid.
<b>Fysisk Princip</b>	Kort mekanisk påverkan orsakar stressvågor. Flera reflektioner mellan yta och reflektor (gränser, bakvägg eller tomrum) registreras och deras frekvensspektrum överförs från tidsdomän till frekvensdomän (FFT). Målets djup beräknas med den validerade våghastigheten.
<b>Begränsning</b>	Minsta detekterbara storlek på skada varierar beroende på skadans djup. Mycket effektiv testmetod från ett djup av ca 0,1 m till ca 1,2 m
<b>Karaktärisering</b>	
Fysisk princip	<input type="checkbox"/> Visuell <input type="checkbox"/> Elektrisk/Elektromagnetisk <input checked="" type="checkbox"/> Akustisk <input type="checkbox"/> Kemisk
OFP/Förstörande	<input checked="" type="checkbox"/> OFP <input type="checkbox"/> Delvis förstörande <input type="checkbox"/> Förstörande
Kostnad utrustning	<input type="checkbox"/> Hög <input checked="" type="checkbox"/> Medel <input type="checkbox"/> Låg
Kompetens	<input checked="" type="checkbox"/> Hög <input type="checkbox"/> Medel <input type="checkbox"/> Låg
Krav på utförare	<input type="checkbox"/> Inspektör <input checked="" type="checkbox"/> Inspektör + specialist <input type="checkbox"/> Specialiserat lab
<b>Noggrannhet</b>	Tjocklek på betongplattor kan erhållas till $\pm 3\%$ . Mycket tjocka betongtäckskikt kan påverka resultatet negativt. Närvaro av armering reflekterar starkt akustiska vågor vilket leder till försämrat resultat.
<b>Utrustningskrav</b>	Kommersiella utrustningar finns tillgängliga från ett flertal leverantörer, bl a Germann instruments, screening eagle, Olsen intruments etc.
<b>Fördelar</b>	Inga begränsningar på grund av riskfyllda vågor (som röntgen), åtkomst endast från en sida av elementet behövs, lätthanterlig utrustning, snabba resultat erhålls på plats
<b>Nackdelar</b>	Obelagd yta måste vara direkt åtkomlig. Ytans ojämnheter kan försämma uppkoppling mot sensor. Data behöver efterbehandlas (post-processas).
<b>Tidsåtgång</b>	Små områden snabbt, större områden kan vara mycket tidskrävande.
<b>Standardisering</b>	ASTM C1383
<b>Kommentarer</b>	Fungerar mycket bra för delaminerad betong samt större hålrum. Tjocklek är också lätt att detektera. Större svårigheter för hålrum i foderrör. Resultat störs av armering.
<b>Typisk tillämpning:</b>	<b>Typiskt resultat:</b>
<b>Referenser</b>	www.ndt.net
<b>Sammanställd av:</b>	B. Täljsten
<b>Datum:</b>	2023-05-10

<b>Metod</b>	<b>Ultraljud Tomografi</b>	
<b>Tillämpning</b>	Inspektion av den inre strukturen av slak eller spännarmerade betongelement: lokalisering av armeringsjärn + foderrör, hålrum, råttbon, delamineringar, sprickor etc.	
<b>Beskrivning</b>	Ultraljudspulser överförs till betong och deras reflektion analyseras med avseende på reflektioner vid gränssnitt och inre reflektorer. Punktmätningar kombineras för att visualisera reflektionen.	
<b>Fysisk Princip</b>	Ultraljudsskjuvvågstomografi, metoden även känd som MIRA, är baserad på ett lågfrekvent ultraljudssystem som kan upptäcka inre defekter i armerad betong såsom hålrum och delaminering. MIRA är baserad på ultraljuds-pitch-catch-metoden och använder en antenn som består av en rad torrpunktskontaktgivare, som avger skjuvvågor i betongen. 4 x 10-givarmatris placerade under utrustningen sänder och tar emot ljudvågor. Dessa analyseras för att skapa en 2D-bild av de reflekterande gränssnitten inom tvärsnittet under antennen. Styrenheten inuti antennen exciterar en rad av givare och de andra raderna av givare fungerar som mottagare. Den relativa intensiteten hos de reflekterade vågorna ger information om gränsförhållandena för olika lager och förekomsten av luftinneslutningar.	
<b>Begränsning</b>	Utbredningen av ultraljudsvågor begränsas av skikt som innehåller luft t.ex. betong med stora mängder luftporer och av mycket täta placerade armeringsjärn.	
<b>Karaktärisering</b>	<input type="checkbox"/> Visuell <input type="checkbox"/> Elektrisk/Elektromagnetisk <input checked="" type="checkbox"/> Akustisk <input type="checkbox"/> Kemisk <input checked="" type="checkbox"/> OFP <input type="checkbox"/> Delvis förstörande <input type="checkbox"/> Förstörande <input checked="" type="checkbox"/> Hög <input type="checkbox"/> Medel <input type="checkbox"/> Låg <input checked="" type="checkbox"/> Hög <input type="checkbox"/> Medel <input type="checkbox"/> Låg <input type="checkbox"/> Inspektör <input checked="" type="checkbox"/> Inspektör + specialist <input type="checkbox"/> Specialiserat lab	
<b>Noggrannhet</b>	Det är möjligt att hitta hålrum i foderrör. Noggrannheten beror på valet av emitterad våglängd (beror på bl a stenstorleken i betongen), ca 2 cm.	
<b>Utrustningskrav</b>	Utrustning för tomografi, t ex MIRA eller motsvarande utrustning från Proseq.	
<b>Fördelar</b>	Tillgänglighet krävs endast från en sida, inga säkerhetsbegränsningar	
<b>Nackdelar</b>	Svår koppling av plana ultraljudsgivare till grova betongytor, ojämnheten måste vara mindre än 1 cm. Slipning av ytan kan behövas	
<b>Tidsåtgång</b>	Är området preparerat, tar det ca 1 timme för 2m <sup>2</sup> . Därefter postprocessing av data	
<b>Standardisering</b>	ACI 228.2R-98	
<b>Kommentarer</b>	Oftast har denna metod föregåtts av tex GPR för att öka hastighet och noggrannhet.	
<b>Typisk tillämpning:</b>		<b>Typiskt resultat:</b> 
<b>Referenser</b>	MIRA Datablad, (Choi, P., et al., 2016)	
<b>Sammanställd av:</b>	B. Täljsten	
<b>Datum:</b>	2023-07-20	

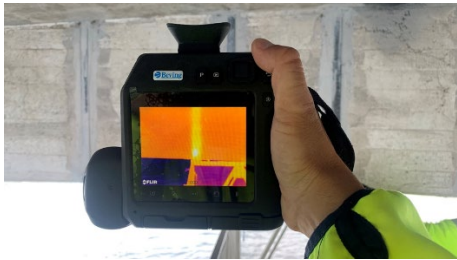
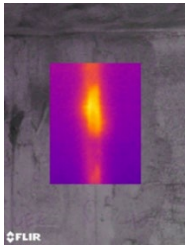
<b>Metod</b>	<b>Ultraljud UPV (Ultrasonic Pulse Velocity)</b>
<b>Tillämpning</b>	Besiktning av den inre strukturen av armerade eller/och spännarmerade betongelement. Utvärdering av betongkvalitet (bristande kompaktering, E-modul, tryckhållfasthet, sprickor, delaminering etc.)
<b>Beskrivning</b>	Ultraljudspulser sänds ut i betongytan av enstaka sensorer och den dämpade signalen tas emot av enstaka sensorer från sidan eller motsatt sida av betongelementet, beroende på vad som undersöks
<b>Fysisk Princip</b>	Ultraljudspulser med frekvens 50-300 kHz sänds ut och tas emot. Ultraljudspulsens intensitet och transithastighet beror på betongens densitet och elastiska egenskaper eller defekter i betongen. Kurvan och dämpningen av ultraljudsvågor indikerar position och geometri för hålrum och sprickor. Korrelation mellan hastighet och tryckhållfasthet kan antingen göras på plats eller från utborrade kärnor på lab.
<b>Begränsning</b>	Om densitetsvariationen är hög i det undersökta elementet finns osäkerhet i resultat. Förekomsten av hålrum är detekterbart, dock är deras storlek svår att uppskatta.
<b>Karaktärisering</b>	
Fysisk princip	<input type="checkbox"/> Visuell <input type="checkbox"/> Elektrisk/Elektromagnetisk <input checked="" type="checkbox"/> Akustisk <input type="checkbox"/> Kemisk
OFP/Förstörande	<input checked="" type="checkbox"/> OFP <input type="checkbox"/> Delvis förstörande <input type="checkbox"/> Förstörande
Kostnad utrustning	<input checked="" type="checkbox"/> Hög <input type="checkbox"/> Medel <input type="checkbox"/> Låg
Kompetens	<input checked="" type="checkbox"/> Hög <input type="checkbox"/> Medel <input type="checkbox"/> Låg
Krav på utförare	<input type="checkbox"/> Inspektör <input checked="" type="checkbox"/> Inspektör + specialist <input type="checkbox"/> Specialiserat lab
<b>Noggrannhet</b>	Förekomsten av tomrum kan detekteras om mätrutnätet är min. lika med tomrummets storlek. Noggrannheten beror på valet av emitterad våglängd, ca 2 cm.
<b>Utrustningskrav</b>	UPV t ex Pundit 250
<b>Fördelar</b>	Kan detektera sprickdjup, delamineringar, materialegenskaper.
<b>Nackdelar</b>	Kräver stort kunnande från den som använder utrustningen. Måste vara relativt säker på var delaminering, hålrum kan finnas – annars tidsödande
<b>Tidsåtgång</b>	Ca 30 min för små områden, t ex för att detektera djup i sprickor
<b>Standardisering</b>	ASTM-C597-16
<b>Kommentarer</b>	Mycket användbar metod, kompletterar andra metoder som t ex GPR
<b>Typisk tillämpning:</b>	<b>Typiskt resultat:</b>
	
<b>Referenser</b>	ASTM-C597-16, screeningeagle.com
<b>Sammanställd av:</b>	B. Täljsten
<b>Datum:</b>	2023-07-20


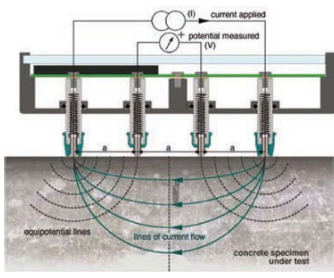
<b>Metod</b>	<b>Impulse Response (IR)</b>
<b>Tillämpning</b>	Lokalisering av delaminering, hålrum, inhomogeniteter, sprickor, råttbon, adekvat återfyllning bakom tunnel lining, förankring av paneler, vidhäftning av asfalt etc.
<b>Beskrivning</b>	Ett slag ges nära en geofon (omvandlar vibrationer till en elektrisk spänning). Både hammar- och geofon är kopplade till en bärbar dator med programvara för datainsamling, bearbetning och lagring
<b>Fysisk Princip</b>	En speciellt utformad hammare slås mot en betongytan och skickar en spänningsvåg genom konstruktionen, ( $f=0-1$ kHz). En geofon hålls i nära kontakt till islagspunkten. Responsen från den reflekterade ljudvågen "plockas upp" och registreras tillsammans med responsen från en lastcell inbyggd i hammaren. Förhållandet mellan geofon- och hammarresponsen beräknas som ett svar från en "enhetshammarslag". Frekvens/energispiktrumet är grunden för relevanta parametrar som: <u>genomsnittlig rörlighet, dynamisk styvhet, tomrumsförhållande</u>
<b>Begränsning</b>	Inte lämplig för att mäta djup till defekter
<b>Karaktärisering</b>	
Fysisk princip	<input type="checkbox"/> Visuell <input type="checkbox"/> Elektrisk/Elektromagnetisk <input checked="" type="checkbox"/> Akustisk <input type="checkbox"/> Kemisk
OFP/Förstörande	<input checked="" type="checkbox"/> OFP <input type="checkbox"/> Delvis förstörande <input type="checkbox"/> Förstörande
Kostnad utrustning	<input type="checkbox"/> Hög <input checked="" type="checkbox"/> Medel <input type="checkbox"/> Låg
Kompetens	<input checked="" type="checkbox"/> Hög <input checked="" type="checkbox"/> Medel <input type="checkbox"/> Låg
Krav på utförare	<input type="checkbox"/> Inspektör <input checked="" type="checkbox"/> Inspektör + specialist <input type="checkbox"/> Specialiserat lab
<b>Noggrannhet</b>	Icke relevant, kvalitativa resultat
<b>Utrustningskrav</b>	Hammare med lastcell, geofon, förstärkare, dator med relevant mjukvara (IR)
<b>Fördelar</b>	Utmärkt för utredning av större enhetliga konstruktioner som t ex plattor, bjälklag, väggar, men även balkar
<b>Nackdelar</b>	Ej lämplig för mindre konstruktioner med oregelbunden form
<b>Tidsåtgång</b>	Större områden, 10 x 3 m tar ca 4 – 5 timmar
<b>Standardisering</b>	ASTM C1740-10
<b>Kommentarer</b>	Bra metod för att detektera hålrum under platta på mark, störs inte av fiberarmerad betong, bra för att hinna utfyllnad bakom t ex grundläggning
<b>Typisk tillämpning:</b>	<b>Typiskt resultat:</b>
	
<b>Referenser</b>	www.ndt.net
<b>Sammanställd av:</b>	B. Täljsten
<b>Datum:</b>	2023-05-10

## Elektromagnetiska metoder



Metod	Georadar (GPR)
<b>Tillämpning</b>	Inspektion av den inre strukturen f ett konstruktionselement tillverkat av armerad eller efterspänd betong för att upptäcka och lokalisera inhomogeniteter (hålrum, metall, råttbon etc., tjocklek på strukturer som bara är åtkomliga från en sida, inre struktur av komplexa element för att bestämma fukthalten och fördelning av denna (begränsad).
<b>Beskrivning</b>	Elektromagnetiska impulser (<1ns) emitteras och deras reflektion vid gränssnitt mellan material med olika dielektriska egenskaper tas emot av givare från ena sidan av konstruktionselementet.
<b>Fysisk Princip</b>	Den emitterade pulsens hastighet är beroende av de dielektriska egenskaperna hos materialet inuti strukturen, förändringar av den reflekterade och mottagna signalen är ett mått på hålrum, tjocklek (backwall), armering etc.
<b>Begränsning</b>	Om variationerna i de olika materialens dielektriska egenskaper är låga kommer endast liten energi att reflekteras. Formen på konstruktionselementen eller materialinhomogeniteter är svåra eller inte alls (diameter på armeringsjärn) möjliga att uppskatta.
<b>Karaktärisering</b>	
Fysisk princip	<input type="checkbox"/> Visuell <input checked="" type="checkbox"/> Elektrisk/Elektromagnetisk <input type="checkbox"/> Akustisk <input type="checkbox"/> Kemisk
OFP/Förstörande	<input checked="" type="checkbox"/> OFP <input type="checkbox"/> Delvis förstörande <input type="checkbox"/> Förstörande
Kostnad utrustning	<input type="checkbox"/> Hög <input checked="" type="checkbox"/> Medel <input type="checkbox"/> Låg
Kompetens	<input checked="" type="checkbox"/> Hög <input type="checkbox"/> Medel <input type="checkbox"/> Låg
Krav på utförare	<input type="checkbox"/> Inspektör <input checked="" type="checkbox"/> Inspektör + specialist <input type="checkbox"/> Specialiserat lab
<b>Noggrannhet</b>	Djup eller tjockleksupplösning för 1,5 GHz: i 7-40 cm djup ±2 cm, för 900 MHz: i 13-60 cm djup ± 3 cm, för 500 MHz: i 25 - 200 cm djup ± 2 cm
<b>Utrustningskrav</b>	Radarsystem (GPR) med olika antenner som sänder ut normala frekvenser från 500 MHz till 2 GHz
<b>Fördelar</b>	Undersökningen görs från en sida. Idag kan man normalt både genomföra linjeskanning och areaskanning. Man erhåll placering av armering samt foderrör och även hålrum. Dessutom kartläggs täckskiktet.
<b>Nackdelar</b>	Elektromagnetiska impulser tränger inte igenom metalliska element. hålrum insida foderrör är inte detekterbara. "Skuggor" skapas bakom tät armering.
<b>Tidsåtgång</b>	Linjeskanning är mycket snabbt, areaskanning tar ca 10 ggr så lång tid.
<b>Standardisering</b>	ASTM D6432-11, ASTM D6087
<b>Kommentarer</b>	
<b>Typisk tillämpning:</b>	<b>Typiskt resultat:</b>
	
<b>Referenser</b>	Concrete society guidance on radar testing of concrete structures: CS Technical Report 48, 1997. ASTM 6087, ASTM D6432
<b>Sammanställd av:</b>	B. Täljsten
<b>Datum:</b>	2023-05-20




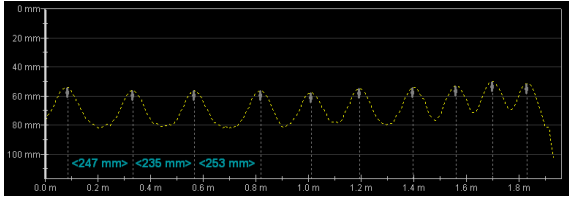
<b>Metod</b>	<b>Termografi</b>
<b>Tillämpning</b>	Vidhäftningsproblem, detektering av fästelement/förankringar, tjockleksmätning av tunna skikt, fuktfördelning, håligheter, ytfuktighet, lossgörande av puts, vidhäftningskontroll, lokalisering av djup och storlek på inhomogeniteter etc.
<b>Beskrivning</b>	Metod för visualisering och upplösning i djup för undersökning av ytnära strukturer och fördelning av luftfuktighet. Information om delaminering och hålrum nära ytan ackumuleras genom temperaturskillnaden mellan påverkade och icke påverkade områden
<b>Fysisk Princip</b>	En värmepuls, mestadels extern, appliceras på provelementet, den termiska fronten fortplantar sig under ytan genom diffusion och den resulterande yttemperaturen övervakas och analyseras med en IR-kamera. Mäter differensen i temperatur mellan olika materials förmåga att avge värme.
<b>Begränsning</b>	Metoden är beroende av den värme som tillförs och hur fort denna lämnar strukturen. Värmen kan inte i normalfallet nå djupare liggande skador/håligheter. Mest lämpligt för Kontroll av ytan, normalt maximalt ca 1-5 cm in i konstruktionen.
<b>Karaktärisering</b>	
Fysisk princip	<input type="checkbox"/> Visuell <input checked="" type="checkbox"/> Elektrisk/Elektromagnetisk <input type="checkbox"/> Akustisk <input type="checkbox"/> Kemisk
OFF/Förstörande	<input checked="" type="checkbox"/> OFF <input type="checkbox"/> Delvis förstörande <input type="checkbox"/> Förstörande
Kostnad utrustning	<input checked="" type="checkbox"/> Hög <input checked="" type="checkbox"/> Medel <input type="checkbox"/> Låg
Kompetens	<input type="checkbox"/> Hög <input checked="" type="checkbox"/> Medel <input type="checkbox"/> Låg
Krav på utförare	<input type="checkbox"/> Inspektör <input checked="" type="checkbox"/> Inspektör + specialist <input type="checkbox"/> Specialiserat lab
<b>Noggrannhet</b>	Noggrannhet beroende på omgivande parametrar som temperatur, luftfuktighet, vindhastighet och värmekameraupplösning.
<b>Utrustningskrav</b>	IR-kamera, värmeenhet (infraröd lampa, värmepistol, värmemattor, solljus etc.), programvara för analys
<b>Fördelar</b>	Beröringsfri metod för laboratorie- och fälttest. Relativt enkelt att använda med moderna IR-kameror
<b>Nackdelar</b>	Inga direkta
<b>Tidsåtgång</b>	Snabb och ger överblick direkt
<b>Standardisering</b>	ASTM D4788-03
<b>Kommentarer</b>	Finns olika typer av utrustning från mycket avancerad till enkla kameror, från ca 10 000 kr till ca 300 000 kr.
<b>Typisk tillämpning:</b>	<b>Typiskt resultat:</b>
	
<b>Referenser</b>	
<b>Sammanställd av:</b>	B. Täljsten
<b>Datum:</b>	2023-07-20


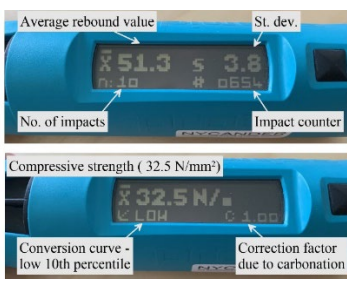
Metod	Elektrisk resistivitet	
<b>Tillämpning</b>	Icke-förstörande provning för att mäta betongens resistivitet som är ett mått på mikrosstrukturens beskaffenhet. Mäter vattenabsorption, kloriddiffusion. <u>Korrosionshastighet hos närliggande armering.</u>	
<b>Beskrivning</b>	Den elektriska resistiviteten tillhandahåller indikationer på hur pass bra porerna leder ström. Av denna anledning förväntas således en korrelation mellan betongens motstånd mot penetration av vätskor eller gaser (i synnerhet viktigt gällande armeringskorrosion). Resistiviteten blir därför ett mått på hur beständig befintlig armering är eller kommer vara.	
<b>Fysisk Princip</b>	Fyra sensorer trycks mot betongytan för att mäta ytans elektriska resistivitet. Arrangemanget av elektroderna är känt som "Wenner Array" och består av fyra elektroder som placeras över betongytan. De yttre elektroderna skapar en elektrisk ström i betongen, och de inre elektroderna mäter den inducerade potentialen. Resistansen beräknas sedan genom att dividera potentialskillnaden med strömmen. Wenner-sonden är känd främst på grund av sin enkelhet och att den är portabel, vilket gör den perfekt för fälttest. När den elektriska resistiviteten hos betongen är låg så ökar sannolikheten för korrosion.	
<b>Begränsning</b>	Betongtäcksiktets elektriska resistivitet påverkas av ökat vatteninnehåll, ökad porositet, ökande temperatur, ökande kloridhalt och minskande karbonatiseringsdjup	
<b>Karaktärisering</b>	<input type="checkbox"/> Visuell <input checked="" type="checkbox"/> Elektrisk/Elektromagnetisk <input type="checkbox"/> Akustisk <input type="checkbox"/> Kemisk <input checked="" type="checkbox"/> OFP <input type="checkbox"/> Delvis förstörande <input type="checkbox"/> Förstörande <input type="checkbox"/> Hög <input type="checkbox"/> Medel <input checked="" type="checkbox"/> Låg <input type="checkbox"/> Hög <input checked="" type="checkbox"/> Medel <input type="checkbox"/> Låg <input type="checkbox"/> Inspektör <input checked="" type="checkbox"/> Inspektör + specialist <input type="checkbox"/> Specialiserat lab	
<b>Noggrannhet</b>	Metoden är relativ och når ca 40 – 50 mm in i betongytan. Ger dock en indikation om korrosion. Kan ej användas för spännkablar placerade inne i foderrör.	
<b>Utrustningskrav</b>	Utrustning för att mäta elektrisk resistivitet, typ Resipod från Proseq.	
<b>Fördelar</b>	Enkel att använda, ger snabb indikation	
<b>Nackdelar</b>	Kräver god förståelse av den som använder utrustningen. Resultat bör verifieras genom friläggning.	
<b>Tidsåtgång</b>	Snabb	
<b>Standardisering</b>	AASTHO TP95, AASTHO T358-15, ASTM C1202-10	
<b>Kommentarer</b>		
<b>Typisk tillämpning:</b>		
<b>Typiskt resultat:</b>		
<b>Referenser</b>	screeningeagle.com	
<b>Sammanställd av:</b>	B. Täljsten	
<b>Datum:</b>	2023-07-20	



## Andra metoder

<b>Metod</b>	<b>Radiografi - röntgen</b>
<b>Tillämpning</b>	Radiografi, eller röntgen som det är allmänt känt, gör det möjligt att producera en 2D-bild av betongen och variationer i densiteten, till exempel de som orsakas av armeringsjärn eller hålrum. Tekniken som används idag gör det möjligt att producera extremt högupplösta digitala bilder av armerad betong upp till 1500 mm tjocklek
<b>Beskrivning</b>	Röntgenstrålningen penetrerar betongen och dämpas av materialet i en grad som är beroende av föremålets densitet och tjocklek. Mängden strålning som penetrerar objektet kommer att avgöra bildens ljusstyrka/kontrast (mörker). En armerad betongkonstruktion ger en bild som återspeglar variationerna i densitet i den testade volymen, så att armeringsjärn framträder som ljusare (mindre täta) bilder på en mörkare yta (förutsatt att betongen är homogen). Om betongen innehåller porer eller hålrum kommer dessa att visas som mörkare fläckar/områden på bilden.
<b>Fysisk Princip</b>	Gammastrålning (del av mycket korta radioaktiva vågor) t.ex. iridium, bestrålar betongelementet. Efter penetration visualiserar gammastrålning defekter på fil, röntgenplåt eller digitalt.
<b>Begränsning</b>	Tung och komplicerad utrustning, inte lämplig överallt. Behöver speciella tillstånd och skydd på grund av röntgen. Gäller troligen speciella projekt, inte lämpligt för kommersiell OFP. När ca 200 mm in i betongen. Djupare med högre strålningsnivå.
<b>Karaktärisering</b>	<input type="checkbox"/> Visuell <input type="checkbox"/> Elektrisk/Elektromagnetisk <input type="checkbox"/> Akustisk <input checked="" type="checkbox"/> Annan <input checked="" type="checkbox"/> OFP <input type="checkbox"/> Delvis förstörande <input type="checkbox"/> Förstörande <input checked="" type="checkbox"/> Hög <input type="checkbox"/> Medel <input type="checkbox"/> Låg <input checked="" type="checkbox"/> Hög <input type="checkbox"/> Medel <input type="checkbox"/> Låg <input type="checkbox"/> Inspektör <input type="checkbox"/> Inspektör + specialist <input checked="" type="checkbox"/> Specialiserat lab
<b>Noggrannhet</b>	Noggrannhet för min. dim. Of hålrum beror på fokus på strålningskälla och geometrin på provkropp. Min indikeringsstorlek 0,5 mm. Mycket bra noggrannhet av armering.
<b>Utrustningskrav</b>	Iridiumkälla, Ir 192. Strålningsmätanordning, röntgenfilm (inkl. framkallare) eller bildplåtssystem. T ex Bärbar Betatron som täcker 2-9 MeV för inspektion av massiva betong.
<b>Fördelar</b>	Ger en klar bild av inre skador och armering.
<b>Nackdelar</b>	Applicerbart endast från en sida åt gången. Röntgenstrålning. Speciella säkerhetskrav. Erhåller 2D bilder som i vissa fall kan vara svåra att tolka.
<b>Tidsåtgång</b>	Skanningen är snabb. Det tar tid att sätta upp utrustning och säkerhetsområde
<b>Standardisering</b>	Finns standardiserad provning för stålkonstruktioner, t ex DIN EN 444, men inte för betong
<b>Kommentarer</b>	Kräver hög kompetens hos den som utför arbetet. Kräver speciella hänsynstagande pga. strålning
<b>Typisk tillämpning:</b>	<b>Typiskt resultat:</b>
	
<b>Referenser</b>	xray.comet.tech, qsa-global.com
<b>Sammanställd av:</b>	B. Täljsten
<b>Datum:</b>	2023-08-08

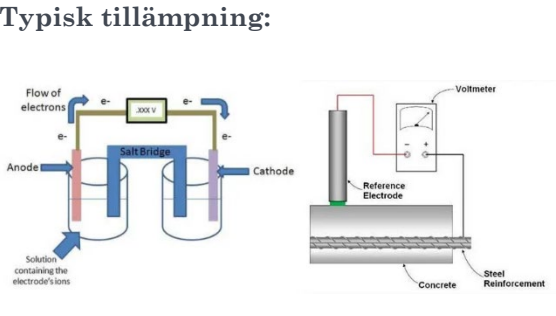
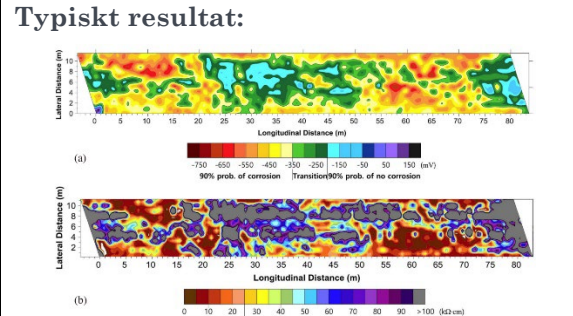
## Enkla metoder

<b>Metod</b>	<b>Täckskiktsmätare</b>
<b>Tillämpning</b>	Bestämning av täckskiktets tjocklek och utbredning samt diameter (osäkert) på armeringsjärnen i betongyta
<b>Beskrivning</b>	Teknik för att lokalisera armering nära ytan samt andra magnetiserbara metalliska element (bultar eller förankringar) med hjälp av en permanentmagnet.
<b>Fysisk Princip</b>	Kvalitativ procedur: magnetisering av armering nära betongytan eller förankringar i betongkonstruktioner med permanentmagnet (DC) eller AC och <ul style="list-style-type: none"> <li>• mätning av attraktionskraften i ett likströmsfält (DC).</li> <li>• mätning av spridningensfältet i ett likströmsfält (DC).</li> <li>• mätning av magnetflödet i ett kontinuerligt fält med lämpliga detektorer efter applicering av en växelström (AC)</li> <li>• Virvelströmsmätning av förstärkningsposition och diameter</li> </ul> Pulsinduktionsteknik
<b>Begränsning</b>	Inte tillämpligt för icke-magnetiska metalliska element (förankringar), ingen användning nära elektriska kablar, temperaturområde - 10 till + 60 °C. Påverkansparametrar: armeringsdiameter; nätarmering (svetsad) kan störa testresultaten.
<b>Karaktärisering</b>	
Fysisk princip	<input type="checkbox"/> Visuell <input checked="" type="checkbox"/> Elektrisk/Elektromagnetisk <input type="checkbox"/> Akustisk <input type="checkbox"/> Kemisk
OFP/Förstörande	<input checked="" type="checkbox"/> OFP <input type="checkbox"/> Delvis förstörande <input type="checkbox"/> Förstörande
Kostnad utrustning	<input type="checkbox"/> Hög <input type="checkbox"/> Medel <input checked="" type="checkbox"/> Låg
Kompetens	<input type="checkbox"/> Hög <input type="checkbox"/> Medel <input checked="" type="checkbox"/> Låg
Krav på utförare	<input checked="" type="checkbox"/> Inspektör <input type="checkbox"/> Inspektör + specialist <input type="checkbox"/> Specialiserat lab
<b>Noggrannhet</b>	Maximalt 150 mm, oftast ca 80 mm med ± 5 noggrannhet
<b>Utrustningskrav</b>	Täckskiktsmätare, virvelströmsmätare, digital utrustning tillgänglig. Flera leverantörer.
<b>Fördelar</b>	Teknik med lättanvänd utrustning snabbt applicerbar, tillförlitliga absolutvärden levererade direkt under mätning på plats, digital datainsamling och bearbetning via PC.
<b>Nackdelar</b>	Ej tillämpligt i närheten av elkablar eller för icke-magnetiska material
<b>Tidsåtgång</b>	Mindre än en timme om den testade ytan är direkt åtkomlig
<b>Standardisering</b>	BS1881, part 204, SS 78-B4, DIN 1045
<b>Kommentarer</b>	Standardprocedur
<b>Typisk tillämpning:</b>	<b>Typiskt resultat:</b>
	
<b>Referenser</b>	screenineagle.com
<b>Sammanställd av:</b>	B. Täljsten
<b>Datum:</b>	2023-03-20

<b>Metod</b>	<b>Studshammare (Rebound Hammer)</b>		
<b>Tillämpning</b>	Icke-förstörande provning av betongkvaliteten (sklerometrisk hårdhet)		
<b>Beskrivning</b>	Materialets hårdhet genom återstuds erhålls direkt på plats genom att mäta impulsen – studsens från instrumentet, applicerbar på ung betong för absoluta värden och på åldrad betong för relativ hårdhetsfördelning längs en yta. Värdet som erhålls kan beräknas om till tryckhållfasthet för betong.		
<b>Fysisk Princip</b>	En hammare slår mot en yta med definierad energiimpuls (0,5 - 60 Nm) val av utrustning beror på tjocklek på betongelementet, ballastdiameter, betongens hårdhet motsvarar den uppmätta returimpulsen, vilket är ett mått på betongens tryckhållfasthet		
<b>Begränsning</b>	Resultat från karbonatiserad betong kan vara missvisande		
<b>Karaktärisering</b>			
Fysisk princip	<input type="checkbox"/> Visuell	<input checked="" type="checkbox"/> Elektrisk/Elektromagnetisk	<input type="checkbox"/> Akustisk <input type="checkbox"/> Kemisk
OFP/Förstörande	<input checked="" type="checkbox"/> OFP	<input type="checkbox"/> Delvis förstörande	<input type="checkbox"/> Förstörande
Kostnad utrustning	<input type="checkbox"/> Hög	<input type="checkbox"/> Medel	<input checked="" type="checkbox"/> Låg
Kompetens	<input type="checkbox"/> Hög	<input type="checkbox"/> Medel	<input checked="" type="checkbox"/> Låg
Krav på utförare	<input checked="" type="checkbox"/> Inspektör	<input type="checkbox"/> Inspektör + specialist	<input type="checkbox"/> Specialiserat lab
<b>Noggrannhet</b>	För användning på betong med en tryckhållfasthet av 10 – 70 MPa		
<b>Utrustningskrav</b>	Schmidthammare med kalibreringslinjer för visuell uppskattning, digital mätning av återstuds, direkt tillgänglighet av tryckhållfastheten		
<b>Fördelar</b>	Erhållna data erhålls direkt, enkel att använda		
<b>Nackdelar</b>	Preparering av ytan nödvändigt		
<b>Tidsåtgång</b>	Snabb – beror på omfattning, 9 prover per undersökt punkt ska tas		
<b>Standardisering</b>	DIN 1048, EN 12504-2, ASTM C805		
<b>Kommentarer</b>			
<b>Typisk tillämpning:</b>	<b>Typiskt resultat:</b>		
			
<b>Referenser</b>	screeningeagle.com		
<b>Sammanställd av:</b>	B. Täljsten		
<b>Datum:</b>	2023-07-20		

<b>Metod</b>	<b>Videoskop</b>
<b>Tillämpning</b>	Besiktning av invändiga håligheter i en konstruktion- och konstruktionselement, ofta genom borrarade hål t.ex. inspektera tillståndet för efterspända linor, kablar, inre stålarmering- eller betongytor
<b>Beskrivning</b>	Med en kamera i mikroskala (halvstyva eller flexibla endoskop/videoskop), implementerad genom borrarat eller existerande hål, kan invändiga stål- eller betongytor i svåråtkomliga eller dolda områden inspekteras, t.ex. tillstånd av olika ytor, spännlinor eller spännkablar. Inne i foderrör.
<b>Fysisk Princip</b>	Ett endoskop med flexibel eller halvflexibel optisk fiberkabel visualiserar inre ytor (armering, betong) eller det inre tillståndet hos foderrör, spännlinor, spännkablar i form av still- eller rörliga digitala bilder.
<b>Begränsning</b>	Begränsningen utgörs av längden på videoskopet och upplösningen på kameran
<b>Karaktärisering</b>	
Fysisk princip	<input checked="" type="checkbox"/> Visuell <input checked="" type="checkbox"/> Elektrisk/Elektromagnetisk <input type="checkbox"/> Akustisk <input type="checkbox"/> Kemisk
OFP/Förstörande	<input type="checkbox"/> OFP <input checked="" type="checkbox"/> Delvis förstörande <input type="checkbox"/> Förstörande
Kostnad utrustning	<input type="checkbox"/> Hög <input type="checkbox"/> Medel <input checked="" type="checkbox"/> Låg
Kompetens	<input type="checkbox"/> Hög <input type="checkbox"/> Medel <input checked="" type="checkbox"/> Låg
Krav på utförare	<input checked="" type="checkbox"/> Inspektör <input type="checkbox"/> Inspektör + specialist <input type="checkbox"/> Specialiserat lab
<b>Noggrannhet</b>	Noggrannheten beror på upplösningen av kameran, upplysning och avstånd, normalt väldigt noggrant, men beror på de lokala förhållandena.
<b>Utrustningskrav</b>	Borrmaskin och borr ca $\phi 25$ samt videoskop
<b>Fördelar</b>	Inspektion av dolda områden inuti betongkonstruktioner, som annars inte kan inspekteras, snabbt applicerbar, omedelbar tillgänglighet av bilder på plats
<b>Nackdelar</b>	Något destruktivt, provet är begränsat till den undersökta ytan eller vald sektion för foderrör, risk för borrar i bärande konstruktionselement, t ex spännlinor, armering (kan dock kontrolleras innan med t ex täckskitmätare, GPR.
<b>Tidsåtgång</b>	Snabbt
<b>Standardisering</b>	
<b>Kommentarer</b>	Standardprocedur
<b>Typisk tillämpning:</b>	<b>Typiskt resultat:</b>
	
<b>Referenser</b>	
<b>Sammanställd av:</b>	B. Täljsten
<b>Datum:</b>	2023-08-06

## Kemiska och potentialmetoder

<b>Metod</b>	<b>EKP – Halvcell potentialmätning</b>
<b>Tillämpning</b>	Kartläggning av områden som är hotade av korrosion
<b>Beskrivning</b>	Analys av potentialförändring för armering genom öppen krets
<b>Fysisk Princip</b>	Raster- eller linjevis mätning av potential mellan armering och en referenselektrod. Korrosionsaktivitet av stålarmring kan mätas med hjälp av halvcellspotentialteknik. Det är en teknik som består av en kopparkoppar-sulfat-halvcell, anslutningsledningarna och en högimpedansvoltmeter. Om armeringen korroderar, tenderar elektronerna att strömma från armeringen till halvcellen. Metoden indikerar endast sannolikheten för korrosionsaktivitet vid testtillfället och inte korrosionshastigheten.
<b>Begränsning</b>	Ledande betong mellan armering och betongyta, inga membran som t ex färg, asfalt eller andra tätningsdelar kan ligga mellan
<b>Karaktärisering</b>	
Fysisk princip	<input type="checkbox"/> Visuell <input checked="" type="checkbox"/> Elektrisk/Elektromagnetisk <input type="checkbox"/> Akustisk <input checked="" type="checkbox"/> Kemisk
OFP/Förstörande	<input checked="" type="checkbox"/> OFP <input checked="" type="checkbox"/> Delvis förstörande <input type="checkbox"/> Förstörande
Kostnad utrustning	<input type="checkbox"/> Hög <input type="checkbox"/> Medel <input checked="" type="checkbox"/> Låg
Kompetens	<input type="checkbox"/> Hög <input checked="" type="checkbox"/> Medel <input type="checkbox"/> Låg
Krav på utförare	<input type="checkbox"/> Inspektör <input checked="" type="checkbox"/> Inspektör + specialist <input type="checkbox"/> Specialiserat lab
<b>Noggrannhet</b>	Lokalisering av möjliga skadade områden kan bestämmas beroende på storleken på raster/rutnät
<b>Utrustningskrav</b>	Kommersiell EKP utrustning. (Referenselektrod (Ag/AgCl eller CuSO <sub>4</sub> ), hjulelektrod för större ytor, anslutningskablar till armering, Ohm-mätare, datalogger, datalagring)
<b>Fördelar</b>	Kommersiellt tillgängliga system, lätthanterliga, snabba mätningar
<b>Nackdelar</b>	Elektrisk tillgång till armering krävs, ytan måste vara våt
<b>Tidsåtgång</b>	Beroende på förhållanden på plats, från några sekunder för en avläsning, till omfattande tid om ytan är indelad in stora och täta rutnät
<b>Standardisering</b>	ASTM C876 – 15, Råd i ACI 228.2R-98
<b>Kommentarer</b>	
<b>Typisk tillämpning:</b>	
<b>Typiskt resultat:</b>	
<b>Referenser</b>	IAEA, <i>Guidebook on non-destructive testing of concrete structures</i> . 2002: Vienna, Austria, <a href="https://www.giatecscientific.com/">https://www.giatecscientific.com/</a>
<b>Sammanställd av:</b>	B. Täljsten
<b>Datum:</b>	2023-05-06

## APPENDIX B – MÖJLIGA ORSAKER TILL SKADOR HOS BETONGKONSTRUKTIONER

Orsaker Symptom	Krympning	Armeringskorrosion	Frostangrepp	Alkali-silika-reaktion	Urlakning	Sulfatangrepp	Syraangrepp	Saltangrepp	Temperaturangrepp	Plastisk krympning	Plastisk sättning	Hög härdnings-temperatur.	Frysning färsk betong	Gjutskadorna	Överlast
Spjälkning		•		•				•	•						•
Spjälkning längs med armering		•													
Delaminering	•	•	•					•	•						
Vittring			•			•	•	•	•				•		
Sprickor längs med armering		•								•	•				
Lutande/diagonala sprickor															•
Godtyckligt placerade sprickor	•		•						•	•		•	•		•
Tvärgående sprickor												•			•
Mörka och fuktiga sprickor				•	•										
Krackelering	•		•	•		•		•	•	•					
Sprickor med utfällning		•		•	•										
Kalk/salt-utfällning					•										
Rostutfällning		•													
Gelutfällning				•										•	
Nedböjning/deformation														•	•
Förskjutning/sättning														•	•
Kantresning/rullning	•														•
Krossning															•



## APPENDIX C - ANVÄNDNING AV OFP FÖR SKADOR I BETONGKONSTRUKTIONER

Identifierade defekter/parametrar som påverkar betongkonstruktionen	Troligen orsakat av dimensionering eller produktion							Troligen orsakat av nedbrytningsmekanismer/belastning												
	Tjockleksmätning	Täckskikt	Rättbon	Hålrum i foderrör	Lokalisering av armering och/eller foderrör	Otillräcklig injektering	Betong (Hållfasthet, elasticitetsmodul etc.)	Betongyta – kvalitet/status(karbonatisering/klorider)	Delaminering/spjälkning	Fuktnnehåll	Lokalisering ytsprickor	Mekanisk nedbrytning (Utmattnig, överlast, sättningar)	Kemisk nedbrytning (ASR, syror etc)	Fysisk nedbrytning (Frostskador, nötning))	Sprickdjup	Brott i spännlinor	Aktiva sprickor	Kvarvarande tjocklek	Kvarvarande diameter	Armeringskorrosion
<b>Visuell</b>																				
Visuell inspektion	•							•	•		•	(•)	(•)	•			(•)	(•)	(•)	(•)
Slag (hammare, kedjedrag)								•	•		•			•						
3D-skanning/LIDAR	•										•	(•)								
Drönare								(•)			•	(•)								
Videoskop			(•)	(•)																
<b>Mekaniska och akustiska OFP metoder</b>																				
Akustisk Emission (AE)									•			(•)				(•)	•			(•)
Impact Echo (IE)	•		•	(•)	(•)	(•)			•		(•)									
Ultrapulse Velocity (UPV)	•		•				•				•			•						
Ultraljud tomografi (MIRA)	•	(•)	•	•	•	•					•	•						•		
Impulse Respons (IR)									•											
Studshammare							•	(•)	(•)											
<b>Elektriska och elektromagnetiska metoder</b>																				
GPR (Georadar)	•	•	(•)		•				(•)									•		
Täckskiktsmätare		•			•															
Termografi									(•)	(•)	(•)			(•)						
Elektrisk resistivitet																			(•)	•

Identifierade defekter/parametrar som påverkar betongkonstruktionen	Troligen orsakat av dimensionering eller produktion							Troligen orsakat av nedbrytningsmekanismer/belastning												
	Tjockleksmätning	Täckskikt	Råttbon	Hålrum i foderrör	Lokalisering av armering och/eller foderrör	Otillräcklig injektering	Betong (Hållfasthet, elasticitetsmodul etc.)	Betongyta – kvalitet/status(karbonatisering/klorider)	Delaminering/spjälkning	Fukttnehåll	Lokalisering ytsprickor	Mekanisk nedbrytning (Utmattning, överlast, sättningar)	Kemisk nedbrytning (ASR, syror etc)	Fysisk nedbrytning (Frostskador, nötning))	Sprickdjup	Brott i spännlinor	Aktiva sprickor	Kvarvarande tjocklek	Kvarvarande diameter	Armeringskorrosion
<b>Kemiska och potentialmetoder</b>																				
Elektrokemisk potentialmätning (EKP)																				•
<b>Mindre förstörande metoder</b>																				
Karbonatiseringsprov/Kloridprov							•													
Tunnslipsanalys											•	•	•							
<b>Övrigt</b>																				
Röntgen (Höga krav på säkerhet)	•	•	•	•					•							•				
Provbelastning/Betongkärnor/Vidhäftning	•						•	•	•											

## APPENDIX D – OFÖRSTÖRANDE PROVNING MÖJLIGHETER OCH BEGRÄNSNINGAR

Testmetod	Beskrivning	Tillämpning/möjligheter	Begränsningar
Akustisk emission (AE)	Övergående elastiska vågor. Kontinuerlig mätning. Baseras på energi vid uppsprickning.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Detektera sprickpropagering</li> <li>2) Används både lokalt och globalt</li> <li>3) Skadedetektering i realtid</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Mäter propagerande sprickor</li> <li>2) Bakgrundsljud kan vara problem</li> <li>3) Kan vara svårt att applicera utanför lab</li> </ol>
Impact Echo (IE)	En stöt skapar en akustisk våg. Vågor reflekteras olika mot olika materia och håligheter.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Detektera defekter i betong</li> <li>2) Detektera delamineringar</li> <li>3) Detektera foderrör</li> <li>4) Detektera håligheter</li> <li>5) Uppskatta betongens E-modul</li> <li>6) Uppskatta betongens tryckhållfasthet</li> <li>7) Detektera injekteringsmassa</li> <li>8) Detektera brist i pågjutning</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Täta nät krävs för små hålrum och detaljer</li> <li>2) Kanteffekter påverkar</li> <li>3) Tät armering kan påverka</li> <li>4) Osäkerhet gällande kartläggning av materialparametrar</li> <li>5) Fungerar dåligt för mjuka beläggningar/pågjutningar</li> </ol>
Ultraljud pulseko (UPE)	Ultraljud med flertal sensorer, sänder och tar emot information på samma sida av konstruktionen. Skapar 3D bilder.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Detektera tjocklek</li> <li>2) Detektera kvalitet på betong</li> <li>3) Detektera armering</li> <li>4) Detektera hålrum i foderrör</li> <li>5) Detektera rättbon</li> <li>6) Detektera delamineringar</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Kräver kunnig operatör</li> <li>2) Tät armering påverkar resultatet</li> <li>3) Betongytan bär vara jämn</li> <li>4) Kräver stor tidsåtgång</li> <li>5) Data måste postprocessas för att bli tydlig</li> </ol>
Ultraljud pulshastighet (UPV)	Ultraljud med enstaka sensorer, oftast två. Kan sända från en sida till den andra sidan från konstruktionen.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Mäta tjocklek på betongelement</li> <li>2) Registrera defekter i betong</li> <li>3) Detektera brist vid vidhäftning av armering</li> <li>4) Detektera mindre sprickdjup från betongyta</li> <li>5) Detektera kontaktytor mellan betong och andra material</li> <li>6) Detektera defekter i samband med injektering</li> <li>7) Uppskatta betongens E-modul</li> <li>8) Uppskatta betongens tryckhållfasthet</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Kvalitet på data beror på anläggning mot betong</li> <li>2) Svårt att erhålla bra resultat för grov betong</li> <li>3) Defekter i ytan kan vara svåra att detektera</li> </ol>

<b>Testmetod</b>	<b>Beskrivning</b>	<b>Tillämpning/möjligheter</b>	<b>Begränsningar</b>
Impulse Response (IR)	Består enkelt uttryck av en hammare och geofon. Ett slag ges med hammaren och reflektionen från slaget insamlas av geofonen. Mjukvara behandlar resultatet.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Detektera sprickor</li> <li>2) Detektera rättbon och betong med låg kvalitet</li> <li>3) Detektera håligheter</li> <li>4) Detektera delamineringar</li> <li>5) Detektera håligheter under plattor på mark</li> <li>6) Detektera defekta pågjutningar</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Resultatet beror på var testpunkterna väljs</li> <li>2) Resultatet beroende på indelning av rutnät</li> </ol>
Georadar (GPR)	Elektromagnetiska vågor sänds in i konstruktionen. Dessa reflekteras vid olika gränssnitt, stål, luft etc. Reflekterade vågor analyseras.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Detekterar ingjutet gods</li> <li>2) Detekterar armering och dess utbredning</li> <li>3) Detekterar foderrör</li> <li>4) Kartlägger täckskikt</li> <li>5) Detektera håligheter och anomalier</li> <li>6) Kartlägger tjocklek hos betongelement</li> <li>7) Detekterar delamineringar</li> <li>8) Uppskattar betongkvalitet</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Tösalter kan påverka den dielektriska konstanten</li> <li>2) Kall väderlek kan påverka mätdata</li> <li>3) Tät armering påverkar mätdata</li> </ol>
Täckskiktsmätare	Ett magnetfält sänds in i betongytan och kringluter den armering som finns där.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Detekterar avstånd till armering</li> <li>2) Kartlägger täckskikt</li> <li>3) Kan teoretiskt detektera olika dimensioner på armering</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Har begräsning i djup, ca 150 mm</li> <li>2) Osäkert gällande detektering av olika dimensioner</li> </ol>
Termografi (IR)	Elektromagnetiska vågor i infrarött spektrum analyseras. Dessa åstadkoms med värme som sänds mot ytan.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Detekterar sprickor</li> <li>2) Detektera delaminering i ytskikt</li> <li>3) Detekterar vidhäftningsbrott</li> <li>4) Kan möjligen detektera förändring i densitet, termisk konduktivitet och värmekapacitet</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Svårt att detektera djupt liggande delamineringar</li> <li>2) Kräver aktive eller passiv värmekälla</li> <li>3) Fukt kan påverka resultatet</li> </ol>

<b>Testmetod</b>	<b>Beskrivning</b>	<b>Tillämpning/möjligheter</b>	<b>Begränsningar</b>
Elektrisk resistivitet	Mäter betongens resistivitet. Mäter vattenabsorption, kloriddiffusion. Korrosionshastighet hos närliggande armering	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Detekterar fukthalt</li> <li>2) Kan uppskatta risk för korrosion</li> <li>3) Kan identifiera områden känsliga för kloridinträngning</li> <li>4) Kan uppskatta närvaro av sprickor</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Ger obehandlad data – kan vara svår att bearbeta</li> <li>2) Resultat beror på materialegenskaper, fukt, porositet, saltkoncentrationer</li> <li>3) Det kan vara svårt att särskilja vilken parameter som är dominerande</li> <li>4) Ytan måste förvattnas</li> </ol>
Elektrokemisk potentialmätning (EKP)	Analys av potentialförändring över öppen krets. Måste frilägga armering och ansluta till denna.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Detekterar aktiv korrosion</li> <li>2) Enkelt handhavande</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Måste vara plusgrader (<math>&gt; + 2 \text{ }^\circ\text{C}</math>)</li> <li>2) Eventuella ytskikt måste avlägsnas</li> <li>3) Resultaten beror på betongens fukthalt</li> <li>4) Relativa resultat</li> </ol>
Kedjedrag och hammarslag	Klassisk metod för att mäta delaminering och hålrum. En kedja dras efter betongytan alt. En hammare slår mot det område som man undersöker.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Detekterar delaminering i betong</li> <li>2) Ger preliminära resultat för fortsatt undersökning</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Är inte applicerbart för vertikala ytor</li> <li>2) Är mycket beroende av den som gör undersökningen</li> </ol>