

**Icke-förstörande provning i samband med
tillståndsbedömning**

En förstudie

**Thomas Blanksvärd, Hans Hedlund, Skanska Sverige AB
Cosmin Popescu, LTU**

2017-07-17

Förord

Projektet har genomförts i samarbete mellan Skanska Sverige AB och Luleå Tekniska Universitet med stöd av SBUF. Större delen av projektet genomfördes av Skanska Sverige AB, Skanskas teknikresurs Teknik, och har under hela projektets gång haft en tydlig anknytning till den forskning som bedrivs vid Luleå Tekniska Universitet.

Vi i projektgruppen vill tacka samtliga finansiärer nedan som gjort det möjligt att genomföra projektet.

- SBUF - Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond
- Skanska Sverige AB
- Luleå Tekniska Universitet

Vi vill också tacka våra referensgruppsdeltagare;

- Anders Carolin (Trafikverket) och Tobias Larsson (NCC).

Luleå, Juli, 2017

Thomas Blanksvärd, Hans Hedlund, och Cosmin Popescu

Sammanfattning

Föreliggande rapport beskriver olika kommersiellt tillgängliga teknologier gällande icke-förstörande provning av betongkonstruktioner, vilket på engelska benämns Non Destructive Testing (NDT). De teknologier som beskrivs i denna rapport avgränsas till att särskilt omfatta NDT för betong och armerad betong. Området för NDT är väldigt stort och täcker ett brett spektrum av metoder och tekniker. Det huvudsakliga syftet med dessa teknologier är att utvärdera och analysera egenskaper hos material, komponenter och system utan att påverka konstruktionernas funktion och samtidigt minimera påverkan av driften. I och med att NDT teknikerna inte har någon permanent påverkan på analyserade material, konstruktionsdelar eller sammansatta konstruktionselement kan dessa vara väldigt användbara och kan spara både tid och pengar vid tillståndsbedömning av nyproducerade och befintliga konstruktioner. Genom att ha en väl genomtänkt strategi för tillämpningen av NDT är den förväntade effekten att erhålla reducerad miljöpåverkan genom att onödiga åtgärder kan motverkas genom rätt val, av rätt metod, i rätt tid.

För att kunna välja rätt NDT metoder krävs stor kunskap om nedbrytningseffekterna hos de ingående materialen och konstruktionsdelarna. I vissa fall krävs även en kombination av olika NDT metoder för att få en helhetsbild över konstruktionens tillstånd.

Den här rapporten inleder med att beskriva de vanligaste defekterna och nedbrytningseffekterna i betongkonstruktioner, sedan beskrivs strategier i samband med val av NDT metod.

Rapporten beskriver även mer ingående ett urval av NDT tekniker, hur dessa fungerar, vad som kan detekteras, vilka begränsningar som förekommer samt kommersiellt tillgängliga utrustningar. Urvalet av NDT teknologierna är i denna rapport klassificerade enligt uppfordrad energi. Totalt beskrivs 15 olika teknologier, baserade på mekaniska, elektromagnetiska och optiska metoder samt provbelastning.

Rapporten visar även på vilka standarder och handböcker som finns tillgängliga för respektive NDT metod (i de fall där det finns någon standard kopplad till respektive teknik, vilket inte gäller alla).

Tillståndsbedömning av befintliga konstruktioner är i många fall relativt komplexa, rapporten beskriver även hur en NDT undersökning kan planeras och vilka befintliga standarder som kan tillämpas tillsammans med planeringen av NDT och dess begränsningar.

Innehåll

1	INLEDNING	1
1.1	BAKGRUND	1
1.2	SYFTE OCH MÅL	2
1.3	AVGRÄNSNINGAR	2
1.4	METODIK	2
2	DEFEKTER, NEDBRYTNING OCH STRATEGI VID VAL AV NDT	3
2.1	DEFEKTER I BETONG	3
2.2	UPPSKATTNING AV NEDBRYTNINGSFASER I BETONG	3
2.3	OLIKA NDT TEKNOLOGIER	5
2.4	VAL AV NDT TEKNOLOGIER	6
3	KLASSIFICERING ENLIGT UPPFORDRAD ENERGI	9
3.1	MEKANISKA METODER	9
3.1.1	<i>Studshammare</i>	9
3.1.2	<i>Ultraljud</i>	10
3.1.3	<i>Slag-eko (impact echo, IE)</i>	13
3.1.4	<i>Aktiv ytvågsmätning</i>	16
3.1.5	<i>Akustisk emission</i>	17
3.2	ELEKTROMAGNETISKA METODER	18
3.2.1	<i>Radar</i>	18
3.2.2	<i>Termografi</i>	21
3.2.3	<i>Radiografi (röntgenologi)</i>	24
3.2.4	<i>Elektrisk resistivitet (electrical resistivity)</i>	25
3.2.5	<i>Täckskiktsmätare</i>	27
3.2.6	<i>Potentialmätning</i>	27
3.3	OPTISKA METODER	29
3.3.1	<i>Infraröd termografi</i>	29
3.3.2	<i>Fotometrisk mätning (digital bildkorrelering)</i>	29
3.3.3	<i>3D laserskanning</i>	30
3.4	PROVBELASTNING	31
4	SLUTSATSER SAMT VAL AV NDT BEROENDE PÅ UPPDRAG	33
5	FRAMTIDA FORSKNING/UTVECKLING	35
6	REFERENSER	39
6.1	SKRIFTLIGA KÄLLOR	39
6.2	INTERNET KÄLLOR	46

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Befintlig infrastruktur och konstruktioner är mottagliga för flertalet olika typer av nedbrytningsprocesser och defekter som t.ex. sprickor, krypning, håligheter, täcksikt-delaminering etc. Sprickor bildas normalt till följd av en eller i kombination av ett flertal olika faktorer så som, krympning, temperaturförändringar, tvång (yttre och inre), sättningar i grundläggning, laster, exponering etc. Omfattande sprickbildning leder ofta till problem, t.ex. kortare teknisk livslängd än förväntat samt förlorad strukturell integritet över tid.

Provning och utvärdering av tillståndet hos befintliga konstruktioner är således inte helt trivialt då kausaliteten bakom nedbrytningen och uppkomna skador alltför ofta inte beror på en, utan flertalet faktorer samt i vissa fall i kombination med varandra. Det är alltså av intresse att kunna identifiera nedbrytning eller avvikande funktion hos en befintlig konstruktion för att kunna avgöra hur dessa påverkar drift samt eventuella underhållsåtgärder.

Inspektion och övervakning av byggnader och infrastruktur är viktigt för att bilda sig en välgrundad uppskattning av konstruktionernas tillstånd och samtidigt kunna planera underhåll och reparationsarbeten i god tid. På så sätt kan en väl utförd inspektion användas för att öka säkerheten, förlänga livslängden och minska livscykelkostnaderna på både befintliga och nya konstruktioner. I dagsläget görs stora satsningar på att minska människans miljöpåverkan genom bland annat minskat resursutnyttjande, minskade utsläpp och mer återanvändning av befintliga resurser. Ett initiativ på Europainivå går under begreppet Horizon 2020 och en av de stora samhällsutmaningarna som identifierats är att tillhandahålla ett ”smart, grönt och integrerat transportsystem” som säkerställer ”miljöintegritet, motståndskraft och hållbarhet”, European Commission (2016). Bland annat har ett av delprojekten Shift2Rail som mål att fördubbla järnvägens kapacitet, tillförlitlighet och punktlighet samtidigt som livscykelkostnaderna halveras, Shift2Rail (2017). En åldrande infrastruktur innebär stora utmaningar för samhället som ställer krav på noggrannare metoder för att ta reda på exakt hur säkra våra konstruktioner är utan att gå sönder och dessutom hur länge de klarar av att bära avsedda och i vissa fall framtida laster. En effektiv tillståndsbedömning har genom smarta metoder för inspektion och tillståndsbedömning en stor potential att bidra till ett mer hållbart samhälle genom att bygga och utnyttja våra konstruktioner på ett optimerat sätt. De krav som kan ställas på de nya metoderna för tillståndsbedömning och övervakning är att de ska vara pålitliga, effektiva, ge minimal störning på driften, optimera resursutnyttjandet och bidra till att konstruktionerna blir hållbarare, billigare, grönare och säkrare.

Icke förstörande provning (NDT-Non Destructive Testing) är ett samlingsnamn för teknologier som kan användas för att mäta konstruktioners tillstånd utan att medföra alltför stor fysisk påverkan på konstruktionen. NDT omfattar tekniker som mäter ett material, en komponent eller en konstruktions integritet. I denna rapport beskrivs ett urval av NDT teknologier som finns kommersiellt tillgängliga.

1.2 Syfte och mål

Huvudsyftet med projektet var att undersöka tillgängliga teknologier för icke-förstörande provning (NDT) samt att klassificera dessa tekniker efter metod. Dessa metoder kopplas därefter mot olika nedbrytningsmekanismer och skador hos betongkonstruktioner. Målet var att koppla de olika NDT metoderna mot gällande standardiserade arbetssätt. Genom att samla tillgängliga NDT teknologier och deras möjligheter och begränsningar kan sannolikt mer resurseffektiva beslut och åtgärder fattas som då sparar ägare, förvaltare och brukare av betongkonstruktioner såväl tid som pengar. Ytterligare positiva effekter som denna rapport förväntas ge är reducerad miljöpåverkan genom att de mest lämpliga metoderna kan väljas vid rätt tidpunkt.

1.3 Avgränsningar

Projektet behandlar endast NDT teknologier avsedda för tillståndsbedömning av betongkonstruktioner med eller utan stålarmring. Vidare beaktas endast de vanligaste nedbrytningseffekterna, skador kopplade till mer extrema eller ovanlig exponering omfattas inte i denna rapport, t.ex. explosionslaster och kraftig kemisk exponering. De NDT metoder som beskrivs i denna rapport är sådana som är vanligt förekommande samt kommersiellt tillgängliga, ett urval nya och mer innovativa teknologier beskrivs endast kortfattat i kapitlet för fortsatt forskning. Kostnader kopplade till införskaffning av NDT utrustning är endast angiven för de teknologier där sådan information funnits tillgänglig och är uppskattat i SEK baserat på då rådande valutakurs. Av den här anledningen bör kostnaderna endast anses som approximativa. Indelningen och kategoriseringen av de identifierade teknologierna teknikerna har i den här rapporten baserats på uppfordrad energi, andra kategoriseringsmöjligheter är självfallet möjliga.

1.4 Metodik

Den större delen av arbetet i detta projekt har bestått i att identifiera gällande och kommersiellt tillgängliga NDT teknologier samt urskilja vilka av dessa teknologier som är relevanta för bedömningen av nedbrytningsprocesser i betong. Eftersom att det förekommer flertalet olika teknologier samt att många av dessa är relativt lika omfattar denna rapport ett urval av de mest tillämplade metoderna för NDT. Efter att de olika teknologierna identifierats har dessa klassificerats baserat på uppfordrad energi kopplat till aktuell nedbrytningsprocess eller skadetyper. Beroende på nedbrytningens art kommer i vissa fall olika NDT teknologier behöva tillämpas samtidigt för att kartlägga omfattningen av nedbrytningen. Detta innebar således att de vanligaste nedbrytningseffekterna i betong behövde undersökas och redogöras. Metodiken för framställandet av denna rapport har alltså baserats på följande struktur:

- Identifiering av de vanligaste nedbrytningsprocesserna i betongkonstruktioner
- Kartläggning av befintliga och kommersiellt tillgängliga NDT teknologier
- Klassificering av identifierade NDT teknologier baserat på uppfordrad energi
- Koppling av NDT teknologi till nedbrytningseffekt

Metodiken är tänkt att resultera till att rätt NDT teknologi ska kunna kopplas till rätt skadenivå, för att en korrekt tillståndsbedömning ska kunna genomföras och slutligen att rätt beslut om rätt åtgärd, i rätt tid ska kunna fattas.

2 Defekter, nedbrytning och strategi vid val av NDT

2.1 Defekter i betong

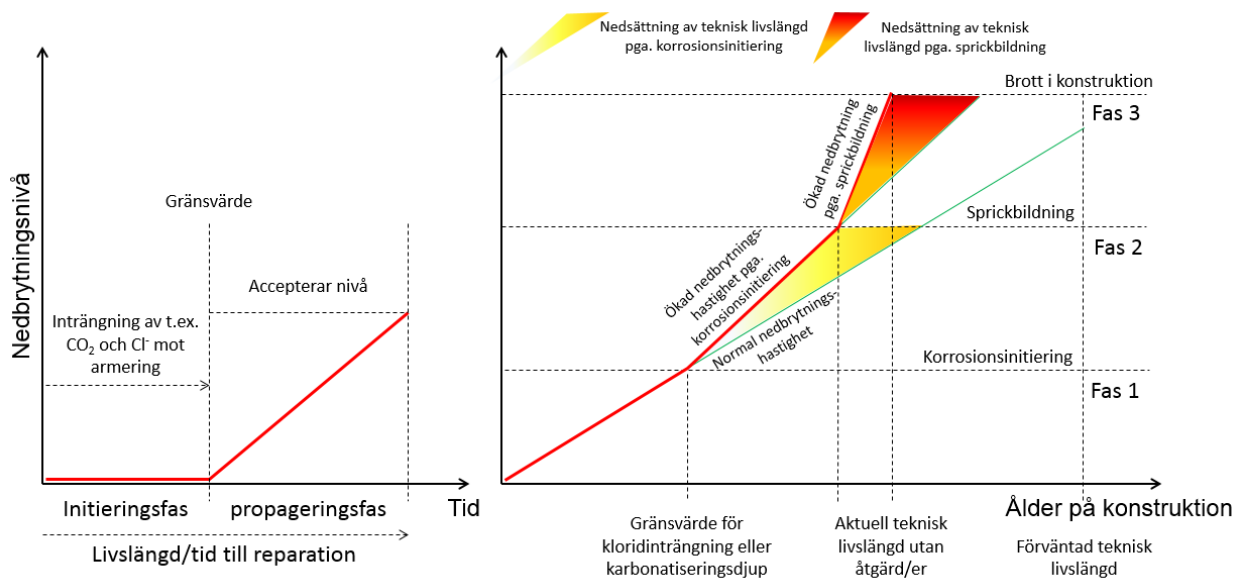
Nedbrytning av betong beror på flertalet orsaker vilket i sin tur beror på ingående material, utförande och exponering. De vanligaste typerna av defekter i betong kan vara delaminering, sprickor, håligheter etc, se Tabell 1. Den här typen av defekter eller skador påverkar betongens hållbarhet, strukturella integritet samt funktion och påverkar således den tekniska livslängden. Delaminering och sprickor i betong beror i många fall på korrosion av ingående armering. Korrosion av armering börjar vanligtvis i de yttre armeringsskikten och delaminering sker oftast i form av sprickor längs med armeringen som sedan propagerar till betongytan och kan innebära att täckande betongskikt faller bort. Sprickor kan också bero på krympning, temperaturrörelser, frostcykler, kemiskt angrepp och mekanisk belastning (t.ex. överlast och utmattning). Att kunna bestämma sprickornas utbredning och djup är alltså av yttersta vikt för att kunna bedöma konstruktionernas tillstånd och strukturella integritet. Håligheter beror vanligtvis på dålig kompaktering under byggskedet. Håligheter i injekterade foderrör för spännarmering kan leda till ökad korrosionshastighet och kan med tiden innebära att konstruktionen går till brott.

2.2 Uppskattning av nedbrytningsfaser i betong

Armeringskorrosion är en av de vanligaste nedbrytningsprocesserna i betong. För 40 år sedan noterades korrosionsprocessen i två faser, nämligen initiering och propagering, Tutti (1982), Betongrapport 12 (2007). Numera betraktas vanligtvis livscykeln för en konstruktion med tre faser, Verma et al. (2013), Al-Neshawy et al. (2016):

1. Perioden efter byggnation och före korrosionsinitiering
2. Perioden mellan initiering av korrosion och bildandet av sprickor
3. Perioden efter att sprickor bildats och före konstruktionen går till brott

Dessa två beaktningssätt för nedbrytningsprocessen i betong (i förekommande fall är det valt att visa nedbrytning pga. korrosion) schematiseras i Figur 1.



Figur 1. Nedbrytningsfaser under en konstruktions livslängd, t.v. två faser baserade på Tuutti (1982), t.h. tre faser baserade på Al-Neshawy et al. (2016).

Tabell 1. Defekter i betong, olika symptom och möjliga orsaker, ISO 16311-2 (2014).

Orsaker→ Symptom ↓	Krymp- ning	Armerings- korrosion	Frost- angrepp	Alkali- reaktio n	Urlak- ning	Sulfat- angrepp	Syra- angrepp	Salt- angrepp	Temp- eraturan- grepp	Plastisk krympni- ng	Plastisk sättning	Hög härdnings- temp.	Frys- ning färsk betong	Gjutsk- ador	Över- last
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															•

2.3 Olika principer för NDT

Det finns flertalet olika teknologier för NDT baserat på olika principer som kan tillämpas för armerade betongkonstruktioner. I Tabell 2 redovisas en studie av de vanligast förekommande principer som tillämpas i dag, NDT Net (2017). När det gäller bedömningen av tillförlitlighet och användbarhet i Tabell 2 baseras denna på praktisk (subjektiv) erfarenhet i specifika situationer och bör inte ses som allmängiltiga. Kapitel 3 beskriver mer utförligt ett urval av kommersiellt tillgängliga NDT teknologier.

Tabell 2. Sammanställning av olika tillgängliga NDT teknologier, NDT Net (2017)

NDT princip	Förkortn.	Material	Tillämpning	Tillförlitlighet	Användbarhet
Akustisk emission	AE	Betong	Kontinuerlig mätning under konstruktionens bygg- och bruksskede	– ^a	– ^a
Karbonatiseringsdjup	– ^b	Betong	Karbonatiseringsdjup för betong	Bra	Bra
Täckskiktetsmätning	– ^b	Stål	Placering och storlek på armering, täckskiktstjocklek	Godtagbar	Dålig
Elektrisk resistivitet	ER	Stål/ betong	Korrosionshastighet (resistivitet)	– ^a	Bra
Galvanostatisk potentialmätning	GPM	Stål	Detektering av pågående armeringskorrosion (elektrokemisk)	Bra	Bra
Halvcells potentialmätning	HCP	Stål	Detektering av pågående armeringskorrosion (elektrokemisk)	Bra/Godtagbar	Bra
Markradar	GPR	Stål	Placering och storlek på armering	Godtagbar	Godtagbar
Slag-eko	IE	Betong	Interna sprickor, täckskiktstjocklek	Bra	Bra
Impuls respons	IR	Betong	Delaminering, håligheter och homogenitet	Godtagbar	Dålig
Infraröd termografi	IRT	Betong	Delaminering och håligheter	– ^a	– ^a
Linjär polarisering	LPR	Stål	Uppskattning av armeringskorrosion (elektrokemisk)	Godtagbar	Godtagbar
Ultraljudspulsko	MIRA	Betong	Håligheter, delaminering, bedömning av injekterad spännarmering	Godtagbar	Godtagbar
Radiografi	RAD	Stål	Placering och storlek av armering, bedömning av injekterad spännarmering	Godtagbar	Godtagbar
Studshammare	– ^b	Betong	Hållfasthet, elasticitetsmodul, skadad betong/delaminering	Godtagbar	Godtagbar
Ytvågsmätning	SASW/MASW	Betong	Reduktion i hållfasthet och elasticitet, täckskiktstjocklek	Bra	Bra
Ultraljud:					
Pulseko	UPE	Stål/Betong	Bedömning av injektering i spännarmering, ytliga och inre sprickor i betong	Godtagbar	Godtagbar/dålig
Pulshastighet	UPV	Betong	Sprickor, reducerad hållfasthet	Godtagbar	Godtagbar

^a inte känd, ^b inte tillämpbar

2.4 Val av princip för NDT

Befintliga NDT teknologier kan med fördel tillämpas som kvalitetssäkrande mätmetoder under konstruktions hela livscykel, allt från kvalitetssäkring av ingående material under utförandeskedet, vid besiktningar och under hela driftperioden. NDT teknologier har flertalet tillämpningsområden inom tillståndsbedömning samt uppskattning av kvarvarande livslängd hos befintliga konstruktioner. Hur och vilka av de tillgängliga NDT teknologierna tillämpas beror till stor del på (McCann & Forde (2001)):

- Ingående material
- Typ av defekt
- Storlek och omfattning av defekt
- Var defekten är placerad

Valet av NDT metoder ska självklart baseras på var konstruktionen befinner sig i under sin tekniska livslängd kopplat till aktuell nedbrytningsnivå och defekt, se Figur 1. Baserat på de tre faserna beskrivna i kapitel 2.2 kan valet av NDT teknologier delas enligt följande, Al-Neshawy et al. (2016):

Fas 1. Teknologier eller metoder som väljs här ska kunna mäta det faktiska tillståndet hos konstruktionen gällande både utförande och eventuella defekter. Kontroll av utförande kan t.ex. vara geometrier, täthet, homogenitet och kvalitet. Defekter som inte är kopplade till utförandet kan t.ex. vara felaktigt dimensionerade detaljer, konstruktionslösningar etc. De här typerna av defekter kan över tiden leda till att konstruktionen inte klarar av att uppfylla funktion och förväntad teknisk livslängd. Om de här typerna av defekter upptäcks tidigt (fas 1) finns goda förutsättningar att åtgärda dessa och reducera kostsamma ingrepp under konstruktionens senare fas. Exempel på nedbrytningseffekter som kan mätas är håligheter, dålig vidhäftning, otäta övergångszoner, karbonatiseringsdjup, kloridinhåll, täckande betongskikt, armeringsnivåer och betongkvalitet. En viktig aspekt i samband med uppteckning av konstruktionens tillstånd direkt efter uppförandet är att all information lagras och senare kan ligga till grund för undersökningar som görs i de senare faserna (2 och 3).

Fas 2. I denna fas ska teknologier och metoder väljas för att kunna mäta tillståndet i konstruktionens driftsskede. Okulära inspektioner återspeglar endast vad som är synligt på ytan och ofta på handnära avstånd. Genom att tillämpa mer avancerade teknologier kan mer information införskaffas om det faktiska tillståndet hos konstruktionen. Med detta menas vad som händer inuti konstruktionen, t.ex. håligheter. Sådant som kan mätas under nedbrytningens initieringsfas är kopplade till den faktiska exponeringen, dvs. fysikaliska orsaker (t.ex. frostcykler), mekanisk påverkan (t.ex. sprickor pga av överlast, nötning etc.), kemisk påverkan (t.ex. aggressiva gaser eller joner), se SS-EN1504-9. Ett sätt att säkerställa vetskapen om att konstruktionen har erforderligt motstånd mot exponering är att undersöka det täckande betongskikt runt armering i syfte att säkerställa vidhäftning och reducerad nedbrytning.

Fas 3. Den tredje fasen kräver teknologier som klarar av att mäta konstruktionen under effekterna av propageringsfasen, dvs. när sprickor börjar bildas. Sådana

metoder ska alltså kunna mäta och undersöka sprickor, delaminering, korrosion och placering av armering.

En sammanställning över standarder och handböcker som beskriver NDT metoder kan ses i Verma et al. (2013).

3 Klassificering enligt uppfordrad energi

I den här rapporten har klassificeringen av NDT teknologierna valts att, förenklat, delas in i tre olika klasser beroende på uppfordrad energi, nämligen; mekaniska, elektromagnetiska, optiska och provbelastningsmetoder. Författarna till denna rapport är medvetna om att detta är en förenkling och att teknologierna kan delas upp i mer förfinade klassindelningar men har gjort bedömningen att som sammanfattning duger denna enkla klassindelning.

3.1 Mekaniska metoder

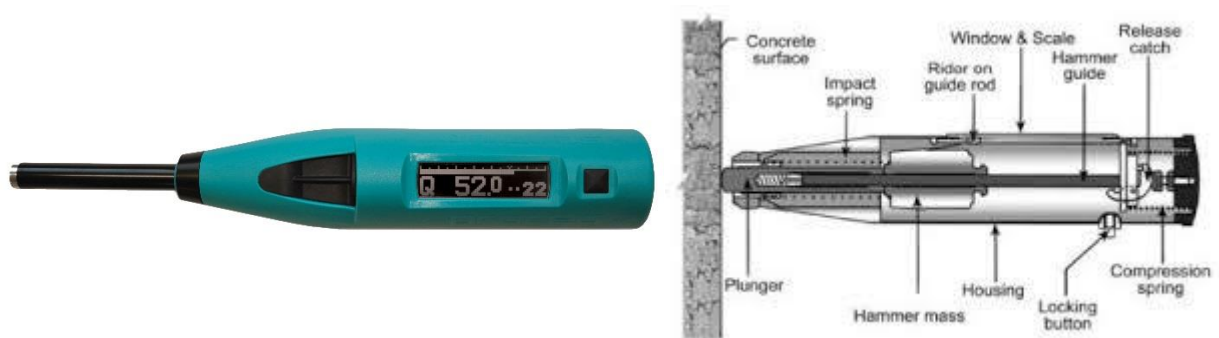
Den här typen av teknologier täcker ett brett spektrum av metoder. I huvudsak omfattar dessa metoder att det inspekterade ämnet utsätts för en fysisk påverkan, oftast i form av någon typ av vågor som sedan färdas/reflekteras genom ämnet, Sack & Olson (1995). Den här typen av vågor omfattar ljud-, tryck-, seismiska-, skjuv-, ytvågor etc. skapade av mekaniska eller elektriska källor.

3.1.1 Studshammare

Den svenska standarden som beskriver bestämning av studsvärden är SS-EN12504-2:2012. En studshammare är en fjäderbelastad stålhammare som mäter studsmotståndet. I utrustningen ska även ett kalibreringsdon finnas som har en hårdhet om minst 52 HRC, SS-EN ISO 6508-1:2015, en massa om 16 ± 1 kg samt en diameter om ca 150 mm. Utöver kalibreringsstället ska även en slipsten finnas i utrustningen med medelgrov textur av silikakarbidmaterial eller likvärdigt.

Studsvärdet, R , är avståndet till massan efter att den träffat ytan. Fördelarna med att tillämpa studshammare är främst att det är en standardiserad metod och att den är förhållandevis enkel att använda.

Studsvärdet, Q , är förhållandet mellan hastigheten, v_r och v_0 , mätt kort före och kort efter studs. Fördelarna med Q -värdet är att den är oberoende av riktningen av försöket (gravitationen) och friktion och har därmed lägre variation i resultaten. En typisk studshammare och en principskiss finns redovisad i Figur 2.



Figur 2. T.v. Studshammare av märket PROCEQ. T.h. principskiss för studshammare, Nordman & Pettersson (2011)

De grundläggande principerna för studshammare är antagandet om att det finns ett förhållande mellan hårdhet och tryckhållfasthet. Ju hårdare ett material är desto mindre mekanisk energi kommer således att absorberas.

När ytan för provtagning väljs, vanligtvis 300 x 300 mm² med minsta tjocklek av 100 mm, ska följande beaktas:

- Betonghållfasthet
- Typ av motyta (vanligtvis beroende av form)
- Typ av betong (normaldensitetsbetong eller lättdensitetsbetong)
- Fuktförhållanden vid ytan
- Karbonatisering
- Riktning av test (i förhållande till gravitationsriktningen)
- Andra faktorer

Ytor som uppvisar allvarlig nedbrytning, avskalning, råhet eller hög porositet ska undvikas.

Mjuka ytor eller ytor med grov textur ska slipas med slipstenen.

Ett försöksområde består oftast av flera försökspositioner och varje försöksposition bör ha minst 9 testvärden. Exempel på ett försöksområde är en balk i bro.

Processen för tillämpningen av studshammare kan sammanfattas i följande steg:

- *Tillstånd av försöksytor:*
 - Temperaturen ska ligga mellan 0 - 50°C (mest beroende på försöksapparat)
- *Steg 1: Verifiering med hjälp av kalibreringsdon*
- *Steg 2: Tillämpning med studshammare*
 - Toppen måste träffa vinkelrätt ytan
 - Öka trycket successivt till dess att toppen träffar ytan
 - Avläs/notera studsverd och riktning
 - Använd minst 9 avläsningar för varje försöksposition
 - Minsta avstånd är 25 mm mellan två studs lägen och inget studs läge får vara närmare än 30 mm från en kant
 - Undersök varje träffyta, när en studs har krossat eller penetrerar en hålighet vid ytan ska resultaten avfärdas.
- *Steg 3: Verifiera studs mot kalibreringsdon*
- *Resultat:*
 - Median av alla avläsningar som heltal
 - Avfärda resultat om mer än 20% av värdena skiljer sig eller om mer än 30% skiljer sig från median

När testresultaten erhållits ska försöksrapporten innehålla följande

1. Identifikation av betongkonstruktion/element
2. Identifiering av försöksytornas läge
3. Identifiering av studshammaren och dess specifikationer
4. Beskrivning av förberedelserna av underlaget samt om möjligt dess tillstånd
5. Datum och tidpunkt för respektive försök
6. Studsnummer, R, som median av testresultat, justerat mot riktningen av hammaren (om tillämpligt). Detta ska ske för respektive försöksyta
7. Varje avvikelse från standard testmetod, t.ex. förekomsten av fukt vid ytan, temperatur etc.

3.1.2 Ultraljud

Tillämpningen av ultraljud som mätmetod finns bland annat återopad i SS-EN206:2013 och den standard som styr bestämningen av ultraljudshastigheter är SS-EN12504-4. Denna standard beskriver i generella drag hur ultraljudshastigheten ska bestämmas.

Den fundamentala principen för ultraljudsmätning av betong går ut på att skicka en puls av longitudinella vibrationer från en elektroakustisk sändare. Denna sändare ska vara i kontakt med betongen under försöket. När pulsen skickas in i betongen från sändaren, ibland via flytande kontaktmedium, men numera oftast torrt, Kozlov et al. (1997), Shevaldykin et al. (2003), reflekteras denna olika beroende på sammansättning, sprickor, kanter etc. Detta innebär att ett relativt komplex system av spänningsvågor bildas, både longitudinella- och skjuvvågor. Dessa propagerar sedan genom betongen. Pulsen och sedermera de bildade vågorna tas upp i en mottagare, de första vågorna att tas upp är de longitudinella, se Figur 3. Vanligtvis behöver två sidor vara tillgängliga för mätningen.

Den longitudinella pulshastigheten beräknas enligt (m/s eller km/h):

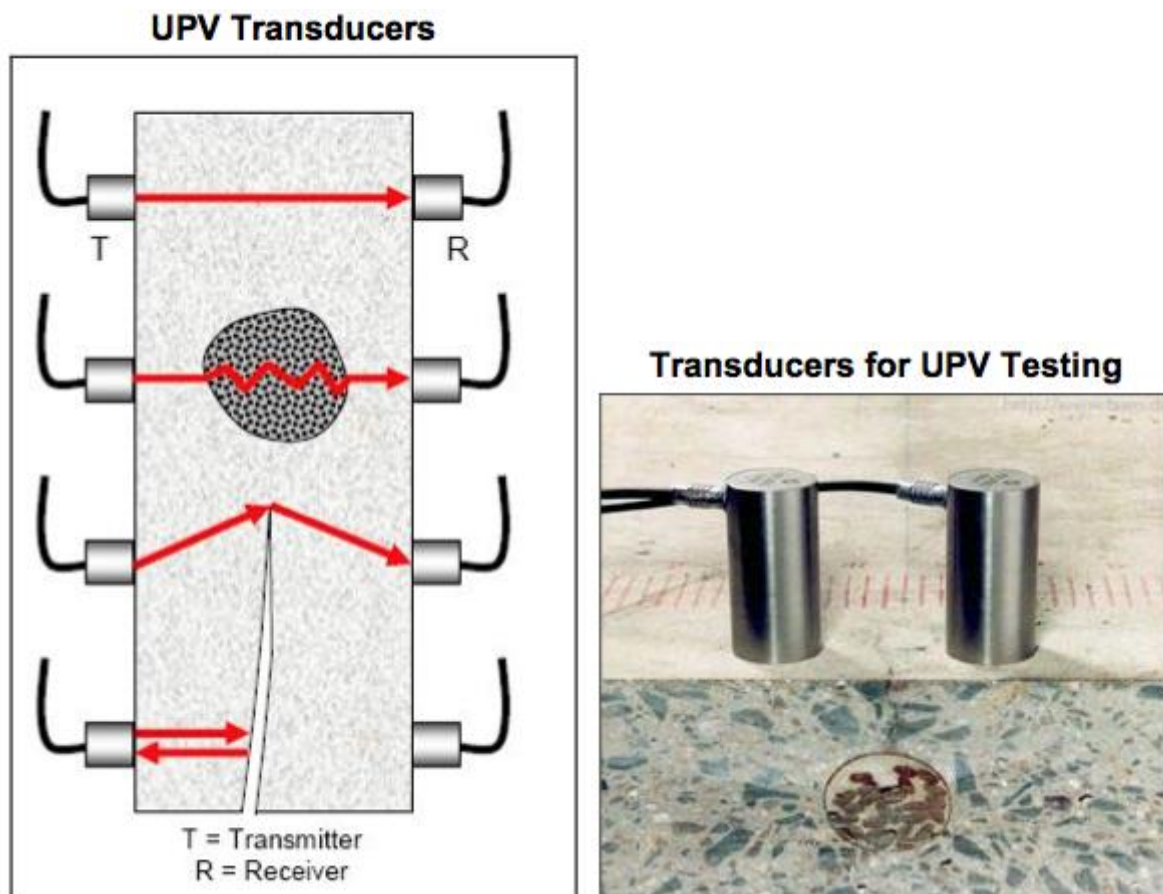
$$v = L/T$$

Där v är hastigheten hos den longitudinella pulsen, L är längden på vägen, T är tiden det tog att transversera längden L .

Genom att tillämpa ultraljudspulshastighetsmätning (UPV, Ultrasonic Pulse Velocity) kontrolleras således pulshastigheten av longitudinella vibrationer genom betongen. Vanligtvis förekommer följande tillämpningsområden:

- Homogenitet i betong
- Förekomsten av sprickor, håligheter eller andra imperfektioner
- Ändringar i betongkonstruktionen som kan ske under livslängden
- Kvaliteten på betong i förhållande till standardiserade krav
- Kvaliteten på ett betongelement i förhållande till ett annat
- Indikativa värden på elasticitetsmodul hos betong

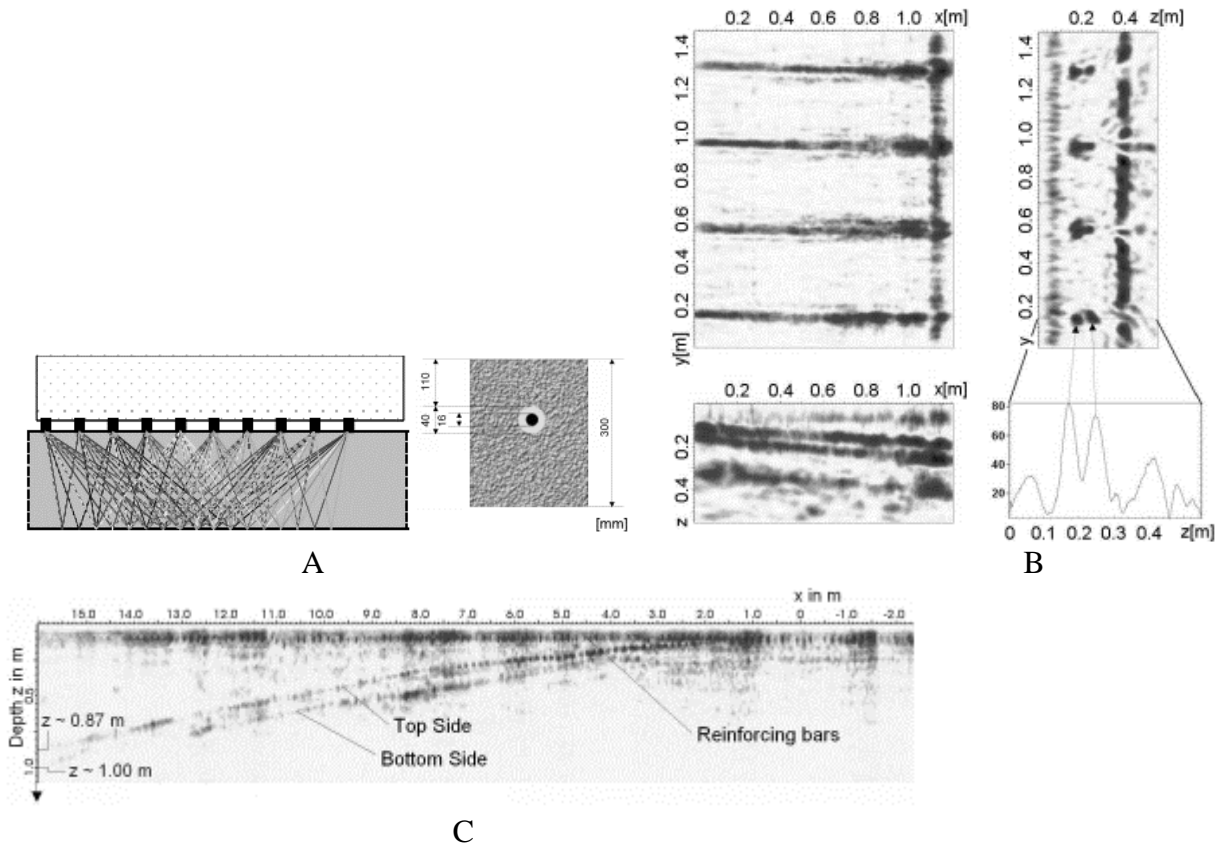
Mätsignalerna vid UPV kan påverkas av rådande fuktillstånd, temperatur, utformning på provkropp och armeringsinnehåll. Det är av yttersta vikt att försöken genomförs och analyseras av en expert som är väl bekant med tekniken.



Figur 3. Ultraljudspulshastighets mätning i betong (UPV-Ultrasonic Pulse Velocity), PCTS (2016).

Bearbetningen av signalerna kan göras på sådant sätt att en visualisering av betongtvärsnittet erhålls. Detta kan exempelvis göras genom EFIT modellering (Elastodynamic Finite Integration Technique). Genom att visualisera fås en bättre förståelse av resultaten vilket kan ske genom att detektera armeringsutformning, håligheter, kvalitetskontroll av injektering i spännarmering, Krause et al. (2011). Figur 4 visar en uppställning av sändare och mottagare för att visualisera armeringsinnehåll och spännkablar i en järnvägsbro.

Det är numera även möjligt att tillämpa UPV på konstruktioner där endast sida är tillgänglig för mätning, PROCEQ (2017). Metoden har framgångsrikt tillämpats vid tillståndsbedömning av pelare i spillvattenvägar i dammkonstruktioner i kombination med borrhärdor, Saint Pierre et al. (2016). Standardisering av metoden återfinns i ASTM C597-16 (2016).



Figur 4. Visualisering av signaler från ultraljudsmätning, (A) kvalitetssäkring av injikerad spännkabel, (B) spännarmerad balk från en tågbro (B) och (C) en vägbro (C), Krause et al. (2011).



Figur 5. Tillämpning av UPV, Pundit 250 Array instrument, PROCEQ (2017).

3.1.3 Slag-eko (impact echo, IE)

De vanligaste slag-eko utrustningarna, impact echo (IE), består av en mindre stålsfär som slås mot ytan, normalt 3-12 mm i diameter. Slaget mot ytan producerar lågfrekventa spänningsvågor (P-våg), som transporteras i betongen och reflekteras tillbaka till mottagaren från baksidan av elementet (pelare, vägg, balk etc.) eller från håligheter eller andra avvikelser/defekter, Azari et al. (2014), Chaudhary (2013). Dessa P-vågor reflekteras ett antal gånger och de reflekterade P-vågorna tas upp av mottagaren vid utan, normalt placerat relativt nära stålsfären. Gensvaret i tid-förskjutning konverteras till ett frekvensbaserat gensvar genom att tillämpa algoritmer baserade på snabb fouriertransformering (FFT-fast fourier transform).

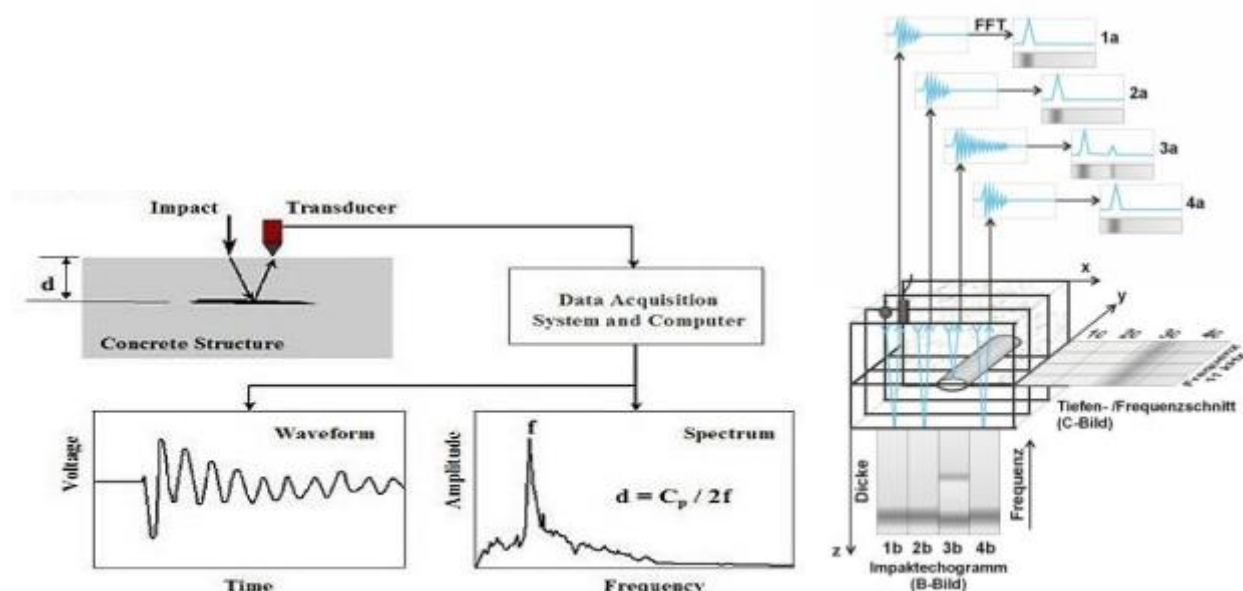
IE systemen mäter alltså tjockleken på betongen alternativt djupet till detekterad defekt. Tiden, Δt , det tar för den reflekterade P-vågen att nå mottagaren beror på P-vågens hastighet, C_p , och tjockleken på betongen, T . Tiden för den reflekterade P-vågen uttrycks av:

$$\Delta t = \frac{2T}{C_p}$$

Genom att tillämpa FFT algoritmen kan sedermera tjockleken, T , av betongen eller djupet till defekten avgöras mer effektivt baserat på förskjutningsfrekvensen, f , enligt:

$$T = \frac{C_p}{2f}$$

Där T är tjockleken, antingen uppmätt på konstruktionen eller känd från ritningar. C_p är P-vågens hastighet, som kan fås från kalibrering uppmätt från konstruktionen där tjockleken är känd eller genom kalibrering direkt på ytan genom att använda två mottagare med ett känt avstånd mellan sig (i detta fall mäts Rayleigh vågorna på ytan). Principen för IE är beskriven i Figur 6.



Figur 6. Slag-eko, signalbandling, PCTE (2016), Friese et al. (2009).

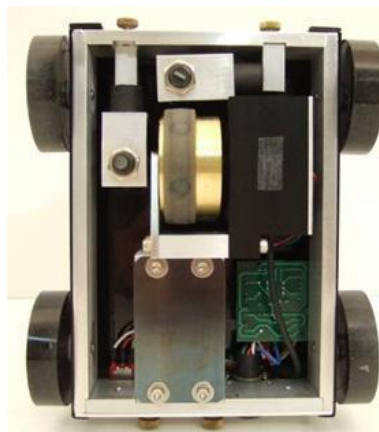
Det vanligaste IE utrustningen består av en cylindrisk handhållen mottagare, hammare med olika mått på det sfäriska huvudet, en bärbar dator, en höghastighets analog-till-digital mätuppsamlare, mjukvara och monitor för att visa resultaten (numerisk eller grafiskt), se Figur 7



Figur 7. Typisk slag-eko provutrustning, impact echo test system, Impact-Echo (2016)

Det finns en hel del olika kommersiellt tillgängliga utrustningar för att mäta IE, två exempel är IE-1 och IE-S från Olson Instruments. IE-1 är ett handhållet system som endast kräver en person vid försökstillfället. Utrustningen är handhållen och har inbyggd hammare och mottagare. Denna kan tillämpas på betong med tjock upp till 400 mm. Bättre noggrannhet kan fås genom att tillämpa en sekundär extern hammare samt för tjocklekar överstigande 400 mm, se Figur 8. För större ytor som ska skannas med IE kan systemet IE-S användas. Detta system kombinerar en mottagare och ett hjul vid mät huvudet. Genom att rulla utrustningen mäts IE var 25 mm.

IE-1

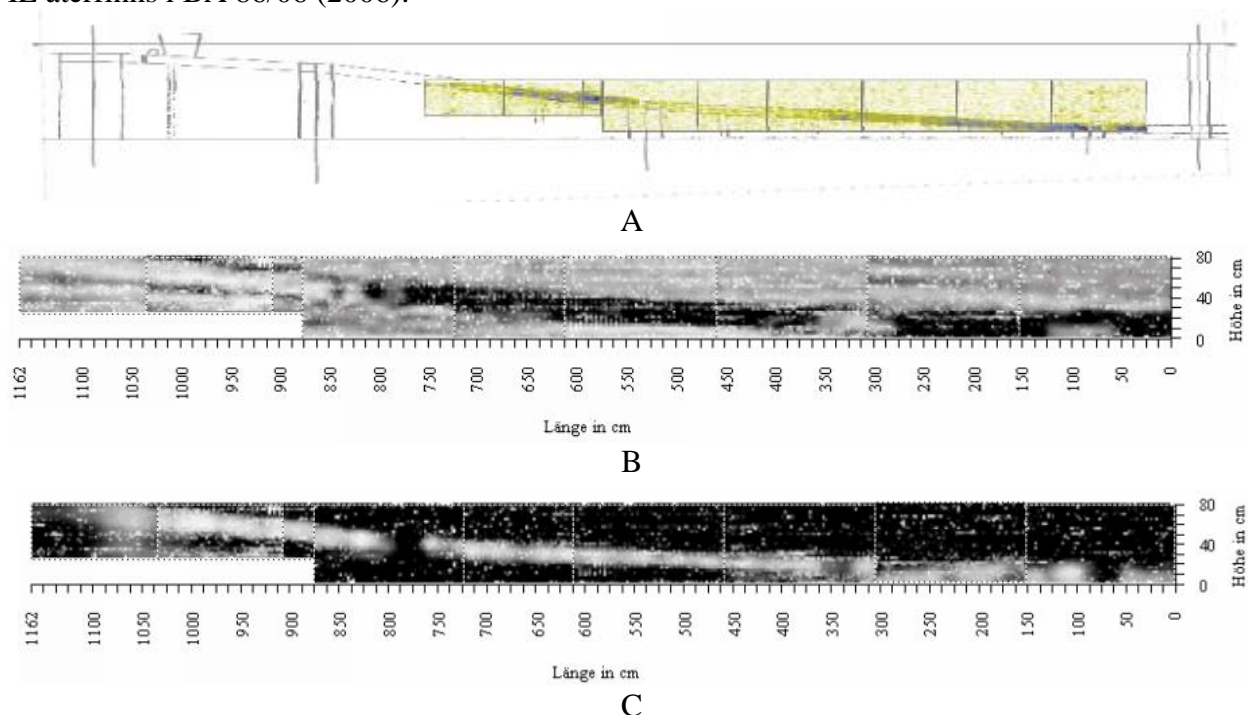


IE-S

Figur 8. Handhållna IE system för mätning av betong. T.v. IE-1 för mätning av enskilda punkter. T.h. IE-S, rullande utrustning för mätning av större ytor, Olson-Instruments (2016)

Mät noggrannheten i IE är inte helt etablerad utan beror till stor del på underlaget samt hur FFT algoritmen fungerar och osäkerheten i hur P-vågornas hastighet, C_p , uppskattas. Desto större tjocklek som uppmäts, desto lägre mät noggrannhet. Ett standardiserat förfaringsätt för både ultraljudsmätning samt IE provning av otillräcklig tjocklek i tunnlar finns angiven i tyska handboken RI-ZFP-TU (2007). Tjocklekar som kan mätas med IE omfattar 10 cm till ca 100 cm speciellt för kraftigt armerade konstruktioner. Vid detektering av delamineringar fås ingen information om djupet om delamineringen ligger grundare än 10 cm. IE är även mer begränsad vid visualisering av den inre strukturen jämfört med ultraljudsmätning. Visualisering av IE mätning av IE direkt reflektion av injekteringsrör för spännkablar samt IE reflektion mot baksida

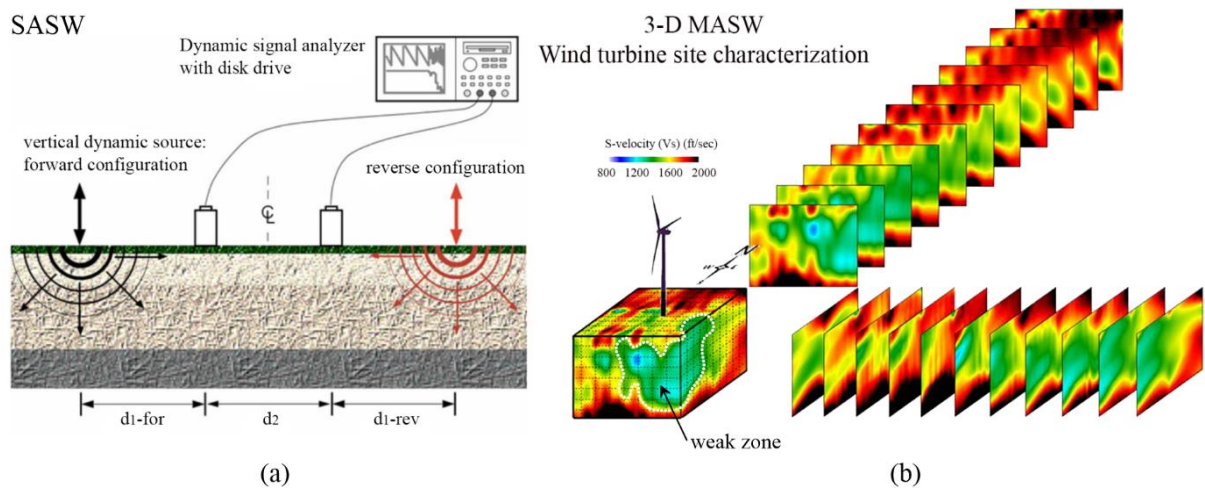
är redovisad i samt jämförd mot ultraljudsmätning.Handledning i tillämpningen av mätning med IE återfinns i BA 86/06 (2006).



Figur 9. Ultraljud och IE mätning av spännarmerad bro i Köln, Tyskland. A. Ultraljudsmätning, direkt reflektion. B. IE direkt reflektion, injekteringsrör inte synlig längd hela brobalken, C. IE reflektion mot baksida i svart med reducerad intensitet.

3.1.4 Aktiv ytvågsmätning

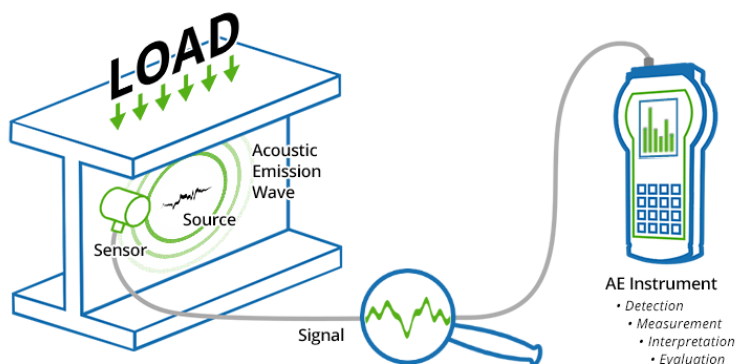
Tekniken för att aktivt mäta ytvågor utförs genom att ytvågor skapas med hjälp av dynamiska källor, Kim et al. (2006), se även IE i föregående kapitel. Dessa teknologier omfattar SASW (Spectral Analysis of Surface Waves) och MASW (Multi channel Array Surface Waves). SASW-metoden används för att indirekt bestämma skjuv- och elasticitetsmodul i jord och berg genom att analysera profilerna för skjuvstångshastigheterna. Dessa vågor skapas genom en hammare och resultaten mäts av två sensorer (accelerometrar). Principen för detta visas schematiskt i Figur 10a. MASW-metoden är en utveckling av SASW-metoden och tillämpar också utvärdering av fördelningen av skjuvstångshastigheten i jord och berg, t.ex. genom att kartlägga geologin under ytan. Den här typen av teknologier kan undersöka berggrunder ned till ett djup om 30 m. Standarder för SASW och MASW är beskrivna i D6758-08 (2008) och ACI 228.28R-98 (1998). SASW-metoden har även tillämpats på betongkonstruktioner för att upptäcka djupet på defekter, Chang et al. (2016).



Figur 10. Aktiv ytvågsmätning, a) SASW-metoden, GEOVision (2017), b) MASW för analys av bergegenskaper under ett vindkraftverk, Park Seismic LLC (2017).

3.1.5 Akustisk emission

Metoder som tillämpar akustiska emission (AE) används, i likhet med tidigare nämnda teknologier, för att detektera en förändring i konstruktionen. Exempel på den här typen av förändringar är sprickor som kan detekteras i samband med att konstruktionen blir utsatt för yttre påverkningar, t.ex. belastning och temperatur. Metoden kräver att flertalet AE-sensorer appliceras på konstruktionens yta för att mäta små förskjutningar i storleksordningen pikometer (10^{-9} mm). Till skillnad från andra NDT metoder analyserar AE energin som avges i konstruktionen samband med en irreversibel förändring istället för att inducera energi till konstruktionen under själva undersökningen. Av den här anledningen anses AE vara en passiv metod och klassificeras därför mer som en mätmetod än en försöksmetod, Kaiser & Karbhari (2004). En av nackdelarna med denna metod är att den inte har standardiserats och blir därför beroende på kunskapen hos utföraren, den största tillämpningen sker mestadels under laboratorieförhållanden, Kashif et al. (2016).



Figur 11. Principen för akustisk emission, Physical Acoustics (2017).

3.2 Elektromagnetiska metoder

Elektromagnetiska NDT metoder innebär att materialegenskaper mäts indirekt via ett elektriskt gensvar. Interaktionen mellan elektricitet och magnetism bildar basen för flertalet olika NDT metoder, magnetiska partikelundersökningar, magnetiskt flöde (magnetic flux), virvelström (eddy current), markradar, täcksjiktetsmätning, halvcell potentialmätning, elektrisk resistivitet och linjär polarisering. De här metoderna och dess potential för att tillämpas vid NDT är summerade i detta kapitel.

3.2.1 Radar

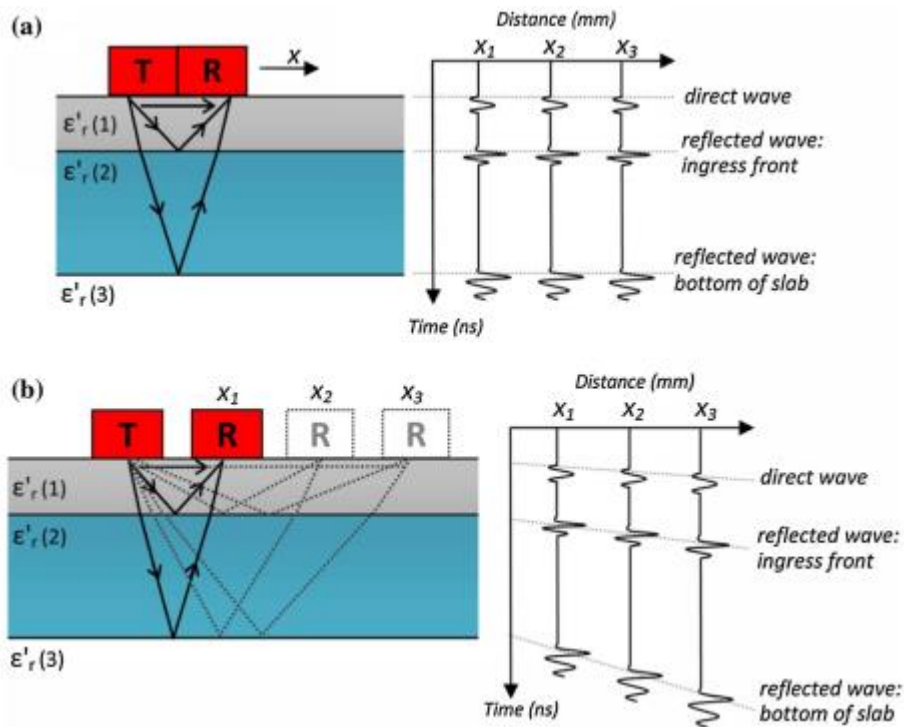
Radar tillämpas på konstruktioner som icke förstörande provning när antingen material eller byggnadsdelar behöver undersökas. Områden där radar är synnerligen lämpligt är vid tillståndsbedömning, kvalitetskontroll och skadedetektering. De tillämpningsområdena som finns kan förenklat fördelas enligt följande:

Konstruktionsdelar:	Material:
<ul style="list-style-type: none">○ Detektering av armering i betong○ Mätning av tjocklek på beläggning○ Kontroll av funktion○ Detektering av håligheter i kärnkraftsanläggningar	<ul style="list-style-type: none">○ Fuktkontroll i murverk○ Brister vid gjutning av betong så som dålig kompaktering och håligheter○ Brister i ballasterade järnvägsspår

Tillämpningen av radar på konstruktionsdelar och material karaktäriseras av att metoderna inte har direkt kontakt med studerat objekt, de är snabba, innehar möjlighet till visualisering och är kompatibla med miljön, Dérobert et al. (2009). De olika namnen på radar kan vara markradar (GPR-Ground Penetrating Radar), Impulsradar (Impulse Radar), Ultra Wide Band radio (UWB Radar), Georadar etc.

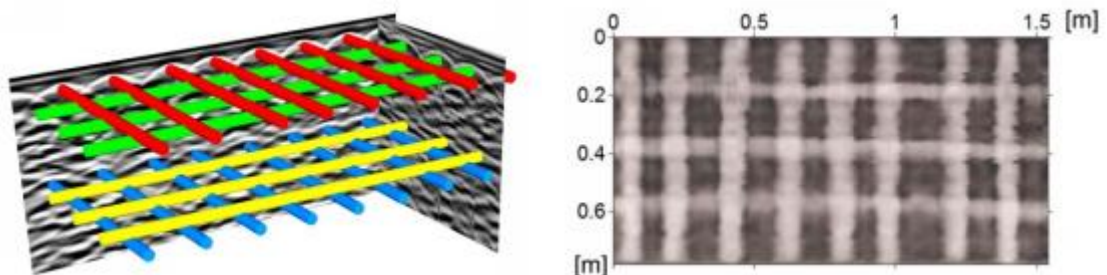
Den mest tillämpade radartekniken vid tillståndsbedömning av betong och beläggningar är markradar (GPR). Eftersom att sändare och mottagare är i samma antennenhet kan skanning av betongen ske från en sida av ytan, vilket är en fördel om tillträde till baksidan på undersökt element saknas. GPR använder radiovågor och är därför säker, snabb och med en portabel monitor kan realtidsvisualiseringar fås. GPR är även mycket effektiva att detektera spännkablar, stålarmring och rörledningar, Hugenschmidt & Loser (2008).

GPR fungerar, i likhet med ultraljudsmätningar, på sådant sätt att elektromagnetiska vågor skickas genom undersökt medium och de mottagna/reflekterade signalerna analyseras med avseende på tidsförskjutning eller amplitud, Ihamouten et al. (2012), Laurens et al. (2002). En schematisk redovisning av GPR finns i Figur 12.



Figur 12. Principskiss över hur GPR fungerar, A. Traditionell installation där sändare och mottagare har samma/konstant avstånd till varandra, B. Wide Angle Reflection Refraction (WARR) där mottagaren flyttas i förhållande till sändaren, du Plooy et al. (2015).

GPR arbetar inom frekvensområdet 300 MHz – 3 GHz. Dock brukar högre frekvenser tillämpas på GPR i samband med undersökning av betong eftersom att upplösningen är högre och mindre avvikelser i ytan kan detekteras, t.ex. 1500 MHz eller högre. Å andra sidan får resultaten högre grad av brus vilket innebär att djupet på undersökt material blir lägre än för GPR med lägre frekvens, du Plooy (2015). En visualisering av resultaten från GRP finns redovisad i Figur 13



Figur 13. 3D respektive 2D visualisering från GPR detektering av glasfiberarmering, Lachowicz & Rucka (2015).

GRP fungerar väl som en icke förstörande mätmetod för att kontrollera armeringsinnehåll och i vissa fall även korrosion på befintlig armering, Hugenschmidt & Loser (2008), du Plooy (2015). Noggrannheten och syftet med undersökningen med GPR kan med fördel kompletteras med både ultraljudsmätning och elektrisk resistivitetmätning, Lai et al. (2013). Exempel på kommersiellt tillgängliga GRP utrustningar finns redovisade i Figur 14 - Figur 16.



Figur 14. Malå CX 12 GPR utrustning, *Malå-Malå* (2016).

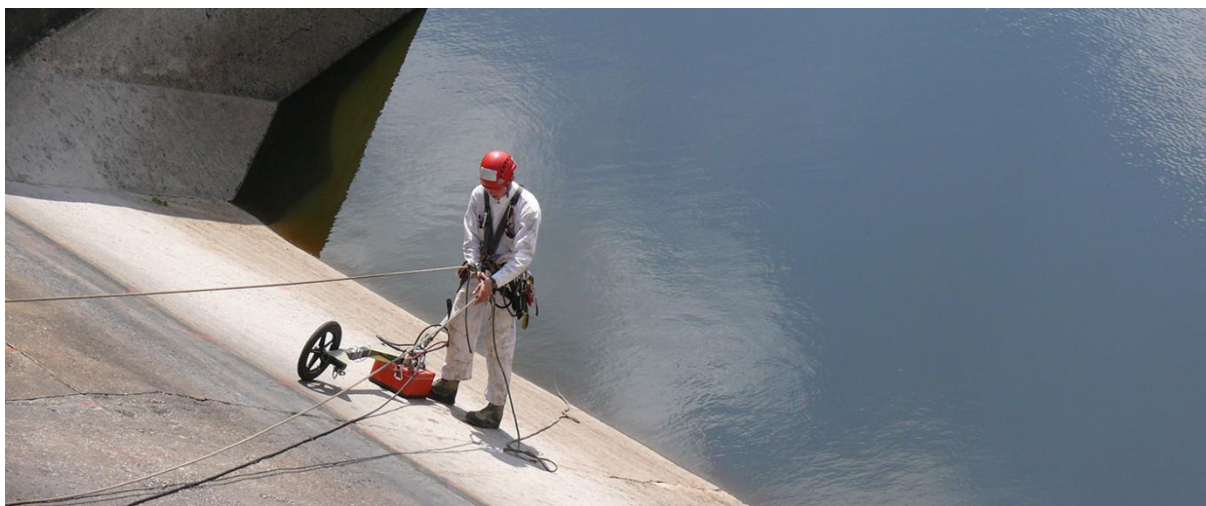


Figur 15. 2500 series mäter både 2D och 3D, *USRadar* (2016).



Figur 16. Hilti X-scan PS 1000, *Hilti* (2016)

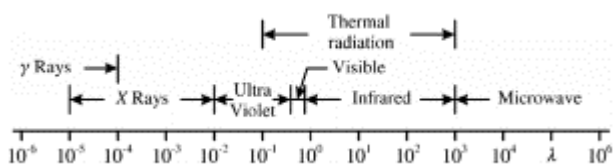
GPR är en vanlig metod som tillämpas flitigt i samband med tillståndsbedömning av infrastruktur, tillämpningen i samband med broinspektioner finns utförligt beskrivet i Hugenschmidt & Mastrangelo (2006). Applikationer på dammar är inte lika vanligt förekommande, se Figur 17, endast ett fåtal referenser har återfunnits, Karastathis et al. (2002), Xu et al. (2010), Loperte et al. (2011). Metoder med GPR är inte standardiserade ännu men riktlinjer för sådana kan återfinns i ACI 228.2R-98 (1998).



Figur 17. GPR tillämpning i samband med NDT vid Occoquan-dammen i Fairfax, Vertical access (2017).

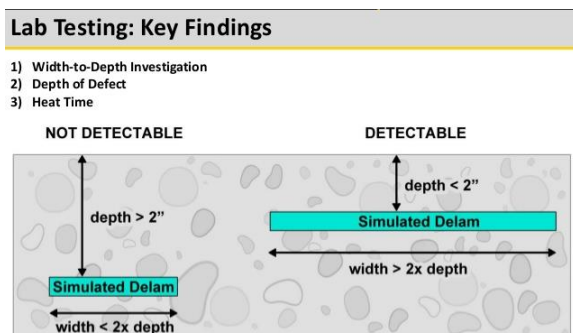
3.2.2 Termografi

Den gällande standarden för tillämpning av termografi omfattar en kvalitativ metod för lokalisering av termiska ojämnheter för byggnader. Denna standard, SS-EN13187, kontrollerar byggnadens klimatskärm med hjälp av som värmekamera som undersöker strålning i det infraröda spektrumet, $10^{12} - 4 \cdot 10^{14}$ Hz, våglängder mellan 1 mm – 800 nm, se Figur 18.



Figur 18. Elektromagnetiskt spektrum (våglängd i mikrometer), Cengel (2014).

Infraröd termografi (IRT-InfraRed Termography) är en icke berörande metod som grafiskt visar data. Med denna metod kan kvalitativa defekter, termiska ojämnheter, så som fukt, lufttäthet, sprickor etc. detekteras. Mätningen kan genomföras från avstånd och detektera förändringar i konstruktionen, t.ex. nedbrytning och delaminering, dock finns det begränsningar på djupet av de defekter som mäts. Billigare IRT utrustningar kan upptäcka avvikelser i betong upp mot ett djup av ca 5 cm och med ett förhållande på bredd/djup på defekter motsvarande > 2 , se Figur 19.



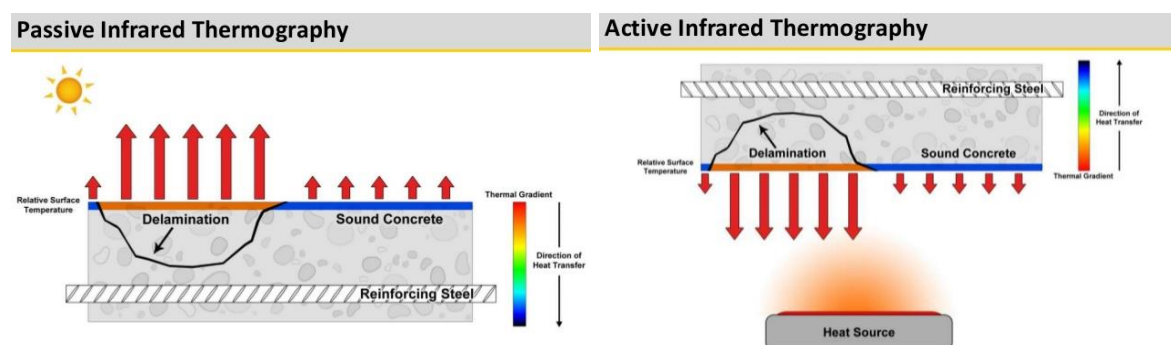
Figur 19. Detekterbarheten av defekter i betong, Calotti (2016).

Kvaliteten och omfattningen av undersökning beror på om IRT-tekniken tillämpas som passiv eller aktiv. Med passiv IRT menas att ingen extern/intern värmekälla tillämpas och med aktiv

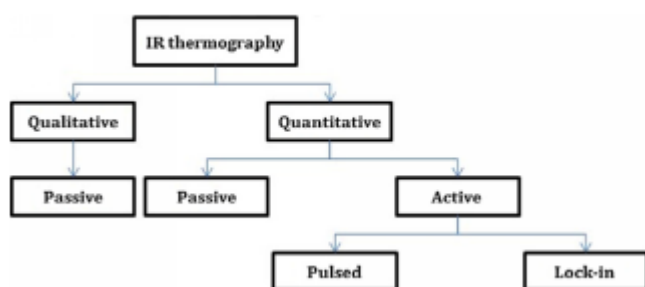
IRT menas att en aktiv värmekälla tillämpas på objektet, se Figur 20. Vid passiv IRT tillämpas alltså inget värmefflöde och inga kvantitativa slutsatser är möjliga då resultaten beror på omgivande förhållanden och exponering. För aktiv IRT tillämpas alltså ett känt värmefflöde och avgiven energi mäts av IRT utrustningen. Detta ställer krav på tiden som objektet exponeras av värmekällan, flexibiliteten ökar även jämfört mot passiv IRT samt att kvantitativa slutsatser är möjliga. Värmekällorna vid aktiv IRT kan bestå av t.ex. lampor, ugnar, värmepåsar etc. och delas in i pulserad termografi (PT) respektive fast termografi (LT – Locked in Thermography) beroende på varaktigheten av värmekällan, se Figur 21. Passiv IRT tillämpar alltså ingen förvärmning av objektet och har således begränsad applicering. Det finns ett antal olika typer av Aktiv IRT, nämligen:

- Pulsed thermography in time domain (PT-TD)
- Lock-in thermography (Frequency Domain – FD)
- Pulsed phase thermography (FD)
- Step heating thermography
- Square pulse thermography (TD / FD)

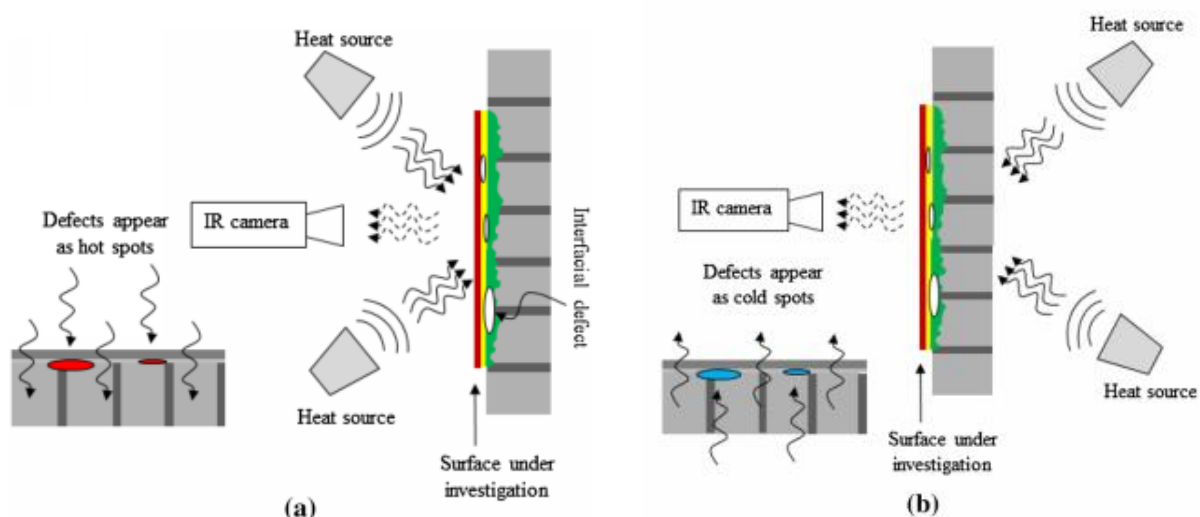
Olika värmeobservationsmetoder för aktiv IRT finns redovisade i Figur 22, vid reflektionsmetoden lokaliseras defekterna som värmezoner, vid transmissionsmetoden lokaliseras defekterna som avkylningszoner.



Figur 20. Passiv och aktiv IRT på betongkonstruktioner, Calotti (2016).



Figur 21. Olika IRT tekniker, Kylili et al. (2014).

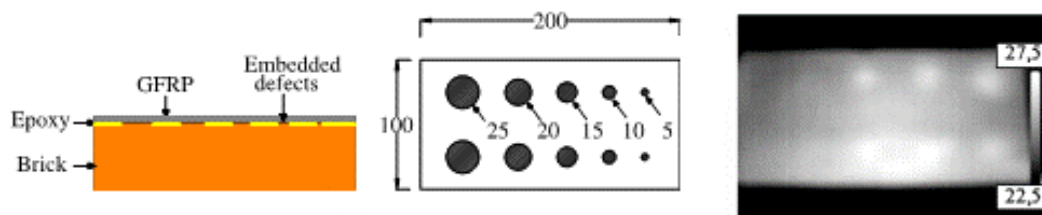


Figur 22. Olika värmeobservationsmetoder för IRT, a) reflektionsmetod, b) transmissionsmetod, Ghiassi et al. (2014).

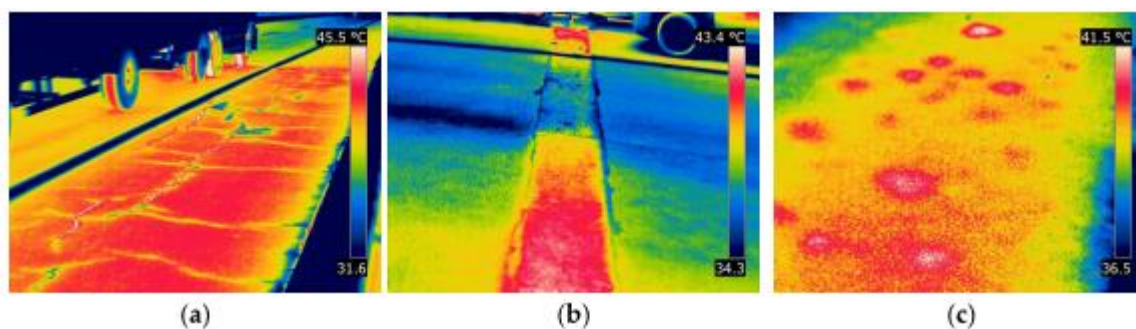
För aktiv IRT av betong finns ett antal områden där den här typen av mätning lämpar sig:

- Lokalisering av håligheter
- Upptäcka delaminering vid pågjutningar eller annan vidhäftning (t.ex. förstärkning med kolfiberlaminat eller -väv, tunnare pågjutningar etc.)
- Lokalisering av delaminering i samband med putsskikt mot betong/tegel eller bruksfogar i tegelkonstruktioner
- Upptäcka håligheter bakom kakel/klinker
- Lokalisera fuktkoncentrationer i närheten av ytan

IRT har tillämpats med goda resultat för att lokalisera inlagda defekter. Ghiassi et al. (2014) tillämpade tekniken för att lokalisera planterade defekter i vidhäftningszonen mellan tegel och glasfiberförstärkning, se Figur 23. Milovanovic et al. (2014) tillämpade IRT tekniken för att lokalisera defekter i pågjutningen/asfalteringen på brodäck, både sprickbildning och mindre brister i vidhäftningen kunde registreras, vilket syns tydligt i Figur 24. I Figur 24 är det endast möjligt att göra en kvalitativ bedömning av resultaten. För en kvantitativ bedömning av storlek och djup behövs information av värmeeffekten från solen, avgiven energi från underlaget, termiska egenskaper av undersökt material, optiska egenskaper hos utrustning, kameravinklar etc. Detta leder till den praktiska nackdelen att det är omöjligt att veta om defekterna ligger i asfaltlagret, brodäck eller i vidhäftningsytan mellan brodäck eller asfalt. Detta är således en klar nackdel när passiv IRT tillämpas. En mer omfattande studie på aktiv IRT kan fås i Milovanovic & Banjad Pecur (2016).

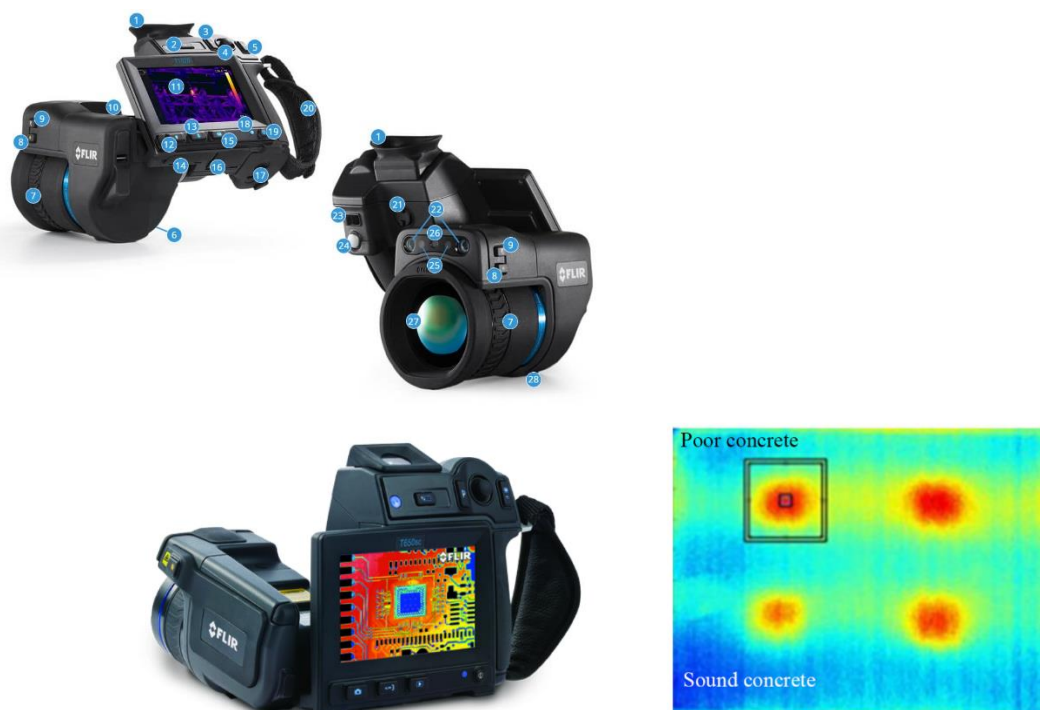


Figur 23. Tegel förstärkt med glasfiberkomposit och inlagda defekter, IRT visar defekterna som vita områden, Ghiassi et al. (2014).



Figur 24. Resultat från IRT i samband med lokalisering av defekter i brodäck vid Krapina bron i Kroatien, Milovanovic et al. (2014).

Kostnaden för en IRT-utrustning beror på kraven på upplösning, vilken typ av infraröd kamera som behövs, typ av uppvärmning, tid som krävs för att mäta samt hur stora insatser som krävs vid analysen av data. Enbart kostnaden för en någorlunda bra kamera i dagsläget startar vid ca 100 kSEK. Det finns ett flertal olika kommersiellt tillgängliga IR kameror, FLIR är en av de som tillverkar dessa kameror, se Figur 25. Utöver kamera behövs även mjukvara för utvärdering, värmekällor och i vissa fall även kompletterande givare för att mäta egenskaperna i undersökt material och strålning. Notera dock att djupet på avvikelserna inte kan uppskattas med IRT. För fall där djupet på avvikelserna behöver bedömas kan IRT teknologin användas tillsammans med GPR, Kashif et al. (2016). Vidare finns det inget standardiserat förfaringsätt för IRT.



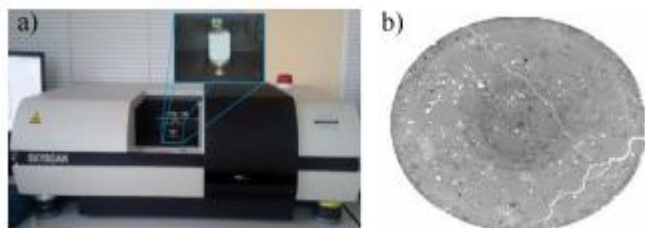
Figur 25. IR kamera med högupplösning. Övre bild T1020, FLIR (2016), undre bild T630sc, FLIR (2017).

3.2.3 Radiografi (röntgenologi)

Radiografi, eller röntgenologi, omfattar tillämpningen av gamma eller röntgen-strålning för att undersöka defekter i konstruktioner eller konstruktionsdelar. En röntgengenerator eller en isolerad radioisotopkälla används som strålningskälla. Strålningen riktas genom den del som ska undersökas och fångas sedan på en film eller annan mottagningsmedia. Den resulterande skugg-

grafen visar möjliga defekter genom att densiteten på undersökt område ändras, på samma sätt som ortopedisk röntgen i samband med benbrott. Alternativt kan även armering detekteras. Radiografins tillämpningsområde är dock starkt begränsad på grund av svårigheterna att placera mottagningsmedia, de vanligaste isotoperna (t.ex. Ir-192) kan bara penetrera ca 200 mm betong samt att strålningen kan anses hälsovådlig och måste isoleras från allmänheten, IAEA (2016).

Tekniken för fältförsök finns men är förknippad med negativa hälsoeffekter samt att bäst resultat fås i isolerad och kontrollerad laboratoriemiljö, se Figur 26. Av dessa anledningar anses denna teknik i dagsläget inte vara lämpad för kommersiell NDT.



Figur 26. Datorbaserad och isolerad processteknologi för röntgen mikrotomografi, a) utrustning, b) 2D projicering av skanningsresultat, Hola et al. (2015).

3.2.4 Elektrisk resistivitet (electrical resistivity)

Elektrisk resistivitet är ett materials egenskap att transportera elektrisk spänning. Vid provning av betong är detta en metod att bedöma mikrostrukturens beskaffenhet. Skillnaden i potential mellan pålagd spänning, av två elektroder, och vattenfasen i betongens porstruktur blir således ett indirekt mått på hur bra betongens porstruktur leder ström (jontransport). Archie (1942) visade att det var möjligt att formulera resistiviteten i ett poröst medium genom:

$$\rho = a\rho_0\phi^{-m}$$

Där ρ_0 är resistiviteten av betong med vattenhalt, a är en konstant som beror på sammansättningen av materialet, m representerar alla parametrar relaterade till porstrukturen av materialet. ϕ är en variabel för den mättade volymdelen av vatten, i helt vattenmättad betong blir denna den totala porositeten. Detta betyder således att ju mer vattenmättad betongen är desto lägre blir den elektriska resistiviteten.

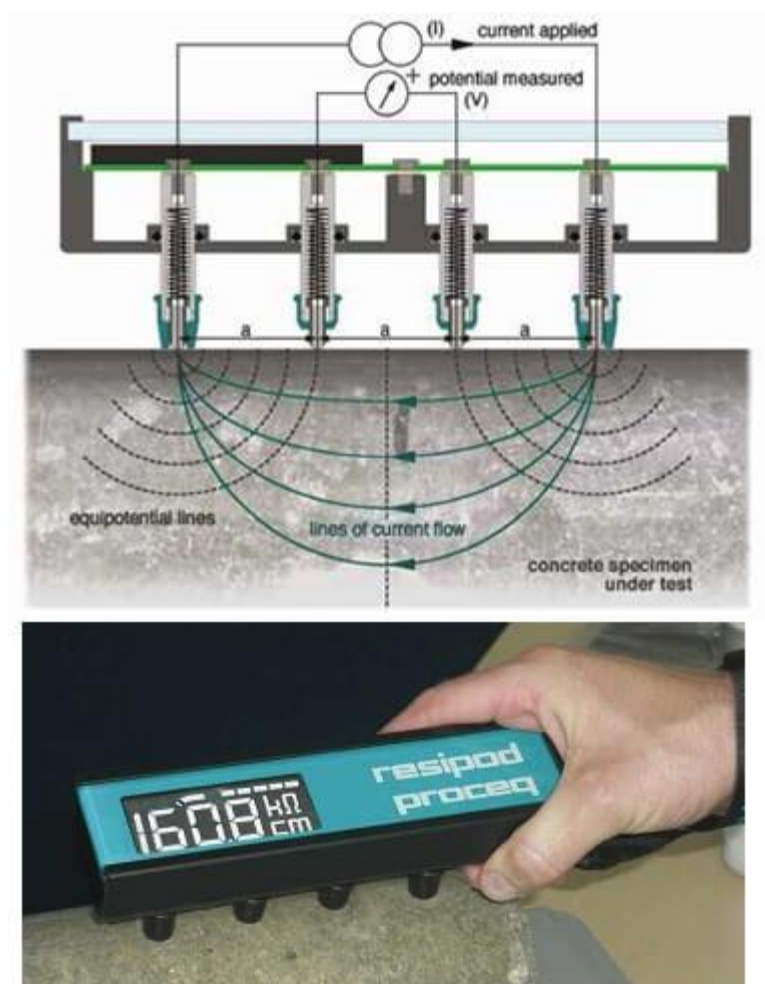
Den elektriska resistiviteten tillhandahåller alltså indikationer på hur pass bra porerna leder ström. Av denna anledning förväntas således en korrelation mellan betongens motstånd mot penetration av vätskor eller gaser (i synnerhet viktigt gällande armeringskorrosion). Resistiviteten blir därför ett mått på hur beständig befintlig armering är eller kommer vara.

Det finns alltså faktorer som påverkar betongens resistivitet däribland, betongens ålder, vattenmättnadsgrad och temperatur. Betongens resistivitet ökar med tiden (t) eftersom att porstrukturen förändras/förfinas med tiden. När cementen hydraterar sänks porositeten i betongen vilket påverkar de mekaniska egenskaperna och resistiviteten. Uttrycken för hur dessa beräknas ligger utanför omfattningen av denna rapport (här avses specifika beräkningar av resistivitet och diffusion) men borde vara sådana att dessa beaktas vid uppskattningen av resistivitet för betong vid olika åldrar, olika beräkningar kan behövas för standardportlandcement och för blandcement, Adrade (2005). För vattenmättnadsgraden i porösa strukturer/nätverk varierar ρ beroende på mättnadsgraden. I semi-mättade tillstånd leds jonerna via det lager av vatten som adsorberats på porväggarna, Shulte et al. (1978). Temperaturen har en viktig effekt

när det gäller påverkan av resistiviteten. En något förenklad förklaring, om ρ -värdena standardiseras till en referenstemperatur, vanligtvis 25° (Andrade et al. (2000); Castellote et al. (2002)), borde en temperaturökning medföra en ökning av diffusionen, D , och därmed även korrosionshastigheten, V_{corr} . Men, denna temperaturökning kan samtidigt skapa en ökning i förångning av vatten, vilket i sin tur skulle leda till en sänkning av både D och V_{corr} . Av denna anledning är sällan temperatureffekterna medtagna i modellerna för beräkning betongens beständighet i samband med korrosion.

Tillämpningen av mättekniken av betongens resistivitet blir allt mer vanlig, i synnerhet när det kommer till tillståndsbedömningar av beständigheten, Nadelman & Kurtis (2014), Claisse (2014). Dock är det inte vanligt förekommande att den här typen av tekniker standardiseras, vilket ställer höga krav på de individer som analyserar resultaten. Den enda metoden som hittills standardiseras är mätningen av den elektriska resistiviteten på ytan, se AASHTO TP 95 (2014), ASTM C1760 (2012).

En typisk utrustning för mätning av resistivitet finns redovisad i Figur 27.



Figur 27. Apparatur för undersökning av resistivitet i betong, ACX (2016)

3.2.5 Täcksjiktsmätare

Dessa teknologier är utformade för att mäta betongtäcksjiktets tjocklek samt förekomsten av metallisk armering dess diameter samt avstånd mellan armeringsstänger. De vanligaste metoderna omfattar täcksjiktsmätare, i de flesta fall, baserade på puls-induktions metoden. Denna metod lämpar sig bäst för att detektera armering som ligger nära ytan samt betongtjocklekar upp till 50 mm. Relativt noggranna resultat kan fås i realtid vid in-situ provning genom flertalet olika digitala täcksjiktsmätare. Figur 28 visar en digital utrustning från PROSEQ som baseras på virvelström-puls-induktionsprincipen (eddy current) och kan mäta täcksjikt upp till 185 mm och armeringsdiameter upp till 63 mm. Just denna utrustning kan även uppgraderas till att göra korrosionsanalyser. Rekommendationer för tillämpningen av elektromagnetiska täcksjiktsmätare återfinns i BS 1881-204:1988 (1989).



Figur 28. Täcksjikt och armeringsdetektering av digital täcksjiktsmätare Profometer 650 AI, PROCEQ (2017).

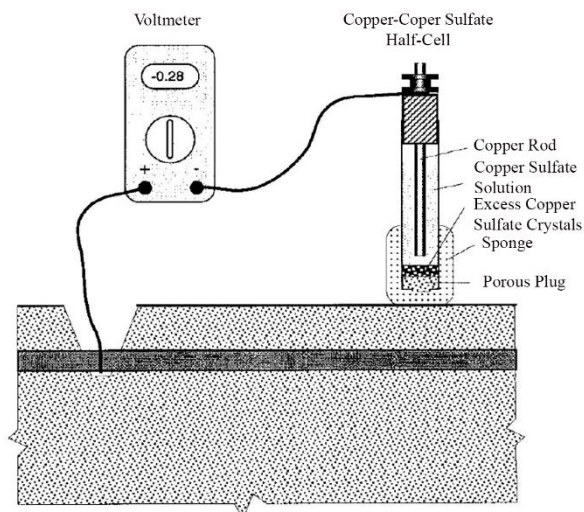
3.2.6 Potentialmätning

Korrosionsaktiviteten hos stålarmring i betong kan tillståndsbedömmas genom halvcell potentialmätning. Detta är en elektrisk teknologi som består av en koppar-till-koppar sulfathalvcell, kopplingstrådar och en högimpedansvoltmätare, ACI 228.2R-98 (1998). Om armeringen korroderar kommer elektronerna att flyttas från armeringen till halvcellen. Denna metod indikerar bara om det, sannolikt, förekommer korrosionsaktiviteter vid provningstillfället och indikerar därför inte korrosionshastigheten. Metoden kräver även direktkontakt med armeringen, se Figur 29. Figur 30a visar en typisk översiktskarta över sannolikheten för att ett brodäck har pågående armeringskorrosion genom att använda halvcell potentialmätning. Områden där det råder olika sannolikheter att armeringskorrosion förekommer anges i en färgskala. En lätt och portabel utrustning finns tillgänglig på marknaden genom att uppgradera Profometer 650 AI, se Figur 28, till Profometer Corrosion, PROCEQ (2017). En standardiserad testmetod finns beskriven i ASTM C 876-15 (2015).

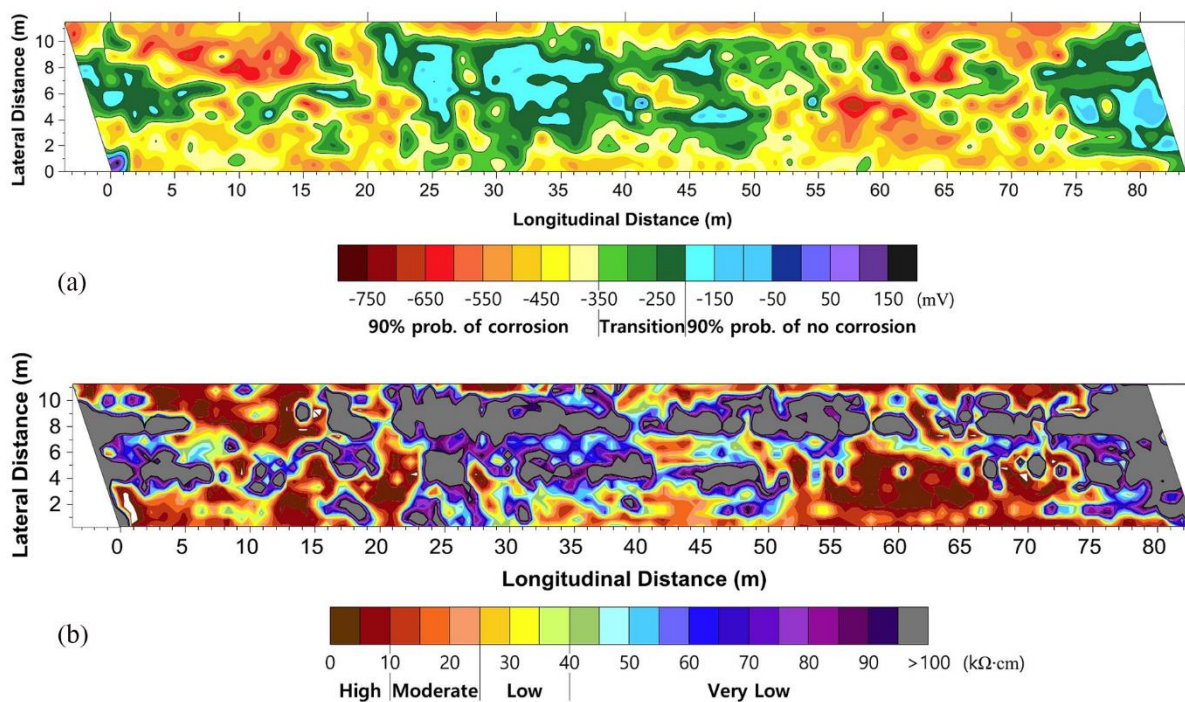
Om korrosionshastigheten erfordras kan ovanstående teknologi kompletteras med elektrisk-resistivitetsmetod eller linjär-polariseringsmetod. Ingen av dessa metoder är enkla och för att få tillförlitliga resultat rekommenderas att båda metoderna tillämpas tillsammans med halvcell potentialmetoden, IAEA (2002). Dinh et al. (2016) visade att nedbrytningsområden som påvisats

av elektrisk resistivitetsmätning korrelerar väl med resultaten från halvcell potentialmätning. Denna överensstämmelse kan ses i Figur 30. Begränsningar hos dessa metoder inkluderar; betongtäckskikt skall vara mindre än 100 mm, armeringsstänger (metall) ska inte vara epoxibelagda eller katodiskt skyddade samt att samtliga metoder kräver kontakt med befintlig armering, ACI 228.2R-98 (1998).

Det förekommer inga standardiserade förfaringssätt för att analysera och tolka armeringskorrosionshastigheten, dock förekommer en del riktlinjer i ACI 228.2R-98 (1998) för tillämpningen av linjär polarisering.



Figur 29. Utrustning för halvcell potentialmätning, ACI 228.2R-98 (1998).



Figur 30. Karta från tillståndsbedömning av ett brodäck för a) sannolikhet för korrosionsaktivitet genom tillämpningen av halvcell potentialmätning och b) korrosionshastigheter uppmätta genom elektrisk resistivitet, Dinh et al. (2016).

3.3 Optiska metoder

Optiska metoder för icke berörande tillståndsbedömning är ett relativt stort område där mycket forskning pågår för närvarande, för Europa se Shift2Rail (2017). NDT i samband med optiska metoder omfattar mer avancerade okulära visualieringsmöjligheter där digitala bilder av ett objekt analyseras med mer eller mindre avancerade algoritmer. Resultaten är till stor del beroende på precision, ytan på objektet som ska undersökas, upplösning och känslighet hos kamera- och kringutrustning.

3.3.1 Infraröd termografi

Denna teknologi är i denna rapport kategoriserad under elektromagnetiska metoder, se kapitel 3.2.2.

3.3.2 Fotometrisk mätning (digital bildkorrelering)

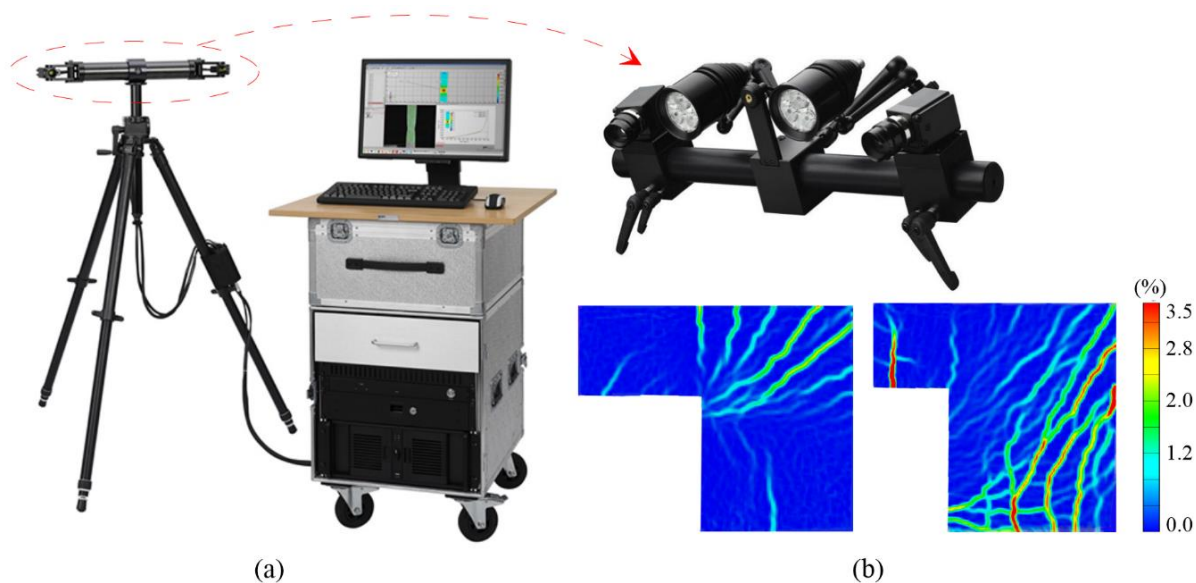
Fotometrisk mätning är en, i de flesta fall, icke berörande NDT som tillämpas genom att man får information om en konstruktions tillstånd utan att störa den normala driften. Information som kan inhämtas kan relateras till geometri, förskjutningar och deformationer. Denna data hämtas genom att använda tre huvudsakliga komponenter; fotometrisk utrustning (t.ex. digitalkamera/or), bildanalysalgoritmer/program och möjliggörare/kringutrustning (t.ex. lampor, blixtrar, stativ, robotar etc.). En serie bilder tas med hjälp av digitalkameror och koordinater för punkter, mönster och andra egenskaper i bilderna identifieras genom olika typer av bildprocesstekniker, Baqersad et al. (2017). En kamera används när 2D-analyser (i planet) erfordras och två, synkroniserade, kameror används när resultaten för både i- och ut ur-planet (3D) behöver analyseras. Beroende på typen av optiska målbilder kan fotometrin kategoriseras i följande; följa en punkt (point tracking, PT), digital bildkorrelering (digital image correlation, DIC) och mållös mätning (targetless), Baqersad et al. (2017).

En serie av optiska mål, t.ex. reflekterande cirkulära punkter, monteras på utvalda ställen på konstruktionen/objektet. Förskjutningarna av dessa bestäms sedan genom att spåra deras rörelser i olika tidssteg (flertalet foton tas), sedan jämförs dessa mot ett referensfoto. I kontrast till PT, där förskjutningarna endast redovisas för en handfull punkter, finns DIC som är mäter större områden hos objektet. För att kunna tillämpa DIC behöver ytan på det uppmätta området behandlas innan mätningen genomförs. Denna behandling omfattar en s.k. speckle-yta med hög kontrast, helst av stokastisk natur (vanligtvis svart och vit). Mätningen startar med att foton tas av det inspekterade området i ett initialt icke deformerat tillstånd (referens) och allt eftersom objektet deformerar tas foton kontinuerligt. På detta sätt fås en mängd data från deformationsmätningar (t.ex. töjningar, nedböjningar och förskjutningar). Denna data analyseras sedan genom att mjukvaran delar in respektive foto i flertalet mindre områden (s.k. facets, subbilder) och dessa analyseras mot referensvärdena och på detta sätt kan deformationer erhållas (t.ex. som töjningsdata eller töjningsfält). Vid mållös mätning behandlas objektet inte med någon form av mål eller stokastisk kontrastyta, denna metod har sämre noggrannhet men har sina fördelar när det inte finns möjligheter att skapa mål eller mönster, t.ex. om större objekt eller ytor ska mätas. De vanligaste mjukvarutillämpningarna omfattar skadedetektering genom att analysera kanter eller att jämföra olika mönster, Baqersad et al. (2017).

Det finns flertalet tillgängliga DIC system på marknaden, ett sådant är ARAMIS från GOM GmbH, se Figur 31. Denna klarar av både mätning av större områden (DIC) samt följa målpunkter (PT). De här typerna av analyser klarar ARAMIS av i både 2D och 3D då denna har två kameror. Noggrannheten på det avsedda mätområdet sträcker sig från millimetrar till flertalet meter, beroende på den optik och de kalibreringsverktyg som används.

Vid Luleå Tekniska Universitet har det här systemet används för att mäta sprickmönster, sprickvidder, förskjutningar och töjningar. Detta har genomförts för betongväggar under excentrisk last, Popescu (2017), vidhäftningsegenskaper mellan pågjuten FRCM (fibre-reinforced cementitious composites) mot betong, Sabau et al. (2017), balkar utsatta för utmattningslast, Mahal et al. (2015).

I likhet med AE, är inte fotometrisk mätning ett NDT-verktyg i traditionell mening, den bör mer ses som en mätmetod. Det finns stor potential inom tillämpandet av DIC som empirisk data för att korrelera mot finita element modeller, Helfrick et al. (2011).



Figur 31. 3D DIC system, a) ARAMIS mätutrustning, GOM GmbH, b) analyserade resultat i form av huvudtöjningar på en betongvägg, Popescu (2017).

3.3.3 3D laserskanning

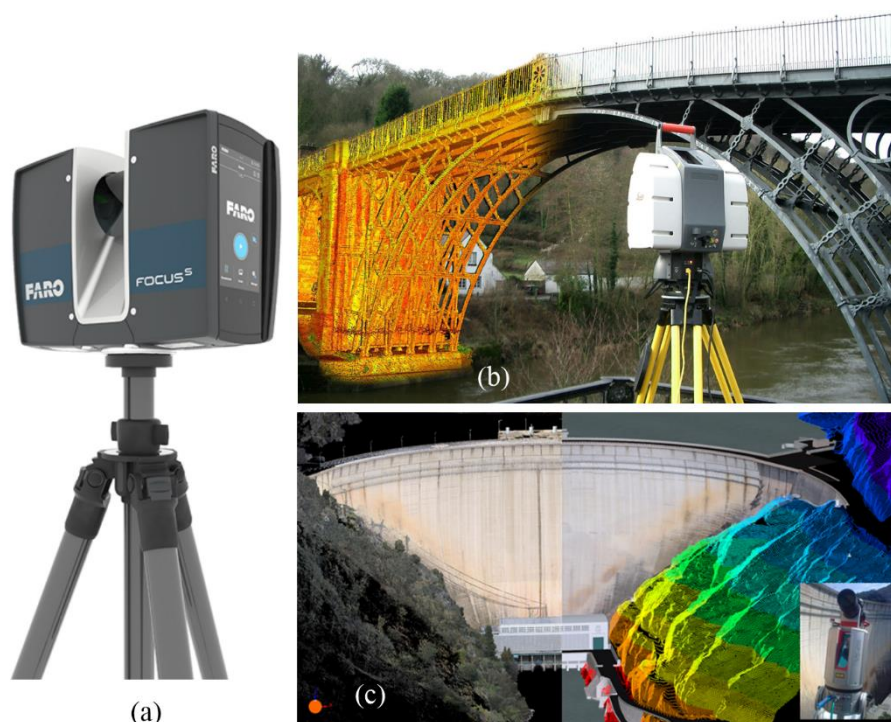
Denna teknologi skulle eventuellt kunna vara indelad som en spektroskopisk metod men är i den här rapporten kategoriserad som en optisk metod.

Den metod som beskrivs här är mest känd som LiDAR (light detection and ranging), det är en teknik som förvärvar tredimensionell digital data innehållande XYZ-koordinater från varje detalj som mäts på ett objekt. Tekniken används för att digitalt återskapa de faktiska dimensionerna efter att konstruktionen byggts. Den här typen av information är oftast något som faktiskt behövs vid tillståndsbedömning, omvänd teknik och bakåträkning. Lasersystemet fungerar på sådant sätt att den avger ljus och mäter hur detta reflekteras för att sedan bestämma avståndet till den reflekterande ytan. Enligt Feng (2012) finns det tre olika system för skanning beroende på mätintervallen (från några fåtal millimeter till 10 och 100-tals meter):

- Luftburet lasersystem
- Markburet lasersystem
- Mikrolaserskanning

Den första avser skanning av väldigt stora områden som t.ex. områden med hög population, industriområden etc. medan den sistnämnda mer avser skanning av små objekt. Det system som bäst lämpar sig för att mäta de geometriska förutsättningarna, med hög noggrannhet, hos broar och dammar är de markburna laserskanningssystemen. Ett exempel på markburet 3D laserskanningssystem är redovisat i Figur 32a. Detta system har visat goda resultat för att mäta

de geometriska förutsättningarna av en stålbro och en betongdamm, Figur 32b-c. Den här typen av laserskanningssystem har också tillämpats med goda resultat på tillståndsbedömning av gamla, komplexa, byggnader som t.ex. St Pauls katedral i London, Thirteen (2017). Den här typen av mätsystem är dock relativt kostsamma, enbart lasern i Figur 32a kostar 500 000 SEK, den här typen av system kostar från 400 000 -3 000 000 SEK. Ett alternativ är att tillämpa fotometrisk mätning som är billigare men med sämre noggrannhet. Sådan mätning är beroende på avståndet till objektet samt upplösningen på kameran. För en nio våningsbyggnad hade mätresultaten en standardavvikelse på omkring 50 mm i jämförelse med mer noggrann mätning, t.ex. laserskanning, Sužiedelyte-Visockiene and Bručas (2009).



Figur 32. 3D markburen laserskannerutrustning, a) FARO Focus S350, FARO Technologies (2017), b) 3D skanning av en stålbro, Mulla (2016) och c) 3D skanning av en betongdamm med omgivande berg, Artescan (2017).

3.4 Probelastning

Probelastning är en mer eller mindre avancerad metod för att verifiera bärförmåga och deformationsbeteende för en befintlig konstruktion. Objektet som ska undersökas lastas således upp till fördefinierade nivåer. Dessa nivåer bör ligga inom bruksgränsintervallerna för att provmetoden ska anses som NDT, dvs. fortsätta sin livscykel med samma funktion som innan provbelastningen. För nybyggda konstruktioner kan provbelastning också utgöra ett verifikat att antagna dimensioneringsförutsättningar föreligger samt att kontrollera att produktionen av konstruktionen är genomförd enligt förutsättningarna, Kashif et al. (2016). Det bör dock noteras att de fördefinierade lastnivåerna bör väljas noggrant eftersom att eventuella skador eller plastiska deformationer kan bli en konsekvens av för högt valda lastnivåer. Beroende på valda lastnivåer kan även provbelastning komma att ske som kvasi-NDT. Ett exempel på när denna metod varit lyckosam är på befintliga broar där lastnivåerna valts och utvärderats baserat på tillförlitlighetsanalyser med stor variation på storskaliga konstruktioner, Casas & Gomez (2013). Probelastning för kontroll av deformationsbeteende och

förspänningskraft i befintlig förspänd betongbro har även utförts i Bagge (2017) samt för en stålfackverksbro i Häggström (2016).

Ett sätt att kontrollera och mäta konstruktionen i realtid är att tillämpa akustisk emission (AE, se kapitel 3.1.5), Olaszek et al. (2010). Ytterligare teknologier som kan tillämpas i realtid är fotometriska metoder (se kapitel 3.3.2) under själva belastningen, detta har tillämpats vid provbelastningar i Danmark, utförda av Danmarks Tekniska Universitet tillsammans med COWI och vägverket hösten 2016. Dock fanns inga publicerade referenser på detta omfattande försök tillgängliga vid skrivandet av denna rapport.

Det finns en del etablerade processer för genomförandet av provbelastning av konstruktioner, se DafStb (2000) och ACI 437.2M-13 (2014). Det Europeiska projektteamet inom CEN TC250/WG2.T1 behandlar tillståndsbedömning, reparation och uppgradering av befintliga konstruktioner vilket kommer att ingå i den reviderade upplagan av Eurokod 2 (SS-EN1992-1-1).

4 Slutsatser samt val av NDT beroende på uppdrag

Den information som hittills presenterats i denna rapport belyser de generella principerna för flertalet olika NDT-teknologier. Denna rapport beskriver användbarheten för just dessa teknologier i samband med tillståndsbedömning av konstruktioner (främst av materialet betong), vidare beskrivs även flertalet, på marknaden, tillgängliga utrustningar och standarder. En kortare sammanfattning av de olika metoderna är redovisade i Tabell 3.

Det bör dock noteras att tillståndsbedömning av befintliga konstruktioner i många fall blir relativt komplex. Flertalet faktorer ligger bakom nedbrytningen samt utformningen av den slutliga konstruktionen och dessa behöver undersökas och kartläggas innan en tillståndsbedömning genomförs med olika NDT teknologier, se bl.a. SS-ISO 13822 och ISO 16311-2. Av denna anledning beror således framgångsfaktorerna av valda NDT teknologier på hur väl problemställningen etablerats innan valet av NDT metod/er fastställs. Detta innebär alltså att en preliminär undersökning måste genomföras innan valet av NDT metod/er bestäms. En sådan undersökning benämns som ”skrivbordsstudie” (desk study) och innehåller en algoritm om fem steg, Das et al. (2000):

1. Okulär inspektion
2. Analys av bärförmåga
3. Behov av ytterligare undersökningar? Om inte, återgå till steg 1. Om så, gå vidare till steg 4.
4. ”Skrivbordsstudie”; insamling av data gällande aktuellt objekt, t.ex. dimensioneringsförutsättningar, ritningar, ändringar, reparationer etc.
5. Val av lämpligast NDT metod/er för ytterligare undersökningar baserat på kostnadseffektivitet och tillgänglighet
6. Implementering

Ett liknande arbetssätt finns beskrivet i både SS-ISO 13822 och ISO 16311-2.

Tabell 3. Tillämpbarhet och begränsningar med olika NDT metoder.

Metod	Tillämpning	Begränsningar
Studshammare	a) Tryckhållfasthet hos betong eller sten	a) Viss spridning i resultat, bättre resultat för icke karbonatiserad betong
Slag-eko (IE)	a) Upptäcka brister i betong b) Utvärdering av tjocklek, ensidig tillgänglighet c) Sprickdjup d) Upptäcka delaminering i betong konstruktioner e) Kontaktytans beskaffenhet mellan berg och betong	a) Efterbehandling kan behöva ske i ett specialiserat laboratorium b) Tillförlitligheten minskar med ökad tjocklek c) Inga standardiserad processer
Akustisk emission (AE)	a) Upptäcka förändringar i en konstruktion (t.ex. inre sprickor) b) Fjärrmätning c) Sprickdetektering i realtid	a) TRL nivå (technology readiness level) är relativt låg, höga krav på brukare b) Passiva defekter kan inte mätas

Metod	Tillämpning	Begränsningar
Ultraljud (UPV)	a) Tryckhållfasthet och E-modul på betong b) Utvärdering av härdning i betong c) Uppskattning av sprickdjup d) Detektering av injekteringsdefekter e) Mätning på fiberbetong	a) Tidskrävande metod samt kräver analys av expert b) Behöver tillgänglighet från två sidor
Radiografi	a) Den inre strukturen för ett objekt: b) Armeringens läge c) Sprickdetektering d) Utvärdera materialets heterogena egenskaper	a) Kan innebära risk i för utförare och omgivning i samband med arbetsmiljö
Täckskiktsmätare	a) Täckande betongskikt b) Armeringens storlek c) Armeringens läge d) Brandmotstånd	a) Påverkas av stora täckskikt och tätt sittande armering
Elektrisk resistivitet/ Potentialmätning	a) Korrosionssannolikhet (potentialmätning) <i>Om den kombineras med elektrisk resistivitet:</i> b) Korrosionshastighet c) Fiberfördelning i betong d) Härdningsförlopp	a) Problem med att mäta den faktiska korrosionen b) Kräver direktkontakt med armering
Infraröd termografi	a) Delaminering i brodäck b) Delaminering i konstruktioner förstärkta med FRP c) Delaminering i beläggning d) Energiförluster i byggnader	a) Vanligtvis kan endast undersökningar genomföras nära ytan b) Kan inte avgöra djupet på uppmätta avvikelser
Fotometrisk mätning	a) Geometri mätningar b) Förskjutnings och deformationsdata c) Heltäckande område för töjningar och töjningsfält d) Skadedetektering e) Sprickutvärdering	a) Vanligtvis kan endast undersökningar genomföras nära ytan om hög noggrannhet eftersträvas b) Omfattande efterarbetning av data (viss data kan fås i realtid)
3D laserskanning	a) Faktiska geometriförutsättningar efter att konstruktionen byggts. Gäller generellt för konstruktioner upp till 350 m	a) Hög kostnad b) Avancerad hårdvara för databearbetning
Provbelastning	a) Bestämma bär- och deformationsförmåga	a) Höga kostnader b) Möjlig säkerhetsrisk c) Stor arbetsinsats i förstudie

5 Framtida forskning/utveckling

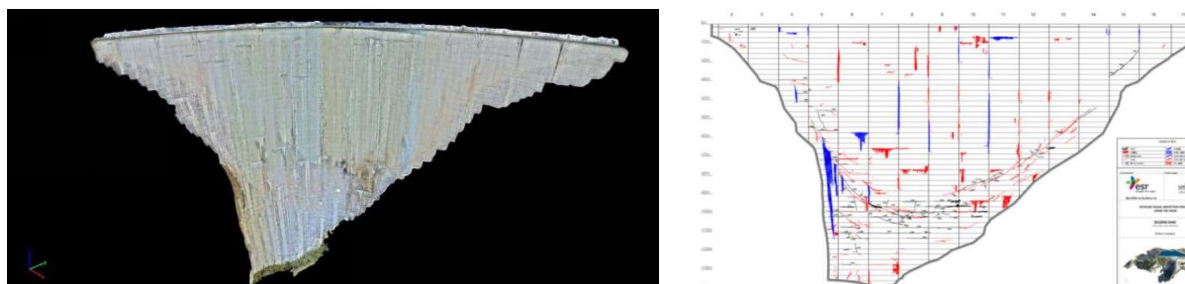
Det finns flertalet ytterligare applikationer och metoder för de NDT teknologier som inte är beskrivna i denna rapport. NDT är ett stort forskningsområde och denna rapport beskriver bara en del av de potentiellt ingående teknologierna. Andra möjliga områden och tillämpningar som skulle kunna undersökas vidare är:

Tomografi med hjälp av olika penetrerande vågor för att visualisera ett tvärsnitts sammansättning. Exempel på den här typen av teknologier är; ECT (Electrical Capacitance Tomography), EMT (ElectroMagnetic Tomography), EIT (Electrical Impedance Tomography) och ERT (Electrical Resistance Tomography). ERT (och självfallet EIT, som liknar ERT) kan användas för att visualisera där den kontinuerliga fasen är konduktiv och den dispersiva eller fasta fasen isolerar eller leder till på lägre nivå. ERT och EIT skulle således kunna vara lämpliga teknologier för att upptäcka och visualisera igensättning (t.ex. kalciumkarbonatbeläggning) av rörledningar vilket kan vara ett problem i samband med VA-anläggningar samt dränering i tunnlar. Det sistnämnda härrör från att dräneringsvatten är ledande i olika nivåer och igensättningar är troligtvis ledande beroende på dessas porositet. Fördelarna med ERT och EIT jämfört med andra tomografiteknologier är att de har låg kostnad, snabba, bärbara och inte nödvändigtvis påverkar rören som ska mätas.

En relativt ny teknologi för tomografi omfattar att mäta myoner. Kosmisk strålning når jordens övre atmosfär och interagerar med atomer och på så sätt produceras ett kontinuerligt flöde av laddade, subatomiska partiklar, kallade myoner. Varje minut träffar ca tiotusen myoner varje kvadratmeter på jordens yta. Deras stora omfång i energi, kombinerat med att de endast svagt interagerar med materia medför att de kan penetrera till stora djup. Teknologier för att mäta myoner omfattar MTR (Muon Transmission Radiography) och MST (Muon Scattering Tomography). Teknologierna för tomografi med myoner har hittills mestadels omfattat större geologiska områden, t.ex. genom att detektera snötäcken på alperna och dolda utrymmen under pyramiderna i Giza (MTR), Alvarez et al. (1970). På senare tid har även MST tekniken tillämpats för att mäta sprickor och identifiera dolda förstärkningselement i Katedralen Santa Maria del Fiore i Florens, den uppmätta domen är mer än två meter tjock, Guardincerria et al. (2016). Trots den enorma potentialen inom myontomografi råder det fortfarande många begränsningar inom teknologin för att kunna implementeras som tillförlitlig NDT teknologi. Dock är teknologin och dess tillämpningar väldigt intressant och utvecklingen inom denna teknologi bör bevakas för att omvärdera dess tillämpning som tillförlitlig NDT metod i framtiden.

Optiska metoder, okulära inspektionsmetoder har hittills varit en stor del av hur befintliga konstruktioner inspekterats. Detta innebär att en eller flera personer genomför en visuell inspektion på handnära avstånd eller längre. Detta är en metod med stor spridning i tillförlitlighet eftersom att den beror på individerna som inspekterar (subjektivt) samt konstruktionens tillgänglighet. Att tillämpa optiska teknologier så som DIC (Digital Image Correlation) innebär att en mer objektiv bedömning kan genomföras som även har högre repeterbarhet och tillförlitlighet i jämförelse med de subjektiva och tidskrävande arbetet när personer genomför besiktningar okulärt, detta reducerar även risker i samband med arbetsmiljö. Fotometrisk analys (med t.ex. DIC) är en användbar NDT teknologi som kan tillhandahålla mycket information om konstruktionens tillstånd utan att nämnvärt påverka driften hos konstruktionsdelar/byggnaden/anläggningen. Fotometrisk analys tillämpas mestadels för att detektera skador (sprickor, ytsplittring, korrosion, utfällningar etc.) men kan även användas för att inhämta geometriska resultat från den inspekterade konstruktionen. Vidare lämpar sig metoden väldigt bra för att dokumentera tillståndet över tid, dvs. upptäcka förändringar mellan olika inspektioner som t.ex. förskjutningar och deformationer över tiden. Framtida utveckling inom den här teknologin skulle

kunna ligga inom utvecklingen av autonoma system, med t.ex. robotar för tunnlar och broar samt UAV (Unmanned Aerial Vehicle/drönare) för broar och dammar. Figur 33 visar resultaten av daminspektion med UAV och fotometrisk analys.

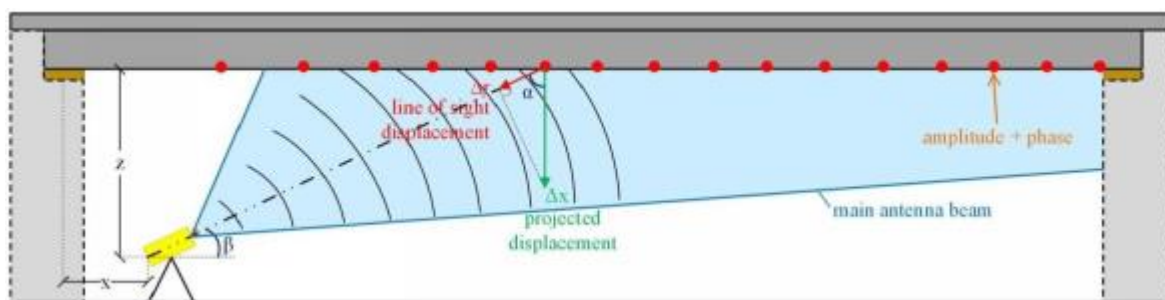


Figur 33. Fotometrisk mätning av skador på Tseuzier dammen, SenseFly (2017).

Markradar (GPR) på betongkonstruktioner tillämpas mestadels på att detektera armering och spännkablar. Den här teknologin har även potential att omfatta utvärdering av korrosionstillståndet hos armerade betongkonstruktioner genom att analysera de elektromagnetiska egenskaperna. Intensiteten hos den reflekterande radarpulsen beror på de dielektriska egenskaperna hos de studerade objekten. Skillnaderna i dessa egenskaper är väldigt stora för betong och stål, vilket underlättar analysen. Men i de fall där armeringen har korroderat innebär även detta en förändring i elektromagnetiska egenskaper jämfört med icke korroderad armering. Det borde därför finnas en korrelation mellan amplituden hos GPR reflektioner och korrosionen hos befintlig armering. Genom att utveckla GPR teknologin mot att även detektera armeringskorrosion fås en mätteknologi som kan mäta två egenskaper nämligen positionen av armering samt eventuellt pågående armeringskorrosion. Vidare skulle även delaminering i betong kunna upptäckas.

En vanlig typ av delaminering eller ytsplittring sker i samband med att den befintliga armeringen korroderar (expanderar) och skapar sprickplan i armeringsriktningen. Traditionellt har den här typen av sprickproblematik detekterats med IE eller potentialmätning. Genom utveckling och förfining av GPR teknologin skulle det även vara möjligt att uppnå liknande resultat för detektering av den här typen av delamineringsskador. Dock förekommer problem när det gäller små amplitudförändringar och dess tillförlitlighet, mindre variationer i amplitud kan även bero på fuktinnehåll eller ytskador.

Mikrovågsradar (radarinterferometri) är en kraftfull mätteknologi där små förskjutningar och rörelser kan mätas på stora avstånd. Teknologin är ursprungligen utvecklad inom rymdteknik där radarsystem på satelliter mäter markförskjutningar med en noggrannhet på några få millimeter på flera 100 kilometers avstånd. Principen baseras på att mäta amplitud och fas på de elektromagnetiska vågor som radarutrustningen skickar ut och sedan mäts de reflekterande vågorna med en antenn, se Figur 34 för princip vid mätning på broar. Den här typen av teknologi kan tillämpas på alla konstruktioner där fri sikt förekommer (inga hinder), som t.ex. broar och stödmurar. Denna teknologi är oberoende av klimateffekter (väder och vind) samt ljusförhållanden (om det är dag eller natt).



Figur 34. Standarduppställning för mätning av en bro med interferometrisk radar, Friese et al. (2016).

Den här teknologin skulle alltså kunna innebära ett väldigt effektivt icke berörande mätsystem. Realtidsmätningar skulle kunna uppnås på ett avstånd på upp till 1 km utan att någon tillkommande utrustning behöver installeras på konstruktionen. Den uppenbara fördelen med den här teknologin är att den är väldigt tidseffektiv, på bara några minuter skulle konstruktionens statiska eller dynamiska verkningssätt kunna mätas, tillskillnad från de tidskrävande arbetet med att installera flertalet sensorer (trådbundna eller trådlösa). Resultaten kan fås i realtid och med en noggrannhet om 0.01 mm vid ett mätavstånd på 500 m.

Sammantaget, den fortsatta utvecklingen av NDT teknologier har stor potential för implementering av effektiv mätning i samband med tillståndsbedömning av befintliga konstruktioner. Framtida utvecklingsområden omfattar automatisering samt kombination av olika NDT teknologier för att täcka ett större område av mätbara variabler. Robotik och UAV tillsammans med NDT teknologier bör kunna utgöra basen för att digitalisera informationen av konstruktioners tillstånd över tiden.

6 Referenser

6.1 Skriftliga källor

AASHTO TP 95. (2014). “*Standard Test Method for Surface Resistivity of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration*”. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 10 pp

ACI 228.2R-98. (1998). “*Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures*”. American Concrete Institute (ACI), Farmington Hills, Michigan.

ACI 437.2M-13. (2014). “*Code requirements for load testing of existing concrete structure and commentary*”. American Concrete Institute (ACI), Farmington Hills, Michigan.

Al-Neshawy, F., Sistonen, E., Ferreira, M., Bohner, E. & Puttonen, J. (2016). “*Selection of matrix for non-destructive testing of NPP concrete structures*”. 19th World Conference on Non-Destructive Testing, WCNDT 2016, session: Energy Nuclear, pp. 9.

Alvarez, L.W., Anderson, J.A., El Bedwei, F., Burkhard, J., Fakhry, A., Girgis, A., Goneid, A., Hassan, F., Iverson, D., Lynch, G., Miligy, Z., Moussa, A., Sharkawi, M. & Yazolino, L. (1970). “*Search for Hidden Chambers in the Pyramids*”. Science, New Series, vol 167 (3919), pp. 832-839.

Andrade, C. (1993). “*Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements*”, Journal of Cement and Concrete Research., vol 23, pp.724-742.

Andrade, C., Alonso, C., Arteaga, A. & Tanner, P. (2000) “*Methodology based on the electrical resistivity for the calculation of reinforcement service life*”. 5th Canmet/ACI International Conference on Durability of concrete – Supplementary papers volume. Barcelona, Spain, pp. 899-915.

Archie, G.E. (1942). “*The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics*”. Petroleum technology, transactions of the AIME, vol 146, pp. 54-62.

ASTM C1760-12. (2012). “*Standard Test Method for Bulk Electrical Conductivity of Hardened Concrete*”. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM C597-16 (2016). "*Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete*" ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM C 876-15 (2015). "*Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*". ASTM International, West Conshohocken, PA.

Azari, H., Nazarian, S. & Yuan, D. (2014). "Assessing sensitivity of impact echo and ultrasonic surface waves methods for nondestructive evaluation of concrete structures". *Journal of Construction and Building Materials*, vol 71, pp. 384-391.

BA 86/06 (2006). "*Advice notes on the non-destructive testing of highway structures*". Highways England, UK.

Bagge, N. (2017). "*Structural assessment procedures for existing concrete bridges: Experiences from failure tests of the Kiruna Bridge*". PhD thesis, Luleå University of Technology.

Baqersad, J., Poozesh, P., Niezrecki, C., & Avitabile, P. (2017). "*Photogrammetry and optical methods in structural dynamics – A review*". *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 86, Part B, pp. 17-34.

Becker, M., Traiser, B., Shill, F., Scheider, J. & Firus, A. (2016) "*Messung und Identifikation dynamischer Strukturparameter mittels terrestrischer Mikrowelleninterferometrie*". *Messen im Bauwesen*, Seminarium 2016-11-08, Berlin, Germany.

BS 1881-204:1988 (1989). "*Testing concrete. Recommendations on the use of electromagnetic covermeters*". British Standards Institution, London.

Casas, J. R., & Gómez, J. D. (2013). "*Load rating of highway bridges by proof-loading*". *KSCCE Journal of Civil Engineering*, vol. 17(3), pp. 556-567.

Olaszek, P., Świt, G., & Casas, J. R. (2010). "*Proof load testing supported by acoustic emission. An example of application*". *Proc., Bridge Maintenance, Safety, Management and Life-Cycle Optimization - Proceedings of the 5th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management*, pp. 484-491.

Castellote, M., Andrade C. & Alonso, C. (2002) "*Standardization, to a reference of 25° C, of the electrical resistivity values measured at any temperature for mortars and concrete in saturated conditions*". *ACI Materials Journal*, vol 99, pp.119–128.

Cengel, Y.A. (1997). *“Introduction to thermodynamics and heat transfer”*. McGraw Hill series, mechanical engineering/international edition. McGraw Hill; 1997. ISBN: 0-07-011498-6

Chang, K.C., Shiotani, T. & Tamrakar, S.B. (2016). *“Experimental verification of a Rayleigh-wave based technique for detecting the depth of deteriorated concrete”*. Emerging Technologies in Non-Destructive Testing VI, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-02844-5, pp. 25-31.

Chaudhary, M. T. A. (2013). *“Effectiveness of impact echo testing in detecting flaws in prestressed concrete slabs”*. Journal of Construction and Building Materials, vol 47, pp. 753-759.

Claisse, P.A. (2014). *“Letter: Using Electrical Tests as Durability Indicators”*. Concrete International Journal, vol 36, p.17

D6758-08 (2008). *“Standard Test Method for Measuring Stiffness and Apparent Modulus of Soil and Soil-Aggregate In-Place by Electro-Mechanical Method”* ASTM International, West Conshohocken, PA.

DAfStb. (2000). *“Belastungsversuche an Betonbauwerken”*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton.

Dérobot, X., Villain, G., Cortas, R. & Chazelas J.L. (2009). *“EM characterization of hydraulic concretes in the GPR frequency band using a quadratic experimental design”*. In Proceedings of NDTCE’09, non-destructive testing in civil engineering, Nantes, France

Dinh, K., Gucunski, N., Kim, J., and Duong, T. H. (2016). *“Understanding depth-amplitude effects in assessment of GPR data from concrete bridge decks”*. NDT & E International, vol. 83, pp. 48-58.

du Plooy, R., Villain, G., Palma Lopes, S., Ihamouten, A., Dérobot, X. & Thauvin, B. (2015). *“Electromagnetic non-destructive evaluation techniques for the monitoring of water and chloride ingress into concrete: a comparative study”*. Journal of Materials and Structures, vol 48, pp. 369-386.

Feng, Q. (2012). *“Practical application of 3D laser scanning techniques to underground projects, PHASE 2-3 A part of ISRM - Swedish national task: A survey of 3D laser scanning techniques for application to rock mechanics”*. Rock Engineering Research Foundation Stiftelsen Bergteknisk Forskning, Stockholm.

Friese, M., Taffe, A., Wöstmann, J. & Zoëga, A. (2009). "Zerstörungsfreie Untersuchungen am brückenbauwerk A Hagen/Schwerte". Berichte der bundesanstalt für strassenwesen, Brücken- und Ingenieurbau, Heft B65, pp. 54.

Ghiassi, B., Silva S.M., Oliveira, D.V., Lourenço, P.B. & Bragança, L. (2014). "FRP-to-Masonry Bond Durability Assessment with Infrared Thermography Method". Journal of Nondestructive Evaluation, vol 33, pp. 427-437.

Guardincerria, E., Durham, J. M. ., Morris, C., Bacon, J. D., Daughton, T. M., Fellows, S., Morley, D. J., Johnson, O. R., Plaud-Ramos, K., Poulson, D. C. & Wang, Z. (2016). "Imaging the inside of thick structures using cosmic rays". AIP Advances, vol 6, doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4940897>.

Helfrick, M. N., Niezrecki, C., Avitabile, P., & Schmidt, T. (2011). "3D digital image correlation methods for full-field vibration measurement". Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 25(3), pp. 917-927.

Hola, J., Bien, J., Sadowski, L. & Schabowicz, K. (2015). "Non-destructive and semi-destructive diagnostics of concrete structures in assessment of their durability". Bulletin of the Polish academy of sciences technical sciences, vol 63, pp. 87-96.

Hugenschmidt, J. & Loser, R. (2008). "Detection of chlorides and moisture in concrete structures with GPR". Journal of Materials and Structures, vol 41, pp. 785–792.

Hugenschmidt, J., & Mastrangelo, R. (2006). "GPR inspection of concrete bridges" Cement and Concrete Composites, vol 28(4), pp 384-392.

Karastathis, V. K., Karmis, P. N., Drakatos, G., & Stavrakakis, G. (2002). "Geophysical methods contributing to the testing of concrete dams. Application at the Marathon Dam". Journal of Applied Geophysics, vol. 50(3), pp. 247-260.

Häggström, J. (2016). "Evaluation of the Load Carrying Capacity of a Steel Truss Railway Bridge: Testing, Theory and Evaluation". Licentiate thesis, Luleå University of Technology.

IAEA (2002). "Guidebook on non-destructive testing of concrete structures". Vienna, Austria.

Ihamouten, A., Villain, G. & Dérobert, X. (2012). “*Complex permittivity frequency variations from multi-offset GPR data: hydraulic concrete characterization*”. IEEE Trans InstrumMeas, vol 61, pp. 1636–1648.

ISO-16311-2 (2014). “Maintenance and repair of concrete structures - Part 2: Assessment of existing concrete structures”. International Standard Organisation.

Kashif, U. R. S., Ibrahim, Z., Memon, S. A., & Jameel, M. (2016). “*Nondestructive test methods for concrete bridges: A review*”. Construction Building Materials, vol. 107, pp. 58-86.

Kaiser, H., & Karbhari, V. M. (2004). “*Non-destructive testing techniques for FRP rehabilitated concrete. I: a critical review*”. Int. J. of Materials and Product Technology, vol. 21(5), pp. 349 - 384.

Kashif, U. R. S., Ibrahim, Z., Memon, S. A., & Jameel, M. (2016). “*Nondestructive test methods for concrete bridges: A review*” Construction Building Materials., vol 107, pp. 58-86.

Kim, D.S., Seo, W.S. & Lee, K.M. (2006). “*IE-SASW method for nondestructive evaluation of concrete structure*”. NDT & E International, vol. 39(2), pp. 143-154.

Kozlov. V.N., Samokrutov. A.A. & Shevaldykin. V.G. (1997) “*Thickness measurements and flaw detection in concrete using ultrasonic echo method*”. Journal of Nondestructive Testing and Evaluation, vol 13, pp. 73–84.

Kraus. M., Mayer. K., Friese. M., Milmann. B., Mielentz. F & Ballier. G. (2011) “*Progress in ultrasonic tendon duct imaging*”. European Journal of Environmental and Civil Engineering, vol 15, pp. 461-485.

Kylili, A., Fokaides, P.A, Christou, P. & Kalogirou, S. (2014). “*Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: A review*”. Journal of Applied Energy, vol 134, pp. 531-549.

Lachowicz, J. & Rucka, M. (2015). “*Application of GPR method in reinforced concrete structures*”. Diagnostyka, vol 16, pp. 31-36.

Lai, W.l., Kind, T., Stoppel, M. & Wiggenhauser, H. (2013). “*Measurement of Accelerated Steel Corrosion in Concrete Using Ground-Penetrating Radar and a Modified Half-Cell Potential Method*”. Journal of Infrastructure Systems, vol 19, pp. 205-220.

Laurens, S., Balayssac, J., Rhazi, J. & Arliguie, G. (2002). "Influence of concrete relative humidity on the amplitude of groundpenetrating radar (GPR) signal". *Journal of Material and Structures*, vol 35, pp. 198–203.

Loperte, A., Bavusi, M., Cerverizzo, G., Lapenna, V., & Soldovieri, F. (2011). "Ground Penetrating Radar in Dam Monitoring: The Test Case of Acerenza (Southern Italy)". *International Journal of Geophysics*, 2011, vol. 9.

Mahal, M., Blanksvärd, T., Täljsten, B., & Sas, G. (2015). "Using digital image correlation to evaluate fatigue behavior of strengthened reinforced concrete beams". *Engineering Structures*, vol. 105, pp. 277-288.

McCann, D.M. & Forde, M.C. (2001). "Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry". *NDT & E International*, vol. 34(2), pp. 71-84.

Milovanovic, B.; Pecur, I.B. & Štirmer, N. (2014). "Quality control of concrete structures using IR thermography". In *Proceedings of the RILEM International Workshop on Performance-Based Specification and Control of Concrete Durability*, Zagreb, Croatia, 11–13 June 2014; pp. 125–132.

Milovanović, B., & Banjad Pečur, I. (2016). "Review of Active IR Thermography for Detection and Characterization of Defects in Reinforced Concrete". *Journal of Imaging*, vol. 2(2), 11.

Nadelman, E.I. & Kurtis, K.E. (2014). "A Resistivity-Based Approach to Optimizing Concrete Performance". *Concrete International Journal*, vol 36, pp. 50-54.

Nordman, A. & Pettersson, C. (2011). "Metodik för fastställande av bärförmåga på befintliga betongkonstruktioner". Examensarbete i Byggnadsteknik, Högskolan i Gävle, Institutionen för teknik och byggd miljö. pp. 59

Popescu, C. (2017). "CFRP strengthening of cut-out openings in concrete walls – Analysis and laboratory tests." PhD Thesis, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden.

RI-ZFP-TU. 2007. "Richtlinie für die anwendung der zerstörungsfreien prüfung von tunnelinnenschalen". Ausgabe 2007-12. In: ZTV-ING, Teil 5: Tunnelbau: Geschlossene bauweise, Anhang A. Verkehrsblatt-Sammlung Nr. S1056 (2007), pp. 29-35.

Sabau, C., Gonzalez-Libreros, J. H., Sneed, L. H., Sas, G., Pellegrino, C., & Täljsten, B. (2017). "Use of image correlation system to study the bond behavior of FRCM-concrete joints" *Materials & Structures*, vol. 50(3), 172.

Saint-Pierre, F., Philibert, A., Giroux, B., & Rivard, P. (2016). "Concrete Quality Designation based on Ultrasonic Pulse Velocity". *Construction Building Materials*, vol. 125, pp. 1022-1027.

SS-EN12504-2. 2012. "Provning av betong i färdig konstruktion – Del 2: Icke förstörande provning – Bestämning av studsvärden". Swedish Standards Institute.

SS-EN12504-4. 2004. "Provning av betong i färdig konstruktion – Del 4: Bestämning av ultraljudshastighet". Swedish Standards Institute.

SS-EN13187. 1999. "Byggnaders termiska egenskaper – Kvalitativ metod för lokalisering av termiska ofullkomligheter i klimatskärmen – Infraröd metod (värmekamera)". Swedish Standards Institute.

SS-EN206. 2013. "Betong – Fordringar, egenskaper, tillverkning och överensstämmelse". Swedish Standards Institute.

SS-EN ISO 12504-1, 2015. "Metalliska material – Hårdhetsprovning enligt Rockwell – Del 2: Provningsmetod". Swedish Standards Institute.

Shevaldykin, V.G., Samokrutov, A.A. & Kozlov, V.N. (2003) "Ultrasonic low-frequency short-pulse transducers with dry point contact. Development and application". International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), in: DGZfP (Ed.), Proceedings, V66, Berlin, Germany.

Sack, D. A., & Olson, L. D. (1995). "Advanced NDT methods for evaluating concrete bridges and other structures". *NDT & E International*, vol 28(6), pp 349-357.

Schulte, C., Mader, H. & Wittmann, F.H. (1978). "Electric Conductivity of Hardened Cement Paste at Different Moisture Contents". *Journal of Cement and Concrete Research*, vol 8, pp. 359-368.

Sužiedelyte-Visockiene, J., & Bručas, D. (2009). "Digital photogrammetry for building measurements and reverse-engineering" *Geodezija ir Kartografija*, vol. 35(2), pp. 61-65.

Tuutti, K. (1982). "*Corrosion of steel in concrete*". Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm

Verma, S. K., Bhadauria, S. S. & Akhtar, S. (2013). "*Review of Nondestructive Testing Methods for Condition Monitoring of Concrete Structures*". Journal of Construction Engineering, vol. 2013, Article ID: 834572, pp. 11, doi:10.1155/2013/834572

Xu, X., Zeng, Q., Li, D., Wu, J., Wu, X., & Shen, J. (2010). "*GPR detection of several common subsurface voids inside dikes and dams*". Engineering Geology, 111(1–4), pp. 31-42.

6.2 Internet källor

ACX (2016)

ACX, Australian Concrete X-ray.

<http://concretexray.com.au/services/concrete-investigation/resistivity-testing.html>

Hämtat 19 Juli 2016

Artescan (2017)

3D scanning of a concrete dam. Digital image

<http://www.artescan.net/>

Hämtat 5e maj 2017

Physical Acoustics (2017)

Acoustic Emission (AE) Technology

<http://www.physicalacoustics.com>

Hämtat 12 april 2017

FARO Technologies (2017)

Laser Scanner instruments for 3D Documentation and Surveying

<http://www.faro.com/en-gb>

Hämtat 5e maj 2017

FLIR (2016)

FLIR, the world's sixth sense, Infrared Technology.

<http://www.flir.se/instruments/content/?id=70502>

Hämtat 18 Juli 2016

FLIR (2017)

FLIR, the world's sixth sense, Infrared Technology.

<http://www.flir.se/home>

Hämtat 18 Maj 2017

GEOVision (2017)

GeoVision - geophysical services.

<http://www.geovision.com>

Hämtat 12e april 2017

GOM GmbH (2017)

ARAMIS - Optical 3D Deformation Analysis.

<http://www.gom.com/metrology-systems/system-overview/aramis.html>

Hämtat 5e Maj 2016

European Commission (2016)

Horizon 2020. The EU Framework Programme for Research and Innovation.

<http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en>

Hämtat 18 juli 2016

Hilti (2016)

Ground penetrating radar system, radar scanner

<https://www.hilti.com.au/measuring-systems/detection-systems/r5042#gallery>

Hämtat 12 Juli 2016

IAEA (2016)

International Atomic Energy Agency

http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/tcs-17_web.pdf

Hämtat 19 Juli 2016

Impact-Echo (2016)

Impact Echo Instruments

<http://www.impact-echo.com/Impact-Echo/impact.htm>

Hämtat 11 Juli 2016

Malå (2016)

Malå, part of the guideline Geo group

[http://www.malags.com/products/mala-cx-\(concrete-imaging\)-system](http://www.malags.com/products/mala-cx-(concrete-imaging)-system)

Hämtat 12 Juli 2016

Mulla, S. (2016)

Future Thinking IV: 3D scanning

<http://architecturenow.co.nz/articles/future-thinking-iv-3d-scanning/#img=2>

Hämtat 5e maj 2017

NDT Net (2017)

Assessment of The Deterioration of Concrete in NPP - Causes, Effects and Investigative Methods

<http://www.ndt.net/article/0298/shaw/shaw.htm>

Hämtat 29 maj 2017

Olson-Instruments (2016)

Impact Echo Instruments

<http://www.olsoninstruments.com/impact-echo-ndt.php>

Hämtat 11 Juli 2016

Park Seismic LLC (2017)

Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW)

<http://www.masw.com/index.html>

Hämtat 13e april 2017

PCTS (2016)

Perth Construction Testing Services

<http://www.pcts.com.au/concrete-ndt/ultrasonic-pulse-velocity.htm>

Hämtat 7 Juli 2016

PCTE (2016)

Papworths Construction Testing Equipment

<http://www.pcte.com.au/construction-ndt-july-2013>

Hämtat 7 Juli 2016

PROCEQ (2017)

Portable non-destructive instruments.

<https://www.proceq.com>

Hämtat 12 april 2017

SenseFly (2017)

Fotometrisk mätning av Tseuzier dammen med hjälp av drönare

https://www.sensefly.com/fileadmin/user_upload/sensefly/user-cases/2016/senseFly-Case-Study-Tseuzier-Dam.pdf

Hämtat 2 juni 2017

Shift2Rail (2017)

Rising traffic demand, congestion, security of energy supply, and climate change are some of the major issues that the European Union and the wider world are facing. Tackling these challenges will call for the railway sector to take on a larger share of transport demand in the next few decades.

<https://shift2rail.org/>

Hämtat 18 maj 2017

Thirteen (2017)

St Pauls katedral, laserskanning

<http://www.thirteen.org/programs/time-scanners/time-scanners-st-pauls-cathedral/>

Hämtat 19 maj 2017

USRadar (2016)

US Radar Inc., subsurface imaging systems

<http://www.usradar.com/ground-penetrating-radar-gpr/modular-expandable-gpr/3d-and-2d-concrete-inspection-scanning/2500-series>

Hämtat 12 Juli 2016

Cattelino (2016)

Michigan Tech, slideshare

<http://www.slideshare.net/JasonCattelino/condition-assessment-of-concrete-bridge-elements-using-active-ir-thermography>

Hämtat 14 Juli 2016

Vertical access (2017).

The Occoquan Dam.

<https://verticalaccessllc.wordpress.com/2011/08/>

Hämtat 18 april 2017