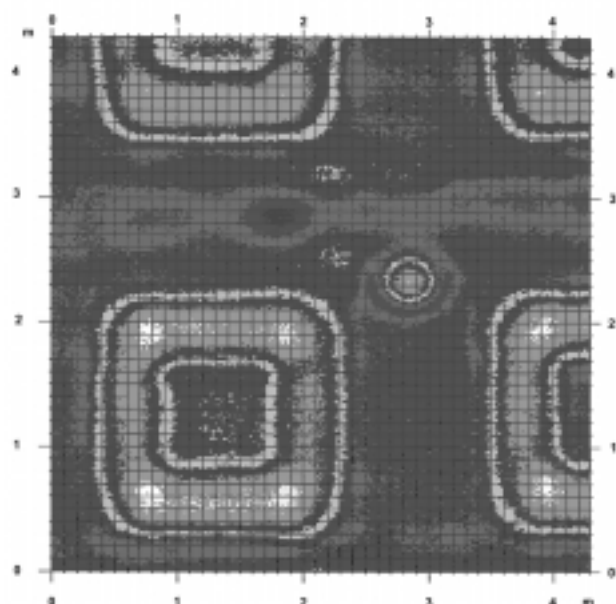


**Utvärdering av befintliga metoder för
oförstörande provning av betong i
kraftanläggningar**

Elforsk rapport 99:45

Utvärdering av befintliga metoder för oförstörande provning av betong i kraftanläggningar

Elforsk rapport 99:45



Christian Bernstone

December 1999

Förord

Föreliggande rapport har framkommit i ett pågående arbete vid Vattenfall Utveckling vilket har som mål att koppla ihop ett flertal olika utvecklingsområden som berör vattenbyggnadsbetong: tillståndskontroll, konditionsbedömning, livslängdsbedömning och åtgärdsalternativ. Genomförandet har möjliggjorts genom anslag från Elforsk.

Syftet med den studie som redovisas i rapporten är att, där så är möjligt, göra en översiktlig kvalitativ bedömning av befintliga metoder för oförstörande provning. Utvärderingen görs för 11 olika skador eller problem som kan förekomma på eller i anslutning till betongkonstruktioner i vattenkraftanläggningar. Bedömningarna grundar sig på dels metodernas generalitet och dels i vad mån inverkan av yttre miljöfaktorer begränsar användandet. Resultatet skall först och främst ses som ett hjälpmedel för att motivera och underlätta användningen av ofp-metoder i betongundersökningar, men det visar också på områden där fortsatt utveckling behöver bedrivas. De metoder som tas upp till diskussion finns, med något enstaka undantag, kommersiellt tillgängliga i Norden.

Materialet har tagits fram efter diskussioner med personer vid företag och organisationer som har en professionell kontakt med ofp-metoder. Författaren vill härmed tacka dessa personer för deras viktiga insatser.

Bedömningen gör inte anspråk på att vara heltäckande och fortsatt utveckling gör naturligtvis att revideringar kommer att behöva göras framgent. I görligaste mån finns referenshänvisningar med som stöd till gjorda uttalanden. Rapporten ger även viss bakgrundsinformation om hur tillsynsarbetet idag bedrivs för dammkonstruktioner inom vattenkraftindustrin.

Sammanfattning

Metoder för oförstörande provning av betong är i flera avseenden lämpliga att använda vid tillståndsbedömning av vattenbyggnadsbetong och det finns idag ett flertal olika metoder som går att handla upp av mätkonsulter på den svenska/nordiska marknaden. Metoderna baseras på olika fysikaliska principer, och mäter t.ex. elektriska, elektromagnetiska, seismiska, akustiska eller radiologiska egenskaper hos betongen.

I föreliggande rapport anges vilka metoder som kan vara lämpliga att välja med utgångspunkt i en förväntad skada. Fem olika typer av skadefall diskuteras (i samtliga fall med mer än en problemställning för varje skadefall). Dessa är mätning av sprickor, mätning av spjälkning och delaminering, mätning av hålrum och inneslutningar, uppföljning av utförda reparationer, och mätning av betongtjocklek.

Det material som redovisas har arbetats fram i en workshop, med deltagare från Betongteknik vid Vattenfall Utveckling AB, Avdelningen för Teknisk Geologi vid LTH, Force Institutet AB, SAQ Kontroll AB, ÅF Kontroll AB, Geosigma AB, NCC Teknik AB, Skanska Teknik AB, YIT Bygg AB och Vägverket (Bro och Tunnel).

Syftet har varit att nå fram till bedömningar som det kan sägas råda konsensus om. Bland de metoder som har fått högst betyg återfinns impact echo och ytvågsseismik (spjälkning och delaminering), ultraljudspulseko, högenergiröntgen och radarskanner (mätningar av olika typer av hålrum och inneslutningar), och impact echo, ytvågsseismik (mätning av betongtjocklek). Man bör emellertid eftersträva att alltid använda mer än en mätmetod vid en undersökning. Metoderna kompletterar i allmänhet varandra och en ökad säkerhet i tolkningen av resultaten blir därmed möjlig.

Den metodik som har använts redovisas steg för steg, tillsammans med bedömningsunderlaget, i rapportens bilagedel. Den läsare som så önskar kan därmed göra motsvarande bedömningar på egen hand.

Författaren anser att det är viktigt att försöka sätta problematiken med skadade betongkonstruktioner och eventuella ofp-undersökningar i sitt sammanhang vad gäller vattenbyggnadsbetong. Ett kapitel om tillståndskontroll av betongdammar har därför författats. Av detta framgår olika situationer när ofp-undersökningar kan vara aktuella.

En sammanställning av ofp-metoder har gjort i en bilaga till rapporten. Materialet bygger på en rapport som sammanställdes av Betongteknik på beställning av Elforsk 1994 [36]. En begränsad ny litteratursökning har gjorts vilket har lett till vissa uppdateringar. Litteraturgenomgången har visat att det finns god potential för vissa metoder som endast i liten skala har börjat användas kommersiellt på betongområdet (t.ex. akustisk emission), eller som inte finns tillgänglig kommersiellt ännu (ultrasonic pulse-echo). Vid metodbedömningen för de olika problemställningarna har därför även fogats en kommentar för metoder där potential finns för lyckad tillämpning framgent.

Innehållsförteckning

1	INLEDNING.....	1
1.1	BAKGRUND.....	1
1.2	SYFTE.....	2
1.3	BEGRÄNSNINGAR.....	2
1.4	PROJEKTETS UPPLÄGGNING/LÄSANVISNING.....	2
1.5	TIDIGARE UTFÖRDA STUDIER.....	3
2	TILLSTÅNDSKONTROLL AV BETONGDAMMAR	4
2.1	INLEDNING	4
2.2	ANSVAR	5
2.3	TILLSYN ENLIGT RIDAS	5
2.4	FRAMTIDA FÖRVALTNINGSSYSTEM FÖR BETONGKONSTRUKTIONER.....	6
2.5	DOMINERANDE TYPSKADOR	8
3	ÖFÖRSTÖRANDE PROVNING AV BETONG	12
3.1	INLEDNING	12
3.2	ANVÄNDNINGSSOMRÅDEN.....	12
3.3	OFP-METODER	14
3.4	AVSÖKNINGSMETODIK.....	14
3.5	INVERKAN AV YTTRE FAKTORER	16
4	BEDÖMNING AV MÄTMETODER.....	19
4.1	INLEDNING	19
4.2	UTVÄRDERINGSMETODIK	19
4.3	RESULTAT.....	22
4.4	EKONOMI	27
4.5	METODERNAS POTENTIAL FÖR ÖVERVAKNING	27
5	SLUTSATSER.....	28
6	REFERENSER.....	29

Bilagor

- A DELTAGARLISTA FÖR OFP-WORKSHOP**
- B PRODUKTBLAD FÖR OFP-METODER**
- C BEDÖMNINGSFÖRMULÄR**

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Under senare år har erfarenheter av oförstörande provning av betongkonstruktioner samlats både inom och utanför vattenkraftbolagen. Det praktiska införandet av metoderna går dock trögt, även om den allmänna inställningen bland inblandade parter ofta är att ett ökande användande är väl befogat. Internationellt har detta t.ex. visat sig i en gemensam utvärdering av ofp-metoders lämplighet och utvecklingspotential för tillståndskontroll på betongkonstruktioner inom kärnkraftsindustrin och att området är ett prioriterat område för delar av den FoU som bedrivs inom EU:s forskningsprogram.

Livslängden för vattenkraftsbranschens anläggningar torde ligga på 50-160 år [34]. För att kunna bibehålla en konstruktion så att den fungerar drifts- och säkerhetsmässigt under lång tid på ett ekonomiskt försvarbart sätt så behövs information om dess kondition. Resultat från en undersökning inom det amerikanska forskningsprogrammet REMR visar att för allvarliga skador finns det ett klart samband mellan ökande medelålder på vattenkraftanläggningar och antalet fall med undermålig betong [3]. Däremot saknas en klar korrelation mellan det totala antalet observerade skador och betongkonstruktioners medelålder. Detta faktum beror till stor del på att merparten av rapporterade skador är att beteckna som ringa, d.v.s. det är vanligt med ringa skador oberoende av en konstruktions ålder. En viktig slutsats från utredningen blir således att vid fortsatt drift, med påföljande successivt ökande medelålder, så kommer antalet skadefall som kräver reparationsåtgärder att öka. Svenska konstruktioner skiljer sig förmodligen inte i någon större utsträckning från de amerikanska. De flesta kraftanläggningar i Sverige byggdes under perioden 1900-1960 och i takt med att dessa blir allt äldre så kommer reparationsbehovet att öka. Detta problem är också uppmärksammat.

Ett bra beslutsunderlag är väsentligt då val av reparationsmetod skall göras. I detta sammanhang bör användandet av oförstörande provningsmetoder ha en viktig roll tillsammans med insatser från statiker och materialvetare. Metoderna kan vid besiktningar möjliggöra upptäckt, och eventuellt även karakterisering, av skador. Skadornas betydelse för den fortsatta livslängden kan sedan bedömas. Andra skeden då oförstörande provning kan vara aktuell är då en skada har uppmärksamrats på en konstruktion och en handlingsplan behöver tas fram, eller då en reparationsåtgärd behöver följas upp.

Tekniska rön och alltmer förbättrad apparatur har bidragit till framgångsrik metodutveckling. Det är emellertid först på senare år som utvecklingen har nått så pass långt att en bedömning motsvarande vad som har varit ambitionen för denna rapport varit möjlig eller meningsfull att göra. Materialet i rapporten gör inte anspråk på att vara heltäckande och fortsatt utveckling gör naturligtvis att revideringar kommer att behöva göras framgent. Rapporten är avsedd att i lättillgänglig form delge erfarenheter, rön och rekommendationer till handledning för berörd personal på såväl beställar- som utförarstadiet. Materialet har tagits fram efter diskussioner med personer i företag och organisationer som har en professionell kontakt med ofp-metoder. Andra bedömningar av ofp-metoder finns i [19] och [21].

1.2 Syfte

Syftet med studien är att så långt som möjligt göra en översiktlig kvalitativ bedömning av befintliga metoder för oförstörande provning för ett antal olika skadetyper som kan förekomma på betongkonstruktioner i vattenkraftanläggningar. Bedömningen grundar sig på metodernas generalitet och i vad mån inverkan av yttre miljöfaktorer begränsar användandet.

1.3 Begränsningar

- De skadefall och miljöförutsättningar som medtagits i betygsättningen anses ha betydelse för dammars tillståndskontroll. Någon fullständig utvärdering av skador och miljöförutsättningar görs emellertid inte (enskilda dammars undersökningsbehov ofta är unika). Rapporten gör således inte anspråk på att vara heltäckande men förhoppningen är att den trots detta kan utgöra ett bra hjälpmedel då t.ex. ett undersökningsprogram skall tas fram för en betongdamm.
- Ambitionen är att i huvudsak bedöma sådana metoder som går att beställa i undersökningar genom svenska/nordiska provningsutförare. Vissa av de metoder som tas upp finns emellertid än så länge inte tillgängliga hos mätkonsulter eller ens med utrustningar som är kommersiellt tillgängliga. Anledningen till att de trots detta finns med är att de förekommer i diskussioner om mätmetoder som svenska mätkonsulter anser som viktiga att ta i anspråk framöver.

1.4 Projektets uppläggning/läsanvisning

Projektet har drivits av Betongteknik vid Vattenfall Utveckling på beställning av Elforsk. En viktig del av arbetet har varit genomförandet av en workshop med deltagare från verksamma konsulter, entreprenadföretag och beställarorganisationer. En deltagarlista återfinns i Bilaga A. Resultatet från projektet redovisas i denna rapport.

Rapporten ger en bakgrund till kraftindustrins behov av ofp-metoder och ger en grund för värdering av metodernas möjligheter genom att ta upp följande:

- Hur tillsynen av betongdamm ser ut för de företag som är anslutna till RIDAS (Kapitel 2).
- Vad ska mätas? För att ge en introduktion till detta ges en kortfattad översikt av dominerande skadetyper på svensk vattenbyggnadsbetong i Kapitel 2. Materialet baseras på en inventering gjord av Betongteknik under 1997-98 [5].
- Sammanställning av ofp-metoder (Kapitel 3). En utförlig beskrivning av respektive metod görs i Bilaga B.
- En genomgång av yttre faktorer som det enskilda fallet kan påverka valet av ofp-metod (Kapitel 3).

Med utgångspunkt i resultatet från diskussionerna i workshopen ges i kapitel 4 en kvalitativ bedömning av metodernas lämplighet för undersökning av betong i kraftanläggningar. Den intresserade läsaren hittar underlaget i Bilaga C.

1.5 Tidigare utförda studier

Ett flertal rapporter som avhandlar tillståndskontroll med hjälp av oförstörande provningsmetoder har tidigare publicerats i Elforsks rapportserie. Rapporterna sammanfattas kortfattat nedan:

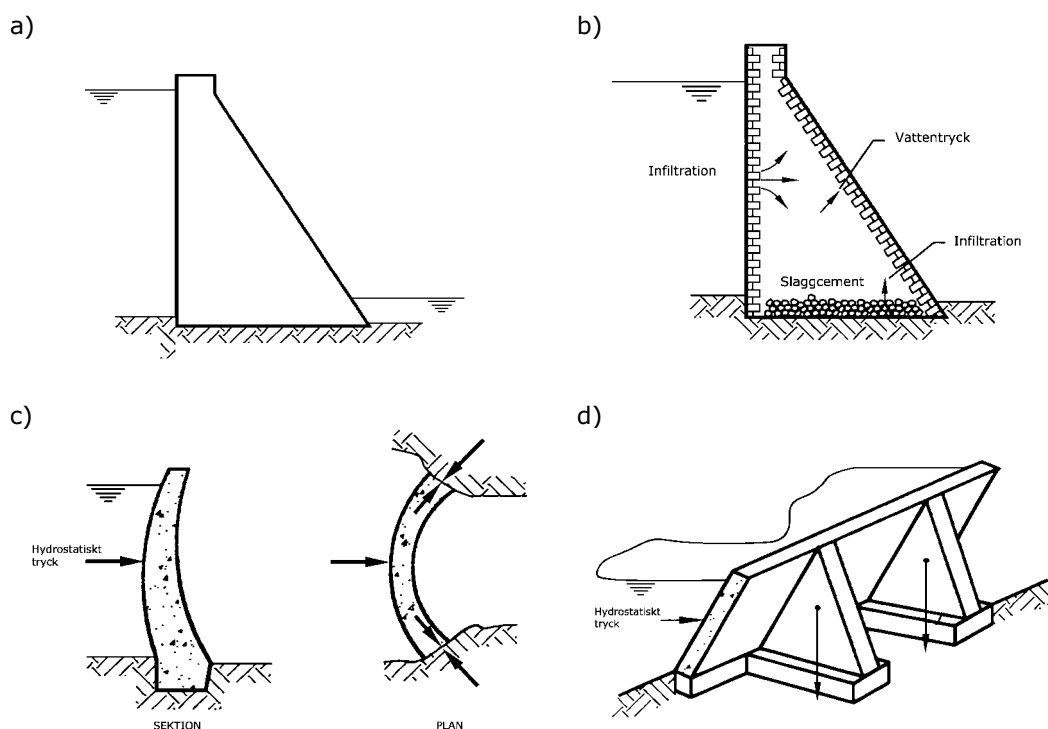
- Rapporten *"Tillståndskontroll av betong i kraftanläggningar"* från 1994 [36] innehåller en översikt över de metoder för oförstörande tillståndskontroll som kan ha en tillämpning vid betongprovning (översikten återfinns till vissa delar i Bilaga B). Oförstörande tekniker baserade på i första hand stötvågsutbredning, elektromagnetisk vågutbredning och dynamisk respons redovisas och deras potential för kontroll av betongkonstruktioner värderas översiktligt. Tillvägagångssätt för bedömning av allmäntillståndet hos en konstruktion diskuteras.
- Betongteknik genomförde 1995 försök med verifieringsprovning och fälttester av Impact-Echo och radarskanner tillsammans med Institutionen för Geoteknologi vid Lunds Tekniska Högskola. I [31] och [37] redovisas mätresultat från provning av laboratorieplattor, golv och väggpartier av betong. Genom integrering av mätgivare och skannerutrustning fås viktiga vinster genom att volymen mätdata och undersökningens kvalitet kan ökas med rimlig arbetsinsats. Den skannerteknik som används har utvecklats med stöd från bl.a. Elforsk.
- 1995 genomfördes en inventering av befintliga mätmetoder lämpade för undersökningar av fyllningsdammar. I rapporten *"Nyare metoder för tillståndskontroll av fyllningsdammar"* [17] utvärderas dessa metoders användning för mätningar på fyllningsdammar samt utvecklingspotential med avseende på användningsområde och skadetypp/generalitet. Den metodik som används vid värdering av enskilda metoder har till vissa delar använts som underlag för den diskussion som förts i workshopen i föreliggande rapport.
- I rapporten *"Undersökning av betongkonstruktioner med radarteknik för 3D avbildning"* från 1996 [39] presenteras ytterligare resultat från arbeten med den skannerteknik som användes i [37]. Resultaten från en serie laboratiemätningar visar att det finns god kapacitet för detektering av ingjutna föremål eller defekter i ett för övrigt homogent material. Framtida möjliga tillämpningar diskuteras. Koppling finns även till [32].
- Rapporten *"Möjligheter till kontroll av betongkonstruktioner med oförstörande mät- och utvärderingsmetoder"* från 1997 syftar till att identifiera kontrollmöjligheter för mätning på betong [40]. Utvecklingsmöjligheterna för mätning, bearbetning och värdering analyseras.

2 Tillståndskontroll av betongdammar

2.1 Inledning

I Sverige finns närmare ca 900 kraftverksdammar. Strax över 100-talet av dessa är större betong- eller betong/fyllningsdammar, d.v.s. dammar med en höjd som är större än 15 m [2]. Betongdammar kan efter sitt verkningssätt delas upp i gravitationsdammar och valvdammar. Gravitationsdammar förekommer i flera olika utföranden där de vanligaste är massivdammar och lamelldammar. I äldre konstruktioner förekommer även massiva stenkädda dammar av s.k. stampbetong (enkel form av bearbetning), se Figur 1.

De inledande avsnitten i detta kapitel redogör för ansvarsfrågor för dammsäkerhet, och gör ett försök till att peka på hur den tillsynsverksamhet som bedrivs på betongdammar kan integreras med ofp-undersökningar (avsnitt 2.2 – 2.3). På många håll runt om i världen görs en översyn av hur underhålls- och tillsynsarbetet skall bedrivas på de stora investeringar som finns i befintlig infrastruktur genom etablerandet av speciella underhållssystem. Ett utkast till hur ett sådant system kan komma att se ut för betongdammar beskrivs i avsnitt 2.4, där även ofp-metoders ställning kommenteras. I de avslutande avsnitten (2.5 – 2.6) följer en sammanfattande genomgång av skadetyper som kan förekomma på svenska betongdammar.



Figur 1. Fyra olika typer av betongdammar (a) massiv gravitationsdamm, (b) stenkädd gravitationsdamm, (c) valvdamm och (d) lamelldamm. Modifierad från [6].

2.2 Ansvar

Under senare år har behovet av gemensamma och mer heltäckande dammsäkerhetsriktlinjer blivit allt tydligare. Inom VASO dammkommitté har övergripande preliminära riktlinjer sammanställts för dels betongdammar och dels betongkonstruktioner som ingår som delar i dammar. Till dessa riktlinjer, som benämns RIDAS, skall framöver särskilda tillämpningsanvisningar kopplas. Detta innebär att tillsynsverksamheten framöver kommer att bli något annorlunda jämfört med hur det har sett ut fram till idag. Då det gäller ansvarsfrågor gäller bland annat följande [33]:

- Med dammsäkerhet (i allmänhet) avses främst säkerhet mot uppkomst av okontrollerad strömning från magasinet, som kan medföra skador i dammens närhet och nedströms därom.
- Den som äger en damm är enligt vattenlagen skyldig att underhålla den så att det inte uppkommer skada på allmänna eller enskilda intressen genom ändring av vattenförhållandena. Det är således dammägaren som har det yttersta ansvaret för dammsäkerheten.

2.3 Tillsyn enligt RIDAS

Tillsyn utgör ett mycket viktigt moment för dammar som är tagna i drift. Varje damm kommer framöver att erhålla en konsekvensklass baserad på de konsekvenser som kan bli följden vid ett dammbrott. Tillsynens omfattning kommer på det sättet att bestämmas av dess konsekvensklass. Som framgår av Tabell 1 omfattar klassificeringen i RIDAS fyra olika klasser. De olika formerna av tillsyn diskuteras vidare nedan utifrån behovet av undersökningar med ofp-metoder.

Tabell 1. Tillsynsprogram för dammar enligt RIDAS konsekvensklassificering [33]. För den lägsta klassen 3 får dammägaren själv utforma tillsynsprogram. Till respektive tillsynsprogram har angivits huruvida undersökningar med ofp-metoder kan vara aktuell.

Tillsyn	Konsekvensklass				Användning av ofp
	1A	1B	2	3	
Driftsmässig tillsyn	Fortlöp.	Fortlöp.	Fortlöp.	Ej spec.	Nej
Dammätning	Fortlöp.	Fortlöp.	Fortlöp.	Ej spec.	Nej
Inspektion	2 gånger/år	2 gånger/år	1 gång/år	Ej spec.	Nej
Besiktning	1 gång/3 år	1 gång/3 år	1 gång/6 år	Ej spec.	Möjligt
FDU ¹	1 gång/15 år	1 gång/24 år	1 gång/30 år	Ej spec.	Möjligt

¹ Fördjupad dammundersökning enligt RIDAS. Den amerikanska termen SEED (Safety Evaluation of Existing Dams) har tidigare varit vanlig i Sverige. Man övergår emellertid nu till att tala om FDU enligt RIDAS.

För de tre första typerna av tillsyn i Tabell , *driftsmässig tillsyn*, *dammätningar* och *inspektioner*, görs inga ingående undersökningar. Den driftsmässiga tillsynen utförs i regel med ca 1 veckas mellanrum och inspektioner ca två gånger per år av en anläggnings driftspersonal [27]. Förutsättningarna är följaktligen sådana att undersök-

ningar som omfattar användning av ofp-metoder troligen inte kommer att bli aktuella.

Besiktningar av betongkonstruktioner genomförs av sakkunniga besiktningsmän som bl.a. har kompetens inom betongområdet. De genomförs normalt visuellt och genom granskning av dokumentation från driftsmässig tillsyn, inspektion och mätning. Syftet är att bedöma konstruktionens allmäntillstånd och att utvärdera vilket behov det finns av ytterligare undersökningar och analyser. Målsättningen är att i god tid upptäcka utbildade skador och det är bland annat i denna del som användandet av ofp-metoder kan ha en viktig funktion.

RIDAS införande innebär att det kommer att behöva göras ett stort antal *fördjupade dammsäkerhetsutvärderingar* (FDU) i Sverige. Syftet med dessa är att uppnå en samlad utvärdering av dammsäkerheten som kan leda fram till ett åtgärdsprogram (anläggningens driftsäkerhet behandlas inte i en FDU). Vattenfall påbörjade t.ex. detta arbete för RIDAS, och under perioden 1990-98 å har mer än hälften av Vattenfalls anläggningar gått igenom [4]. I huvudsak omfattar arbetet en genomgång av existerande data från respektive anläggning. Detta gäller bl. a. dokumentation från planering, konstruktion och drift samt intervjuer. Undersökningar i form av oförstörande provning har ingen given roll i detta skedet, men kan styrkan med dagens metoder¹ tydliggöras så kan dessa mycket väl komma att specificeras i den handlingsplan som upprättas till följd av FDU (t.ex. i form av instrumentering för övervakning av kritiska konstruktionsdelar).

Ett angeläget skede där ofp-undersökningar kan komma in är då man i anläggningarna har identifierat ett potentiellt problem av något slag, vilket behöver utredas för säkerhetsbedömning och eventuell åtgärdsplanering. Här finns ett påtagligt behov av återkoppling i form av klara anvisningar och sammanställningar där en beställare kan finna stöd inför en upphandling.

2.4 Framtida förvaltningssystem för betongkonstruktioner

En något annorlunda bild av ett tillsynsprogram för betongkonstruktioner fås då förfarandet studeras utifrån konceptet med förvaltningssystem. Ett sådant system (SA-FEBRO) används inom Vägverket för att styra underhåll och reparationer med avseende på funktion, säkerhet och totalekonomi i kombination med exempelvis styrning på miljö och livscykelkostnad. Motsvarande system skulle kunna tillämpas på

¹ En kvalificering av de konsulter som skall göra undersökningar med ofp-metoder skulle eventuellt kunna vara en väg att uppnå en sådan styrkeverifiering. Motsvarande kvalificering måste konsulter genomgå då ofp-metoder skall användas inom kärnkraftindustrin (gäller dock ej betong idag). Kvalificeringen kontrolleras av det av kärnkraften gemensamt ägda bolaget SQC Kvalitetscentrum AB.

vattenbyggnadsbetong enligt med en möjlig uppbyggnad enligt Figur 2. Systemet i figuren innehåller fyra viktiga grunddelar:

1. tillsyn enligt RIDAS;
2. tillståndsbedömning;
3. fastställande av funktion och livslängdsprognos;
4. val av åtgärdsstrategi,

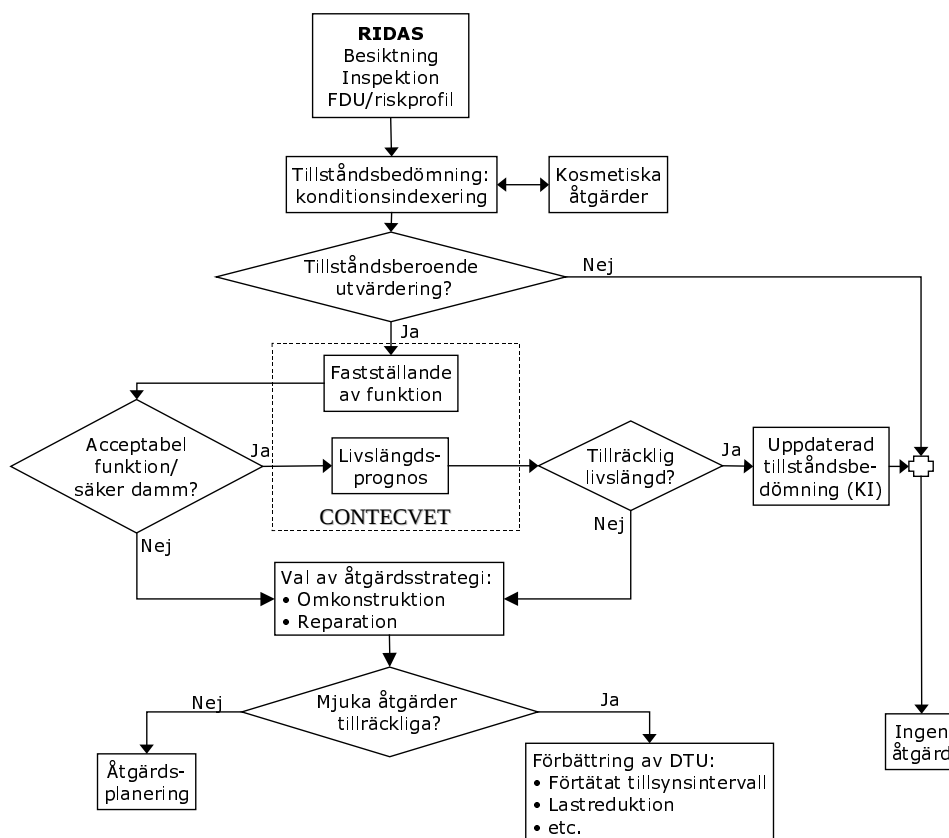
där tillsyn enligt RIDAS utgör ram för själva tillsynsarbetet.

Den andra punkten, *system för att göra tillståndsbedömningar*, har i Sverige utvecklats för bruk inom Vägverket, och har i USA även utvecklats för bruk på dammkonstruktioner [3]. Tillståndsbedömningen innebär i realiteten att särskilda system används för att klassificera skadors art och grad vid periodiska tillståndskontroller. Vidare används system för att bestämma en konstruktions kondition genom att på något sätt indexera skadans betydelse för konstruktionens funktion. En viktig komponent i tillståndsbedömningen är möjligheten till att övervaka utvecklingen av en damms kondition, samt att utgöra underlag för beslut över vilken anläggning eller konstruktionsdel som en ägare skall prioritera för reparation i sin budgetering.

Arbetet inom punkten tre, *fastställande av funktion och upprättande av livslängdsprognos*, kan idag bedrivas utifrån de resultat som framkommit i det nyligen avslutade BRITE/EURAM-projektet: "Värdering av betongkonstruktioners återstående livslängd". Fortsatt arbete pågår för närvarande med att anpassa resultaten från projektet till praktiskt bruk på bl.a. dammkonstruktioner².

Den fjärde och sista punkten, *val av åtgärdsstrategi*, avhandlas inom ett pågående Elforskprojekt. Arbetet baseras på såväl modeller för nedbrytning och resterande livslängd som på alternativa reparationsalternativ, vilka ger olika val av tidpunkt för åtgärd. Stöd tas fram utgående från de erfarenheter som framkommit vid inventering av reparationer på svenska dammar.

² CONTECVET-projektet koordineras i Sverige av Cement och Betonginstitutet (CBI).



Figur 2. Möjlig arbetsgång för ett tillsynsprogram sett utifrån ett perspektiv med ett förvaltningssystem.

I detta synsätt placeras ofp-undersökningar främst in under det skede som omfattar fastställande av funktion och livslängdsprognos (punkt tre enligt ovan). De undersökningar som skall utföras, utöver sedvanliga inspektioner och besiktningar, styrs av den information som en konstruktör behöver för att kunna fastställa konstruktionens nuvarande bärighet. Beroende på problemets art kan det röra sig om stickprov på kritiska konstruktionsdelar eller mer omfattande undersökningar. Vidare kan det röra sig om att ta fram sådan information som en materialvetare behöver för att kunna upprätta en livslängdsprognos.

2.5 Dominerande typskador

Eftersom påfrestningarna på en damm är stor med permanent höga belastningar i form av ensidiga vattentryck, vattenströmningsfenomen (nötning och kavitation) och miljöpåfrestningar (fukt och frost) så skiljer sig skadetyperna till viss del från vad som är fallet med betong i annan infrastruktur (t.ex. kärnkraftverk och broar). Korrosionsskador på armering är mindre vanligt och eftersom förspända konstruktioner saknas så utgör inte heller den typen av skador något problem (flera dammar har dock spänstag ned i berg). Dessutom är betongen i allmänhet inte särskilt hårt armerad. Skadorna kan delas upp i yttre och inre, Tabell 2 [36], eller med avseende på själva betongen eller ingående armering, Tabell 3.

I ett kartläggningsprojekt där den svenska kraftindustrins betongkonstruktioner följts upp med avseende på utförda reparationer och använda reparationsmetoder [5] finns statistik sammanställd över skador som har inträffat. Inventeringen omfattar 200 re-

parationer utförda på 90 anläggningar konstruerade mellan 1903 och 1992, varav flertalet uppförts mellan 1940 och 1970. Merparten av reparationerna har utförts under de senaste 10-15 åren. Resultatet visar att de skadetyper som varit mest frekventa är sådana som är visuellt synliga (avflagnings orsakad av frostangrepp samt läckage och kalkutfällningar orsakade av sprickor), se Tabell 4. En viktig slutsats är således att de flesta reparationer utförs på tydligt utbildade skador (visuellt synbara). Inre skador finns knappt representerad alls – vilket förmodligen beror på den typ av besiktning som utförs (ej ”instrumentbaserad”).

Tabell 2. Typiska skador som kan uppstå i en betongkonstruktion uppdelade på inre och yttre skador.

SKADETYP	INRE SKADA	YTTRE SKADA
Sprickbildning.	Ja	Ja
Avskalning.	Nej	Ja
Krackeleringssprickor.	Nej	Ja
Erosionsskada.	Nej	Ja
Porös betong.	Ja	Ja
Kvalitetsnedsättning till följd av fysikalisk eller kemisk nedbrytning.	Ja	Ja
Hållrum till följd av felaktig gjutning eller kraftig lokal nedbrytning.	Ja	Ja
Inneslutning (refererar till lokal nedbrytning i en konstruktion).	Ja	Nej
Spjälkning och delaminering (spricka parallellt btgn:s yta).	Ja	Nej

Tabell 3. Typiska skador som kan uppstå på en betongkonstruktion uppdelade på ingående material (betong och armering).

BETONGRELATERADE SKADOR	ARMERINGSRELATERADE SKADOR
Betongens homogenitet (större hållrum, inneslutningar av nedbrutet material).	Armeringens läge.
Sprickor i betong: parallellt med betongytan.	Armeringens kondition.
Sprickor i betong: vinkelrätt mot betongytan.	Spännkablars läge.
Betongens fuktighet.	Spännkablars kondition.
Betongens täthet.	
Betongens hållfasthet.	

Tabell 4. Förekommande skador identifierade vid en inventering av 200 betongreparationer på 90 vattenkraftanläggningar [5].

SKADETYP	PROCENTUELL ANDEL [%]	SKADANS ORSAK
Avskalning/betongen släppt från konstruktionen.	32	Frostangrepp; erosion/nötning; urlakning; utförande; erosion; kemiskt angrepp; sprickor; okänd.
Läckage och kalkutfällningar.	25	Sprickor; urlakning; utförande; otät betong; fog; erosion/nötning; ordinär drift; uppnådd livslängd; okänd.
Sprickor.	9,5	Utförande; kemiskt angrepp; urlakning; okänd.
Vittrad betong.	2,5	Urlakning; frostangrepp; utförande.
Vidhäftning.	2,0	Okänd.
Rasrisk.	1,5	Uppnådd livslängd; okänd.
Armeringskorrosion.	Enstaka fall	Utförande.
Okänd.	24	Okänd.

Till följd av det ensidiga tryck som ett vattenmagasin utövar tränger vatten igenom en betongdamm. Det sker långsamt och jämnt fördelat i betongens fina porstruktur. Finns det sprickor som genomkorsar dammkonstruktionen går vattnet huvudsakligen som läckage genom dessa. Vid större genomströmning bryts betongen snabbt ned och ett koncentrerat läckage resulterar i att den intilliggande betongen lakas ut på cement.

Viktiga delar i en betongdamm är gjut- och dilationsfogar där särskilda krav på vattentäthet respektive rörelsemöjlighet föreligger [29]. I [31] sammanfattas att förekomsten av skadad betong i kraftstationer och dammar omfattar såväl mycket stora och grova konstruktioner och konstruktionsdelar som mer begränsade delar och anslutningar. Skadorna är också av mycket varierande storlek och utbredning alltifrån grova sprickor med stor utbredning till materialnedbrytning av t.ex. frost [36].

Statistik från det kartläggningsprojekt som omnämndes i avsnitt 2.6 visar att i stort sett alla konstruktionsdelar på en dammkonstruktion har varit aktuell för reparationer (Tabell 5). Vanligast är emellertid reparationer av utskov samt på och i själva dammen.

Tabell 5. Fördelning av skador på olika konstruktionsdelar baserad på information från en inventering av 200 betongreparationer på 90 vattenkraftanläggningar i Sverige [5].

HUVUDEL	KOMMENTAR	PROCENTUELL ANDEL [%]
Utskov	Framförallt skibord och till dessa angränsande konstruktionsdelar.	21,5
Dammen	Ofta omfattande reparationer av dammen, d.v.s. flera delar av dammen repareras. Även reparationer av horisontella och vertikala ytor på uppströms- och nedströmssidan förekommer.	19,5
Sugrör	Reparationer av hela sugrör (även mindre lagningsarbeten).	9
Kraftstation	Reparation av uppströmsväggen. I andra hand reparationer av ytor till angränsande vattenvägar.	8
Pelare/monolit	Vertikala och horisontella ytor.	8
Övriga vattenvägar	Tilloppstub, spiraltak, samt övriga tunnlar och betongkonstruktioner som angränsar till vattenvägar.	8
Intag	Främst reparationer i anslutning till vattenlinjen.	6,5
Fogar	Fogar i dammen, på skibord, etc.	4,5
Fundament	Framförallt kraftledningsfundament.	4
Angränsande konstruktioner	Övriga konstruktioner som ej tillhör vattenkraften men som ändå är av intresse, t.ex. bergväggar och ställverk.	2,5
Broana	Broana över dammen.	1,5
Tunnlar	Inspektionstunnlar.	Enstaka fall
Ledmur	Horisontella ytor.	Enstaka fall
Stödmur	Horisontella och vertikala ytor.	Enstaka fall
Övergripande reparation	Hela anläggningen och dammen.	Enstaka fall
Betongplugg	-	Enstaka fall
Okända	Ingen uppgift.	2,5

3 Oförstörande provning av betong

3.1 Inledning

Innebörden av begreppet oförstörande provning är uppenbar. Vad som betraktas som regelrätta ofp-metoder beror dock på vilket användningsområde som avses (t.ex. geodetiska, geofysiska samt vissa geotekniska, materialtekniska och kemiska metoder). Exempelvis är geofysiska mätmetoder också oförstörande metoder men geofysiker hänför i regel inte dessa till begreppet ofp. Radar är ett exempel där samma typ av utrustning används i båda fallen. Viss begreppsförvirring råder dessutom: inom geofysiken talar man om ”elektromagnetiska metoder” medan ofp-ingenjörer talar om ”eddy-current methods”:

Oförstörande provning³ kan definieras som (amerikanska marinen):

”NDT encompasses technologies (methods) for determining characteristics about the physical condition of a part of material, without permanently changing it. NDI is the application of nondestructive testing to the inspection of parts, structure, and material to determine condition and/or serviceability. Typical defects and conditions to be detected are those not detectable visually, like fatigue and stress corrosion cracks, inclusions, porosity, delaminations, disbonds, etc.”.

Kontrollmetoder in-situ betong har funnits i bruk under lång tid. En översiktlig beskrivning av dessa återfinns i [36]. Metoderna omfattar visuell kontroll, sprickkartering, rörelsemätning med extensometrar, provborrning, laboratorieanalys etc..

3.2 Användningsområden

Undersökningar av betong med oförstörande provningsmetoder kan göras av flera olika anledningar vilka i regel kan hänföras till något av följande fyra områden:

- Att fastställa en konstruktion/konstruktionsdels utformning (t.ex. att bekräfta överensstämmelse med konstruktionshandlingar).
- Att upptäcka yttre, inre eller begynnande skador i en konstruktion.
- Att karakterisera och kvantifiera redan identifierade skador.
- Att kontrollera genomförda reparationer.

Det ligger en distinkt skillnad i ambitionsnivå mellan att upptäcka en skada och att karakterisera och kvantifiera en skada. I det förra fallet räcker det med att den teknik som används klarar av att identifiera att en skada finns samt att ge ungefärlig information om var skadan finns och hur stor den är. En ofp-metod som skall användas för att karakterisera och kvantifiera en skada bör kunna lämna så pass detaljerad information ifrån sig att en teknisk utvärdering av skadans effekt på konstruktionens säkerhet kan göras. De olika områdena diskuteras vidare nedan.

a. Fastställa en konstruktion/konstruktionsdels utformning

Denna tillämpning fyller en viktig funktion för att ta fram information till en konstruktör/statiker i samband med fastställande av en konstruktions nuvarande bärighet. Speciellt i de fall som en konstruktion saknar dokumentation eller vid misstanke

³ NDT: Non-destructive testing; NDI: Non-destructive inspection.

att den dokumentation som finns är felaktig. Syftet kan vara att:

- Mäta tjocklekar för betongsektioner eller täcksikt.
- Mäta egenskaper hos betong (t.ex. dynamisk E-modul eller relativ vidhäftning).
- Identifiera armering, och att fastställa armeringsmängder, överlappningar och anslutningar. Detta kan även gälla avsaknad av eller felaktigt placerad armering.

Mätningar av denna typ kan även hjälpa materialvetare med sådan information som behövs för att upprätta livslängdsprognoser.

b. Upptäcka yttre, inre eller begynnande skador i en konstruktion

Även detta fall utgör ett viktigt tillämpningsområdet för ofp-undersökningar på betongkonstruktioner inom vattenkraftindustrin. Mätningarna genomförs för att upptäcka konstruktionsfel till följd av brister i utförandet eller för att upptäcka skador som uppstått till följd av nedbrytningsprocesser och åldring.

Brister till följd av felaktigt metodval eller arbetsutförande eller avsaknad av kvalitetskontroll kan visa sig i form av hålrum till följd av bristfällig bearbetning eller sprickbildningar till följd av inre och yttre tvång vid betongens hårdnande. Bristfällig bearbetning påträffas speciellt i anslutning till områden med kraftig armering, vid konstruktionsfogar, bakom beklädnader eller runt om ingjutna detaljer och genomföringar.

Beständighetsproblem kan uppstå till följd av fysiska eller kemiska nedbrytningsprocesser (eller båda delar). För att kunna upptäcka nedbrytningsskador krävs ofp-metoder som med stor noggrannhet och tillförlitlighet kan mäta och övervaka sprickbildning, ytavflagning och delaminering, ytbeläggning, porositets- och permeabilitetsökning, samt minskning i betongs styvhet och hållfasthet.

c. Karakterisering av skador

Utrustning för att karakterisera en skada kan vara baserad på samma tekniker som används för att upptäcka skador men kräver en ökad känslighet (upplösning). I regel råder det dock ett motsatsförhållande genom att en metod som är bra för att upptäcka skador är ej bra på att karakterisera den (och vice versa). I det fall en skada har konstaterats så kan fortsatta undersökningar koncentreras till bestämda partier. Där kan tekniker med hög detaljupplösning vara värdefull. I regel är hög upplösning förknippat med högre areell kostnad för att utföra undersökningen.

Detta tillämpningsområde bör kunna få en ökad betydelse på lite längre sikt.

d. Kontroll av genomförda reparationer

Resultatet av en reparation kan i vissa fall vara svår att bedöma. Det kan t.ex. gälla att följa upp hur väl ett injekteringsbruk har förts ut i en konstruktion vid reparationsinjektering. Det är oklart i vad mån ofp-metoder kan användas för att utvärdera detta kvantitativt men i vissa fall kan en kvalitativ bedömning göras, t.ex. genom att utvärdera ljudhastigheter genom en betongkonstruktion före och efter injektering. Om det går att konstatera att ljudhastigheten har ökat så har reparationen sannolikt varit framgångsrik (kriterier för att avgöra detta finns). Ett annat exempel kan vara att genomföra kontrollmätningar av vidhäftning efter reparationer där ett nytt material gjuts på det skadade materialet.

3.3 Ofp-metoder

Fram tills för några tiotals år sedan fanns få oförstörande provningsmetoder för betong att tillgå kommersiellt. Senare års forskning och utveckling har gjort att situationen förändrats en del och idag finns ett flertal olika metoder kommersialiserade. På nationell eller regional nivå kan det dock fortfarande finnas begränsningar vad gäller tillgänglighet hos mätkonsulter.

Ett antal olika angreppssätt är tänkbara för att finna de fysikaliska förändringar i betongen som uppstår på grund av t.ex. åldrande. En grundläggande indelning kan göras mellan svängningsmätningar där en hel konstruktion sätts i rörelse, vågutbredningsmätningar där materialet i konstruktionen lokalt påverkas, strålningsmätningar där påverkan också är lokal, mätning av värmekonduktivitet hos materialet och mätning av elektriska eller magnetiska fält i konstruktionen. Metoderna har varierande lämplighet för detektering av skador i betongdammar. En del metoder är särskilt lämpliga för kontinuerlig övervakning medan andra kan användas endast vid enstaka mättillfällen. Ett antal befintliga ofp-metoder listas i Tabell 6. En kort beskrivning av flera av metoderna återfinns i Bilaga B.

Fältmässigheten kan variera metoderna emellan, d.v.s. hur pass enkelt som metoderna praktiskt kan användas ute på en anläggning. Fältmässigheten kan också ses som ett mått på hur pass långt man har kommit med arbetet att gå från forskning till exploatering. Bland de krav som kan ställas på mätutrustningen kan nämnas snabbhet, tillförlitlighet, kompakt, robust, låg vikt, vattentät, strömsnål och enkel att hantera. Dessa krav kan många gånger vara oförenliga, men är mycket viktiga faktorer vid användning på de stora och svåråtkomliga konstruktioner som dammanläggningar i många fall utgör.

3.4 Avsökningsmetodik

Flertalet metoder kan användas både för enstaka, yttäckande, och övervakande mätningar. Yttäckande mätningar kan i vissa fall genomföras med hjälp av s.k. skannerteknik varvid en eller flera typer av mätgivare söker av en yta. Skannerteknik kan vara ett effektivt sätt att erhålla mätningar med hög upplösning men ställer också stora krav på noggrann lägesbestämning av mätgivare och hantering av stora datamängder. Ett annat sätt att göra detaljerade mätningar är genom tomografiska mätningar, d.v.s. tekniker som möjliggör att konstruktionen studeras tredimensionellt (skannerteknik utgör en av flera möjliga tekniker för att göra tomografiska mätningar).

Vissa utrustningar är utformade både för mätningar från en yta och för borrhålsmätningar (loggning). Mätning i borrhål medför i regel att detaljeringsgraden (mot djupet) blir bättre. Loggning kan i vissa fall den enda praktiska metod som går att använda, t.ex. för pelare vars sidor är svåra att komma till.

Skannerteknik

Teknik finns utvecklad för skannermätningar med radar där antennen flyttas kontinuerligt längs linjer i ett rutnät [31] samt [37]. Detta förfarande ger en beskrivning av hela volymen under betongytan där alla långsträckta objekt kommer kunna att avbildas. Det blir också möjligt att bedöma de reflekterade horisonternas eventuella lutning. De försök som gjorts lider ännu av att det tar lång tid att genomföra avsökning av en någorlunda stor yta.

Skannertekniken möjliggör även att andra typer av mätgivare hakas på avsökningshuvudet, t.ex. en magnetometer (gradiometer) eller akustiska givare. För den senare typen, d.v.s. sådana mätgivare där det är nödvändigt att upprätta en fysisk kontakt med betongytan vid varje enskild mätning, så kommer mättiderna att öka ytterligare (jämfört med t.ex. skanner med radarantenn).

Metodöversikten i Tabell 6 innehåller en referens till radarskanner. Att endast denna typ av skanner ingår i genomgången i Kapitel 4 beror på att det i detta fallet finns erfarenhet i Sverige från både mätningar i fält och i laboratorium. Generellt gäller att kapaciteten för flertalet av metoderna i Tabell 6 ökar om de används tillsammans med en skanner men eftersom erfarenheterna fortfarande är begränsade inom området så lämnas detta därhän.

Tabell 6. Sammanställning av ofp-metoder som kan användas för undersökningar av betongkonstruktioner. Beroende på metodutförande och vilken typ av mätutrustning som används skapas ett flertal undersökningsmetoder som har sin grund i samma fysikaliska grundprincip. I vissa fall har den engelska metodbenämningen använts där en bra svensk översättning saknas.

	Metod	Beteckning	Fysikalisk princip	Täckning
Akustiska/dynamiska/seismiska	Ultrasonic Pulse Velocity	UPV	Direkt trm. (vanl.)	1, 2D
	Ultrasonic Pulse Echo	UPE	Eko	1, 2D
	Sonic tomography	ST	Direkt/semidirekt trm.	2, 3D
	Impact-eko	IE	Eko	1, 2D
	Impulsrespons	IR	Eko	1, 2D
	Ytvågsseismik	SASW	Ytgående vågor	1, 2D
	Experimentell modanalys	EMA	Dynamisk mätning	2, 3D
	Akustisk emission	AE	Passiv mätning	1, 2, 3D
Elektro-magnetiska				
	Georadar	GPR	Ekon	1, 2, 3D
	Radarskanner		Ekon	1, 2, 3D
	Time Domain Reflectometry	TDR	Ekon	1, 2D
Elektriska				
	Självpotential	SP	Mätn. av elektriskt fält	1, 2D
	Resistivitet	–	Yttransmission (vanl.)	1, 2, 3D
	Galvanostatisk puls	–		1, 2, 3D ?
Radioaktiva				
	Gammagrafi	–	Radioaktiv strålning	1, 2, 3D
	Radiografi	–	Radioaktiv strålning	1, 2, 3D
	Radioskopi	–	Radioaktiv strålning	1, 2, 3D
Magnetiska				
	Magnetoflux	–	Mätn. av magnetfält	1, 2D
	Magnetometer	–	Mätn. av magnetfält	1, 2D
Termiska				
	Termografering	T	Mätn. av temperatur	2D

3.5 Inverkan av yttre faktorer

Då en ofp-metod skall väljas så är det förutom typ av skada viktigt att känna till omständigheter som kan komma att påverka möjligheten till att genomföra en undersökning med bra resultat, t.ex. den skadade konstruktionsdelens åtkomlighet. En svåråtkomlig konstruktionsdel kan medföra att indirekta mätningar behöver göras, till exempel radarmätningar på fundament som ligger dolda av jordmaterial eller undersökningar på konstruktionsdelar under vatten. Några exempel på yttre faktorer diskuteras nedan.

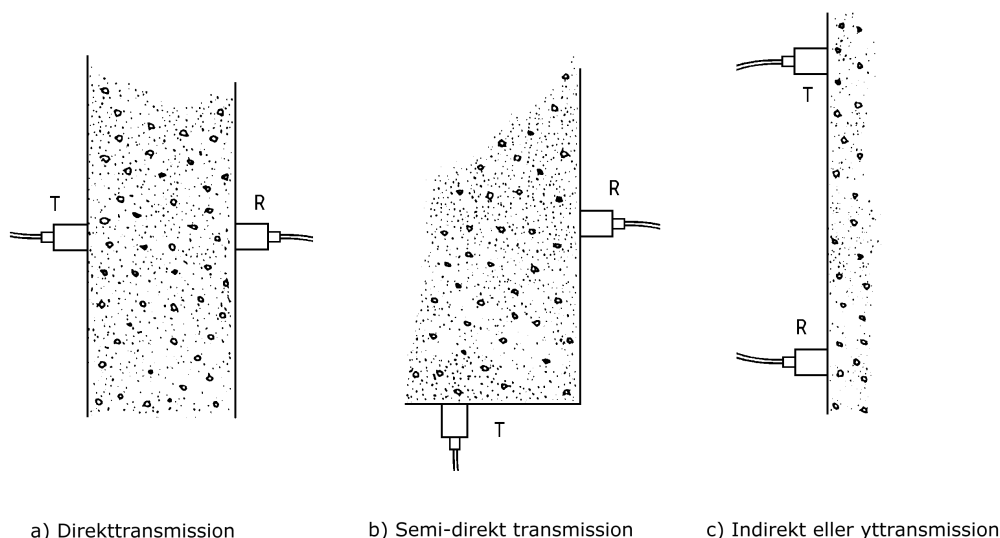
a. Konstruktionens tjocklek

Betongkonstruktioner i vattenkraftanläggningar är ofta grova med tjocklekar som vanligtvis är större än 1 m. Eftersom dagens ofp-metoder fungerar bäst på tunna betongsektioner (< 1 m) så finns det begränsningar i antalet möjliga tillämpningar,

speciellt då det gäller att upptäcka detaljer och skador med liten utbredning på stora djup.

b. Geometriska begränsningar

Konstruktionens tillgänglighet och skadornas läge har en avgörande betydelse på den mätuppläggning som väljs, se Figur 3. Mätningar rakt igenom en konstruktion där två sidor är tillgängliga ger goda möjligheter att hitta och lägesbestämma defekter. Mätningar från ena sidan av en konstruktion kan också i många fall ge goda möjligheter till lokalisering av defekter [38].



Figur 3. Exempel på möjliga metoder att göra placera givare (T = sändare; R = mottagare) på konstruktionsdelar. Efter [8].

c. Över eller under vatten

Att utföra en inspektion av en betongkonstruktion som befinner sig under vatten är ett betydligt mer komplext arbete än att utföra motsvarande arbeten över vatten. Sakkunnig personal är sällan tillgänglig som både kan utföra ett professionellt undervattensarbete och som samtidigt är expert på skadebedömning och det är därför besvärligt att ta fram bra utvärderingsunderlag. Analogt med detta visar sig ett allmänt dåligt och/eller eftersatt underhåll speciellt i form av skador på de delar av betongkonstruktionerna som befinner sig under vatten.

Tillämpning av ofp-metoder under vatten ställer krav på att utrustningen tål vatten under tryck. Möjlighet kan finnas att haka på utrustningen på undervattensfarkoster för fjärrstyrning. I annat fall kan undersökningen behöva utföras av en dykare.

Vid en detaljerad inspektion krävs i allmänhet att de betongytor som skall undersökas rengörs (betongen kan vara dold av växtlighet eller sediment). Ytterligare en svårighet vid undersökningar under vatten är att det kan vara besvärligt att knyta lägesinformation till gjorda observationer.

d. Armering

Mängden armering och dess läge i en betongkonstruktion inverkar på möjligheten till att genomföra ofp-undersökningar. Dels kan det vara svårt att skilja ut individuella armeringsjärn och hur dessa ligger i betongen, dels kan själva närvaron av metall göra det svårt att med tillförlitlighet upptäcka skador som finns i betongen. I vissa fall, t.ex. UPV, finns det då läget för armering är känt möjlighet att kompensera för närvaro av armering [8].

e. Råheten hos betongens ytor

Kvaliteten på akustiska mätningar är ofta direkt kopplad till att en god (akustisk) koppling kan åstadkommas mellan betong och sökare, d.v.s. beskaffenheten hos betongkonstruktionens ytor är av betydelse. För akustiska metoder så kan de råa ytorna på en brädformad konstruktion eller hos en konstruktion med avskalning behöva slipas eller spacklas i mätpunkterna [38]. Detta medför ett påtagligt extraarbete i fält, vilket fördyrar undersökningen.

Kopplingen mellan givare och betong har även stor betydelse vid elektriska mätningar. Det är då av stor vikt att man har övergångsmotståndet under kontroll – i annat fall finns det en uppenbar risk för att operatören introducerar bias i mätresultaten.

f. Betongens sammansättning.

Betong med stor ballaststorlek eller betong med sparsten försvårar möjligheten till att identifiera skador.

g. Fuktinnehåll.

I det fall som fuktinnehåll inte är den avvikelser som eftersökts så kan närvaro av fukt inverka negativt på mätningens resultat och förmågan att detektera defekter [38].

h. Inklädning.

En inklädning med stål eller sten förhindrar direktkontakt med betongytan. Inklädningen blir en barriär som försvårar möjligheterna till att detektera avvikelser i den bakomliggande betongen.

i. Lägesbestämning

Det är viktigt att mätmetoder möjliggör noggrann koppling av mätresultat mot läge i konstruktionen. I vissa fall utgör lägesbestämningen viktig information då mätdata skall tolkas. I vilket fall som helst måste avvikelser kunna identifieras för eventuell provtagning med förstörande tekniker och för att kunna göra ett riktigt val av åtgärd.

4 Bedömning av mätmetoder

4.1 Inledning

I detta kapitel görs en kvalitativ bedömning av 11 ofp-metoders lämplighet för undersökningar på olika typer av skadefall på betong i kraftanläggningar samt för reparationsuppföljning och tjockleksmätning. Varje fall avhandlas i en tabell som sammanfattar problemet, identifierar lämpliga undersökningsmetoder och ger en viktad kvalitativ bedömning av metoderna i form av ett betyg (låg, medel respektive hög lämplighet). Bedömningen grundar sig på de diskussioner som fördes i workshopen i Lund november 1998.

De 5 olika typer av skadefall som avhandlas är:

- Mätning av sprickor (2 problemställningar): Tabell 13
- Mätning av spjälkning och delaminering (2 problemställningar): Tabell 14
- Mätning av hålrum och inneslutningar (3 problemställningar): Tabell 15
- Uppföljning av utförda reparationer (2 problemställningar): Tabell 16
- Mätning av betongtjocklek (2 problemställningar): Tabell 17

4.2 Utvärderingsmetodik

Tabellerna i nästa avsnitt tar upp möjliga tillämpningar för existerande ofp-metoder på betong i kraftanläggningar⁴ (d.v.s. företrädesvis tjänster som går att beställa av mätkonsulter i Sverige i dag). Den bedömning som presenteras i form av en trebetygsskala (hög, medelgod, och låg lämplighet) grundar sig på hur väl metoderna uppfyller vissa specifika kriterier (fet bokstav hänför sig till Ekvation 1 nedan):

1. **L**ämplighet för problemställningen.
2. **G**eometrisk upplösning.
3. Krav på betongens **Y**ta.
4. **K**änslighet för närvaro av **A**rmering.

För punkterna 1-4 görs poängbedömningar där sämsta poäng är noll och högsta poäng är 3. Förutom de punkter som poängbedöms så görs en notering om ytterligare 5 miljörelaterade kriterier (**MK**) vilka dock inte poängbedöms:

- Krav på åtkomlighet.
- Möjlighet till att använda under vatten.
- Eventuella begränsningar vad gäller betongens sammansättning.
- Eventuella begränsningar vad gäller inklädning (sten eller stål).

Den sammanvägda bedömningen görs därefter utifrån medelvärdet för poängsättningen i punkterna 1 till 4 och övriga noteringar (se Tabell 12). I princip görs sålunda den sammanvägda bedömningen (**SB**) enligt:

$$SB = \frac{1}{4}(L + G + Y + A) + f(MK) \quad (\text{Ekvation 1})$$

Beteckningar enligt ovan (fet stil). Alla delmoment redovisas i formulär i Bilaga D.

⁴ Ett likartat tillvägagångssätt har använts i en utvärdering genomförd av OECD [20], samt i en motsvarande bedömning av metoder för jorddammskonstruktioner [16].

Denna sammanvägda bedömning syftar till att visa vad som är möjligt att göra idag och baseras på synpunkter från experter på både beställar- och utförarsidan (i vissa fall hänför sig bedömningen till resultat som presenterats i artiklar och andra publikationer). Motiveringar återfinns likaledes i metodbeskrivningarna i Bilaga B. Bedömningen grundas på hur väl metoderna uppfyller följande aspekter:

- Hur väl den enskilda metoden är anpassad för specifika problemställningar - (Tabell 7). Som nämnts tidigare kan metoderna täcka in olika nivåer av kontroll, från enbart detektering av skada till lokalisering samt bestämning av utbredning och slutligen en fullständig identifiering av skadetyper och grad av skada. Val av metod beror till viss del av den typ av information som är önskvärd.
- Geometrisk upplösning (Tabell 8).
- Hur pass väl den enskilda metoden klarar av att möta yttre begränsande faktorer i ytans råhet (Tabell 9) och armering (Tabell 10).

En ej betygsatt bedömning i form av "potential finns" (PF) har gjorts för sådana metoder där erfarenheten för vissa problemställningar än så länge är begränsad.

De betongtjocklekar (tunna, medelgrova eller grova) som metoderna klarar av kommenteras. Indelningen i respektive klass görs enligt Tabell 11. Förutom detta kommenteras i viss utsträckning vad framtida förbättringar till följd av FoU kan innebära.

Tabell 7. Metodernas lämplighet för problemställningen. (Om inte annat motiveras används den lägre poängen i angivet intervall).

METODERNAS LÄMPLIGHET	POÄNG
Olämplig	$0 \leq L < 0.5$
Möjlig	$0.5 \leq L < 1.25$
Lämplig	$1.25 \leq L < 1.75$
Mycket Lämplig	$1.75 \leq L \leq 2.0$

Tabell 8. Metodernas geometriska upplösning. (Om inte annat motiveras används den lägre poängen i angivet intervall).

GEOMETRISK UPPLÖSNING	POÄNG
Dålig	$0 \leq G < 0.5$
Acceptabel	$0.5 \leq G < 1.25$
God	$1.25 \leq G < 1.75$
Mycket god	$1.75 \leq G \leq 2.0$

Tabell 9. Metodernas krav på betongens yta (finish). (Om inte annat motiveras används den lägre poängen i angivet intervall).

BETONGENS Y TA	POÄNG
Fullgod betong	$0 \leq Y < 0.5$
Ytbelagd/Målad	$0.5 \leq Y < 1.25$
Något vittrad	$1.25 \leq Y < 1.75$
Rå/brädformad	$1.75 \leq Y \leq 2.0$

Tabell 10. Inverkan av armering. (Om inte annat motiveras används den lägre poängen i angivet intervall).

INVERKAN AV A RMERING	POÄNG
Mycket tydlig	$0 \leq A < 0.5$
Tydlig	$0.5 \leq A < 1.25$
Mätbar	$1.25 \leq A < 1.75$
Obetydlig	$1.75 \leq A \leq 2.0$

Tabell 11. Indelning av konstruktionsdelar efter grovlek.

KONSTRUKTIONSDELAR	GROVLEK
Tunna (T)	$< 1.0 \text{ m.}$
Medelgrova (MG)	$1.0 \leq X \leq 2.5 \text{ m.}$
Grova (G)	$> 2.5 \text{ m.}$

Tabell 12. Bedömningarna i Tabell 13 – 17 grundar sig på följande poängintervall (resultatet från Formel 4.1).

BETYG	SB
Låg lämplighet (L)	< 1.0
Medelgod lämplighet (M)	$1.0 \leq X \leq 1.5$
Hög lämplighet (G)	$> 1.5 \text{ m.}$
Potential Finns (PF)	Ingen betygsättning

4.3 Resultat

Problem 1-2: Mätning av öppna sprickor

Tabell 13. Inre och yttre skada: Öppna sprickor orsakade av t.ex. frost, temperaturdifferenser eller höga laster. Bedömningsunderlaget återfinns i Bilaga D.

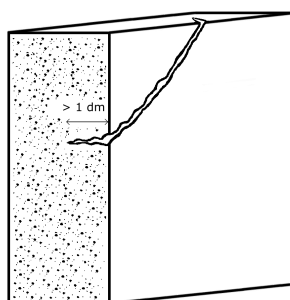
Tillämpning: Mätning av öppna sprickor (sprickdjup).								
Problem:	Metoder som störst	Tjocklek			Bedömning			
		T	MG	G	L	M	H	PF
1. Direkt: mätning av vertikal spricka, sprickdjup > 1 dm.	Ultrasonic Pulse Velocity	×	×	×		√		
	Impact Echo	×	×	×		√		
	Ytvågsseismik	×	×	×		√		
	Ultrasonic Pulse-Echo							√
	Akustisk Emission (vid utbildandet)							√
2. Indirekt: mätning av läckage genom sprickor.	Termografering							√
	Akustisk Emission							√

Tunn (T), Medelgrov (MG), Grov (G), Låg lämplighet (L), Medelgod lämplighet (M), Hög lämplighet (H), Potential Finns (PF).

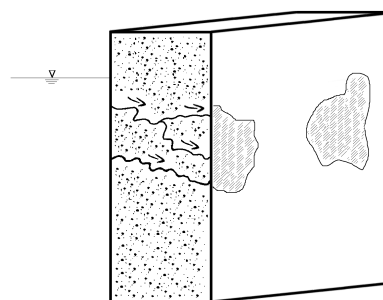
Kommentarer (FoU eller annat):

Problem 1. Pågående vidareutveckling av Impact-Echo-metoden visar att det finns möjlighet till att mäta sprickdjup genom att vid utvärdering använda s.k. "time-of-flight"-teknik. Modifieringen medför en betydligt förbättrad möjlighet till att bestämma djupet av vertikala luft- och vattenfyllda sprickor. Även djupet av öppna lutande och kurviga sprickor kan bestämmas (dock med en något sämre noggrannhet [26]).

Problem 2. Bedömningen för Akustisk Emission härstammar från resultat av [14], [22] och [24].



Problem 1. Öppna sprickor vars djup antras vara större än 1 dm.



Problem 2. Fukt tränger in genom otätheter på uppströmssidan och rör sig vidare genom konstruktionen.

Problem 3-4: Mätning av spjälkning och delaminering

Tabell 14. Inre skada: Spjälkning och delaminering orsakade av t.ex. armeringskorrosion eller dålig vidhäftning.

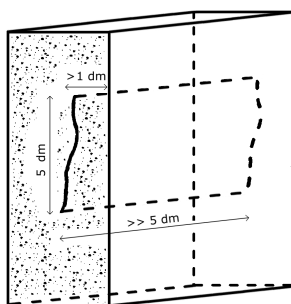
Tillämpning:		Mätning av spjälkning och delaminering. (Skada både nära och på avstånd från betongytan)						
Problem:	Metoder som erbjuder störst möjligheter	Tjocklek			Bedömning			
		T	MG	G	L	M	H	PF
3. Mätning av spricka parallellt med betongens yta. Utbredning > 0.5 m.	Ultrasonic Pulse Echo	×	×			√		
	Impact Echo	×	×				√	
	Ytvägsseismik	×	×			√		
	Radar	×	×	×		√		
	Radarscanner	×	×			√		
4. Mätning av nedbruten betong i anslutning till avskalning.	Ultrasonic Pulse Velocity							√
	Impact Echo	×	×			√		
	Ytvägsseismik	×	×	×			√	
	Radar	×	×	×		√		
	Resistivitet	×	×	×		√		

Tunn (T), Medelgrov (MG), Grov (G), Låg lämplighet (L), Medelgod lämplighet (M), Hög lämplighet (H), Potential Finns (PF).

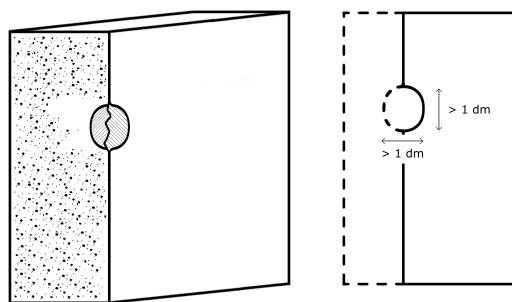
Kommentarer (FoU eller annat):

Problem 3. Impact-Echo är den bästa metoden för problemet ner till ca. 1-1.5 dm. Ultrasonic Pulse-Echo är speciellt lämplig i de fall det finns ett naturligt botteneko mot luft.

Problem 4. Bedömningen för Ultrasonic Pulse Velocity härstammar från resultat av [40].



Problem 3. Sprickan antas ligga på ett djup större än 1 dm. Utbredningen i sidled är stor den ena riktningen och minst 5 dm i den andra riktningen.



Problem 4. Området med nedbruten betong ligger bakom en yta som uppvisar avskalnings-skador. Alla dimensioner för skadans utbredning antas vara större än 1 dm.

Problem 5-7: Mätning av hålrum och inneslutningar

Tabell 15. Inre skada: Hålrum och inneslutningar orsakade av t.ex. urlakning eller dålig bearbetning vid gjutning.

Tillämpning:		Mätning av hålrum och inneslutningar. (Skada både nära och på avstånd från betongytan)						
Problem:	Metoder som erbjuder störst möjligheter	Tjocklek			Bedömning			
		T	MG	G	L	M	H	PF
5. Mätning av luftfyllt hålrum.	Impact Echo	x	x	x		√		
	Ytvågsseismik	x	x	x		√		
	Radar	x	x	x		√		
	Högenergiröntgen	x				√		
	Ultrasonic Pulse Echo							√
6. Mätning av vattenfyllt hålrum.	Impact Echo	x	x	x		√		
	Ytvågsseismik	x	x	x		√		
	Radar	x	x	x		√		
	Högenergiröntgen	x					√	
	Ultrasonic Pulse Echo							√
7. Mätning av område i en betongkonstruktion med förändrade egenskaper, t.ex. våta zoner.	Impact Echo	x	x			√		
	Ytvågsseismik	x	x			√		
	Radarscanner	x	x				√	
	Resistivitet	x	x		√			
	Termografering	x				√		

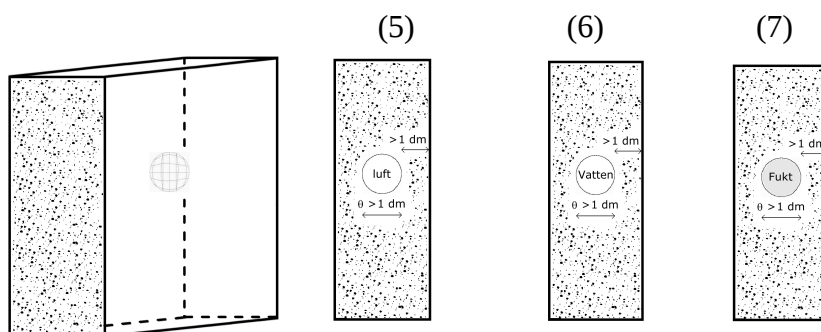
Tunn (T), Medelgrov (MG), Grov (G), Låg lämplighet (L), Medelgod lämplighet (M), Hög lämplighet (H), Potential Finns (PF).

Kommentarer (FoU eller annat):

Problem 5. Radar kan bestämma djup till skadan från ytan, men klarar sannolikt inte att ge diameter ur reflex i luften i hålrummet. Impact Echo ger endast information om djup – ej att det är frågan om en sfär. Bedömningen för Ultrasonic Pulse-Echo härstammar från resultat från [16] och [18].

Problem 6. Bedömningen för UPE härstammar från resultat från [16] och [18]

Problem 7. Ytvågsseismik har visat sig fungera speciellt bra vid detektion av porösa områden i anslutning till gjutfog.



Problem 5-6. Sfäriskt luft/vattenfyllt hålrum inneslutet i konstruktionen på ett djup > 1 dm. Sfärens diameter antas vara större än 1 dm.

Problem 7. Område med egenskaper som skiljer sig från konstruktionen i övrigt, t.ex. genom fuktansamling. Området (en sfär) antas ligga på ett djup > 1 dm. Sfärens diameter antas vara > 1 dm.

Problem 8-9: Uppföljning av utförda reparationer

Tabell 16. Uppföljning av utförda reparationer.

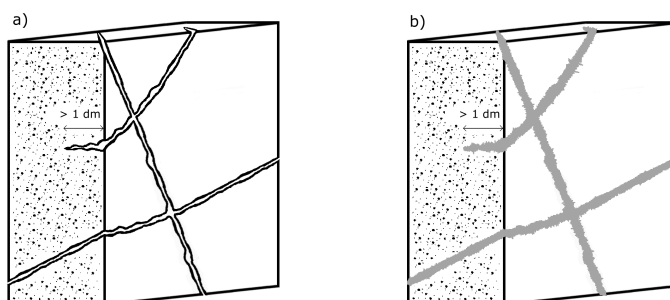
Tillämpning: Uppföljning av utförda reparationer.								
Problem:	Metoder som erbjuder störst möjligheter	Tjocklek			Bedömning			
		T	MG	G	L	M	H	PF
8. Inträngning av injekteringsbruk.	Ultrasonic Pulse Velocity							✓
	IE + AE + ST							✓
	Radarskanner							✓
	Ytvågsseismik							✓
	Högenergiröntgen							✓
9. Effekt av tätning på uppströmssidan av en damm.	Se problem 2							

Tunn (T), Medelgrov (MG), Grov (G), Låg lämplighet (L), Medelgod lämplighet (M), Hög lämplighet (H), Potential Finns (PF).

Kommentarer (FoU eller annat):

Problem 8. Tillämpningen är inte att betrakta som färdigutvecklad. Potential finns för vissa metoder, speciellt om de används i kombination. Tillämpning med IE + AE + ST har utförts av [24], där Impact Echo används för att karakterisera sprickan, Akustisk Emission för att följa injekteringsförloppet och Sonic Tomography för att utvärdera injekteringsbrukets utfyllnad. I övrigt kan det finnas potential för att använda:

- Radarskanner. Kan eventuellt användas för att hitta bruket efter injektering [39].
- Akustiska metoder. Impact Echo hittar sprickor. En utvärdering av ett injekteringsbruks utfyllnad grundar sig på att sprickresponsen försvinner i det fall sprickan blir återfylld. UPV jämför ultraljudshastigheten i betongen före respektive efter reparation;
- Röntgen. Metoden kan registrera utfyllnad av hål. Utfyllnad av sprickor svårare.
- Ytvågsseismik. Kvaliteten på sprickreparation (ej injektering) har utvärderats med ytvågsseismik av [7].



Problem 8. Betong med öppna sprickor (a) som skall repareras med hjälp av injektering. Mätningar genomförs före injektering och följs upp efter injektering (b). Eventuellt görs även mätningar under själva injekteringsarbetet.

Problem 10-11: Mätning av betongtjocklek

Tabell 17. Mätning av betongtjocklek.

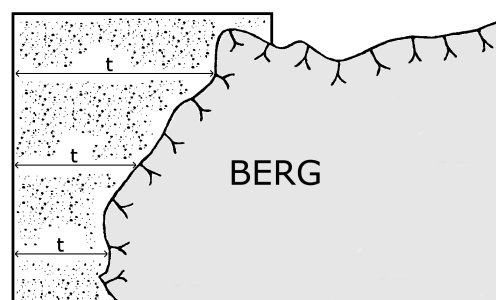
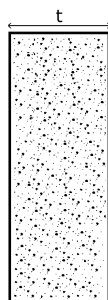
Tillämpning: Mätning av betongtjocklek.								
Problem:	Metoder som erbjuder störst möjligheter	Tjocklek			Bedömning			
		T	MG	G	L	M	H	PF
10. Mätning av tjocklek.	Impact Echo	x	x				√	
	Ytvågsseismik	x	x	x			√	
	Radar	x	x	x		√		
	Ultrasonic Pulse-Echo	x	x					√
11. Mätning av tjocklek för motgjuten betong.	Impact Echo	x	x				√	
	Ytvågsseismik	x	x	x			√	
	Radar	x	x	x		√		
	Ultrasonic Pulse-Echo	x	x					√

Tunn (T), Medelgrov (MG), Grov (G), Låg lämplighet (L), Medelgod lämplighet (M), Hög lämplighet (H), Potential Finns (PF).

Kommentarer (FoU eller annat):

Problem 10. Ytvågsseismik kan få problem vid grova konstruktioner i och med att den yta som behöver täckas med mätningar ökar samtidigt med mät-djupet. Georadars djupbestämning baseras på mätningar med succes-sivt ökande antennseparationsavstånd. Bedömningen för Ultrasonic Pulse Echo härstammar från resultat från [16], [18] och [19].

Problem 11. Bedömningen för Ultrasonic Pulse Echo härstammar från resultat från [16], [18] och [19].



Problem 10. Tjockleksbestämning av balk, vägg eller liknande.

Problem 11. Tjockleksbestämning av betong gjuten mot berg

4.4 Ekonomi

Marknaden för ofp-undersökningar har varit, och är fortfarande, liten. Detta medför att möjligheten till forskning och utveckling inom området hittills varit små samt att det har varit svårt att få en god ekonomi i att erbjuda ofp-undersökningar. Av betydelse för kostnadsbilden är främst de personella resurser som krävs samt den tid det tar att utföra och sammanställa resultaten från en undersökning. Fortsatt forskning och utveckling inriktar sig därför bl. a. på att korta ner mättider, förenkla handhavandet i fält, samt att automatisera tolkningsarbetet och presentationen av mätresultat.

En ökad automatisering av tolkningsarbetet medför troligtvis kostnadsbesparingar för en ägare av konstruktioner. Denne är inte behjälpt av att situationer uppstår där olika individer kan tolka in olika skadebilder i mätdata. I det fall som tveksamheter uppstår så behöver dessa i regel följas upp med nya undersökningar, vilket tenderar att bli mycket kostsamt.

I ett internationellt perspektiv förekommer diskussioner om införandet av myndighetskrav på provning inom vissa områden. Konsulter skulle då ha bättre möjligheter till att utveckla sin verksamhet. Från ägarnas sida är man inte förmodligen inte lika angelägen om en sådan utveckling eftersom kostnaderna för underhållsverksamheten åtminstone på kort sikt kommer att öka. En medelväg skulle kunna vara, som redan har nämnts, att konsulter genom att kvalificera sig för en viss metod skulle kunna erbjuda en kvalitetsgaranti varvid ägaren också vet vad han köper. Kvalificeringen skulle t.ex. kunna utformas på ett sådant sätt att konsulten visar med sina mätmetoder att de kan hitta simulerade skador på någon form av standardiserade betongprovkroppar.

4.5 Metodernas potential för övervakning

Potentialen för övervakning med ofp-metoder är stor. En av de viktigaste fördelarna som uppnås vid övervakning är möjligheten till att upptäcka trender i för konstruktionen viktiga parametrar.

5 Slutsatser

Utvecklingen av oförstörande provningsmetoder har resulterat i ett flertal kommersiellt tillgängliga utrustningar som kan användas för undersökning av betongkonstruktioner. För vissa av dem så har utvecklingen varit specifikt inriktad mot materialet betong, t.ex. impact-echo, medan för andra så har det primära användningsområdet varit andra tillämpningar, t.ex. hydrogeologiska radarmätningar eller geotekniska SASW-mätningar. Intresset för betongområdet har emellertid ökat i och med att åldern på anläggningsbeståndet runt om i världen blir allt högre. Riktade utvecklingsinsatser för att förbättrade ofp-metoder för betongundersökningar börjar därför synas alltmer. Utvecklingstakten hämmas emellertid av att marknaden för denna typ av undersökningar fortfarande är begränsad.

Materialet rapporten redovisar om kapaciteten för sådana metoder som finns att tillgå på den skandinaviska marknaden, och utgör en bra översikt av metodernas kapacitet för ett antal olika problemställningar med fokus på vattenkraftindustrin. För vissa av problemställningarna finns det ett flertal möjliga metoder att tillgå, medan det för andra finns betydligt färre.

Bland de metoder som har fått högst betyg av deltagarna i workshopen återfinns impact echo och ytvågsseismik (spjälkning och delaminering), ultraljudspulseko, högenenergiröntgen och radarskanner (mätningar av olika typer av hålrum och inneslutningar), och impact echo, ytvågsseismik (mätning av betongtjocklek). Betygen skall dock ses i perspektivet att varje problemställning i praktiken är unik. Det finns alltid yttre miljöfaktorer som påverkar hur bra det går att använda en viss metod. Det bästa angreppssättet är i många fall att använda två eller flera metoder vid en undersökning. Därigenom kan olika mätresultat jämföras och tolkningar kan göras med större säkerhet.

Fortsatt arbete inom området bör inriktas mot att genomföra demonstrationsmätningar med ofp-metoder, där genomförande kan följas upp och erfarenheter återkopplas till fortsatt forskning och utveckling.

6 Referenser

- [1] Andradé, C., Alonso, C. och Goñi, S. (1993). Possibilities for electrical resistivity to universally characterize mass transport processes in concrete, i *Concrete 2000*, Ed. R. K. Dhir och M. R. Jones, ISBN 0 419 18120 2, s. 1639 – 1652.
- [2] Bartsch, M. (1997). *Risikanalyt i dammsäkerhetsarbetet*, VASO dammkommittés rapport nr. 26, ISSN 1400-7827, 25 s.
- [3] Bernstone C (1998). *Kunskapsåterföring på betongområdet från det amerikanska REMR-programmet*, Elforskrapport 98:33, 79 p.
- [4] Berntsson, S., Sandell, J.-E. och Wiberg, U. (1998). Experiences gained at Vattenfall from safety evaluations of dams, i *Dam Safety - Procs. of the international symposium on new trends and guidelines on dam safety*, Barcelona, Spanien 17-19 juni, ISBN 90 5410 975 0, s. 105 – 112.
- [5] Björkenstam, E. (1999). *Inventering av betongreparationer på svenska vattenkraftanläggningar*, Elforskrapport 99:1B.
- [6] Bordes, J-L., Capelle, J-F och Choquet, P. (1998). *Dam monitoring and instrumentation*, ISBN 2 9805841 1 8, ROCTEST Ltd., Canada, 47 s.
- [7] Bowen, B. R. och Stokoe II, K. H. (1992). Evaluation of cracked and repaired beams and columns using surface stress waves, i *Proc. Earth quake engineering – 10th world conference*, ISBN 90 5410 060 5, s. 2713 – 2718.
- [8] BSI (1986). *British standard: Testing concrete – recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete*, Part 203, British standards institution, 16 s.
- [9] Bungey, J. H. (1989). *Testing of concrete in structures*, Chapman and Hall, New York.
- [10] Bungey, J. H., Millard, S. G. och Shaw, M. R. (1994). The influence of reinforcing steel on radar surveys of concrete structures, *Construction and Building Materials*, vol. 8, nr. 2, s. 119 – 126.
- [11] CEN (1998). *Testing concrete – Determination of ultrasonic pulse velocity*, European committee for standardization, Draft prEN 13296, Bryssel, 10 s.
- [12] Elkey, W. och Sellevold, E. J. (1995). *Electrical resistivity of concrete*, Norwegian Public Roads Administration, Publication 80, ISSN 0803-6950, 33 s.
- [13] Hammar, L. (okänd datering). *Digital röntgen*, PM SAQ Kontroll AB, 6 s.
- [14] Hearn, S. och Shield, C. K. (1997). Acoustic emission monitoring as a non-destructive testing technique in reinforcing concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 94, Nr. 6, s. 510 – 519.
- [15] Hobbs, C. Kenway-Jackson, D. och Milne, J. (1991). Quantitative measurement of thermal parameters over large areas using pulse video thermography, Proceedings reprint from Thermosense XIII, Florida 3-5 april 1991, SPIE Vol. 1467, s. 264-277

-
- [16] Jansohn, R., Kroggel, O. och Ratmann, M., (1997). Detection of thickness, voids, honeycombs and tendon ducts utilizing ultrasonic-impulse-echo-technique, i *Proc. International symposium non-destructive testing in civil engineering*, augusti 1995, Berlin, 7 s.
- [17] Johansson, S., Bartsch, M., Landin, O., Barmen, G., Dahlin, T. och Ulriksen, P. (1995). Nyare metoder för tillståndskontroll av fyllningsdammar, VASO dammkommittés rapport nr 21, 71 s.
- [18] Krause, M. och Wiggenhauser, H. (1997). Ultrasonic pulse echo technique for concrete elements using synthetic aperture, i *Proc. UT online application workshop*, maj 1997, 8 s.
- [19] Krause, M., Maierhofer, C., Wiggenhauser, H., Bärmann, O., Langenberg, K., Frielinghaus, R., Krautkrämer, K., Neisecke, J., Wollbold, F. och Schickert, M. (1997). Comparison of pulse-echo-methods for testing concrete, ultrasonic pulse echo technique for concrete elements using synthetic aperture, i *Proc. International symposium non-destructive testing in civil engineering*, augusti 1995, Berlin, 12 s.
- [20] Landis, E., Peterson, M., Sellek, S., Shah, S., Li, Z., Zdunek, A. och Prine, D. (1994). *Developments in NDE of concrete*, ITT report, Infrastructure Technology Institute, Northwestern University, 6 s.
- [21] OECD Nuclear Energy Agency (1998). *Development priorities for non-destructive examination of concrete structures in nuclear plant*, Report NEA/CSNI/R(98)6, 62 s.
- [22] Ohtsu, M., Okamoto, T., och Yuyama, S. (1998). Moment tensor analysis of acoustic emission for cracking mechanisms in concrete, *ACI Structural Journal*, mars-april, s. 97-95.
- [23] Olson, L. D., Wright, C. (1990). Nondestructive testing for repair and rehabilitation, *Concrete International*, mars, s. 58 – 64.
- [24] Saleh, K., Hassani, F. P., Guevremont, P., Sadri, A., Lapointe, R., Ballivy, G., Rhazi, J. och Kharrat, Y. (1999). Three seismic nondestructive methods used to monitor concrete slab injection tests, *Pure and Applied Geophysics*, vol. 150, nr. 3-4, s. 605 – 625.
- [25] Sansalone, M. (1986). *Impact-Echo: A method for flaw detection in concrete using transient stress waves*, US department of commerce, Gaithersburg, NBSIR 86-3452, s. 58 – 64.
- [26] Sansalone, M., Lin, J-M. och Streett, W. B. (1998). Determining the depth of surface-opening cracks using impact-generated stress waves and time-of-flight technique, *ACI Materials Journal*, mars-april 1998, s. 168 – 177.
- [27] Sjöborg, K-Å. (1986). Dammsäkerhetsarbete inom Vattenfall och ICOLD:s Committee on dam safety, i *"Seminarium om Dammar"*, 20-21 november 1986, Institutionen för Vattenbyggnad, Kungliga Tekniska Högskolan, Rapport No. 36, s. 249 – 255.

-
- [28] Soshiroda, T. (1998). Ultrasonic pulse velocity as an indicator of concrete quality, i *Concrete under severe conditions*, Ed. O. E. Gjrv, K. Sakai, och N. Bantha, ISBN 0-419-23860-3, s. 2093-2102.
- [29] SOU 1995:40. *lvskerhet – Betnkande av Utredningen om dammsäkerhet och hga flden*, Kommunikationsdepartementet, ISBN 91-38-13931-6, 144 s.
- [30] Superbo, S., Devin, P., Ruggeri, G., Fanelli, M. och Zaninetti, A. (1993). Techniques used in assessing the conditions and physical-mechanical properties of materials in old dams – acquired experience and current research, i *Proc. of Technical symposium on maintenance of older dams*, Vol. 1, s. 325 – 343.
- [31] Ulriksen, P. (1995). *Hgupplsnings tredimensionell impulsradar – en metod att genom oförstörande provning studera inre variationer i betongkonstruktioner*, Lunds Universitet, ISRN:LUTVDG/TVTG--3048--SE, 35 s.
- [32] Ulriksen, P. och Wiberg, U. (1998). *Geofysiska metoder för oförstörande provning och kartering*, Institutionen för Geoteknologi, Lunds Tekniska Högskola, Projekt-rapport, 85 s.
- [33] VASO (1997). *RIDAS – Kraftföretagens riktlinjer för dammsäkerhet*, Svenska Kraftverksföreningen, Stockholm, 31 s.
- [34] VAST (1991). *Betong i vattenkraftanläggningar*, Kraftverksföreningens Utvecklingsstiftelse, ISBN 91 8733070, 111 s.
- [35] Wiberg, U. (1993). *Material characterization and defect detection in concrete by quantitative ultrasonics*, Kungliga Tekniska Högskolan, TRIKA-BKN, Bulletin 7, 152 s.
- [36] Wiberg, U. (1994). *Tillståndskontroll av betong i kraftanläggningar*, Elforskrapport 94:17, 61 s.
- [37] Wiberg, U. (1995a). *Oförstörande provning av laboratorieplattor, golv och väggpartier av betong: mätning med impact-echo och radar scanner*, Elforskrapport 95:15B, 36 s.
- [38] Wiberg, U. (1995b). *Sttvgsbaserade kontrollmetoder för betong*, Kungliga Tekniska Högskolan, TRITA-BKN, Rapport 22, ISSN 1103-4289, 52 s.
- [39] Wiberg, U. (1996). *Undersökning av betongkonstruktioner med radarteknik för 3D-avbildning*, Elforskrapport 96:21, 14 s.
- [40] Wiberg, U. (1997). *Möjligheter till kontroll av betongkonstruktioner med oförstörande mät- och utvärderingsmetoder*, Elforskrapport 97:18, 23 s.
- [41] Wouters, J. P., Peterson, E., Kesner, K. och Poston, R. W. (1999). Impact-echo locates subgrade voids, *Concrete International*, May 99, s. 23-27.
- [42] Yamashita, H., Saki, H. och Saeki, N. (1998). Effectiveness of ultrasonic wave velocity as a method to evaluate frost damage to concrete, i *Concrete under severe conditions*, Ed. O. E. Gjrv, K. Sakai, och N. Bantha, ISBN 0-419-23860-3, s. 709-716.

- [43] Muravin, G., Lezvinsky, L. och Muravin, B. (1998). Evaluating the condition of a tunnel's reinforced concrete structure by non-destructive inspection acoustic emission method, i *Progress in acoustic emission IX – transactions in AE for the 21st century*, Big Island, Hawaii, 9-14 augusti, 11:80 –11:88.
- [44] Muravin, G., Lezvinsky, L. och Muravin, B. (1998). Acoustic emission diagnosis of reinforced concrete bridges condition, i *Progress in acoustic emission IX – transactions in AE for the 21st century*, Big Island, Hawaii, 9-14 augusti, 11:89 – 11:98.

A Deltagarlista för ofp-workshop

De personer som omnämns nedan antingen deltog i den grupp workshop som hölls i Lund i november 1998, eller har haft möjlighet att lämna kommentarer till materialet efteråt.

NAMN	POSTADRESS	TEL. NR.	FAX NR.
Alemo, Jan	Vattenfall Utveckling, Betongteknik, 814 26 Älvkarleby.	026-83500	026-83630
Bernstone, Christian	Vattenfall Utveckling, Betongteknik, 814 26 Älvkarleby.	026-83827	026-83630
Bergström, Jörgen	Force Institutet AB, Karbingatan 30, 254 67 Helsingborg.	042-152140	026-161320
Björkenstam, Emma	Vattenfall Utveckling, Betongteknik, 814 26 Älvkarleby.	026-83500	026-83630
Björkkvist, Peo (Kommenterat)	NCC Teknik, 405 14 Göteborg.	031-771 50 00	
Pellbjer, Niklas (Kommenterat)	ÅF Kontroll, JA Wettergrens gata 6, 421 30 Västra Frölunda	031-743 10 00	031-743 12 45
Bertil Ek	SAQ Kontroll AB, Box 49306, 100 29 Stockholm.	08-616 41 19	
Shaw, Peter	Force Institutet AB, Karbingatan 30, 254 67 Helsingborg.	042-152140	026-161320
Svensson, Mats	LTH, Inst. för Geoteknologi, Box 118, 221 00 Lund.	046-222 7426	046-222 9127
Täljsten, Björn	Skanska Teknik AB, Vendevägen 89, 182 25 DANDERYD.	08-753 81 04	08-753 4973
Ulriksen Peter	Inst. för Geoteknologi, LTH.	046-222 8991	046-222 9127
Van-Meer, Peter	YIT Bygg AB, Box 513, 721 09 Västerås.	070-370 2375	021-312 009
Westergren, Pereric	Vägverket, Bro och Tunnel, 781 87 Borlänge.	0243-75 000	
Wiberg, Ulrika	Vattenfall Utveckling, Betongteknik, Råcksta Gårdsväg 5, 162 87 Stockholm.	08-739 6923	08-739 6030
Jacobsson, Jan-Åke	GEOSIGMA AB, Box 894, 751 08 Uppsala.	018-650 821	018-121 302

B Produktblad för ofp-metoder

De metodbeskrivningar som finns med i Bilaga B bygger i stor utsträckning på material från Elforskrapport 94:17 [36]. Beskrivningen av radarskannern kommer från Elforskrapporterna 95:15B [37] och 96:21 [39]. I förekommande fall har andra litteraturreferenser angivits.

B1	Akustiska metoder	s. 2
	B1-1 Ultrasonic Pulse Velocity	
	B1-2 Ultrasonic Pulse Echo	
	B1-3 Impact Echo	
	B1-4 Impulsrespons	
	B1-5 Ytvågsseismik	
	B1-6 Experimentell modanalys med FEM-uppdatering	
	B1-7 Akustisk Emission	
B2	Elektromagnetiska metoder	s. 10
	B2-1 Georadar	
	B2-2 Radarskanner	
B3	Elektriska metoder	s. 13
	B3-1 Resistivitet	
B4	Radioaktiva metoder	s. 14
	B4-1 Gammagrafi	
	B4-2 Radiografi	
	B4-3 Radioskopi	
B5	Termiska metoder	s. 16
	B5-1 Termografi	

I finns ett antal metoder med som dock inte beskriv i denna bilaga. Detta gäller för sonic tomography, TDR, SP, galvanostatic puls, magnetoflux, samt magentometer.

B1 AKUSTISKA METODER

Allmänt

Grunden för stötvågsbaserade metoder är utbredningen av en akustisk våg som uppstår då en lokal svängning av en partikel i materialet mekaniskt fortplantas till närliggande partiklar. En akustisk vågrörelse kan användas för att detektera förändringar i materialets akustiska egenskaper [38]. Under detta avsnitt beskrivs 7 metoder som baseras på olika akustiska fenomen.

B1-1 Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)

Metod

Metoden grundar sig på utbredning av ultraljudvågor i en direkt transmissionsmätning. En sändande sökare appliceras på ena sidan av en betongkonstruktion och en mottagare på den andra. En longitudinalvåg får utbreda sig genom materialet och gångtiden för pulsen att passera materialet mäts. Med kunskap om gångsträckan kan en utbredningshastighet i materialet bestämmas. Den uppmätta hastigheten ger en genomsnittlig bild av konditionen hos materialet mellan sökarna. Stora hastighetsavvikelser lokalt i materialet kan på detta sätt få som enda mätbar effekt en ringa avvikelse i medelhastigheten över sträckan. Uppmätt ljudhastighet kan användas för att uppskatta relativ hållfasthet, dynamisk elasticitetsmodul [28], uniformitet och skadegrad. Metoden finns på olika håll beskriven i standarder, t.ex. Brittisk Standard [8] samt i ett förslag till europeisk standard [11].

Mätförfarande

För att utföra en ljudhastighetsbestämning behövs i enklaste fallet endast två sökare för sändning och mottagning, en enhet som avger exciteringen till sändaren och en tidsräknare som kan arbeta analogt. För att förbättra möjligheterna att korrekt bestämma ankomsttiden kan en digital lagring av signalen ge möjlighet till en mer nyanserad bestämning.

De två sökarna placeras i direkt kontakt med betongens yta på två motstående sidor, eller eventuellt i vinkel mot varandra. Traditionellt används ofta sökare med relativt låg resonansfrekvens (omkring 50 kHz) för att möjliggöra god penetration. Ljudsignalen som tas emot efter transmission genom provkroppen används enbart för att bestämma signalens ankomsttid. Gångtiden och uppmätt gångsträcka ger ett medelvärde på ljudhastigheten längs den antagna utbredningsvägen.

Utvärderingsmetodik

Ljudhastighetsbestämningen bygger på att en utbredningsväg för signalen antas rätlinjigt mellan sändare och mottagare. Utbredningsvägens längd tillsammans med uppmätt gångtid ger möjlighet till bestämning av medelhastigheten i materialet längs antagen utbredningsväg. Ljudhastigheten korreleras exempelvis mot materialets relativa hållfasthet [9]. Bestämningen av gångtiden ur uppmätt signal kan göras med fasta nivåer för triggnings av signalen eller mer nyanserat utifrån signalens nivå och frekvensinnehåll. Longitudinalvågshastigheten i betong är inte frekvensdispersiv inom det frekvensområde som är aktuellt för betongprovning och alltså finns inget att vinna i känslighet genom att öka mätfrekvensen. Däremot kan vågor med högre

frekvenser breda ut sig i mindre provkroppar utan att begränsningsytorna skapar en vågledare för signalen.

Potential och begränsningar

Ljudhastigheten kan användas för att bedöma betongens kondition och uniformitet relativt inom en konstruktion. Metoden begränsas av att en medelförändring mäts och att det därigenom inte blir så stora utslag i ljudhastighetsbestämningen av defekter med begränsad utbredning längs mätsträckan. Denna begränsning medför också att god kontroll av faktisk mätsträcka blir nödvändig för att minska mätfelen. Ljudhastighetens känslighet för tidig nedbrytning och uppsprickning är dessutom liten och minskningen av hastigheten till följd av även mer omfattande nedbrytning är begränsad. Vissa enklare typer av ljudhastighetsmätare finns för användning i betong.

B1-2 Ultrasonic Pulse Echo (UPE)

Metod

Som metodens namn antyder baserar sig mätningen på reflekterade akustiska vågor. En stötvåg introduceras i materialet från en tillgänglig yta hos objektet och reflekterad energi tas emot i samma yta. Mottagningen av reflekterade vågor kan göras med sändande sökare eller med en separat mottagande sökare. På så vis kan mätningen göras antingen i ett en- eller tvåsökarsystem (grupper av sökare kan också användas). I den uppmätta responssignalen från ytan identifieras ekon och deras ankomsttid registreras. Med kunskap om utbredningshastigheten kan reflektorns djupläge beräknas. I uppmätta ultraljudssignaler kan också spridda ekon från materialet finnas. Detta materialbrus är informationsbärande när det gäller materialets nedbrytningsgrad, men bidrar samtidigt till att försvåra identifieringen av ekon i signalen.

Mätförfarande

En puls-eko mätning erfordrar en eller två sökare som sänder respektive tar emot ljudvågorna, en enhet som exciterar sändaren samt ett digitalt oscilloskop. Möjlighet till efterföljande digital signalanalys förbättrar förutsättningarna att tolka uppmätta signaler.

Av avgörande betydelse för mätningens kvalitet är de sökare som används. Vanligtvis används piezo-elektriska sökare för att såväl generera som ta emot signaler. Det är dock svårt att konstruera sökare för de frekvenser som behövs vid betongkontroll så att korta och fokuserade ljudpulser kan sändas och att samtidigt hålla nere deras storlek så att inte kopplingen mot betongen blir problematisk. För mätningar i betong bör sökare med resonansfrekvenser under cirka 75 kHz användas om några meters penetration önskas. Sökare med högre frekvens än cirka 75 kHz blir mer lätthanterliga och kan användas för mätningar på betongtjocklekar upp till cirka en meter. Exempel på kontaktfri excitering och mottagning av signal finns genom användning av lasrar.

Vid en puls-ekomätning appliceras en eller två sökare i direkt kontakt med betongens yta eller genom att vatten som omger konstruktionen får tjäna som kopplingsmedium. Avgörande för kvaliteten på mätningen är att en akustiskt god koppling kan åstadkommas mellan betong och sökare. Mätdata samlas in, digitalomvandlas och lagras för fortsatt bearbetning.

Utvärderingsmetodik

Utvärderingen av puls-eko mätningen görs i första hand direkt ur uppmätt signal genom att tiden för ankomna ekon registreras. Om sökare med någorlunda fokuseringseffekt använts, fås ekon i första hand från den direkta sökriktningen. För att möjliggöra en säkrare identifiering av ekon särskilt vid klenare konstruktioner där ekona kommer tätt kan digital signalbehandling användas för att lyfta fram ekon och reducera inverkan av materialbrus [28], vilket kan bli betydande vid höga frekvenser och skadad betong.

Potential och begränsningar

Metoden kan användas för att detektera små och stora defekter, men i konstruktioner av begränsad tjocklek, upp till någon enstaka meter (exempel finns på tjockleksmätningar upp till 2 m). En annan begränsning för metodens användning är att det i många typer av mätapplikationer krävs en direkt kontakt med ytan. Metoden är speciellt känslig för ballastens storlek (jämfört med radar och IE) – se resultat från [18].

För UPE mätning finns inte någon kommersiellt tillgänglig utrustning anpassad för betong (utvecklingsarbete pågår). Erfarenhetsuppbyggnad har skett under senare år, med intressanta resultat. Tillämpbarheten i fält behöver dock provas vidare.

B1-3 Impact-Echo (IE)

Metod

Impact-Echo metoden grundar sig på reflektion av akustiska vågor med i första hand frekvenser nedanför ultraljudsområdet. I denna teknik introduceras en transient stöt-våg i betongkroppen med en mekanisk impaktor på betongens yta. Vågfältet som exciteras med en nära punktformig mekanisk impaktor utbreder sig utan fokusering mot sökstället. Det innehåller också flera olika vågtyper. Stötvågen propagerar in i betongen med en sfärisk vågfront av skjuv- och tryckvågor. Dessutom rör sig en ytvåg längs ytan bort från punkten för stöten. Vågorna reflekteras av yttre begränsningsytor och inre defekter och tas emot av en mottagare som registrerar ytans rörelse när vågorna kommer. Vid tät placering mellan impaktor och mottagare fås en vågform som domineras av förskjutningar förorsakade av tryckvågornas ankomst. Den uppmätta responssignalen utvärderas inte i tidsplanet utan frekvensomvandlas. Reflektorn lägesbestäms med hjälp av ekofrekvensen mellan ytan och reflektorn och kunskap om ljudhastigheten i materialet [25].

Mätförfarande

Ett Impact-Echo system består av de tre komponenterna impaktor, mottagande sökare och digitalt oscilloskop med vågformsanalys. Den mekaniska impaktorn som exciterar stötvågorna består lämpligen av en stålsfär som knackar på betongens yta vid klenare konstruktioner. Kulor kan t.ex. skjutas i väg med en fjäder. Vid mycket grova konstruktioner kan också hammare användas. Valet av impaktor för exciteringen är av avgörande betydelse för mätningens kvalitet. Exciteringen måste få ett frekvensinnehåll som lämpar sig för den tilltänkta mätapplikationen. Vid excitering med en stålsfär avgörs frekvensinnehållet ($\approx 1 / \text{kontaktiden}$) i första hand av kulans

diameter. Frekvenser över 20 kHz lämpar sig för konstruktioner med en maximal tjocklek på cirka en meter.

Mottagande sökare i ett Impact-Echo system kan vara av lite olika typ beroende på tillämpning. Geofoner som registrerar hastighet eller accelerometrar kan användas vid provning av grova konstruktioner. För klenare konstruktioner används en sökare med mycket liten kontaktyta vilken reagerar på ytans rörelse.

Mottagen signal digitaliseras och analyseras i tids- eller frekvensplanet beroende på tillämpning.

Utvärderingsmetodik

Utvärdering av uppmätta data i tidsplanet fungerar väl för långsmala konstruktionsdelar. Utvärderingen bygger då på identifiering av ankomsten av ett eko från botten av en vågledare. Vid andra typer av konstruktioner där energin propagerar i flera olika riktningar och med betydligt kortare tidsrymd mellan eken blir utvärdering i tidsplanet endast möjlig om mycket korta pulser, i själva verket ultraljudspulser används. Ett annat angreppssätt för utvärderingen är då att frekvensomvandla den uppmätta vågformen och med hjälp av frekvenstoppen för reflexer fram och åter mellan betongens yta och en reflektor bestämma reflektorns läge. Detta fungerar väl vid plattlika strukturer där tjockleken är begränsad i förhållande till utbredningen i planet. Den dominerande karaktären i spektrum blir reflexfrekvensen mot botten eller en reflektor i betongen. Vid mer komplexa provningsfall där reflexer från begränsningsytor i planet eller svängningsmoder hos kroppen kan inverka på responsen kan kontrollberäkningar med FEM ge information om förväntad respons [25].

Potential och begränsningar

IE-metoden kan användas för att detektera defekter i betongkonstruktioner. Metoden har visat sig relativt effektiv för att hitta stora hålrum och delamineringar, speciellt i plattlika konstruktioner, t.ex. beläggningsbetong eller brodäck, där skadan tenderar att ha en utsträckning parallellt med betongytan. Beroende på frekvensinnehållet i exciteringen kan konstruktioner med tjocklekar upp till flera meter kontrolleras.

Även hålrum under en betongplatta kan identifieras med IE [41]. Mindre sprickor och oregelbundenheter har emellertid varit svårart att hitta till följd av de relativt låga frekvenser som används [20]. Pågående vidareutveckling visar att det finns möjlighet till att mäta sprickdjup genom att vid utvärdering använda s.k. "time-of-flight"-teknik. Modifieringen medför en betydligt förbättrad möjlighet till att bestämma djupet av vertikala luft- och vattenfyllda sprickor. Även djupet av öppna lutande och kurviga sprickor kan bestämmas (dock med en något sämre noggrannhet [26]).

En begränsning för metodens användning är att det krävs en direkt kontakt med ytan. En ytterligare begränsning är att tolkningen av mätningar på konstruktioner med komplicerad struktur kan kräva kontrollberäkningar för att underlätta tolkningen. För IE mätning finns det kommersiellt tillgänglig utrustning anpassad för betong.

B1-4 Impulsrespons (IR)

Metod

Impulsresponsmetoden bygger på samma grundprincip som Impact-Echo metoden d.v.s. reflektion av akustiska vågor med i första hand frekvenser nedanför ultraljudsområdet. Även här sker exciteringen med en mekanisk impaktor och en sökare tar emot vågor som når ytan. Det speciella med metoden är att utöver hastighetsresponsen från konstruktionen mäts också kraft-tidsambandet för impakten och informationen från båda dessa mätningar används för att analysera konstruktionens kondition. Ett impulsresponspektrum bildas som överföringsfunktionen mellan in- och utsignal och ur denna utvärderas den dynamiska styvheten eller avståndet till en reflektor.

Mätförfarande

I ett IR mätsystem ingår typiskt en impaktor av hammartyp med antingen inbyggd instrumentering för lastmätning eller med en lastcell som hammare får träffa vid anslaget. En lågfrekvent hastighetssökare eller accelerometer används som mottagare och en tvåkanalig omvandlare samlar in och analyserar data.

Vid mätning exciteras en stötvåg i materialet och denna tryckvåg fortplantar sig ned i konstruktionen. Vid oregelbundenheter i betongen eller från botten i konstruktionen fås sedan reflexer tillbaka upp mot ytan där signalen tas emot.

Utvärderingsmetodik

Utvärderingen av mätningen görs med hjälp av överföringsfunktionen mellan in- och utsignal. Denna överföringsfunktion är karakteristisk för strukturen och den representerar strukturens respons på en direkt puls. Överföringsfunktionen förändras med geometrin, upplagsförhållandena och skadebilden och den kan innehålla information både om vågutbredning i strukturen och om dess svängningsegenskaper.

Om den mätta utsignalen representerar hastighet fås överföringsfunktionen som hastighet per kraftenhet vilket brukar benämnas mobilitet. Mobilitetsplotten har sina maxima vid strukturens resonansfrekvenser. Vid låga frekvenser representerar överföringsfunktionens rätlinjiga förlopp den dynamiska styvheten hos konstruktionen inklusive dess upplagsförhållanden.

Potential och begränsningar

IR metoden ger goda resultat vid kontroll av uniformiteten i betongkonstruktioner med en form som skapar en vågledare för ljudpulsen. Även vid kontroll av underlagets egenskaper för betongplatta på mark fungerar metoden [23]. Metoden är begränsad till enkla typfall av konstruktioner som höga pelare och pålar eller där styvhetsförändringar är avgörande som vid plattor på mark.

B1-5 Ytvågsseismik (SASW).

Metod

Som namnet antyder baserar sig denna metod på utbredning av ytgående mekaniska vågor. En impaktor genererar en stötvåg i konstruktionens yta och två mottagande sökare placeras på olika avstånd från impaktorn. Mottagarna registrerar ytans rörelse när de ytgående vågorna passerar. I mätuppställningen är partikelrörelsen av de ytgående vågorna dominerande framför rörelsen på grund av skjuv- och tryckvågor. Vågformerna som registreras i mottagarna används för att konstruera en styvhetsprofil för eventuella materiallager i konstruktionen. Utvärderingen baserar sig på att ytvågorna påverkas av materialet ned till ett visst djup under ytan. Djupet till vilket en påverkan av materialet finns med och bidrar till vågens amplitud avgörs av vågens frekvens. Detta innebär att de lågfrekventa komponenterna i den transienta pulsen penetrerar till ett större djup än de högfrekventa komponenterna och att de därigenom kan användas för att ge information om egenskaperna i djupare liggande lager. Amplituden för partikelrörelsen avtar exponentiellt med djupet och vid ett djup av cirka 1.5 gånger våglängden har amplituden avtagit till 1/10 av värdet vid ytan.

Mätförfarande

Den mätteknik som behövs för att utföra en SASW-mätning består av impaktorn som vanligtvis utgörs av en hammare, två mottagande sökare (geofoner eller accelerometrar) samt en tvåkanalig analysator som digitalt lagrar de uppmätta vågformerna och spektralanalyserar desamma.

Vid mätning appliceras de båda mottagarna på godtyckligt avstånd från varandra. Därefter exciteras betongstrukturen med impaktorn placerad i linje med mottagarna och på ett avstånd från den närmaste mottagaren som överstiger avståndet mellan mottagarna. För att få god noggrannhet vid beräkning av fashastigheterna för ytvågen har det visat sig att avståndet mellan mottagarna bör vara mindre än två gånger den våglängd man söker fashastigheten för och större än våglängden dividerad med tre. Detta får till följd att mätningen kan behöva upprepas för olika avstånd beroende på hur brett frekvensområde man vill beräkna dispersionskurva för.

Lämpliga egenskaper hos impaktorn avgörs av styvheten hos de lager man vill kontrollera, avståndet mellan givarna och djupet man vill nå ned till. En liten hammare med frekvenser på 10 - 20 kHz kan användas för klena strukturer, medan en tyngre hammare erfordras för grova konstruktioner.

Utvärderingsmetodik

Genom att välja impaktor så att de högfrekventa komponenterna i ytvågen fortplantar sig enbart i ytskiktet så kommer fashastigheten för dessa frekvenser att bero på ytskiktets skjuvmodul, densitet och Poisson's tal. Lägre frekvenser kommer sedan i tur och ordning att bero på underliggande skikts egenskaper. På så vis blir ytvågens utbredningshastighet dispersiv i ett medium bestående av lager med olika egenskaper.

Fashastigheten för varje frekvenskomponent avgörs ur den tid det tar för vågen med denna frekvens att propagera mellan mottagarna. Dessa gångtider bestäms ur fasskillnaderna mellan signalerna vid respektive mottagare. En dispersionskurva ställs

därefter upp genom plottning av fashastigheter mot våglängder. Denna kurva ligger sedan till grund för beräkning av en styvhetsprofil genom ett iterativt förfarande.

Potential och begränsningar

Metoden fungerar för konstruktioner med distinkta materiallager eller med på djupet kontinuerligt varierande egenskaper under förutsättning att skikten ser likadana ut i hela det plan som mätningen omfattar (metoden utvecklades inledningsvis för geotekniska applikationer). Detta innebär att stora sökdjup kräver att variationerna i planet är små över en yta ungefär tre gånger så stor som sökdjupet. På betongområdet har metoden varit speciellt framgångsrik vid undersökningar av landningsbanors betongbeläggningar [7]. Användningen för betongundersökningar har ökat under senare år och i takt med detta börjar det även finnas tillgång till undersökningsresultat i litteraturen. FoU pågår med att ta fram en skanner som kan användas tillsammans med mätutrustningen, vilket skulle snabba upp den tid det tar att göra en undersökning.

B1-6 Experimentell Modanalys med FEM-uppdatering

Metod

Experimentell modanalys (EMA) bygger på en mätning av dynamiska responser genom ett stort antal mätpunkter på konstruktionens yta. Ur den uppmätta responskarakteristiken beräknas de modala parametrarna. En jämförelse mellan förväntade och uppmätta modformer och resonansfrekvenser ger indikationer om skada.

Genom att kombinera en mätning med experimentell modanalys och en strukturmодellering med FEM kan mätdata användas för att identifiera försvagningar av konstruktionen eller dess upplag. Genom att uppdatera strukturmodellen mot mätdata kan en modell erhållas som dessutom bättre representerar den verkliga konstruktionen för bärlighetsanalyser, analyser av speciella lastvillkor o.d. än en traditionell FE-modell skulle kunna göra.

Mätförfarande

För mätningar behövs hammare, fallvikt eller elektrodynamisk skakare för exciteringen. Responserna mäts med en accelerometer, hastighetsgivare eller lägesgivare. Tillgång till flera accelerometrar och AD-omvandling med fler än två kanaler möjliggör en mer rationell mätprocedur. Vidare behövs dator med programvara för modanalys.

Vid mätning exciteras lämpliga punkter på konstruktionen och responserna mäts gärna i flera punkter samtidigt. Data lagras för vidare analys.

Utvärderingsmetodik

Utvärderingen av en EMA-provning bygger på att uppmätta responser omvandlas till modala egenskaper. Ur responsmatrisen kan egenfrekvenser, egenvektorer och dämpningar lösas, men mätta data ger vanligtvis endast ett begränsat antal modformer vid låga frekvenser. Uppmätta responser måste processeras för att möjliggöra bestämning av de modala parametrarna.

Vid utvärderingen skapas en FE-modell för konstruktionen enligt ritningar. Denna modell har en mycket fin elementindelning. I beräkningsmodellen bör mätpunkterna ingå som noder, medan övriga noder utgör ett överskott jämfört med vad man med rimlig ansträngning kan åstadkomma vid mätning. En reducering av FE-modellen eller en expanderings av mätmodellen kan utföras för att anpassa strukturmodellen mot mätdata. Genom att stegvis förändra strukturmodellens egenskaper t.ex. beträffande randvillkor och lokala styvhetsförändringar kan en uppdaterad modell fås som bättre representerar de aktuella upplagsvillkoren, materialegenskaperna och styvhetsvariationerna.

Potential och begränsningar

Fullskalemätning på en damm visar att tillräcklig mätnoggrannhet kan uppnås för att väl representera och identifiera konstruktionens svängningsmoder. Inga erfarenheter finns av hur stora förändringar i dammens egenskaper som behövs för att ge väsentlig förändring av dessa moder. Utrustning för experimentell modanalys finns på marknaden.

Metoden har i kombination med FEM-uppdatering en potential för bärighetsanalys av konstruktioner som har svårbedömda randvillkor och omfattande skador genom att en beräkningsmodell anpassas mot verkligt dynamiskt beteende. Identifiering av skador kan göras genom jämförelse mellan uppdaterad modell och ursprunglig modell med hänsyn tagen endast till ursprungliga villkor. Metoden har testats i första hand för stålkonstruktioner. Utrustning för mätningar och programvara för uppdatering av strukturmodeller mot mätdata finns på marknaden.

B1-7 Akustisk Emission (AE)

Metod

Akustisk emissionsmätning grundar sig på registrering av de ljudpulser som ett material ger ifrån sig under påkänning. Vid mätning appliceras en mottagande sökare på betongens yta och de ljudpulser som når ytan registreras. Förutsättningen för mätningen är att materialet är utsatt för någon form av belastning som förorsakar t.ex. mikrospricktillväxt. Analysens omfattning beror på hur avancerad mätning som det är fråga om. Den kan då bygga på de ankommande ljudpulsernas amplitud, energiinnehåll, varaktighet, täthet, stigtid, frekvensinnehåll, eller delar av detta. Det har påvisats att material i olika stadier av nedbrytning ger olika ljud ifrån sig vid ökad belastning. Det finns med hjälp av de akustiska emissionerna också möjlighet att lägesbestämma de områden i konstruktionen som ger ifrån sig ljuden.

Mätförfarande

För en akustisk emissionsmätning behövs i grunden bara en mottagande sökare och en digital insamlingsenhet. Mottagaren placeras på konstruktionens yta och får lyssna på de ljud materialet spontant ger ifrån sig under belastning eller för att lyssna på ljud som härrör från läckage. Exempelvis använder Muravin med flera [33] givare med frekvensbandet 50-600 kHz.

Utvärderingsmetodik

För analys av de insamlade ljuden kan antingen en enkel räknare av händelser användas eller så görs en mer avancerad analys för kontroll av typ av händelser och rekonstruktion av läget för skadan.

Potential och begränsningar

Metoden är begränsad i sin användning till konstruktioner som i sitt driftstillstånd utsätts för sådana belastningar att akustiska emissioner avges eller vilka kan belastas så att de avger sådana vid mättillfället. Tillämpningen på befintliga betongkonstruktioner är något begränsad genom att uppkomna energinivåer vid s.k. "events" är små och de dämpas därmed snabbt ut i omkringliggande betong. En intressant potential för metoden ligger i övervakning av konstruktionsdelar av begränsad storlek vilka utsätts för stor lokal belastning, men även andra tillämpningar finns rapporterade: uppföljning av injekteringsbruks inträngning [24], lokalisering av läckagevägar, tidig upptäckt av armeringskorrosion samt övervakning av fundaments grundläggning vid tömning och fyllning av vattenreservoarer [30]). I nyligen rapporterade laborationsförsök [22] och rapporteras lyckade resultat där sprickors läge, spricktyp och sprickorientering har kunnat fastslås. Muravin med flera använder sig av en patenterad teknik som med hjälp av AE kan bestämma spänningsnivån i befintliga konstruktioner, t.ex. för tunnelinklädnad i betong [43] och för betongbroar [44].

B2 ELEKTROMAGNETISKA METODER

Allmänt

De två grundprinciper som elektromagnetisk instrumentering baseras på är induktion och reflektion av elektromagnetisk energi. Till den senare metoden hör radar, vilken sammanfattas vidare nedan.

B2-1 Georadar (GPR - Ground Penetrating Radar)

Metod

GPR-metoden baserar sig på utbredning av radiovågor i materialet från ytan på en konstruktion. En antenn används för att sända korta elektromagnetiska pulser som reflekteras i det inre av konstruktionen. Reflekterad energi tas emot och tiden mellan sändning och mottagande av reflexer mäts. Radarsystemet sänder pulser med korta intervall emellan och under mätningen rör sig antennen kontinuerligt. I varje läge på konstruktionen där mätning gjorts representerar tiden i signalen ett djup för det reflekterande skiktet. De uppmätta signalernas intensitet ritas längs mätlinjen som en profil över de elektriska gränsskikten i materialet.

Mätförfarande

För att utföra en GPR-mätning behövs sändande och mottagande radarelement som monteras i en antenn. En enda eller två separata antenner kan användas. Till detta kopplas elektronik för sändande och mottagande. Dessutom behövs en kontrollenhet för styrning av mätningen (mättid, insamlingshastighet, filter och förstärkning), en insamlingsenhet för radarsignaler och en enhet för grafisk presentation.

En GPR-mätning utförs utan direktkontakt med konstruktionens yta. Vid mätningen förs antennen längs en mätlinje med så nära konstant fart som möjligt mellan utsatta referenspunkter. Genom att känna till fordonets väg och hastighet kan mätdata relateras till lägen i konstruktionen. Om en yta ska kontrolleras bör man vara noggrann med att rikta in mätlinjerna så att de är parallella och utgår från samma läge.

Utvärderingsmetodik

Den grundläggande informationen som fås ur mätdata är de radargram som innehåller rådata plottade med ett tröskelvärde för vilka signalnivåer som räknas som informationsbärande. Signalens polaritetsväxlingar ger upphov till svart-vita band i radargrammen.

Mätdata kan processeras vidare och presenteras på färgskärm eller som videosignaler. Signalbehandling av rådata kan göras för att avlägsna interferensfenomen av t.ex. slumpmässigt brus eller regelbundet upprepade reflexer som inte härrör från materialet. Genom signalbehandling kan också önskade reflexer framhävas, korrekationer för antennens geometri eller andra kända fenomen göras och beräkningar av signaler göras. För en meningsfull utvärdering krävs dock god kunskap om den aktuella konstruktionen, de ingående materialen och mätuppläggningsen.

Potential och begränsningar

GPR-metoden har god förmåga att identifiera relativt stora defekter i betong. Mätningar kan göras på stora konstruktioner med flera meters grovlek. Inverkan av armering kan göra att penetrationen begränsas och reflexer från defekter maskeras. Mätproceduren kräver stor noggrannhet för att ge bra koppling till läget i konstruktionen. Metoden lämpar sig väl för automatisk avsökning längs en linje, men är inte i första hand anpassad för avsökning över ytor. Tolkning av data kräver god kunskap om mätmetoden och mätsituationen. Utrustningar för georadarmätningar i betong finns utvecklade.

B2-2 Radarskanner

Mätmetod

3D-avbildning med radar är baserad på samma metod som georadarmetoden. Flera parallella GPR-mätlinjer fördelas över ytan på den undersökta. Djupet i konstruktionen representeras av tidsdomänen i uppmätta data och på så vis genereras en tredimensionell datakub.

Vid en GPR-mätning sänds pulser av elektromagnetiska vågor in i konstruktionen med en radarantenn. Detektering av ekon i signalerna görs visuellt genom jämförelse av de reflektivitetsvariationer som kan ses mellan närliggande mätpositioner längs en linje på konstruktionens yta.

Avsökningen av konstruktionens yta kan åstadkommas på olika sätt. Det som är av vikt för avbildningen är att den relativa positioneringen av närliggande mätpunkter är tillräckligt god för att inte förvränga konturerna av de anomalier som ska detekteras. För att i mindre konstruktioner mer fotografiskt avbilda begränsade ytor kan en enda antenn automatiskt flyttas över ytan. Ett sådant mätsystem för automatisk positionering av antennen har utvecklats vid Lunds Tekniska Högskola [31].

Den fortsatta beskrivningen som görs nedan gäller LTH:s skanner

Mekanisk skanner (LTH)

Den mekaniska skanner förflyttar antennen mellan mätpunkterna och tillåter på så vis mätningar att göras i ett rutnät över konstruktionens yta. I de försök som gjorts av [31] avsöks en yta på 4 gånger 4 meter avsöks i 256 gånger 256 punkter.

Skannern består av en 5 m lång balk med två servomotorer. Totalvikten är 75 kg. Antennen fästs i en hållare på balken och denna positioneras först längs med balken med en av servomotorerna och därefter rullar hela balken på hjul i sin tvärriktning driven av den andra servomotorn. Skannern rullar i flexibla plastskenor vid mätning på horisontella ytor och vid mätning på vertikala ytor hänger den på en räls av plattjärn vilken fixeras på väggen. Utrustningen kan transporteras med personbil.

Radarutrustning (LTH)

Styrning, förstärkning och insamling av radarsignaler sköts av ett analogt arbetande konventionellt radarsystem. Dessa analoga signaler AD-omvandlas sedan i styr- och insamlingssystemet. Till systemet kan anslutas antenner med olika frekvensområde.

Analys och presentation (LTH)

Datakuben som resulterar från en mätning med skannersystemet innehåller den information som vid en konventionell GPR mätning redovisas i form av radargram. Den tredimensionella mätdatakuben kan i princip användas för att generera profiler av konstruktionen längs en godtycklig skärningslinje mellan mätpunkter i ytan. Enklast presenteras radargram från antingen linjerna parallellt eller i vinkel mot skannerbalkens längdriktning. Genom att data lagras digitalt kan bearbetning i form av filtrering eller viktning användas för att undertrycka t.ex. starka ytekon.

Datakuben kan användas för att presentera bilder av konstruktionen på olika nivåer från ytan (se bild på denna rapports omslagssida). Vid sådan avbildning tilldelas höga signalvärden (starka reflexer) en särskild färg och alla andra amplitudvärden i uppmätta data skalas i relation till denna färg. Då mätdata från varje mätpunkt på ytan representeras av en signal med fas och amplitudinformation kan antingen rådata eller enveloppbildade data användas vid avbildning. Amplitudinformation kan vidare skalas så att den maximalt framhäver variationerna inom varje skikt eller så att variationerna mellan skikten i första hand framhävs. Data kan vidare visas skikt för skikt (för varje uppmätt sampel) eller som ett medelvärde för flera skikt.

Gemensamt för alla metoder för presentation är att den viktiga informationen vid avbildning i första hand är konturerna av sammanhållna områden med liknande reflektivitetsvariationer med djupet. Det exakta djupet som data representerar kan inte bestämmas utan en fullständig kalibrering av utbredningshastigheten i materialet.

En verklig tredimensionell on-line avbildning av konstruktionen kräver stor datorkraft. Det är dock vid arbetsstation möjligt att på skärm studera hela datakuben samt rotera och skära godtyckligt i data.

Potential

Till viss del har svårigheter med att få förståelse för radarteknikens kapacitet berott på att det utan erfarenhet kan vara svårt att göra en tolkning av mätresultaten från en undersökning. Genom den skannerteknik som beskrivs ovan kan resultaten från en undersökning presenteras i form av bilder vilka är betydligt lättare att utvärdera än ett konventionellt radardiagram. Denna avbildande möjlighet ger radarmetoden en betydande potential för betongundersökningar.

B3 ELEKTRISKA METODER

Allmänt

Inom geofysiken hänförs elektrisk prospektering till sådana mätmetoder som kan registrera effekter som beror på att en elektrisk ström flyter genom marken. Detta kan innebära mätning av potentialer, strömmar eller elektromagnetiska fält som antingen förekommer naturligt eller skapas genom en extern källa. Av dessa metoder kan bl.a. resistivitetsmetoden användas i betongsammanhang. En sammanfattning görs nedan.

B3-1 Resistivitet

Metod

En torr betong fungerar som en elektrisk isolator, men i takt med att vatten fyller betongens porer ökar ledningsförmågan och betongen blir elektriskt ledande. Ledningsförmågan beror på betongens struktur (komposition, skelett- och porsystem) och uppgår i regel till $> 10^6 \text{ ohm}\cdot\text{cm}^5$. Porvattnets resistivitet beror på joninnehållet och varierar i regel mellan några till ca $100 \text{ ohm}\cdot\text{cm}$ [1].

I regel uppvisar två betongkroppar med olika porositet men med samma sammansättning förhållandevis hög resistivitet vid låg porositet. Därmed sagt att en betong med hög porositet kommer att ha lägre resistivitet än en betong med låg porositet (under förutsättning att kalibrering görs gentemot betongens sammansättning).

Mätförfarande

Ett problem som uppstår vid elektriska mätningar i betong är hur en god elektrisk kontakt etableras mellan de elektroder som används och själva betongen. Risken för att introducera bias i mätresultatet i form av att varierande övergångsmotstånd är mycket stor (motståndet har visat sig bero på den kraft med vilken elektroderna pressas mot betongytan) [12]. Andra faktorer som är viktiga att ta hänsyn till är fel som beror på randvillkor genom provkroppens geometri samt vilken elektrodkonfiguration som skall användas.

En genomgång av mätprocedurer har gjorts av [12]. De mest vanligt förekommande elektrodtyperna som anbringas mot en betongyta är plattor eller nät av metall.

Ett alternativ till att göra mätningar från en betongkonstruktions yta är att gjuta in permanenta elektroder. Fördelen med dessa är att det går snabbt att genomföra mätningar samt att övergångsmotståndet håller sig konstant vid upprepade mättillfällen.

⁵ Inom betongtillämpningar verkar enheten $\text{ohm}\cdot\text{cm}$ (Ωcm) vara allmänt förekommande. Inom geofysiken används däremot uteslutande ohmm (Ωm).

Ingjutna elektroder finns i form av metallstänger vars yta har räfflats i syfte att åstadkomma en god vidhäftning.

Utvärderingsmetodik

Det finns olika nivå av tolkningsmöjlighet för resistivitetsdata. Numerisk inversion kan göras i det fall som man har tillgång till stora datamängder. För enskilda mätningar kan även enklare beräkningsformler avseende geometri och använd ström användas för att beräkna en skenbart resistivitetsvärde för det material som undersöks.

Potential och begränsningar

Genom att fukttinnehållet har en kraftig inverkan på betongens ledningsförmåga så finns det en potential till att använda metoden för att karakterisera områden i en betongkonstruktion som har fuktansamlingar, t.ex. beroende på att porositet ökat genom någon form av nedbrytning. En nackdel i sammanhanget är att det kan vara svårt att avgöra i vilken omfattning som armeringsjärn inverkar på mätresultatet.

Resultat från försök har visat att en betongs resistivitet är intimt förknippad med ingående armeringsjärns benägenhet till korrosion [12]. Det existerar, visar det sig, ett linjärt förhållande mellan betongens resistivitet och korrosionsströmmar – armeringskorrosionen är större i en betong med låg resistivitet jämför med en betong med hög resistivitet (vid samma exponeringsförhållanden i övrigt).

B4 RADIOAKTIVA METODER

Allmänt

Alla radiologiska metoder bygger på att detektera densitetsvariationer i testobjektet. Skall t.ex. en spricka kunna upptäckas får den ej vara helt sluten utan måste ha en viss volym [13].

Genom digital bildbehandling kan man urskilja defekter som svårigen kunnat hittats vid okulär granskning av filmen (bättre kontrastupplösning). Detta hör dock ej till med huruvida en digital detektor används eller ej – det går även bra att digitalisera en vanlig film. Det är dock mer arbetskrävande eftersom ytterligare ett arbetsmoment behöver utföras. Till fördelarna med digital röntgen kan räknas hög detektions-effektivitet, automatisk digitalisering samt att ingen framkallning behövs.

B4-1 Gammagrafi

Metod

Mätningar med gammagrafi grundar sig på att ena sidan av den struktur som ska kontrolleras utsätts för strålning från ett radioaktivt element. På motsatta sidan av konstruktionen tas strålningen emot i form av ett radiogram vilket utgör en närmast fotografisk representation av de transmitterade strålningsnivåerna.

Mätförfarande

För att utföra en gammagrafi mätning behövs ett radioaktivt element av t.ex. kobolt eller iridium. Dessutom behövs ett fotolaboratorium för behandling av bilder vilka exponeras vid konstruktionen allt ifrån några minuter till tiotals minuter.

På grund av att strålkällan är radioaktiv i sig själv krävs särskilda säkerhetsarrangemang vid transporter och mätning. Säkerhetsavstånd på 20-100 m kan behövas under den tid då mätning pågår.

Utvärderingsmetodik

Vid en gammagrafimätning fås direkt en fotografisk avbildning av strålningsintensiteten genom materialet. Varje bild täcker typiskt en yta på 30*40 cm i konstruktionen och visar materialets genomsläpplighet för de högre frekventa elektromagnetiska vågorna.

Potential och begränsningar

En gammagrafimätning har en potential vid detaljgranskning av klena konstruktionsdelar, kring en halvmeter tjocka, vilka är tillgängliga från två motstående sidor. Kapaciteten vid kontroll begränsas av tunga materialtransporter, tidskrävande etablering och säkerhetsarrangemang för strålskydd vilket tillsammans leder till att cirka 50 bilder av strukturen beräknas kunna tas under en mätvecka. Utrustning finns utvecklade för tillämpningar på betong.

B4-2 Radiografi

Metod

Vid radiografiska mätningar appliceras på ena sidan av den struktur som ska kontrolleras en strålkälla i form av en röntgengenerator. En fotoplåt på motsatta sidan tar emot strålningen och en närmast fotografisk representation av de transmitterade strålningsnivåerna erhålls.

Mätförfarande

För att utföra en radiografisk mätning behövs alltså inte något radioaktivt element utan strålningen genereras vid exponeringstillfället. Exponeringstiden förkortas väsentligt från de upp till tio minuter som krävs vid gammagrafi. För att utföra mätningar behövs utöver strålkällan ett fotolaboratorium för behandling av bilder.

Säkerhetsarrangemangen vid mätning inskränker sig till själva exponeringen då säkerhetsavstånd på cirka 100 m erfordras.

Utvärderingsmetodik

Vid en radiografimätning fås direkt en fotografisk avbildning av strålningsintensiteten genom materialet på samma vis som vid gammagrafi.

Potential och begränsningar

Potentialen för radiografi liksom för gammagrafi ligger i detaljgranskning av utvalda områden av en konstruktion. Radiografi kan användas på konstruktionsdelar med upp till en meters tjocklek, vilka är tillgängliga från två motstående sidor. Kapaciteten vid kontroll begränsas av tunga materialtransporter och tidskrävande etablering vilket tillsammans leder till att maximalt 70 bilder av strukturen beräknas kunna tas under en mätvecka. För mätningar på betong finns utprovad utrustning.

B4-3 Radioskopi

Metod

Radioskopi är en mätmetod som bygger på att en strålkälla i form av en röntgengenerator placeras på ena sidan av den struktur som ska kontrolleras. Istället för att använda fotoplåtar som mottagare av den transmitterade strålningen, som vid gammagrafi och radiografi, har man vid radioskopi en bildomvandlare.

Mätförfarande

Vid utförandet av en radioskopimätning genereras vid exponeringstillfället den strålning som får penetrera materialet. Exponeringstiden blir kort liksom vid radiografimätningar. Säkerhetsarrangemangen vid mätning inskränker sig till själva exponeringen då säkerhetsavstånd på drygt 100 m erfordras.

Utvärderingsmetodik

Informationen från konstruktionen vid radioskopi visar som radiografi konstruktionens genomsläpplighet för högfrekventa elektromagnetiska vågor. Vid mätningen får en bildomvandlare ta emot transmitterad strålning och generera videobilder i realtid från konstruktionen.

Potential och begränsningar

Potentialen för radioskopi liksom för gammagrafi ligger i detaljgranskning av klena konstruktioner, upp till cirka en halvmeters tjocklek, vilka är tillgängliga från två motstående sidor. Kapaciteten vid kontroll begränsas av tunga materialtransporter, men etableringen är mindre tidsödande än om ett fotolab behövt etableras och detta gör att kontrollkapaciteten väsentligt höjs jämfört med vid radiografi. Utrustning finns för kontroll av betong.

B5 TERMISKA METODER

B5-1 Termografi

Metod

Termografianalys är ett sätt att uppskatta värmekonduktiviteten i materialet och variationer i densamma. En mätning görs av värmeutstrålningen från konstruktionens yta och denna relateras till konduktiviteten i materialet inne i konstruktionen. Metoden kan användas med en aktivt skapad värmegradient eller passivt med en värmegradient som uppkommer naturligt. Metoden kan bygga på en gradient mellan två olika sidor (transmissivt angreppssätt) eller på en brant momentan temperaturgradient som skapas och studeras reflektivt på en och samma sida.

Mätförfarande

För värmetermografering behövs en naturligt existerande temperaturgradient över en konstruktion eller att en gradient kan skapas med en värmekälla t.ex. i form av en lampa. För en lokal mätning med pulstermografering har blixtlampor testats, men att skapa en effektiv fältmässig värmekälla är ett problem. En infraröd kamera eventu-

ellt med digitaliseringmöjlighet används för att mäta värmestrålningen från ytan [15].

Vid aktiv värmetermografering behövs en värmekälla som kan skapa en temperaturgradient i konstruktionen. Atingen värms ena sidan av konstruktionen upp och värmeutstrålningen på motsatta sidan registreras eller så kontrolleras ytan under av svalningen från samma sida som värmts upp. Värmestrålningen registreras in med en infrarödkamera och kan digitaliseras för vidare behandling och bildplottning. För grova konstruktioner som kan vara svåra att aktivt värma upp kan passiv termografering med utnyttjande av naturliga temperaturförändringar vara ett alternativ. Avsvalningsförloppet från en soluppvärmd yta ger en naturlig och god möjlighet till termografering.

Utvärderingsmetodik

Om mätningen utförts med AD-omvandling av temperaturfördelningen finns möjlighet att filtrera bilden eller utföra annan typ av signalbehandling. Dessutom kan analys utföras av kopplingen mellan temperaturfördelningen och konduktivitetsvariationerna i konstruktionen.

Potential och begränsningar

Metoden kan ha en potential för att indikera läckvägar i en konstruktion med ensidigt vattentryck med avvikande temperaturer mellan upp och nedströmssida. En ytterligare möjlighet är för att hitta hålrum och delamineringar som tjänar som isolatorer för avsvalningen av en soluppvärmd konstruktion (metoden har använts för att hitta hålrum och delamineringar i brodäck av betong). En betydande begränsning för den passiva metoden är beroendet av naturliga temperaturgradienter som inte kan styras. Denna nackdel har medfört att konsulter i stället använder radar för att hitta hålrum och delamineringar på brobanor (radarmätningar är speciellt enkelt att utföra på brobanor, men samma enkelhet i mätförfarande existerar inte för dammväggar). Metoden begränsas dessutom av den inte helt triviala kopplingen mellan ytemperatur och konduktivitet i en grov konstruktion.

I sammanhanget kan nämnas att temperaturmätningar i dammkroppar – både betong och fyllningsdammar – numera även görs via fast installerade (ingjutna) fiberoptiska kablar.

C Bedömningsformulär

I denna bilaga beskrivs den arbetsgång som användes vid workshopen i Lund. Arbetsgången består av 10 beskrivande punkter vilka har gått igenom för vart och ett av de problem som tas upp i rapporten, d.v.s. 11 stycken.

För varje enskilt problem sammanfattas den information som diskuterats i ett s.k. bedömningsformulär. Informationen i formuläret vägs därefter ihop till en slutlig bedömning över att antal olika ofp-metoders lämplighet för just denna problemställning. Underlaget för samtliga bedömningar återfinns i slutet av denna bilaga. Den som så önskar kan själv göra motsvarande överväganden som gjorts av workshopens deltagare och göra en egen tolkning.

Långtifrån alla metoderna som beskrivs i Kapitel 3 har diskuterats i workshopen, varför betyg i vissa fall saknas.

Resultaten från bedömningen finns sammanställd i tabellerna 14-17 i Kapitel 4.

ARBETSGÅNG

1. Välj problem (skadefall) ur tabellerna 14-17 (Avsnitt 4.3).
2. Gå igenom vad skadefallet karakteriseras av.
3. Identifiera de metoder som erbjuder störst möjlighet (välj ur Tabell 6 på s. 16).
4. Markera dessa metoder i ett bedömningsformulär (Bilaga C).
- 5a. Starta med att poängbedöma respektive metods lämplighet för problemställningen (för in resultatet i ett bedömningsformulär – se sid. 54).

Metodernas lämplighet (L) för problemställningen.

METODERNAS LÄMPLIGHET	POÄNG
Olämplig	$0 \leq L < 0.5$
Möjlig	$0.5 \leq L < 1.25$
Lämplig	$1.25 \leq L < 1.75$
Mycket lämplig	$1.75 \leq L \leq 2.0$

- 5b. Poängbedöm respektive metods möjlighet till geometrisk upplösning (för in resultatet i ett bedömningsformulär – se sid. 54).

Metodernas geometriska upplösning (G).

GEOMETRISK UPPLÖSNING	POÄNG
Dålig	$0 \leq G < 0.5$
Acceptabel	$0.5 \leq G < 1.25$
God	$1.25 \leq G < 1.75$
Mycket god	$1.75 \leq G \leq 2.0$

- 5c. Poängbedöm respektive metods krav på betongens yta (för in resultatet i ett bedömningsformulär – se sid. 54).

Metodernas krav på betongens yta (Y).

BETONGENS YTA	POÄNG
Fullgod betong	$0 \leq Y < 0.5$
Ytbelagd/Målad	$0.5 \leq Y < 1.25$
Något vittrad	$1.25 \leq Y < 1.75$
Rå/brädformad	$1.75 \leq Y \leq 2.0$

- 5d. Poängbedöm respektive metods känslighet för armering (för in resultatet i ett bedömningsformulär – se sid. 54).

Inverkan av armering (A).

INVERKAN AV ARMERING	POÄNG
Mycket tydlig	$0 \leq A < 0.5$
Tydlig	$0.5 \leq A < 1.25$
Mätbar	$1.25 \leq A < 1.75$
Obetydlig	$1.75 \leq A \leq 2.0$

6. Notera de övriga miljöfaktorer (**MK**) som är aktuella för respektive ofp-metod (för in resultatet i ett bedömningsformulär – se sid. 54).
- Krav på åtkomlighet (notera om två sidor är ett krav).
 - Möjlighet till att använda under vatten (notera om bedömningen avser ovan vatten).
 - Eventuella begränsningar vad gäller betongens sammansättning (notera om stor ballast har negativ inverkan).
 - Notera huruvida inklädning av stål kan anses vara allvarligt begränsande
 - Notera huruvida inklädning av sten kan anses vara allvarligt begränsande
7. Beräkna medelvärde (för in resultatet i ett bedömningsformulär – se sid. 54) och gör den sammanvägda bedömningen.

Den sammanvägda bedömningen skall efter bedömning av medelbetyg av poängen i punkterna 5a-d och hänsynstagande till övriga miljöfaktorer resultera i ett betyg i en trebetygsskala:

- L** = Låg lämplighet
M = Medelgod lämplighet
H = Hög lämplighet
PF = Potential Finns

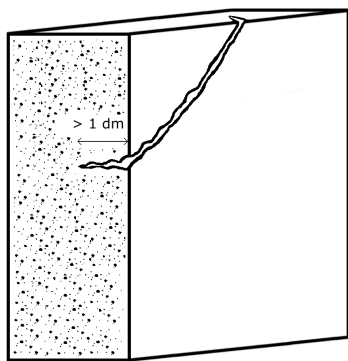
8. För över resultatet i tabellerna 13 - 17.
9. Notera begränsningar i bedömningen vad gäller betongens tjocklek.

Indelning av konstruktionsdelar efter grovlek.

KONSTRUKTIONSDELAR	GROVLEK
Tunna (T)	< 1.0 m.
Medelgrova (MG)	$1.0 \leq X \leq 2.5$ m.
Grova (G)	> 2.5 m.

10. Kommentera framtida FoU.

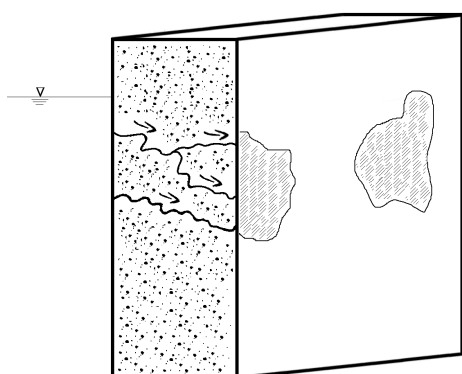
IDENTIFIERADE METODER	PROBLEM 1. (Se Tabell 4-1) Direkt mätning av sprickdjup > 1 dm	Anpassad för problemställningen	Geometrisk upplösning	Krav på betongens yta	Närvaro av armering	MEDELVÄRDE	Övriga miljöfaktorer	SAMMANVÄGD BEDÖMNING
	Ultrasonic Pulse Velocity							
✓	Ultrasonic Pulse Echo	0.5	0.5	1.25	1.75	1.0		M
	Sonic Tomography							
✓	Impact Echo	1.0	0.5	1.25	1.75	1.12		M
	Impulse Response							
✓	Ytvågsseismik	1.0	0.5	1.25	1.75	1.12		M
	Experimentell Modanalys							
	Akustisk Emission							
	Georadar							
	Radar scanner							
	Självpotential							
	Resistivitet							
	Galvanostatic pulse							
	Högenergiröntgen							
✓	Termografering	-	-	-	-	-		PF



Figur C1. Öppna sprickor vars djup antas vara större än 1 dm.

Kommentar: Problemställningen avser ett fåtal sprickor. Vid ett större antal sprickor närmar sig problemställningen Problem 7.

IDENTIFIERADE METODER	PROBLEM 2. (Se Tabell 4-2) Mätning av läckage genom sprickor i syfte att kunna geometriskt avgränsa de delar av en betongkonstruktion där läckage förekommer.	Anpassad för problemställningen	Geometrisk upplösning	Krav på betongens yta	Närvaro av armering	MEDELVÄRDE	Övriga miljöfaktorer	SAMMANVÄGD BEDÖMNING
	Ultrasonic Pulse Velocity							
	Ultrasonic Pulse Echo							
	Sonic Tomography							
	Impact Echo							
	Impulse Response							
	Ytvågsseismik							
	Experimentell Modanalys							
✓	Akustisk Emission							PF
	Georadar							
	Radar scanner							
	Självpotential							
	Resistivitet							
	Galvanostatic pulse							
	Högenergiröntgen							
✓	Termografering							PF



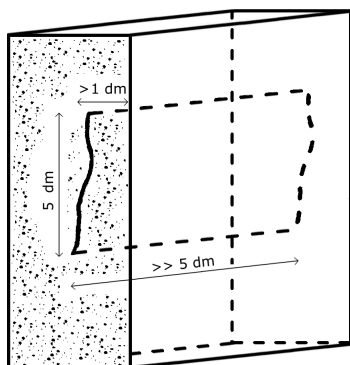
Figur C2. Fukt tränger in genom otätheter på uppströmssidan och rör sig vidare genom konstruktionen.

Kommentar:

Ingen metod har kunnat bedömas kvalitativt.

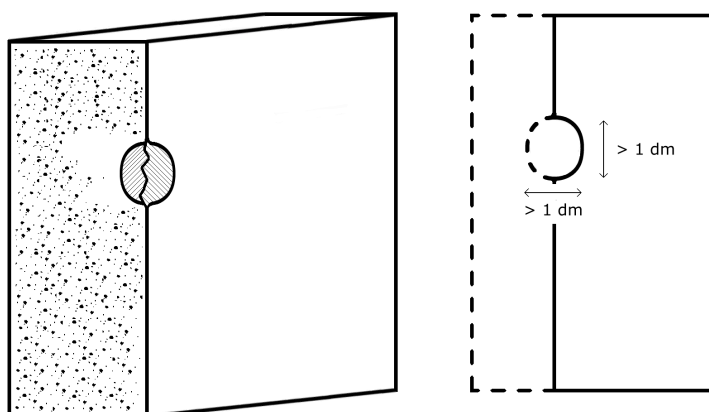
IDENTIFIERADE METODER	PROBLEM 3. (Se Tabell 4-2) Mätning av spricka parallellt med betongens yta. Utbredning > 0.5 m..	Anpassad för problemställningen	Geometrisk upplösning	Krav på betongens yta	Närvaro av armering	MEDELVÄRDE	Övriga miljöfaktorer	SAMMANVÄGD BEDÖMNING
	Ultrasonic Pulse Velocity							
✓	Ultrasonic Pulse Echo	1.75	1.75	1.25	1.25	1.5	d	M
	Sonic Tomography							
✓	Impact Echo	2.0	1.75	1.25	1.75	1.69	d, e	H
	Impulse Response							
✓	Ytvågsseismik	0.5	0.5	1.25	1.75	1.0	d, e	M
	Experimentell Modanalys							
	Akustisk Emission							
✓	Georadar	0.5	1.25	1.75	0.5	1.0	(d), e	M
✓	Radar scanner	1.25	1.25	2.0	0	1.12	(d)	M
	Självpotential							
	Resistivitet							
	Galvanostatic pulse							
	Högenergiröntgen							
	Termografering							

Kommentar:



Figur C3. Sprickan antas ligga på ett djup större än 1 dm. Utbredningen i sidled är stor i ena riktningen och minst 5 dm i den andra riktningen.

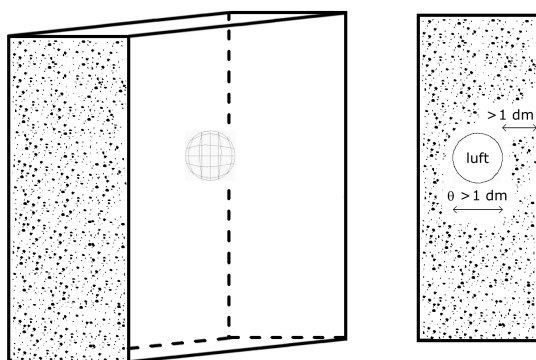
IDENTIFIERADE METODER	PROBLEM 4. (Se Tabell 4-2) Mätning av nedbruten betong i anslutning till avskalning.	Anpassad för problemställningen	Geometrisk upplösning	Krav på betongens yta	Närvaro av armering	MEDELVÄRDE	Övriga miljöfaktorer	SAMMANVÄGD BEDÖMNING
	Ultrasonic Pulse Velocity							
	Ultrasonic Pulse Echo							
	Sonic Tomography							
✓	Impact Echo	0.5	1.75	1.25	1.75	1.31		M
	Impulse Response							
✓	Ytvågsseismik	1.75	1.25	1.25	1.75	1.50		H
	Experimentell Modanalys							
	Akustisk Emission							
✓	Georadar	0.5	1.25	1.75	0.5	1.00		M
	Radar scanner							
	Självpotential							
✓	Resistivitet	0.5	1.25	1.75	0.5	1.00		M
	Galvanostatic pulse							
	Högenergiröntgen							
	Termografering							

**Kommentar:.**

Georadar detekterar, men kvantifierar ej, området om det är fuktigt. Stegvis övergång ger ej upphov till reflex.

Figur C4. Området med nedbruten betong ligger bakom en yta som uppvisar avskalningsskador. Alla dimensioner för skadans utbredning antas vara större än 1 dm.

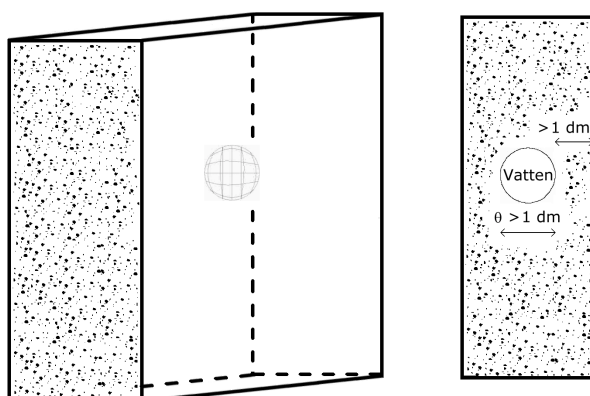
IDENTIFIERADE METODER	PROBLEM 5. (Se Tabell 4-3) Mätning av luftfyllt hålrum.	Anpassad för problemställningen	Geometrisk upplösning	Krav på betongens yta	Närvaro av armering	MEDELVÄRDE	Övriga miljöfaktorer	SAMMANVÄGD BEDÖMNING
	Ultrasonic Pulse Velocity							
✓	Ultrasonic Pulse Echo	-	-	-	-	-		PF
	Sonic Tomography							
✓	Impact Echo	1.25	0.5	1.25	1.75	1.19		M
	Impulse Response							
✓	Ytvågsseismik	0.5	0.5	1.25	1.75	1.00		M
	Experimentell Modanalys							
	Akustisk Emission							
✓	Georadar	1.75	1.25	1.75	0.5	1.31		M
	Radar scanner							
	Självpotential							
	Resistivitet							
	Galvanostatic pulse							
✓	Högenergiröntgen	2.0	1.25	1.75	1.75	1.56		H
	Termografering							



Kommentar:

Figur C5. Sjärsikt luftfyllt hålrum inneluten i konstruktionen på ett djup > 1 dm. Sfärens diameter antas vara större än 1 dm.

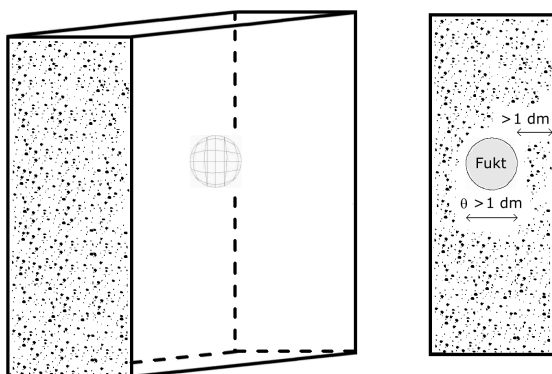
IDENTIFIERADE METODER	PROBLEM 6. (Se Tabell 4-3) Mätning av vattenfyllt hålrum.	Anpassad för problemställningen	Geometrisk upplösning	Krav på betongens yta	Närvaro av armering	MEDELVÄRDE	Övriga miljöfaktorer	SAMMANVÄGD BEDÖMNING
✓	Ultrasonic Pulse Velocity							
✓	Ultrasonic Pulse Echo	-	-	-	-	-		PF
	Sonic Tomography							
✓	Impact Echo	1.25	0.5	1.25	1.75	1.19		M
	Impulse Response							
✓	Ytvågsseismik	0.5	0.5	1.25	1.75	1.00		M
	Experimentell Modanalys							
	Akustisk Emission							
✓	Georadar	2.0	1.75	1.75	0.5	1.5		M
	Radar scanner							
	Självpotential							
	Resistivitet							
	Galvanostatic pulse							
✓	Högenergiröntgen	2.0	1.25	1.75	1.75	1.56		H
	Termografering							

**Kommentar:.**

Radar: även botten av sfären kan förmodligen ge upphov till en reflex.

Figur C6. Sfärsikt vattenfyllt hålrum inneluten i konstruktionen på ett djup > 1 dm. Sfärens diameter antas vara större än 1 dm.

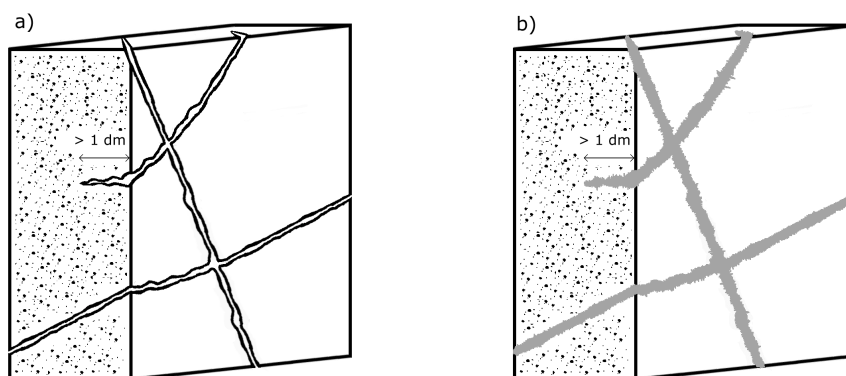
IDENTIFIERADE METODER	PROBLEM 7. (Se Tabell 4-3) Mätning av område med förändrade egenskaper (fuktig zon). Vattentryck förutsätts.	Anpassad för problemställningen	Geometrisk upplösning	Krav på betongens yta	Närvaro av armering	MEDELVÄRDE	Övriga miljöfaktorer	SAMMANVÄGD BEDÖMNING
	Ultrasonic Pulse Velocity							
	Ultrasonic Pulse Echo							
	Sonic Tomography							
✓	Impact Echo	0.5	0.5	1.25	1.75	1.0		M
	Impulse Response							
✓	Ytvågsseismik	1.25	1.25	1.25	1.75	1.38		M
	Experimentell Modanalys							
	Akustisk Emission							
	Georadar							
✓	Radar scanner	1.75	1.75	1.75	0.5	1.56		H
	Självpotential							
✓	Resistivitet	0.5	0.5	1.75	0.5	0.81		L
	Galvanostatic pulse							
	Högenergiröntgen							
✓	Termografering	1.75	0.5	1.75	1.75	1.44		M



Kommentar:

Figur C7. Område med egenskaper som skiljer sig från konstruktionsbetongen i övrigt, t.ex. genom fuktansamling. Området (en sfär) antas ligga på ett djup > 1 dm. Sfärens diameter antas vara större än 1 dm.

IDENTIFIERADE METODER	PROBLEM 8. (Se Tabell 4-4) Mätning av injekteringsbruks inträngning (mätning före och efter injektering).	Anpassad för problemställningen	Geometrisk upplösning	Krav på betongens yta	Närvaro av armering	MEDELVÄRDE	Övriga miljöfaktorer	SAMMANVÄGD BEDÖMNING
	Ultrasonic Pulse Velocity							
	Ultrasonic Pulse Echo							
✓	Sonic Tomography	-	-	-	-	-		PF
✓	Impact Echo	-	-	-	-	-		PF
	Impulse Response							
✓	Ytvågsseismik	-	-	-	-	-		PF
	Experimentell Modanalys							
	Akustisk Emission							
✓	Georadar	-	-	-	-	-		PF
✓	Radar scanner	-	-	-	-	-		PF
	Självpotential							
	Resistivitet							
	Galvanostatic pulse							
✓	Högenergiröntgen	-	-	-	-	-		PF
	Termografering							



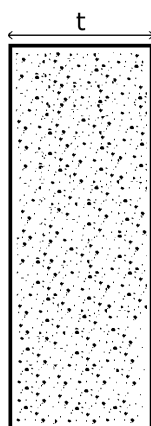
Figur C8. Betong med öppna sprickor (a) som skall repareras med hjälp av injektering. Mätningar genomförs före injektering och följs upp efter injektering (b). Eventuellt görs även mätningar under själva injekteringsarbetet.

Kommentar: Det som används som kännetecken för en lyckad reparation är i det här fallet en ökad homogenitet.

IDENTIFIERADE METODER	PROBLEM 9. (Se Tabell 4-4) Mätning av tätning uppströmssida av damm.	Anpassad för problemställningen	Geometrisk upplösning	Krav på betongens yta	Närvaro av armering	MEDELVÄRDE	Övriga miljöfaktorer	SAMMANVÄGD BEDÖMNING
	Ultrasonic Pulse Velocity							
	Ultrasonic Pulse Echo							
	Sonic Tomography							
	Impact Echo							
	Impulse Response							
	Ytvågsseismik							
	Experimentell Modanalys							
✓	Akustisk Emission	-	-	-	-	-		PF
	Georadar							
	Radar scanner							
	Självpotential							
	Resistivitet							
	Galvanostatic pulse							
	Högenergiröntgen							
✓	Termografering	-	-	-	-	-		PF

Samma förutsättningar som i Problem 2.

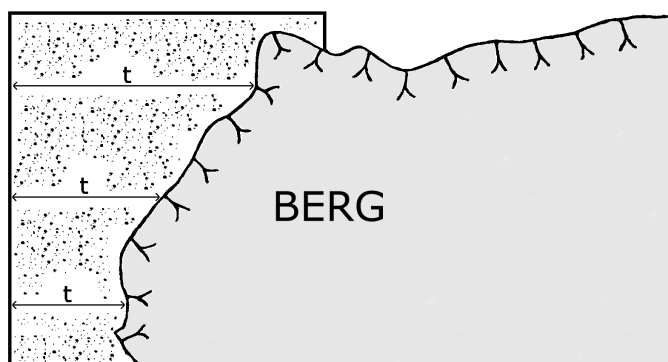
IDENTIFIERADE METODER	PROBLEM 10. (Se Tabell 4-5) Mätning av betongtjocklek.	Anpassad för problemställningen	Geometrisk upplösning	Krav på betongens yta	Närvaro av armering	MEDELVÄRDE	Övriga miljöfaktorer	SAMMANVÄGD BEDÖMNING
	Ultrasonic Pulse Velocity							
	Ultrasonic Pulse Echo							
	Sonic Tomography							
✓	Impact Echo	1.75	1.75	1.25	1.75	1.62		H
	Impulse Response							
✓	Ytvågsseismik	1.75	1.75	1.25	1.75	1.62		H
	Experimentell Modanalys							
	Akustisk Emission							
✓	Georadar	1.75	1.75	1.75	0.5	1.31	d	M
	Radar scanner							
	Självpotential							
	Resistivitet							
	Galvanostatic pulse							
	Högenergiröntgen							
	Termografering							

**Kommentar:.**

Noggrannhet för IE, GPR och SASW ligger på ca $\pm 10\%$.

Figur C10. Tjockleksbestämning av balk, vägg eller liknande.

IDENTIFIERADE METODER	PROBLEM 11. (Se Tabell 4-5) Mätning av betongtjocklek vid gjutning mot berg.	Anpassad för problemställningen	Geometrisk upplösning	Krav på betongens yta	Närvaro av armering	MEDELVÄRDE	Övriga miljöfaktorer	SAMMANVÄGD BEDÖMNING
	Ultrasonic Pulse Velocity							
	Ultrasonic Pulse Echo							
	Sonic Tomography							
✓	Impact Echo	1.75	1.75	1.25	1.75	1.62		H
	Impulse Response							
✓	Ytvågsseismik	1.75	1.25	1.25	1.75	1.5		H
	Experimentell Modanalys							
	Akustisk Emission							
✓	Georadar	1.75	1.75	1.75	0.5	1.31		M
	Radar scanner							
	Självpotential							
	Resistivitet							
	Galvanostatic pulse							
	Högenergiröntgen							
	Termografering							



Figur C11. Tjockleksbestämning av betong gjuten mot berg.

Kommentar:

ELFORSK

SVENSKA ELFÖRETAGENS FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGS – ELFORSK – AB
Elforsk AB, 101 53 Stockholm. Besöksadress: Olof Palmes Gata 31
Telefon: 08-677 2530. Telefax 08-677 2535
www.elforsk.se