

Möjligheter till kontroll av betongkonstruktioner med oförstörande mät- och utvärderingsmetoder

Elforsk Rapport 97:18

Möjligheter till kontroll av betongkonstruktioner och oförstörande mät- och utvärderingsmetoder

Elforsk rapport 97:18

Möjligheter till kontroll av betongkonstruktioner och oförstörande mät- och utvärderingsmetoder

Elforsk rapport 97:18

Sammanfattning

Idag finns ett antal oförstörande kontrollmetoder för användning på betongkonstruktioner. Möjligheter finns att detektera och lokalisera skador samt i begränsad utsträckning också för att värdera skadetyper och deras betydelse för konstruktionen.

I rapporten beskrivs de oförstörande provningsmetodernas grunder och deras potential för tillståndskontroll vid olika grundläggande skadetyper. Sprickor och delamineringar kan företrädesvis detekteras med akustiska metoder. Råttbon och hålrum kan lokaliseras med såväl akustiska som radarmetoder. Läckage och fuktiga områden kan i första hand detekteras med radarmetoder. Korrosion kan mätas med elektrokemiska metoder.

Det mångskiftande kontrollbehovet i vattenkraftanläggningar, för att verifiera stabilitet, bärighet och upptagning av koncentrerade laster, värderas i rapporten mot möjliga mät- och övervakningsmetoder. De speciella förutsättningarna i anläggningarna, med stora och grova konstruktioner och ofta ensidigt vattentryck eller motfyllnad med jord, ligger till grund för en presentation av möjliga tillämpningar av oförstörande provning.

För att åstadkomma bättre konditionsbestämning av betongkonstruktioner behövs vidare-utveckling av de grundläggande kontrollmetoderna. I första hand erfordras bra koppling mellan mätresultaten och deras läge i konstruktionen så att tillståndsbedömningen kan göras effektiv, men också utvärderingsmetoder som kopplar informationen från flera mätpunkter så att en bättre värdering av tillståndet kan göras och falska skadeindikationer sorteras bort. Exempel på metodkoncept baserade på automatiska mätprocedurer och avancerad bearbetning och värdering av mätdata presenteras.

Skanning med stötvågsmetod (IE) för detektering av defekters läge i en profil genom en konstruktion visas. Vidare beskrivs möjligheter till bestämning av egenskaper hos olika skikt i en konstruktion (inklusive eventuell motfyllnad) genom mätning med ytgående vågor (SASW). En indirekt och relativt snabb bestämning av variationer i materialegenskaper i ett snitt genom en konstruktion kan fås genom automatiserad ultraljudstomografi. Bestämning av defekters läge i konstruktionsdelar med komplicerad form kan möjliggöras genom speciella mätuppläggningar och grafisk presentation som vid ultraseismisk metod (US). Vidare kan 3D avbildning av en konstruktionsdel fås genom omfattande automatiska mätningar med radarskanner.

De oförstörande metoderna har hittills i begränsad utsträckning kommit till användning svenska vattenkraftanläggningar, men erfarenheter behöver fås med metoderna i verkliga tillämpningar för att bygga upp en kunskap om deras möjligheter att bidra vid skadeutredningar och tillståndsbedömningar. Genom deltagande från kraftindustrin i utvärderingar och vidareutveckling av metoder och utrustningar kan fältmässiga utrustningar anpassade för kraftindustrins konstruktioner och problem erhållas.

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	1
1.1	BAKGRUND	1
1.2	SYFTE	1
2	GRUNDER FÖR OFÖRSTÖRANDE INSPEKTIONSMETODER	2
2.1	MÄTNING	2
2.2	ANALYS	5
2.3	POTENTIAL FÖR TILLSTÅNDSKONTROLL	5
3	TILLÄMPNINGAR I VATTENKRAFTANLÄGGNINGAR	7
3.1	MÄTSITUATIONER OCH KONTROLLBEHOV	7
3.2	KONTROLLMÖJLIGHETER MED OFÖRSTÖRANDE METODER	9
4	MÖJLIGHETER TILL BÄTTRE TILLSTÅNDSBEDÖMNING	15
4.1	ALLMÄNT	15
4.2	INSAMLING, BEARBETNING OCH VÄRDERING AV MÄTDATA	16
4.3	NYA METOD KONCEPT	19
5	SLUTSATSER	24
5.1	ALLMÄNT	24
5.2	REKOMMENDATIONER FÖR FÄLTMÄSSIG ANVÄNDNING	24
5.3	VIDAREUTVECKLING	24
6	REFERENSER	26

Bilagor

A BILAGA

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Metoder för kontroll av betong i äldre konstruktioner behövs för att ge en grund för åtgärdsbeslut. Vid beslut om åtgärder, vare sig syftet är att säkerställa funktion och säkerhet eller att försäkra att lämpliga och kostnadseffektiva åtgärder vidtas, behövs ett detaljerat underlag. Kunskap om aktuellt skadeläge (fysiskt tillstånd), skadornas betydelse för konstruktionens funktion (funktionellt tillstånd) och skadornas utvecklingstakt kan ge möjlighet till en bestämning av resterande livslängd. Sådan information blir därför avgörande vid beslut om tidpunkt för reinvestering.

Vid tillståndskontroll av betong i kraftanläggningar finns mångskiftande behov både gällande typer av konstruktioner som ska kontrolleras och typer av skador som ska detekteras. Detta gör att många olika mätmetoder kan ha sitt berättigande. Metoderna kan dessutom täcka 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.

Vid tillståndskontroll i samband med allmän konditionsbedömning finns behov av inspektion av stora ytor och utvärdering av helhetsbilden. Detta leder till att en hög grad av automatisering av mätförfaranden och utvärdering är önskvärd. Lättillgänglig presentation av mätdata på ett sätt som knyter an till läget i konstruktionen är av vikt. För värdering av mätresultat är också möjligheten att relatera mätresultat i ett läge på konstruktionen till uppmätta resultat från omgivningen av betydelse.

1.2 Syfte

Rapporten syftar till att identifiera kontrollmöjligheter som finns idag för mätning på betong samt ge en analys av utvecklingsmöjligheter för mät-, bearbetnings- och värderingsmetoder för att förbättra kontrollmöjligheterna.

2 Grunder för oförstörande inspektionsmetoder

2.1 Mätning

2.1.1 Utbredning av akustiska vågor

Metoder med sin grund i utbredning av akustiska (mekaniska) vågor har en god potential

för tillståndskontroll av betongkonstruktioner [1]. Såväl detektering av stora defekter i konstruktioner på tiotals meter som detektering av nedbrytningsgrad i klena konstruktioner kan utföras beroende på utformning av mätmetod, val av utrustning och analys. Vågorna detekterar i första hand luft- och vattenfyllda defekter, men kan inte passera förbi ett luftskikt.

Mätning rakt igenom en konstruktionsdel med bestämning av utbredningshastighet och dämpning av ljudvågen kan användas för att karakterisera materialet och dess grad av nedbrytning eller för att detektera annan typ av skada. Mätning från en sida av en konstruktion med registrering av reflexer ger möjlighet att hitta hålrum, lamineringar och sprickor. Defekter kan lägesbestämmas utgående från ett ekos ankomsttid eller dess resonanstrekvens.

De reflekterande och transmitterande egenskaperna hos olika typer av defekter i betong används för att detektera skador. Dessa egenskaper styrs av skillnaden i akustisk impedans mellan betongen och defekterna. Impedansen beror av produkten mellan densitet och elasticitetsmodul och det innebär att en akustisk våg kan reflekteras där densitet och/eller E-modul ändras. Vatten eller luftfyllda hålrum och sprickor utgör goda reflektorer för en akustisk våg. Vid luftfyllda hålrum fås ingen penetration av ljudvågen över defekten och in i materialet bakom. Den enda möjligheten att få information om betongen innanför ett luftfyllt hålrum är genom den diffraktion av vågen som kan uppstå om förhållandena mellan våglängd och storlek på hålrummet är gynnsamma. Armeringsjärn ger distinkta reflexer om de har en storlek i paritet med våglängden, men de ger också transmission av en del av ljudvågen. Inneslutningar av nedbrutet material kan ha ändrade materialegenskaper eller ökad porositet och därigenom utgöra en akustisk diskontinuitet som förorsakar reflexer.

E-modulförändringar eller densitetsförändringar på tiotalet procent kan inte förväntas leda till märkbara reflexer, men däremot ökad spridning av vågen.

Akustiska vågor kan exciteras i vatten och på så vis föras in i en betongkonstruktion. Detta används vanligtvis endast för att sända in ljudvågor som sedan tas emot på torr sida.

2.1.2 Utbredning av elektromagnetiska vågor

Metoder baserade på elektromagnetisk vågutbredning har potential vid tillståndskontroll av stora betongkonstruktioner som inte är alltför hårt armerade. Elektromagnetiska vågor kan beroende på våglängden penetrera genom tiotals meter betong. De kan

användas för att detektera i konstruktionen ingående metall, men också för att hitta luft- och vattenfyllda defekter. Elektromagnetiska vågor kan inte penetrera ett metallskikt.

De elektriska egenskaperna hos materialet blir avgörande för funktionen hos mätmetoder baserade på elektromagnetisk vågutbredning. Vid mätningar baserade på reflekterad energi behövs kunskap om skillnader i elektrisk impedans för frisk och skadad betong, armeringsjärn och fukt.

En radarmätning påverkas i första hand av utbredningshastigheten i de material som den elektromagnetiska vågen kan komma att transporteras genom [2]. Utbredningshastigheten för elektromagnetiska vågor i betong är väsentligt lägre än den i luft. I vatten är utbredningshastigheten för en elektromagnetisk våg ytterligare lägre. En fuktig betong har därför en lägre utbredningshastighet än torr betong. Reflektionen vid en gränssyta avgörs av impedansskillnaden mellan skikten. Den elektriska impedansen kan för praktiska ändamål uttryckas som inversen av utbredningshastigheten. Detta leder till att energin reflekteras i ett gränsskikt mellan betong och luft och även i gränsen mellan betong och vatten, men med olika fas för de två fallen. Vid gränsskikt mellan betong och stål fås en nära total reflektion och följaktligen inte någon penetration av vågen in i stålet.

Detekterbarheten för skador avgörs både av deras storlek och av deras relativa avvikelse fråga om elektriska egenskaper från det omgivande materialet. Vid en transmissionsmätning baserad på tomografi är det i första hand avvikelser i hastighet och dämpning som är av betydelse. En omfattande egenskapsavvikelse utgör i det fallet armeringen i en betongkonstruktion. Genom den väsentligt avvikande hastigheten för vatten jämfört med torr betong utgör även vattenfyllda hålrum eller en fuktmättad porös betong en distinkt avvikelse.

Radarantennerna kan sänkas ned i vatten och på så vis generera vågor som fortplantas vidare in i konstruktionen. Sändning och mottagning i vatten används i första hand vid mellan-hålsmätningar.

2.1.3 Utbredning av radioaktiv strålning

Radioaktiv strålning kan penetrera och detekteras för mätsträckor upp till cirka 1 m i betong. Med variationer i strålningsnivå kan i första hand densitetsvariationer detekteras, men skiktet med förändrad densitet får inte vara för tunt vilket innebär att t.ex. sprickor och delamineringar är svåra att detektera.

Vid betongprovning används i första hand betastrålning. Strålningen kan genereras i accelerator varför radioaktiva isotoper inte är nödvändiga. Detta och känslig mottagande film gör att relativt kort exponeringstid och därigenom säkerhetsavstängning kan användas. Mätningar görs med strålkällan på ena sidan objektet och mottagande film på den motsatta.

Strålkällan kan sänkas ned i vatten vilket då utgör en skärm för strålningen mot omgivningen.

2.1.4 Elektrokemiska processer

Genom elektrokemiska mätningar detekteras processer med koppling till korroderad armering eller pågående armeringskorrosion.

De elektrokemiska metoderna baserar sig på mätningar av det elektriska fältets egenskaper vid inducerade strömmar i materialet. Olika egenskaper kan mätas, som existerande elektrisk potential, inducerad elektrisk resistivitet och dess frekvensberoende samt polarisationsresistans. Dessutom kan mät- och analysmetoderna utformas på olika sätt. Mätningarna kan påvisa korrosion genom de galvaniska strömmar som uppstår mellan skadade och oskadade områden på armeringen. Korrosionshastigheten kan också uppskattas då den är proportionell mot strömintensiteten. Därför kan fristående mätning av resistivitet och potential ge en skadeparameter för bestämning av korrosionshastighet. En annan metod som ger information om korrosionshastigheten är polarisationsresistansmätning som bygger på att förlusten av tvärsnittsarea per tidsenhet i stålet kvantifieras [3].

2.1.5 Svängningsbeteende

Vid en svängningsmätning fås i första hand indikationer om förändringar i styvhet och massa i en hel konstruktion samt om konstruktionens samverkan med anslutande konstruktionsdelar eller upplag.

Bestämning av de naturliga vibrationsfrekvenserna för en kropp utgör grundvalen för en metod att uppskatta materialets fysikaliska egenskaper eller för att detektera defekter i en konstruktion. En mätmetod som grundar sig på en konstruktions dynamiska beteende har som mål att identifiera dynamiska parametrar som egenfrekvens, dämpning och modform genom mätning av konstruktionens rörelser. Strukturens svängningsbeteende och modeller för detta verifieras genom att kända exciteringar får sätta strukturen i svängning [4]. Kännedom om de dynamiska parametrarna ger möjligheter att kvantifiera styvhetsförändringar och variationer i upplagsförhållanden samt eventuellt att lokalisera förändringarna konstruktionen.

2.1.6 Avgivande av infraröd strålning

Variationer i temperaturer på ytan av en konstruktion kan indikera variationer i värmeledning i konstruktionen. I första hand ger luft- och vattenfyllda hålrum upphov till förändrad konduktivitet jämfört med likformig betong, men även ökad porositet kan ge en motsvarande effekt.

Mätning av infraröd strålning ger indirekt ett mått på ytans temperatur då den avgivna strålningen är proportionell mot föremålets temperatur. Mängden och våglängden på den utstrålade energin beror utöver på temperaturen på föremålets emittans, dvs materialets förmåga att utstråla. Detta leder till att en kropp strålar inom ett visst område av IR frekvenser varför kamerautrustning för IR mätning måste anpassas för tillämpningen. Kroppar med temperaturer omkring 30 °C utstrålar sina högsta energinivåer vid våglängder runt 9 µm.

Med beräkningsprogram kan temperaturgradienter i tredimensionella strukturer beräknas. På så vis kan även tidsberoende variationer i ytemperaturer beaktas [5]. Vid en beräkning av temperaturer i en kropp till följd av stationära temperaturer i omgivande luft eller av tillskott med t.ex. solljus måste värmeövergångstalet mellan kroppen och omgivande luft ansättas. För en uppskattning av absoluta ytemperaturer eller temperaturvariationer över en yta ur en mätning av IR strålning måste kopplingen mellan mängd och våglängd på utstrålad energi och kroppens temperatur och emittans beaktas.

2.2 Analys

Vid tillståndskontroll av betong är målet att fastställa det fysiska tillståndet hos konstruktionen. Det finns för kontrollmetoderna olika nivåer på de resultat som presteras.

I första steget kan metoder ge enbart en indikation om i vilka lägen konstruktionen uppvisar störst sannolikhet att vara skadad. Nästa steg är att med kontrollmetoden kunna detektera att någon typ av skada föreligger. För att ur denna information få en bedömning av det fysiska tillståndet behöver därutöver läget för defekten och dess storlek bestämmas. Lägesbestämningen, lokaliseringen, ges direkt med vissa kontrollmetoder och även storleksbestämningen. En ytterligare nivå på resultat från mätningar är att kunna bestämma skadetyper och grad av skada.

Detektering av defekter kan innebära registrering av information som endast indikerar att en defekt existerar någonstans längs en mätsträcka. Endast detektering av en defekt innebär att en liten materialförändring i en stor volym och en stor förändring av en liten volym kan ge likartade mätresultat.

Lokalisering av defekter ger bättre möjligheter till bedömningar. Lokaliseringen kan vissa fall göras genom att reflektorns läge bestäms ur ett uppmätt ekos ankomsttid. Ytterligare möjligheter är att mätningen upprepas i nya lägen så att defektens läge kan bestämmas eller att man genom användning av speciella analysmetoder som tomografi kan utföra lokaliseringen.

Storleksbestämning kan slutligen göras med upprepade lokaliseringsmätningar antingen genom en automatisk skanningprocedur eller genom t.ex. tomografianalys.

Bestämning av typ och grad av skada fordrar normalt mycket specialiserad analys, gärna med resultat från mer än en mätmetod. Kompletterande bakgrundsinformation måste tillföras analysen.

2.3 Potential för tillståndskontroll

Nedan antyds potentialen för olika fysikaliska mätprinciper för kontroll av olika typer av skador. Det anges också översiktligt hur väl metoderna lämpar sig för detektering, lokalisering och storleksbestämning.

Sprickor och delamineringar kan endast sökas med metoder som kan identifiera tunna luftfyllda skikt. Detta gör att akustiska metoder lämpar sig väl såvida sprickans plan inte sammanfaller med vågens utbredningsriktning. Metoder baserade på utbredning av elektromagnetiska vågor kan i vissa fall också lämpa sig, men även transmission av vågen över sprickan måste i så fall beaktas. Lokalisering kan göras med ekometoder och potential finns för bestämning av sprickplanets utbredning. Sprickor och delamineringar kan i vissa fall också ge ett mätbart utslag vid svängningsmätning då styvheten hos en uppsprucken konstruktionsdel förändras varför åtminstone detektering av skadan kan vara tänkbar.

Råttbon och andra hålrum kan sökas med ett flertal metoder då de kan förväntas ha en relativt stor utbredning i alla dimensioner och dessutom utgöra en stor materialavvikelse från omgivande betong. Såväl akustiska metoder som metoder med elektromagnetiska

vågor är tänkbara för att detektera och lokalisera denna typ av defekter med ekoteknik. Mätningar med radioaktiv strålning lämpar sig också för detektering av denna typ av defekt. Termografering kan också förväntas ge möjlighet till detektering av sådana defekter om tillräckliga temperaturgradienter finns eller kan åstadkommas i konstruktionen.

Urlakning förorsakar en ökad porositet vilket i många avseenden utgör en mindre egenskapsavvikelse från den oskadade betongen än t.ex. ett råttbo. Urlakning bör kunna detekteras med radioaktiv strålning om porositeten ökat i tillräcklig omfattning. Om detektering kan ske med metoden kan också lokalisering och eventuellt storleksbestämning göras. Vidare kan i vissa fall akustiska metoder tänkas detektera denna typ av förändring. Mätningen bör då i första hand bygga på dämpnings- och spridningsmätning. Elektromagnetiska metoder kan vid skanningprocedur tänkas ge mätbara reflexer från denna typ av defekt i synnerhet om den är vattenfylld. IR-termografering har också en potential för detektering av denna typ av defekt.

Korrosion ger upphov till elektrokemiska processer i armeringen och den omgivande betongen och kan därigenom detekteras med elektrokemiska metoder. I vissa fall kan också korrosionshastighet utvärderas. Av korrosionen orsakad spjälkning kan sökas på samma sätt som antytts för delaminering och sprickor. Vidare kan korrosion i grava fall tänkas ge upphov till sådana förluster i armeringsarea att styvhetsförändringar kan detekteras med svängningsmätning. Lokalisering kan inte omedelbart åstadkommas vid en svängningsmätning.

3 Tillämpningar i vattenkraftanläggningar

3.1 Mätsituationer och kontrollbehov

Som en grund för utveckling av nya metoder för tillståndskontroll behövs kännedom om typer av konstruktioner och vanliga skador. Funktions- och säkerhetskraven på konstruktionerna är också avgörande för bedömning av vilken information om tillståndet som behövs för konditionsbestämning.

Funktionskrav på betongkonstruktioner sammanfattas i tabell 1.

Tabell 1. Funktioner för och krav på betongkonstruktioner.

funktion	krav
stabilitet	egenvikt samverkan förankring
bärighet	hållfasthet verkningssätt lastfördelning
upptagning av koncentrerad last	hållfasthet

För konstruktionsdelar i betong ställs utöver krav på lastupptagning också stora krav fråga om motståndskraft mot nedbrytning från omgivande miljö. Vatten och frysning påverkar i hög grad betongens åldrande och kan vara avgörande för livslängden hos konstruktionen.

Exempel på skador som omedelbart eller på sikt kan ha betydelse för konstruktionsdelars funktion ges i tabell 2.

Inventering av konstruktioner inom vattenkraften visar att skador förekommer i såväl klena som grova konstruktionsdelar med varierande tillgänglighet. Skadorna är dessutom av varierande slag, men med tyngdpunkt på sprickor, frostsador och urlakning.

Den stora variationen i inspektionsbehov gör att behoven följdaktligen inte kan tillgodoses med en enstaka kontrollmetod utan ett koncept av flera metoder kan behövas för att täcka in de vanligaste provningssituationerna och feltyperna.

Jämfört med andra betongbyggnader och anläggningar kännetecknas många av konstruktionerna i vattenkraftanläggningar av varje objekts ofta unika utformning. Detta gör att standardsituationer för kontroll och mätning inte lika lätt uppstår som vid exempelvis broinspektion eller inspektion av byggnader. Inom vattenkraften förekommer ofta mycket grova konstruktioner och konstruktioner med varierande tvärsnitt, vilket ställer stora krav på kontrollmetoderna. Vidare skapar ensidigt vatten tryck över konstruktionen ett villkor för kontrollmetoderna som oftast inte finns andra fall. Vattnet minskar tillgängligheten och ger dessutom unika skadesituationer som genomläkning och urlakning.

Tabell 2. Förändringar med möjlig effekt på konstruktioners funktion.

funktionskrav	exempel på inverkande skadetyper
egenvikt	avskalning erosion urlakning
samverkan	sättningar (fogar, förtagningar o.d.) sprickor
förankring	urlakning sprickor korrosion
hållfasthet	frysning urlakning
verkningssätt och lastfördelning	sättningar sprickor åldring av dilatationsfogar

Hela dammväggar eller stationsväggar utgör så stora objekt att inspektionsmetoder helst ska kunna ge en helhetsbild eller indikation om allmäntillståndet. Vid luckinfästningar, generatorfundament, balkar o.d. måste metoderna kunna ge lokala svar om tillståndet liksom vid en noggrannare kontroll av delar av t.ex. dammväggar. Skadorna är också av mycket varierande storlek och utbredning alltifrån grova sprickor med stor utbredning till materialnedbrytning av t.ex. frost, vilket gör att mycket olika krav kan komma att ställas på metodernas känslighet för skada.

Mätning och övervakning av betongdammar kan inriktas mot periodiskt återkommande insatser eller utföras så att resultat kontinuerligt eller med täta intervall kan inhämtas. Kontroll av rörelser kan göras för att följa upp konstruktioners stabilitet och bärighet, i kombination med beräknade gränsvärden för deformation och eftergivlighet. Töjningmätningar tjänar som uppföljning av bärighetsbestämning, lastfördelning i konstruktionen och även vid kontroll av koncentrerade påkänningar. Nedbrytning av material kan mätas för bestämning av lokal lastupptagning och bärighet i långsiktigt perspektiv. Även kontroll av defekters utbredning kan göras för kontroll av lastupptagning lokalt och för kontroll av bärighet. I tabell 3 nedan exemplifieras hur mätning och övervakning kan tillämpas vattenkraftanläggningar.

Tabell 3. Exempel på mätningar för kontroll av förändringar.

förändringar i konstruktion	mätning och övervakning
sättningar	avvägning, extensometer, inklinometer
rörelser	avvägning, lodningskabel, inklinometer
töjningar	trådtöjningsgivare, optisk fibersensor
sprickor	mät dubb med skjutmått, extensometer, oförstörande provning
urlakningsskador	kärnborrning, oförstörande provning
frostskador	kärnborrning, oförstörande provning

3.2 Kontrollmöjligheter med oförstörande metoder

Oförstörande provning (ofp) kan bidra med information om skadeläget vid skador där utbredningen och omfattningen inte är uppenbar genom visuell granskning. Information om skador på djupet i konstruktionen kan fås genom mätning på konstruktionens yta. Exempelvis kan ofp ge viktig information vid värdering av betongens likformighet för upptagning av koncentrerade laster och vid förankring, vid bestämning av sprickriktning och sprickdjup för lastöverföring och förankring eller vid bedömning av urlaknings- och frostskaadors inverkan på lastupptagning och bärighet.

I det följande beskrivs inspektionsmöjligheter utgående från konstruktioners form och tillgänglighet. De idag etablerade metoderna bygger i första hand på akustisk och elektromagnetisk vågutbredning. För metodnamn används så långt möjligt etablerade förkortningar vilka finns listade i bilaga A. En fullständig beskrivning av metodernas principer ges i [6].

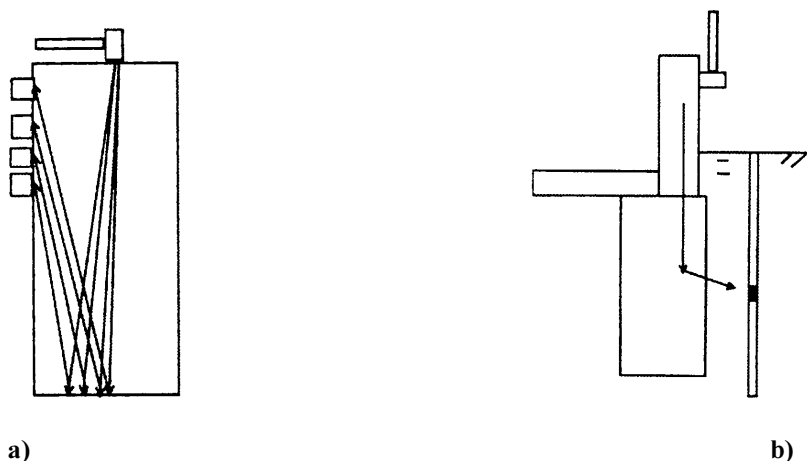
3.2.1 *Plattor, väggar ock grova pelare*

Många konstruktionsdelar kan vid planering av mätningar betraktas som plattor eller väggar, d.v.s de har en förhållandevis stor utbredning tvärs tjockleksriktningen. Dammväggar, kanalväggar, mellanväggar i intag, bjälklagsplattor och brofarbanor kan under vissa omständigheter kontrolleras enligt nedan redovisade principer.

Tvärs tjockleksriktningen

Mätningar tvärs tjockleksriktningen på en vägg karakteriseras av att konstruktionen delvis fungerar som en vågledare i mätningens djup- eller längsriktning. Detta bidrar till att förenkla tolkningen av resultaten genom att en utbredningsriktning kan försummas. Tolkningsproblem kan dock fortfarande uppstå då mätriktningen och en annan riktning har samma storleksordning och information från de två riktningarna alltså kan interferera.

Mätningar på grova väggar t.ex. ingående i massivdammar, kanaler, intagskonstruktioner och på ledmurar kan tänkas göras tvärs tjockleksriktningen som visat i figur 3.1.



Figur 3.1 Exempel på kontroll av en dammvägg tvärs tjockleksriktningen med a) ultraseismisk (US) metod och b) parallellseismisk (PS) metod

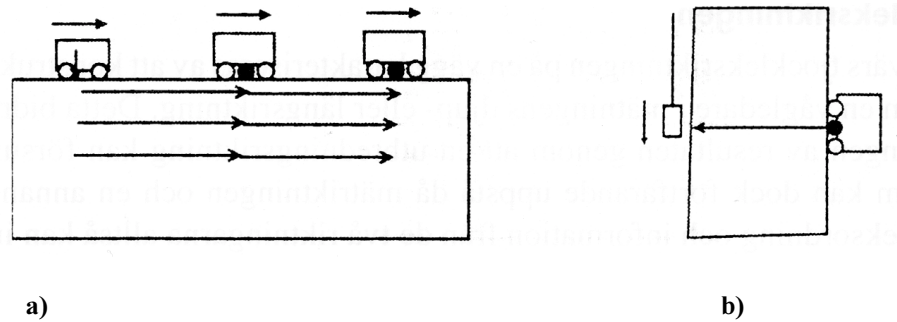
För mätning tvärs tjockleksriktningen förutsätts direktkontakt med åtminstone en av konstruktionsdelens ändytor som vid GPR (Ground Penetrating Radar), SE (Seismic Echo) och IR (Impulse Response) mätningar, vilka alla baserar sig på mätning av ekon. Integriteten kan således kontrolleras och detektering och lägesbestämning av stora diskontinuiteter som sprickor och hålrum utföras.

Förbättrad detektering av skador kan fås med metoder som använder ytterligare en yta på konstruktionen (eventuellt via vatten) eller ett borrhål i eller intill konstruktionen. Exempel på sådana möjligheter är US (Ultra Seismic) och PS (Parallel Seismic) vilka schematiskt illustrerats i figur 3.1 a) respektive b). För US-metoden finns möjlighet att genom åtkomlighet endast i en begränsad del av konstruktionen söka reflekterande ytor utanför mätområdet. Metoden beskrivs närmare i avsnitt 4.3.4. Med PS-metoden är det möjligt att få en profil av kvalitetsvariationer i betongen och i förekommande fall i intilliggande jordmaterial.

I tjockleksriktningen

Mätningar i tjockleksriktningen av en platta eller vägg ger en mätsituation där mätriiktningen är väsentligt mer begränsad än konstruktionens två andra utbredningsriktningar. Detta gör att störningar från konstruktionens ändytor normalt inte behöver beaktas vid skadedetektering i tjockleksriktningen.

Mätningar på bjälklagsplattor och väggar i stationer, på dammväggar som frontplattor i lammeldammar, kanalväggar, mellanväggar i intag och på stödmurar kan göras i tjockleksriktningen som visat i figur 3.2.



Figur 3.2. Exempel på kontroll av en dammvägg i tjockleksriktningen med a) spektralanalys av ytgående vågor (SASW,) och b) korsvisa ljudmätningar (CS).

En grundläggande skiljelinje för kontrollmöjligheterna går mellan de metoder som förutsätter direktkontakt med endast en av konstruktionsdelens sidor (GPR, IE, SASW och slabIR) och de metoder som använder båda sidor av konstruktionen (eventuellt via vatten) eller borrhål i eller intill konstruktionen (borrhålsradar, CS och CSL).

Kontroll av konstruktionsdelens tjocklek, delamineringar, hålrum o.d. kan göras från ena sidan av konstruktionen med hjälp av IE (Impact Echo) eller GPR (Ground Penetrating Radar). Mätning med IE kan göras för ytskiktet av konstruktionen även om den som helhet är för tjock för att medge att ekon från baksidan tas emot. Vid kontroll av platta på mark eller stödvägg mot jordfyllning kan med fördel metoder som SASW (Spectral Analysis of Surface Waves) och slabIR (Impulse Response för plattor) användas. SASW, schematiskt illustrerad i figur 3.2 a), kan användas för att bestämma om nedbrutna skikt finns i plattan och även karaktären hos jordmaterialet under plattan. SlabIR kan användas för tjockleksbestämning av betongen och styvhetsbestämning av underlaget.

Mellan två sidor av konstruktionen kan mätning med UPV (Ultrasonic Pulse Velocity) användas för att detektera kvalitetsvariationer, hålrum o.d. Mätningar kan göras som CS (Cross Sonic) och CSL (Cross Sonic Log) eller korsvis för att utgöra bas för beräkning av hastighetsfördelningen i snittet med tomografianalys, som visat i figur 3.2 b). Därigenom kan hålrum och zoner med nedbrutet material lokaliseras. Motsvarande mätningar kan göras mellan två borrhål längs med dammlinjen.

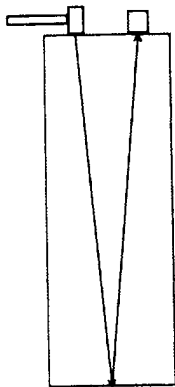
3.2.2 Balkar och slanka pelare

I vattenkraftanläggningar finns konstruktionsdelar som vid mättningsplanering kan ses som balkar eller slanka pelare vilket innebär att de har en begränsad utbredning i planet tvärs längsriktningen. Enligt de mättningsprinciper som redovisas nedan kan exempelvis frontbalkar i intag, brobalkar och pelare i stationsbyggnader kontrolleras.

I längsriktningen

Vid mätning i längsriktningen fungerar konstruktionsdelen som en ledare vilket gör att tolkningen av matdata förenklas då störningarna blir små.

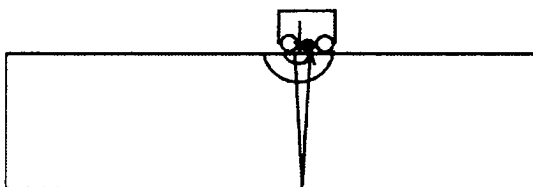
Vid kontroll av kanske i första hand slanka pelare, men under vissa betingelser också balkar kan provningar utföras i konstruktionsdelens längsriktning som visat i figur 3.3.



Figur 3.3. Exempel på kontroll av en påle i längsriktningen med seismiskt eko (SE) eller impulsrespons (IR) metod.

Kontrollen baseras i normalfallet på mätning från endast en yta (SE, IR), men kan för åstadkomma förbättrade kontrollmöjligheter göras med hjälp av ytterligare mätytor (US). En åtkomlig konstruktion kan innebära mätningar görs från toppen på en påle, från två av en påles sidor i dess övre del eller från ovansidan på ett brofäste.

Integriteten hos pålar och brofundament kan kontrolleras och detektering och lägesbestämning av diskontinuiteter som sprickor och hålrum kan utföras med SE/IR (Sesmic Echo/ Impulse Response) som visat i figur 3.3. Vid mer komplicerade skadebilder kan US (Ultra Seismic) ge bättre resultat, se figur 3.1 a).



Tvärs längsriktningen

Mätning på balkar och pelare tvärs längsriktningen innebar att konstruktionen har samma storleksordning i mätriktningen och i en annan riktning. Detta får till följd att inverkan från längsriktningen kan försummas

medan effekterna från båda riktningarna i tvärsektionen måste beaktas.

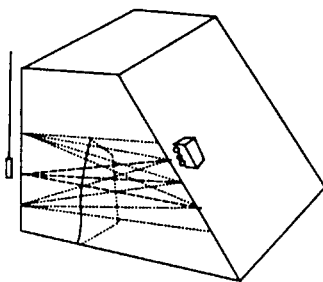
Vid kontroll av pelare och balkar kan mätningar utföras som illustrerat i figur 3.4.

Figur 3.4. Exempel på kontroll av en frontbalk tvärs längsriktningen med metod baserad på stötvågseko (IE).

Kontrollen kan baseras på mätningar från en sida (IE, UPE) eller från två olika sidor (UPV, CS, CSL). Mätningar mellan två sidor ger mer omedelbara tolkningsmöjligheter medan ensidig mätning gör att vissa beräkningar av effekter från tvärsnittets gränssytor måste göras. En konstruktion som inte är åtkomlig på ett lämpligt sätt eller där mer detaljerad information önskas kan mätas mellan två borrhål eller mellan konstruktionen och ett borrhål eventuellt kombinerat med tomografianalys.

IE (Impact Echo) kan t.ex. användas för att hitta sprickor, hålrum och delamineringar pelare och balkar. UPV (Ultrasonic Pulse Velocity) kan användas i motsvarande situationer. Verifiering av integriteten hos en grävpåle eller annan gjuten konstruktion i mark eller vatten kan göras mellan borrhål med CS eller CSL (Cross Sonic Log).

3.2.3 Konstruktioner med oregelbunden form



Vid mätning på konstruktionsdelar med oregelbunden form, där alla utbredningsriktningar är i samma storleksordning eller i anslutningar mellan olika konstruktionsdelar, måste mätmetoden antingen kunna rikta sökningen eller genom analys och inversberäkningar kunna korrigera för störningar från andra riktningar än mätriktningen.

Kontroll av oregelbundna konstruktionsdelar kräver noggrant val av metod, god planering av mätuppläggningsen och ofta relativt omfattande analys. Exempel på en mätuppläggning för en sådan typ av konstruktion visas i figur 3.5.

Figur 3.5. Exempel på kontroll av en utskovspelare med ultraljudstomografi

För kontroll av konstruktionsdelar som landfästen, utskovspelare, skibord och intagskonstruktioner krävs normalt mätuppläggningsen med omfattande mätserier och analys (IE, IR, SE, SASW, US, GPR, UPV, CS, CSL).

Där konstruktionsdelen inte är alltför komplicerad och skadebilden någorlunda enkel kan grundläggande metoder som IR (Impulse Response), SE (Seismic Echo) och GPR (Ground Penetrating Radar) användas. För skiktningar som följer ytan från vilken mätningen görs, kan IE (Impact Echo) och SASW (Spectral Analysis of Surface Waves) ge god kontrollmöjlighet. Vid kvalitetsvariationer kan kontrollen göras med UPV

(Ultrasonic Pulse Velocity), CS och CSL (Cross Sonic Log), gärna i kombination med tomografianalys, figur 3.5. För skadedetektering I besvärliga lägen kan US (Ultra Seismic) ge möjlighet att värdera likformigheten hos en konstruktionsdel.

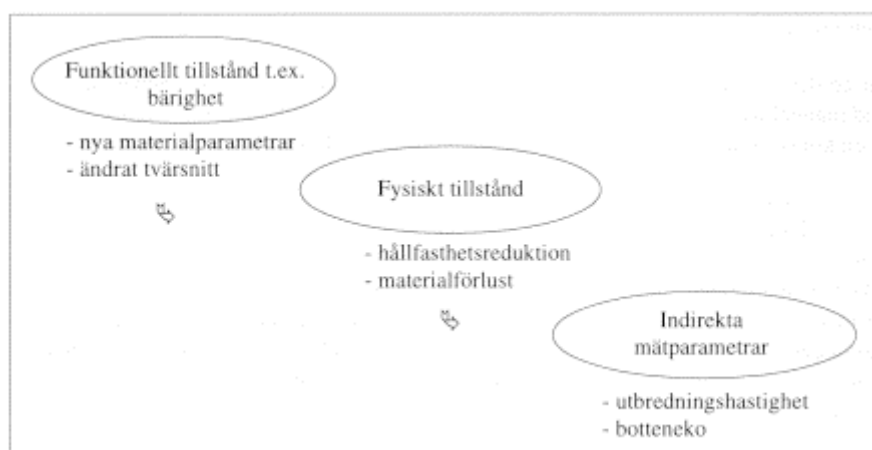
4 Möjligheter till bättre tillståndsbedömning

4.1 Allmänt

Förbättrad tillståndsbedömning (konditionsbestämning) kräver god tillståndskontroll, men också förståelse för skadornas betydelse för konstruktionens beständighet och funktion.

Nya mätmetoder (oförstörande provningsmetoder) ger endast indirekt information om kontrollerad konstruktion och materialkvalitet. Mätparametrarna som är knutna till använd mätmetod måste ges en koppling till det fysiska tillståndet hos konstruktionen d.v.s. till förekomst av beständighetsskador, fuktt innehåll eller andra förändringar i betongen. Dessa förändringar behöver sedan återknytas till konstruktionens funktion. Ett exempel på behovet av ett sådant samband mellan mätmetodernas parametrar, den fysiska statusen för betongen och slutligen konstruktionens kondition visas i figur 4.1.

Figur 4.1. Exempel på relationer mellan mätning, fysiskt tillstånd och funktionellt tillstånd.



Relationer mellan mätparametrar och det fysiska tillståndet fastställs genom fält- och laboratorieerfarenhet och de används för att formulera analysmetoder för skadedetektering samt metoder för skadevärdering. Möjligheter till skadedetektering och skadevärdering redovisas i avsnitt 4.2.2 och 4.2.3.

För att etablera en koppling mellan uppmätta parametrar och fysiskt tillstånd behövs vidare konstruktiv information som i vilken positionen på konstruktionen som mätningen utförts. För en förbättrad konditionsbestämning bör mätdata lagras tillsammans med sådan information. Metoder för att åstadkomma detta redovisas i avsnitt 4.2.1.

För att göra det möjligt att ta fram ett stort underlag för konditionsbestämning och livslängdsbedömning finns behov av att med ringa insats kunna göra omfattande mätningar.

Vidare bör återkommande mätningar lätt kunna jämföras genom en effektiv utvärdering. Metodkoncept som ger sådana möjligheter presenteras i avsnitt 4.3.

4.2 Insamling, bearbetning och värdering av mätdata

4.2.1 *Datainsamling och lagring*

Förenklad tillståndskontroll och möjligheter till förbättrad konditionsbestämning kan uppnås genom automatiserade mätförfaranden och insamling av stora mängder mätdata med koppling till läget i konstruktionen.

Den enklaste och idag vanligaste typen av datainsamling och lagring är helt manuella mätningar med lagring av resultatet från varje mätpunkt separat, utan koppling till mätningar omgivningen.

För ett lagringsförfarande som kopplar uppmätt information till resultat från omgivningen kan mätlinjer med fixt avstånd mellan mätpunkter användas och lagring av data från en hel linje görs i en och samma mätdatafil. Genom lagring av data längs sådana skan-linjer kan utvärderingen effektiviseras. Ett sådant mätförfarande kan genom utrustningsutveckling relativt lätt automatiseras. Automatiska mätningar längs linjer på konstruktionen kan också användas för att bygga upp mätdataset som kan användas i avancerade analyser där även informationen från de olika mätpunkterna kombineras.

För en detaljerad bild av en konstruktion kan också mätningar i ett fixt rutnät användas, med manuella eller automatiska mätningar. En fullständigt automatisk skanning av en yta på en konstruktion ställer stora krav på mätutrustning och datorkraft för utvärdering.

Mätsystem som lagrar data med automatisk koppling till konstruktionen kan bygga antingen på att mätningen görs i en utvald punkt och data lagras med en automatisk positionsbestämning (utifrån någon referens) eller på att själva positioneringen utförs automatiskt av mätsystemet. Automatisk positionering bygger på att ett i förväg fastställt mönster för mätningen måste följas. Mätningen är då inte så flexibel att det enkelt går att förtäta mätningen vid indikation på skador och att öka avståndet mellan mätpunkter när konstruktionen bedöms som likformig. Vid automatisk bestämning av mätpunktens geografiska läge kan mer flexibla system byggas upp.

4.2.2 *Skadedetektering*

För att detektera skador eller områden i betongen som avviker från resten av konstruktionen kan olika angreppssätt användas. Det enklaste och mest direkta angreppssättet är att varje mätning utvärderas för sig och konstruktionens fysiska tillstånd i mätpunkten bedöms. Vid mätningar där mätpunkterna relateras inbördes finns ytterligare möjligheter att förbättra bedömningen av fysiskt tillstånd utifrån mätdata.

Traditionellt med oförstörande metoder är punktvis mätning och utvärdering som utgör basen för mätprincipen. Vid TE och UPE-mätningar används ett identifierat eko i

mätdata som en indikator på att en skada eller förändring föreligger i konstruktionen. Vid många typer av mätningar i betong låter en sådan identifiering i mätdata sig inte så lätt göras pga störningar från betong och armering eller konstruktionens gränssytor.

Genom att redovisa obearbetade eller bearbetade mätdata från flera mätpunkter tillsammans kan avvikelser i mönstret i vissa fall identifieras med blotta ögat. Mönster som uppträder på så vis kan möjliggöra skadedetektering ur set av mätdata där detektering av skadan inte är möjlig ur enstaka mätningar. Detta är grunden för exempelvis GPR och CSL-mätningar. Obearbetade radardata används med fördel i oarmerade betongkonstruktioner medan bearbetning av mätdata kan vara lämplig för att reducera störande inverkan av armering.

Säkrare detektering av skador och undertryckande av störningar i uppmätta data kan erhållas genom bearbetning och analys av mätdata. Enkel brusreducering genom medelvärdesbildning kan i vissa fall räcka medan störningar som inte förekommer stokastiskt, men har kända egenskaper, kan elimineras genom olika typer av flitring. Transformerings av data kan användas för att lyfta fram den väsentliga informationen, något som till exempel används i IL-metoden. Genom lämplig bearbetning kan detektering av skador åstadkommas från en enstaka mätpunkt där rådata inte omedelbart kan tolkas. Exempel på signalbehandling i samband med oförstörande provning ges i [7].

Kombinationer av bearbetning av mätdata och sammanhållen analys av mätningar från flera näraliggande mätpunkter kan ytterligare förstärka detekteringsmöjligheterna.

Vid sådana mätningar där betong och armering ger ett visst brus som kan bidra till att dölja intressant information som ekon kan kombinationer av koherent och icke-koherent medelvärdesbildning användas för att urskilja de olika delarna av informationen i mätdata [7], [8].

Vid avancerad bearbetning av mätdata från oförstörande provning ligger ofta teoretiska modeller och beräkningar till grund för analysen. Problemet kan innebära att den önskade informationen om konstruktionens tillstånd ska extraheras ur mätningar med störningar, med hjälp av en idealiserad modell av mätmetoden (inversproblem). Problemen som ska lösas är i regel illa konditionerade så att små mätfel ger stora fel i lösningen. Mätnoggrannheten kan därför vara avgörande samtidigt som lösningsmetoderna också kan förbättras genom att a priori information utnyttjas. Exempelvis kan lösningen hänföras till en klass av fysikaliskt möjliga lösningar eller så kan probabilistisk kunskap om lösningen eller statistisk fördelning av felen användas för att förbättra lösningsmetoden.

Ofta behöver den intressanta kvantitativa informationen vid oförstörande provning extraheras ur en eller flera fysikaliska mätningar som i sig endast indirekt är relaterade till den önskade informationen. Detta ger upphov till inversproblem. Exempelvis ger en mätsensor ofta ett rumsligt medelvärde eller tidsmedelvärde av den önskade

informationen. Ett sådant medelvärde kan t.ex. uttryckas matematiskt som en integralekvation (t.ex. som en konvolution) eller som ett system av linjära ekvationer (t.ex. som i tomografi).

Exempel på mer avancerad bearbetning är tomografianalys av UPV-data, inversberäkningar av hastighetsprofiler vid SASW-mätningar, uppdatering av FE-modeller med mätdata från experimentell modanalys (EMA) [4] och utvärdering av TE-mätningar för t.ex. balkar, där tvärsnittsform och dimensioner måste beaktas, med FE-modeller [9].

4.2.3 Skadevärdering

För att värdera en skada utgående från oförstörande provning måste ett indirekt samband upprättas mellan mätparameter och skadetyper och/eller skadegrad. Ett sådant samband blir sällan entydigt utan ytterligare kunskap om t.ex. tänkbara skador på konstruktionen och andra på mätningen inverkan faktorer behövs som ytterligare ingående parametrar värderingen.

Teoretiska samband mellan skadetillväxt och indirekta mätparametrar existerar sällan. För värdering av skadeläget för en konstruktion måste därför det grundläggande sambandet mellan skadegrad/skadetyper och mätparametern etableras genom erfarenhet från mätningar. Denna erfarenhetsuppbyggnad kan åstadkommas på olika sätt och användning av den vid förnyad mätning ske på olika sätt.

Samband mellan skadetillväxt och uppmätta parametrar vid oförstörande provning har flera fall påvisats i laboratorieprovning. Att utifrån sådana försök omedelbart ställa upp samband för kvantifiering av nedbrytning i konstruktion är inte möjligt. Däremot kan kvalitativ information om nedbrytningsgrad och uppföljning av förändringar vara möjlig vissa tillämpningar. Kombination av flera mätparametrar [7] eller flera mätningar med olika mätsensorer (multipla sensor system) ger vanligtvis bättre information.

För erfarenhetsuppbyggnad och hantering av uppbyggd erfarenhet kan kunskapsstödjande system (artificiell intelligens) användas. Vid tolkning av mätdata från en enstaka mätmetod har system baserade på nevralla nät, d.v.s. upplärningsbara nät där kopplingarna i nätet inte består av fysikaliskt tolkbar information, visat sig fungera väl. En sådant tränat nevralt nät har dock begränsningen att bara kunna tolka information som funnits inom gränserna för vad det tränats för. Det är också på grund av nätets konstruktion svårt att göra rimlighetsbedömningar av de resultat som faller ut från analysen. Nevrala nät kan användas för att värdera typ och/eller grad av skada i fall där giltighetsområdet för analysen entydigt kan bestämmas.

En ytterligare möjlighet till användning av kunskapsstödjande system är i den fas som involverar värdering av funktionellt tillstånd utifrån mätningar. Kunskapsbaserade formuleringar kan hantera och värdera resultat från en eller flera metoder vid ett enstaka mättillfälle eller för en serie av mätresultat genom att tillämpa logiska beslutsregler. Sådan kunskapsbaserad information kan också kopplas till strukturmodeller.

Kunskapsbaserad formulering kan användas för värdering av konstruktioners tillstånd och ger möjlighet till kontroll och styrning av värderingsgrunder.

Karakterisering och igenkänning av defekter kan åstadkommas genom bildbehandling av stora mätdatamängder som samlats in med en koppling till läget i konstruktionen.

4.3 Nya metod koncept

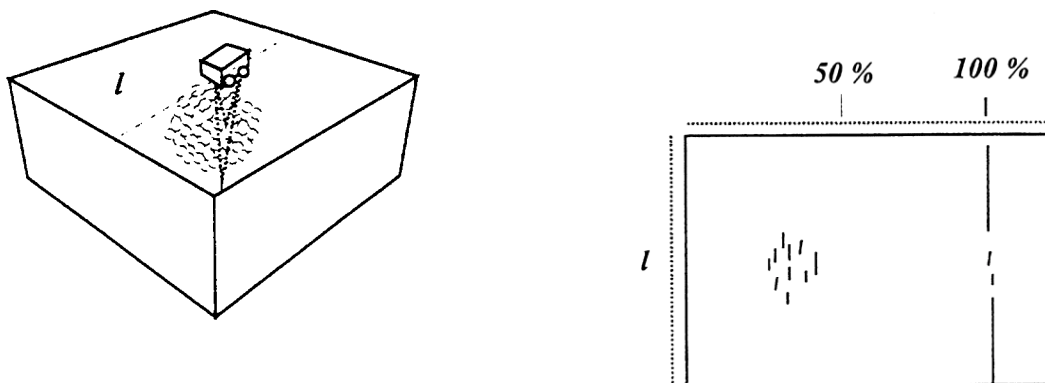
Nedan ges beskrivningar av metoder som genom en hög grad av automatisering kan svara mot kraven på snabb, enkel och heltäckande kontroll. Urvalet ger exempel på pågående utvecklingsinsatser där förbättrade kontrollmöjligheter eftersträvas genom effektivare mätningar och utvärderingar. Vissa av metoderna utnyttjar, eller lämpar sig i fortsatt utveckling för, avancerad analys som bildbehandling och inverstransformer.

4.3.1 Profiler av konstruktion med Impact-Echo linjeskanner

IE (Impact-Echo) mätningar utförs för att bestämma konditionen hos betongen i plattor, balkar, pelare, väggar, betongfarbanor, tunnelinklädningar och dammar. Mätningen görs från ena sidan av konstruktionen och utförs punktvis. Metoden kan detektera hålrum, sprickor, delamineringar och råttbön. Mätningar kan också i vissa fall göras för att bedöma kvalitén på gammal betong eller uppnådd hållfasthet vid tidig ålder.

Generellt kan IE metoden användas för mätning på cirka 1.5 m djup, men med särskilt anpassade sökare kan mätningar göras med större sökdyb, ned till cirka 3 m djup. Metoden övergår sedan mot SE med avseende på analysteknik.

En vidareutveckling av den ursprungliga IE metoden har utförts vid Olson Engineering Inc., Colorado. Utvecklingen innebär att utrustningen anpassats till automatisk mätning längs en linje, figur 4.2 (vänster). Utrustningen (sändare och mottagare) är monterad på en liten vagn som rullas över konstruktionens yta. Sändningen åstadkoms med en elektriskt styrd stöt som avges när mottagaren är i läge mot betongen. Mottagning av ljudvågen sker en hjulsökare där flera runt periferin på hjulsökaren monterade piezoelement i tur och ordning kopplas in. Denna konstruktion ger en fysisk begränsning av mätuppläggnings genom att ett fixt avstånd mellan mätpunkterna erhålls, svarande mot avståndet mellan mottagarkristallerna i hjulet. Mätsträckan på betongen vattenbegjuts genom sprayning framför mottagaren. Vid automatisk linjeskanning med utrustningen kan tusentals mätpunkter på avstånd 2-3 tum mätas på en timme. Mätdata används för att skapa en profil genom konstruktionen längs mätlinjen, figur 4.2 (höger). Vid utvärderingen utnyttjas att mätningarna lägesmässigt är relaterade genom att mätdata från näraliggande punkter vid plottningen kan tolkas gemensamt för att se om de uppvisar likartade indikationer på förändring. För mätning med denna automatiska skannerenhet är en väsentlig begränsning för närvarande att relativt släta ytor erfordras och sökdyb understigande ungefär 30 cm.



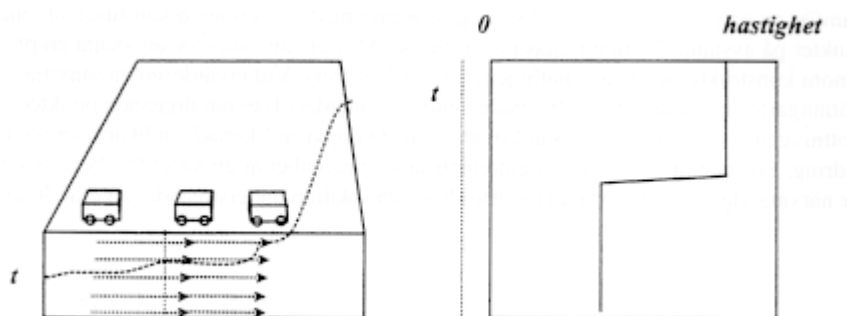
Figur 4.2. Linjeskanner för IE vid mätning på skadad konstruktion (tv.) och presentation av mätdata (t.h.). Mätdata visas som en profil genom betongen med skadeindikations läge längs ytan (l) samt djup i procent av full tjocklek indikerade.

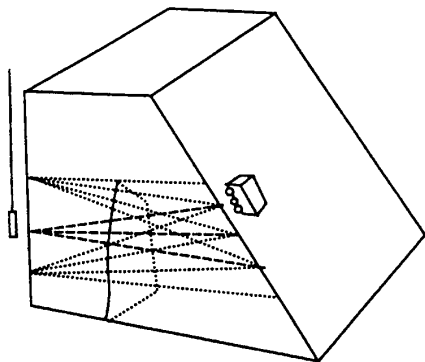
4.3.2 Skiktningar i konstruktion med automatisk mätprocedur för SASW

SASW (Spectral Analysis of Surface Waves) kan användas för bestämning av konstruktioners kondition i ett flertal situationer, i huvudsak för konstruktioner som dammväggar, stöd- eller ledmurar, landfästen och tunnel- eller kanalväggar. Mätningen görs längs en sträcka på konstruktionen och mätningen ger djupinformation som ett medelvärde för hela området (sträckan) där mätningen görs. I första hand lämpar sig metoden för bestämning av djupet (eller tjockleken) på en konstruktionsdel i (eller mot) mark, för konditionsbestämning av betonginklädnad i tunnlar eller murar mot jordfyllnad och för bestämning av styvheten hos underliggande material.

Ur mätningen tas hastighetsprofilen för materialet fram och ur detta kan djupet för en skiktgräns där hastigheten förändras bestämmas. Mätningen görs från ena sidan på konstruktionen och en mätsträcka längs ytan på cirka två gånger önskat mätdjup erfordras. Mätningar från ungefär 5 cm till flera meters djup kan göras beroende på mätsituation och ingående material. Möjligheten att detektera förändringar i tunna skikt avtar med djupet. Frostskadade skikt med en tjocklek större än 5 cm har detekterats.

Vid Olson Engineering Inc., Colorado, har utvecklingsarbete bedrivits beträffande förenkling av mätproceduren för bestämning av djupinformation från konstruktionen. Normalt måste för en fullständig profil mätningar göras med varierande mätsträckor och frekvensinnehåll. En utrustning för automatisering av mätproceduren genom användning av hjulsökare och sammankoppling av informationen vid inversanalysen har utvecklats, figur 4.3.



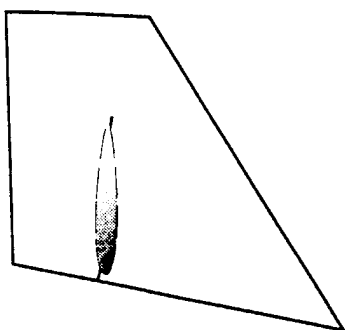


Figur 4.3. Förenklad insamling av ytvågor för spektralanalys (tv.) och presentation av mätdata efter bearbetning (t.h.). Mätdata presenteras som ljudhastighetsvariation med djupet (t) i konstruktionen som ett genomsnitt för området där mätningen görs.

4.3.3 Sektion genom konstruktion med automatiserad ultra ljudstomografi

Mätmetoden används för att utvärdera konditionen hos en betongkonstruktion med tvåsidig tillgänglighet. Ljudhastighetsmätningar görs korsvis mellan två mätlinjer och avbildar därigenom hastighetsfördelningen i en sektion genom konstruktionen mellan mätlinjerna. Hålrum, råttbon, urlakningsskador, frostsador och andra betongskador som ger förändrad utbredningshastighet kan hittas. Tidig hållfasthetstillväxt kan också följas med metoden.

En automatisk mätprocedur kan snabba upp mätningen och göra det möjligt att samla in tillräckligt med data för att med inversberäkningar skapa en bild av defekter i känsliga konstruktionsdelar. Vid Olson Engineering Inc., Colorado har försök gjorts med excitering av ljudvågen med en cylindrisk piezokristall i en hjulsökare, figur 4.4. Denna sändare kan enkelt positioneras automatiskt. Mottagning sker i en konventionell ultraljudssökare, som kan vara nedsänkt i vatten eller ett vattenfyllt hål och därigenom också enkelt manövreras automatiskt. Tomografianalys i kombination med ovan beskrivna utrustning, med automatiskt mätförfarande, har använts för mätningar genom cirka 3 meter betong.

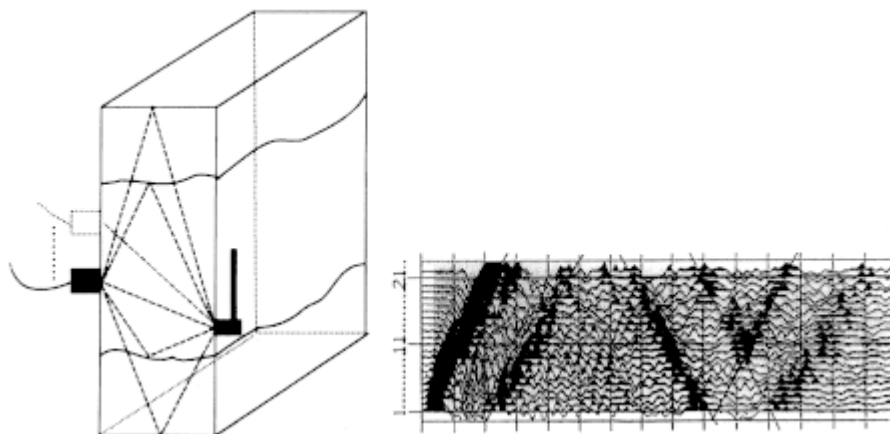


Figur 4.4. Automatiserad ultraljudstomografi vid korsvis mätning (tv.) och presentation av mätdata efter analys (t.h.). Mätdata presenteras som ljudhastighets variationer i en profil genom konstruktionen.

4.3.4 Ultraseismisk metod för komplicerade strukturer och skadebilder

US (Ultra-Seismic) metoden kan användas för bestämning av djupet på en obekant grund-konstruktion och för lägesbestämning av defekter. Metoden är en vidareutveckling av SE (Seismic-Echo) som innebär att upprepade SE-mätningar görs i något förändrade mätpositioner och att utvärderingen grundar sig på mönster inom mätserien [10]. På så vis kan mer komplicerade konstruktionsdelar kontrolleras. Sprickor, hålrum, rättbon eller andra förändringar som förorsakar ekon kan detekteras.

Mätningar görs med ett antal kombinationer av mottagarpositioner och med en fix sändposition (eller omvänt), figur 4.6 (vänster). Vid utvärderingen kan ekon följas och deras inbördes förskjutningar användas för att tolka mätresultaten, figur 4.6 (höger). Placeringen av sändare och mottagare kan vara antingen på motstående sidor om konstruktionen eller på två sidor i vinkel mot varandra. Mätpunkterna kan vara lokaliserade inom ett begränsat område i övre delen av konstruktionen och sökningen görs på djupet. Mätningen kan också göras från en konstruktionsdel som är tillgänglig ovan mark ned i en understruktur som är ansluten mot denna.



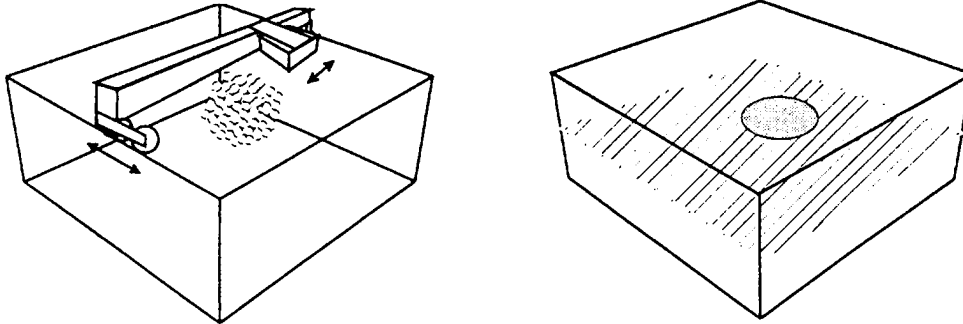
Figur 4.5. Ultraseismisk metod vid mätning på en konstruktion (t.v.) och presentation av mätdata (t.h.). Mätdata visas som signalers tidsförlopp i de olika mätlägena på ytan. Ur bilden identifieras ekon och ekons förskjutningar varur slutsatser dras om reflekterande ytor och skador.

4.3.5 3D avbildning med radarskanner

3D radarmätning kan användas för att avbilda skadors eller nedbrutna områdens form och utbredning i en konstruktion. Metoden är en vidareutveckling av GPR (Ground Penetrating Radar) mätningar och innebär att en yta skannas genom att mätningar görs i parallella mätlinjer med visst avstånd [11].

Genom skanningförfarandet samlas 3D data in, figur 4.7 (vänster). Både mätresultatet och mätpunktens läge på konstruktionen används i utvärderingen. En 3D presentation av mätdata, figur 4.7 (höger), kan möjliggöra en mer omedelbar tolkning av mätresultaten vilka på så vis mer direkt kan förstås av människor som inte är experter på själva

mätmetoden. 3D radarteknik för avbildning är en metod för att samla in 3D-uppsättningar av mätdata och för att presentera gråskale- eller färgbilder av dessa mätdatakuber.



Figur 4.6. Radarscanner för insamling av 3D mätdata (tv.) och avbildning av reflekterande objekt i konstruktionen. Mätdata kan presenteras som planbilder, men endast ungefärlig djup information kan erhållas.

5 Slutsatser

5.1 Allmänt

Idag finns ett flertal oförstörande provningsmetoder som provats ut för användning på betongkonstruktioner. Inom vattenkraften finns dock många speciella mätsituationer och konstruktionstyper och användningen av ofp är bara i viss omfattning omsatt till detta provningsområde. Flera provningsmetoder finns dock tillgängliga på marknaden och bör kunna fylla en viktig funktion som komplement till konventionell provning vid tillståndsbedömning av vattenkraftanläggningar.

Många olika skadetyper bör kunna kontrolleras med tillgängliga ofp metoder. Sprickor och delamineringar kan företrädesvis detekteras med akustiska metoder. Råttbon och hålrum kan lokaliseras med såväl akustiska som radarmetoder. Läckage och fuktiga områden kan i första hand detekteras med radarmetoder. Korrosion kan mätas med elektrokemiska metoder.

Integritet hos dammväggar och grova pelare kan kontrolleras och lägesbestämning av stora diskontinuiteter göras med ofp. Detektering av delamineringar, sprickor och skiktningar i bjälklag, väggar och plattor kan också göras. I många fall kan även motfyllnadsmaterials egenskaper kontrolleras.

5.2 Rekommendationer för fältmässig användning

Oförstörande provningsmetoder som radar (GPR), Impact-Echo (TE), ytvågsmätning (SASW) och elektrokemisk kartering finns idag att tillgå på marknaden. Dessa metoder bör i många situationer kunna ge betydelsefull information vid skadeutredningar och kon-ditionsbestämningar.

Stor vikt måste vid fältprovning läggas vid val av metod och mätuppläggning. Valen görs utgående från konstruktionens form och tillgänglighet samt förväntad skadetyyp och läge.

En noggrann värdering bör göras av förväntat tillskott av information genom provningen och uppföljning sedan göras av verkligt utfall.

5.3 Vidareutveckling

Vidareutveckling av oförstörande provning av betongkonstruktioner bör riktas in mot att genom kombinationer av flera 'beprovade' metoder söka få bättre värderingsmöjligheter. Detta åstadkoms med automatiska mätförfaranden där multipla sensorer kan användas och tillskottet av information användas i analysen. Utveckling av resultatredovisningen så att läget i konstruktionen lätt kan bestämmas och så att en bild av skadeutbredningen kan åstadkommas är också av intresse.

För mätningar på dammar bör också de möjligheter som vattnet ger för koppling av mätutrustning utnyttjas i utveckling av metodkoncept.

6 Referenser

1. Wiberg, U., *Stötvågsbaserade kontrollmetoder för betong*, Institutionen för Bygg-konstruktion, Kungliga Tekniska Högskolan: Stockholm, 1995.
2. *Groundpenetrating radar*, Finnish Geotechnical Society: Tampere, 1992.
3. Pettersson, K., *Olika faktorerers inverkan på korrosionshastigheten*, Cement och Betong Institutet: Stockholm, 1993.
4. Cantieni, R., Deger, Y., Pietrzko, S. *Modal analysis of a concrete gravity dam: Experiment, finite element analysis and link*. in *12 International Modal Analysis Conference*, Honolulu, Hawaii: Society for Experimental Mechanics, 1994.
5. Hobbs, C. *Quantitative measurement of the modal parameters over large areas using Pulse Video Thermography*. in *The Tenth Conference XIII*. Orlando, Florida, 1991.
6. Wiberg, U., *Tillståndskontroll av betong i kraftanläggningar*. Vol. 94:17. Stockholm: Elforsk, 1994.
7. Wiberg, U., *Material Characterization and Defect Detection in Concrete by Quantitative Ultrasonics*, Department of Structural Engineering. Royal Institute of Technology: Stockholm, 1993.
8. Jansohn, R., O. Kroggel, and M. Ratmann. *Detection of Thickness, Voids, Honeycombs and Tendon Ducts Utilising Ultrasonic Impulse Echo-Technique*. in *Int. Symp. NDT in Civil Engineering*. Berlin, Germany 1995.
9. Sansalone, M., Carino, N., *Impact-Echo method*. Concrete International, 1988.
10. Sack, D. and L. Olson. *High Speed Testing Technologies for NDT of Structures*. in *Int. Symp. NDT in Civil Engineering*. Berlin, Germany, 1995.
11. Ulriksen, P., *Högupplösnings tredimensionell impulsradar*, Avdelningen för teknisk geologi, Tekniska Högskolan i Lund, 1995.

A Bilaga

Metodnamn och beteckningar på provningsmetoder

Beteckning	Metodnamn	Metodens grund
CS	Cross Sonic	Akustiska vågor, direkt transmission
CSL	Cross Sonic Log	Akustiska vågor, direkt transmission
EMA	Experimental Modal Analysis	Dynamisk mätning
GPR	Ground Penetrating Radar	Elektromagnetiska vågor, ekon
TE	Impact Echo	Akustiska vågor, ekon
IR	Impulse Response	Akustiska vågor, ekon
PS	Parallell Seismic	Akustiska vågor, indirekt transmission
SE	Seismic Echo	Akustiska vågor, ekon
SASW	Speetral Analysis of Surface Waves	Akustiska vågor, ytgående
Slab IR	Impulse Response for Slabs	Akustiska vågor, ekon
UPE	Ultrasonic Pulse Echo	Akustiska vågor, ekon
UPV	Ultrasonic Pulse Velocity	Akustiska vågor, direkt transmission
US	Ultra Seismic	Akustiska vågor, direkt transmission och ekon

ELFORSK

SVENSKA ELFÖRETAGENS FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGS - ELFORSK - AB
Elforsk AB, 101 53 Stockholm. Besöksadress: Olof Palmes Gata 31
Telefon: 08-677 25 30. Telefax 08-677 25 35

www.elforsk.se