

Tillståndskontroll av betong i kraftanläggningar

Elforsk Rapport 94:17

Tillståndskontroll av betong i kraftanläggningar

Ulrika Wiberg

Elforsk Rapport 94:17

Sammanfattning

Tillståndskontroll av betongkonstruktioner i vattenkraftanläggningar har behandlats. Möjligheterna till användning av oförstörande provningsmetoder för kontroll av betong har undersökts.

Skadeläget för betongkonstruktioner inom vattenkraften beskrivs och aktuella procedurer för övervakning av dessa konstruktionsdelar beaktas. Ett behov av oförstörande provningsmetoder för relativa kvalitets- och nedbrytningsbedömningar inom en konstruktion har identifierats, samt behov av oförstörande metoder för detektering av inre skador.

I undersökningen ges en översikt över de metoder för oförstörande tillståndskontroll som kan ha en tillämpning vid betongprovning. Dagsläget för oförstörande tekniker baserade på i första hand stötvågsutbredning, elektromagnetisk vågutbredning och dynamisk respons redovisas. Teknikernas potential för kontroll av betongkonstruktioner värderas. Tillvägagångssätt för bedömning av allmäntillståndet hos en konstruktion diskuteras med utgångspunkt från punktvis detektering av skador med t.ex. stötvågs- eller radarekon till automatisering av mätproceduren med t.ex. scannermätningar och helhetsbedömningar med exempelvis experimentell modanalys.

Summary

Condition assessment of concrete structures in hydro power stations was investigated. The possibilities in using non-destructive methods for the testing of concrete has been examined.

The state of damage in concrete structures in hydro power stations is described and the current procedures to survey these structures are considered. The need for NDT methods for relative assessment of material quality and degree of deterioration within one structure was identified, as was the need for NDT methods for detection of defects.

The investigation provides an overview of the methods for condition assessment that are applicable to concrete testing. The state of the art for NDT techniques based primarily on stresswave propagation, propagation of electromagnetic waves, and dynamic response is presented. The potential of these techniques for the testing of concrete structures is evaluated. The procedures for making an assessment of the general state of a structure are discussed on the basis of local detection of defects using for example stress wave echoes or radar echoes, automated testing procedures such as scanning, and overall structural integrity using for example experimental modal analysis.

Innehållsförteckning

1	INLEDNING.....	1
1.1	BAKGRUND.....	1
1.2	SYFTE.....	1
2	ÖVERVAKNING AV KONSTRUKTIONSDELAR I BETONG	2
2.1	ALLMÄNT.....	2
2.2	PLANMÄSSIG KONTROLL.....	2
2.3	FÖRDJUPAD KONTROLL.....	2
3	BETONGKONSTRUKTIONERS ÅLD RAND E.....	3
3.1	BAKGRUND.....	3
3.2	YTTRE TECKEN PÅ SKADA	3
3.3	YTSKADOR.....	5
3.4	INRE SKADOR	8
3.5	FÖREKOMST	10
4	TRADITIONELLA METODER FOR KONTROLL	13
4.1	VISUELL KONTROLL	13
4.2	SPRICKMÄTNING.....	13
4.3	MÄTNING AV RÖRELSE R.....	14
4.4	PROVBORRNING OCH LABORATORICANALYS.....	14
4.5	ÖVRIGA HJÄLPMEDEL	15
5	MÖJLIGA INSTRUMENTBASERADE KONTROLLMETODER	16
5.1	FYSIKALISKA GRUNDPRINCIPER.....	16
5.2	KONTROLLMETODER MED STÖTVÅGOR.....	22
5.3	KONTROLLMETODER MED ELEKTROMAGNETISKA VÅGOR.....	36
5.4	KONTROLLMETODER MED SVÄNGNINGSMÄTNING	42
5.5	KONTROLLMETODER MED STRÅLNINGSMÄTNING.....	45
5.6	ÖVRIGA KONTROLLMETODER.....	48
6	VÄRDERING AV NYA METODERS ANVÄNDBARHET	51
6.1	SYNPUNKTER PÅ FÄLTMÄSSIGA TILLÄMPNINGAR	51
6.2	BESTÄMNING AV ALLMÄNTILLSTÅND.....	51
6.3	DETEKTERING AV DEFEKTER	52
6.4	BESTÄMNING AV MATERIALEGENSKAPER.....	53
6.5	BESTÄMNING AV SKADEGRAD	53
7	SLUTSATSER.....	54
7.1	DIREKTA APPLIKATIONER	54
7.2	TÄNKBAR VIDAREUTVECKLING	54
8	REFERENSER.....	55

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Betongkonstruktioner som utsätts för inverkan av miljöbetingelser såväl som av funktionslaster, har en begränsad livslängd. Betongen bryts med tiden ned genom omgivningens påverkan eller genom slitage och belastning. För att kunna bibehålla en konstruktion så att den fungerar drifts- och säkerhetsmässigt, på ett ekonomiskt försvarbart sätt, behövs information om dess kondition. Konditionsbestämning av en konstruktion förutsätter möjligheter att inspektera och fastställa skadeläget, för att sedan bedöma skadornas betydelse för den fortsatta livslängden.

1.2 Syfte

Syftet med rapporten är att redogöra för möjligheter att inspektera och fastställa skadeläget i betongkonstruktioner i vattenkraftanläggningar.

Huvudsyftet är att redovisa tillgängliga och möjliga metoder för tillståndskontroll inklusive de fysikaliska grundprinciper som utgör basen för sådana metoder. Ingen särskild redogörelse ges för instrumentering för fortlöpande kontroll. Vidareutveckling av metoder för fast instrumentering blir intressant när nya metoders applikationsområden för betong utretts.

Då behovet av nya inspektionsmetoder påverkas av hur anläggningarna idag kontrolleras redovisas översiktligt hur den regelbundna inspektionen av kraftanläggningars betongdelar utförs för närvarande, samt de metoder som traditionellt används för att kontrollera tillståndet för betong.

Rapporten ger också en bakgrund beträffande betongskador då det vid diskussionen av möjliga provningsmetoder är av vikt att känna till de dominerande typerna av skador och skadelägen.

Möjligheter till inspektion av betongkonstruktioner har sammanställts för att ge en bas för applikation och fortsatt utveckling.

2 ÖVERVAKNING AV KONSTRUKTIONSDELAR I BETONG

2.1 Allmänt

Övervakning av konstruktionsdelar i betong innefattar den översyn som görs vid regelbundet återkommande besiktningar och inspektioner, samt också vid fördjupad översyn. Dessutom innefattas resultat från fortlöpande kontroll med eventuell fast instrumentering.

Övervakningen av betongkonstruktioner är en del i säkerhetsarbetet vid driften av anläggningar. I dammsäkerhetsarbetet ingår såväl kontroll av anläggningarnas tillstånd som utvärdering av deras driftsäkerhet

2.2 Planmässig kontroll

Allt besiktningsarbete som regelbundet utförs på anläggningar kan räknas som ingående i den planmässiga kontrollen. Detta kan innefatta såväl visuell som instrumentbaserad kontroll med viss efterföljande utvärdering av läget.

Den planmässiga kontrollen av betongen i byggnadsdelar i kraftanläggningar utförs av betongkompetent personal vid en besiktning som normalt återkommer vart fjärde år. Inre vattenvägar inspekteras också med vissa fastställda intervall. Besiktningen förbereds genom kontroll av anläggningen enligt ritningar, kontroll av betongens ålder och tidigare vidtagna åtgärder. Själva besiktningen på plats innefattar i första hand en visuell kontroll av yttre skador, indikationer på inre nedbrytning och kontroll av funktionen hos dränage o.d. Om betongens ålder och sammansättning antyder att problem med kvaliteten kan förekomma på grund av åldringsfenomen så kan också borrkärnor tas för laboratorieanalys.

Utvärderingen baserad på materialet från besiktningen kan föranleda att en fördjupad översyn inleds för att ta fram material till en mer omfattande konditionsbestämning.

2.3 Fördjupad kontroll

En fördjupad översyn kan inledas om anläggningen vid besiktning visar sådana tecken på skada att noggrannare kontroll bedöms behövas. Fördjupade kontroller kan också inledas som ett led i en säkerhetsvärdering av anläggningen som helhet.

Vid en fördjupad kontroll är värderingen av informationen från traditionell besiktning och övriga kontroller en betydelsefull del. I värderingen ingår konditionsbestämning med utgångspunkt från identifierad skadebild och analys av funktion och kvarstående livslängd med avseende på de aktuella förutsättningarna. I undersökningen analyseras informationen från tidigare utförda besiktningar och en särskild inspektion utförs. Inspektionsdelen i en fördjupad kontroll kan innehålla såväl visuell inspektion som provtagning för laboratorieanalys, mätning av rörelser, kartering av uppsprickning och läckagemätning med eventuell analys av läckagevatten

3 BETONGKONSTRUKTIONERS ÅLDRANDE

3.1 Bakgrund

En betongkonstruktion som utsätts för laster och miljöpåverkan förändras med tiden. Förändringarna kan innebära nedbrytning av materialet eller uppkomst av lokala defekter. Förändringarna kan ha betydelse för såväl anläggningens drift som för konstruktionens verkningssätt och säkerhet.

Vissa skadeeffekter är synliga på konstruktionens yta medan andra typer av skador finns i konstruktionens inre, men även de inre skadorna har ofta sekundära effekter som lämnar spår på ytan.

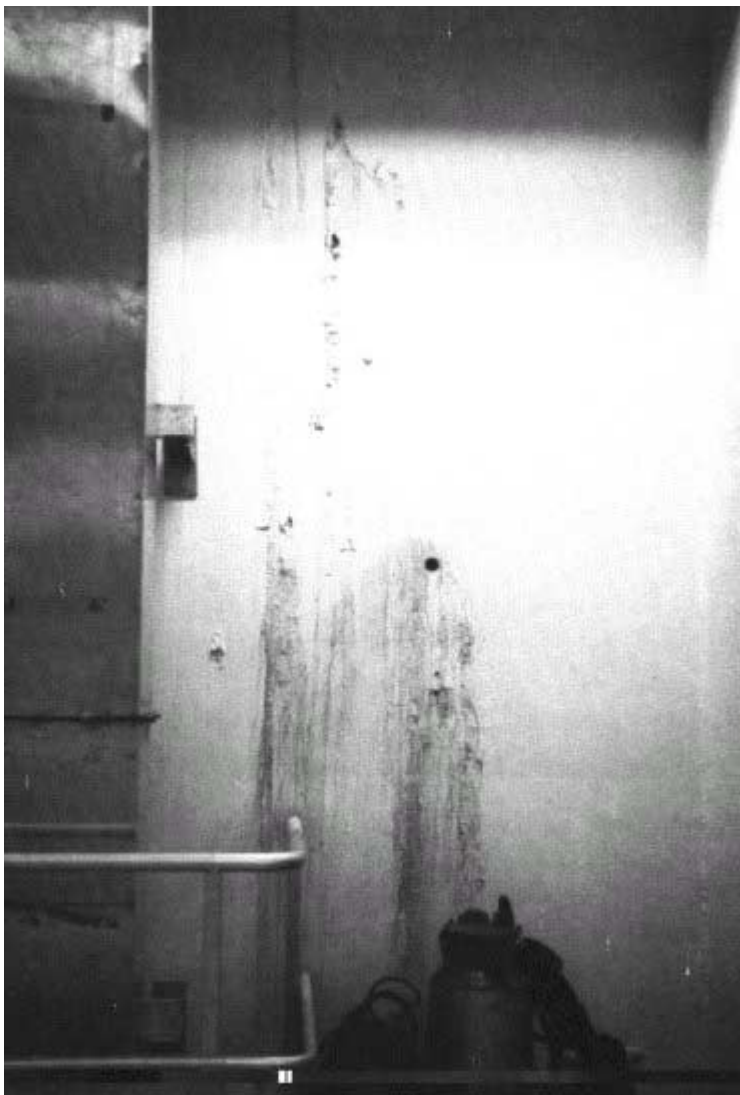
Skadeorsaken är inte alltid självklar även om den fysikaliska förändringen av skadan går att hitta. Det är heller inte alltid lätt att utifrån en fysikalisk förändring bedöma skadans betydelse för konstruktionens fortsatta livslängd då denna främst avgörs av hur skadetillväxten kan förväntas ske och om risk finns för sekundära skadeeffekter. I det följande presenteras fysikaliska effekter av skador och vissa exempel på skadefenomen som kan ge upphov till dessa skador.

3.2 Yttre tecken på skada

Nedan följer en beskrivning av vissa yttre tecken som i sig inte innebär en skada av betongen, men som indikerar att någon form av nedbrytning pågår. Dessa tecken ger alltså uttryck för att ett skadeförlopp pågår inuti konstruktionen, men de säger inte mycket om skadans utbredning och omfattning.

3.2.1 Fuktfläckar och läckage

Fukt och vatten som tränger fram lokalt på en annars torr sida av en konstruktion är en potentiell riskfaktor för betongen, figur 3-1. Inträngande vatten kan ge upphov olika typer av materialskador. Urlakning av betongen i konstruktionens inre, vittring av ytan i en fuktig betong, delamineringar inne i betongen och korrosion av armering kan alla uppkomma primärt eller sekundärt beroende på läckande vatten.



Figur 3.1. Framträngande vatten på en vägg.

3.2.2 Kalkavlagringar

Fukt och vatten som tränger fram lokalt på en annars torr sida av en konstruktion är en potentiell riskfaktor för betongen, figur 3-1. Inträngande vatten kan ge upphov olika typer av materialskador. Urlakning av betongen i konstruktionens inre, vittring av ytan i en fuktig betong, delamineringar inne i betongen och korrosion av armering kan alla uppkomma primärt eller sekundärt beroende på läckande vatten.



Figur 3.2 Kalkavlagringar på vägg.

3.2.3 Rostfläckar

Rostfläckar på betongens yta är ett tecken på att armeringen korroderat inne i konstruktionen eller att järnhaltigt vatten läcker igenom. Det går dock inte att uttolka hur omfattande problemet är eller om eventuell korrosion är fortgående. Vid kraftig korrosion finns på sikt risk att armeringens täcksikt spjälkas loss.

3.3 Ytskador

I det följande beskrivs olika skador som uppträder direkt på betongens yta. Dessa skador kan också ge uttryck för att andra skadeförlopp kan förväntas pågå inuti konstruktionen.

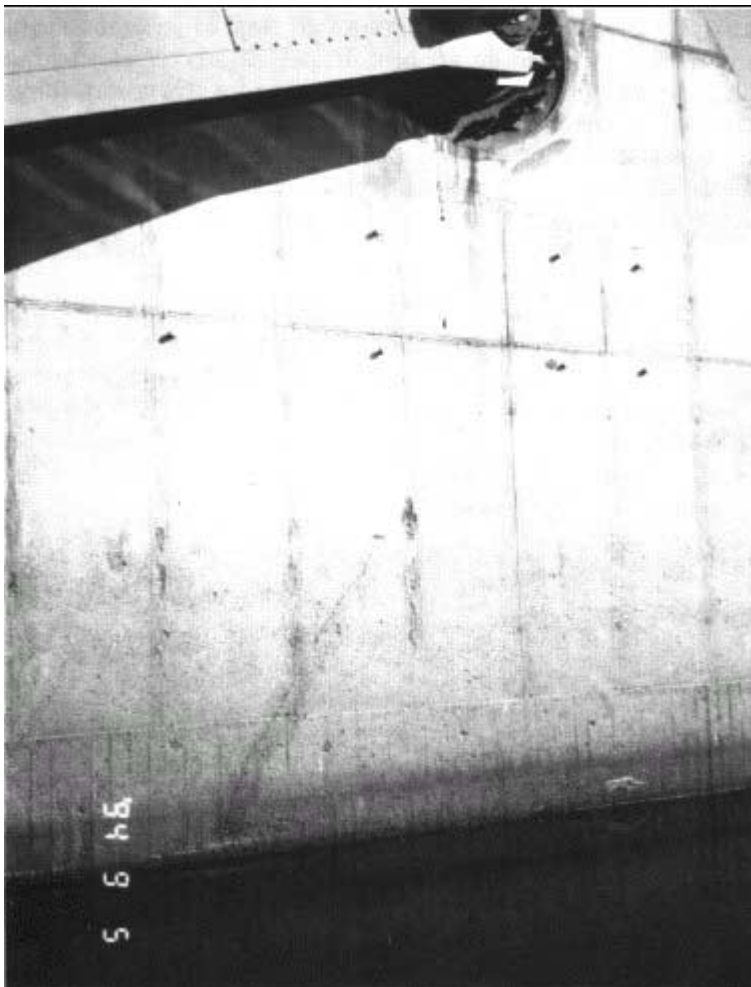
3.3.1 Sprickbildningar

En betongkonstruktion spricker nästan undantagslöst, men sprickorna har ofta inte någon avgörande betydelse för konstruktionens bärrighet. Däremot kan sprickor orsaka driftsproblem genom ökade deformationer och risk för läckage. Sprickor kan också tjäna som initiering för sekundära skadeeffekter.

Synliga sprickor i betong kan ha sitt ursprung i många olika situationer. Sättning, härdning och krympning kan alla förorsaka sprickor. Dessa sprickor kan bilda krackeleringsmönster över ytan. Sprickor uppstår också av de belastningar som konstruktionen utsätts för under dess brukstid. Sprickor av mekanisk last uppkommer vanligtvis i ett fåtal ansträngda snitt i konstruktionen och dessa sprickor är i normalfallet relativt fina. Vidare sprickor uppkommer vanligtvis då de verkliga lasterna inte överensstämmer med de som konstruktionen beräknats för. Förhindrade naturliga rörelser hos en konstruktion och rörelser i angränsande strukturer kan liksom

temperaturrelaterade sprickor i betong. En annan typ av omfattande sprickbildning är krossning av betongen där den utsätts för tryckpåkänningar som överskrider tryckhållfastheten.

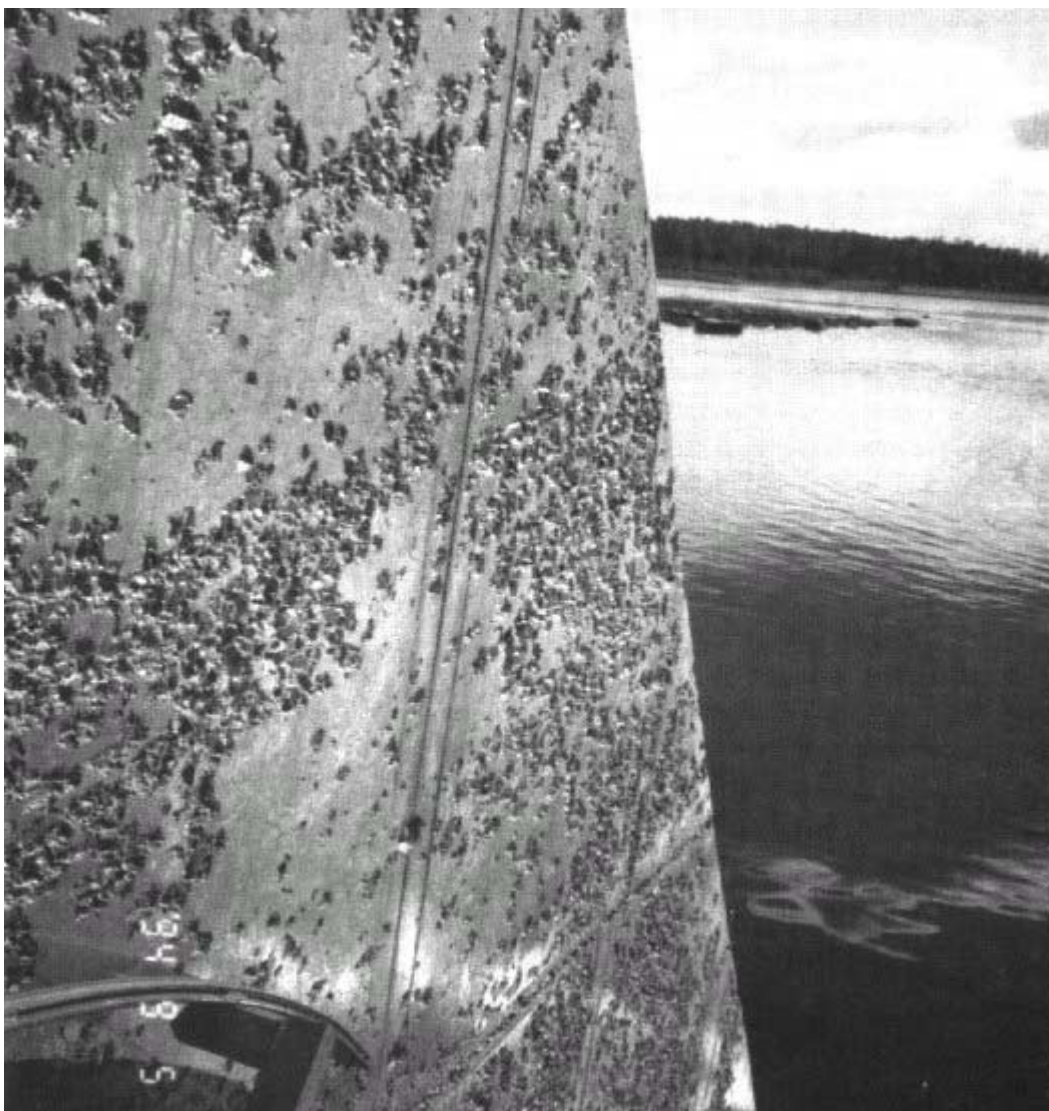
Då sprickor ofta är synliga från endast en sida av konstruktionen är det svårt att bedöma deras betydelse för konstruktionens verkningssätt och fortsatta livslängd, figur 3.3. Det är till hjälp vid utvärdering av sprickornas betydelse och ursprung, att kunna bestämma hur djupt in i konstruktionen de breder ut sig och i vilken riktning.



Figur 3.3. Spricka vid lucklager i utkovspelare.

3.3.2 Avskalning och krackeleringssprickor

Avskalning och krackelering är två skadetyper med förlopp som i vissa nedbrytningsstadier kan yttra sig i sprickbildningar och avflagning av material, figur 3.4.



Figur 3.4. Avflagning av material i ytan på en utkovspelare.

Avskalning har ett skadeförlopp som innebär att små bitar av betongen lossnar från ytan och faller bort. Betongen ändrar i och med det sina egenskaper på ytan med t.ex. ökad permeabilitet och minskad ythårdhet. Avskalning av betongbitar från ytan av en konstruktion är den vanligaste typen av skada på grund av frysning i närvaro av klorider. I ett tidigt skede lossnar bitar av cementpasta ovanför ballastkorn nära ytan. Denna fläckvisa skada är förstadiet till en omfattande avskalning där hela sjok av betong lossnar från ytan. Avskalning uppstår i första hand på den våta sidan av en konstruktion. Andra orsaker till avskalning är ballastreaktioner och saltsprängning.

En kraftig sprickbildning kallad krackeleringssprickor på betongens yta är en annan typ av ytskada som orsakas av frost. Denna indikerar en förändring också av betongens inre och den uppkommer i första hand på den torra sidan av konstruktionen, där ytan är torrare än betongens inre.

3.3.3 Erosion

Erosion förekommer där vatten strömmar förbi eller vågor bryter mot en betongkonstruktion. Nötningen av betongen ger upphov till en ojäm yta med gropar och hål.

3.3.4 Porositet

En porös och otät betong kan finnas i en konstruktion som ett resultat av materialfel eller dåligt tillverkningsförfarande. Porositet kan också vara resultatet av en tidsberoende nedbrytning av materialet till följd av t.ex. urlakning, figur 3.5. En porös betong har dålig beständighet och riskerar att skapa läckagevägar för vattengenomströmning som i sin tur ger upphov till ytterligare nedbrytning.



Figur 3.5. Schematisk skadebild av nedbrytning vid spricka.

3.4 Inre skador

3.4.1 Sprickor

Mikrosprickor uppstår under normala betingelser i betong och de har vanligtvis ingen betydelse, utan kan ses som en naturlig del i materialet. Mikrosprickornas inverkan är dock inte längre försumbar då uppsprickningen är kraftig eftersom materialegenskaperna förändras och risken för sekundära skadeeffekter ökar.

Grövre sprickor som syns i ytan kan genom sin riktning indikera vilken primär orsak som fått sprickan att uppstå. Sprickor som är synliga vid ytan breder också ut sig in i konstruktionen och en böjsprickas djup i en platta är ett exempel på när denna ytterligare dimension är av betydelse. För att avgöra sprickors betydelse för

bärförmågan, men framförallt för beständigheten är sprickornas alla dimensioner av betydelse liksom det system till vilket de binds samman. Av särskild betydelse kan förekomsten av genomgående sprickor vara.

I vissa fall kan sprickor inverka menligt på kraftöverföringen i en konstruktionsdel och på momentfördelningen i en konstruktion. Den effektiva tvärsnittshöjden minskar vid uppsprickning och tvärkraftsöverföringen försvåras. Sprickor kan förorsaka att armeringen överansträngs lokalt. Sprickor transporterar dessutom vatten och i och med det ökar risken för att andra typer av nedbrytning ska sätta in.

3.4.2 Nedbrytning med förändring av materialets egenskaper

Vid nedbrytning av betong förändras materialets egenskaper i den påverkade delen av konstruktionen. Nedbrytning sker i första hand som ett resultat av en fysikalisk nedbrytningsprocess eller av en kemisk nedbrytning. Överlast och utmattning kan också permanent förändra betongens egenskaper.

En frostskadad betong kan utöver avskalning ha drabbats av nedsatt hållfasthet och nedsatt elasticitet. Detta kan uppstå i det till synes oskadade materialet innanför en vittrad zon. Materialet har då brutits ned genom en mikrospricktillväxt förorsakad av de sprängande krafter som uppstår vid frysning av vatten i betongens porsystem.

En kemisk nedbrytning kan förekomma i betongen t.ex. som ett resultat av reaktioner mellan olika komponenter i betongmaterialet. En reaktiv ballast kan förorsaka alkali-kiselsyra reaktioner vars svällande reaktionsprodukter spräcker och försvagar betongen. Andra typer av ballast kan förorsaka sulfatoxidation vilken kan fylla ut porsystemet i betongen och i allvarliga fall spränga sönder cementpastan.

Vid mekanisk belastning av en betongkonstruktion sker en stegvis nedbrytning av materialet. Statisk belastning gör att sprickor växer fram i områden utsatta för stora påkänningar. Mikrosprickor kring ballastkorn och i ballasten förändrar betongens beteende. Utmattning orsakad av många upprepade lastväxlingar förorsakar en sänkning av brotthållfastheten genom den kontinuerliga mikrospricktillväxt som pågår under belastningen.

3.4.3 Hålrum

Hålrum inne i en betongkonstruktion kan uppstå som ett resultat av fel vid gjutningen eller som ett resultat av kraftig nedbrytning. Ofullständig kompaktering kan ge upphov till luftfyllda hålrum inne i betongkroppen. En omfattande urlakning kan också förorsaka att betongen förändrar sina egenskaper och hålrum uppstår.

En mindre hållighet i betongen behöver inte ha någon betydelse för konstruktionens verkningssätt, men ett hålrum lokaliserat t.ex. nära förankringen av armering eller i en sektion utsatt för stora tryckspänningar påverkar strukturens bärighet. Hålrum kan också ha en negativ inverkan eftersom de kan initiera nedbrytning, särskilt i närvaro av vatten.

3.4.4 Inneslutningar

Nedbrytning av betong försiggår ofta lokalt i en konstruktion så att det mellan nedbrutna områden förekommer områden som är mer eller mindre opåverkade. Ett nedbrutet område med förändrade materialegenskaper kan då bilda en inneslutning som avviker från den omkringliggande betongen.

En innesluten volym av nedbrutet material kan uppkomma vid urlakning av betongen kring en spricka. Materialet i anslutning till sprickan får en ökad porositet för att slutligen bilda en utvidgning av sprickan. Frostnedbrytning kan också uppstå som en lokal materialskada i ett område där fukt trängt in i betongen. Inneslutningar kan också finnas i en konstruktion till följd av fel vid gjutningen. De kan även uppkomma när konstruktionen utsätts för stora påkänningar.

3.4.5 Spjälkning

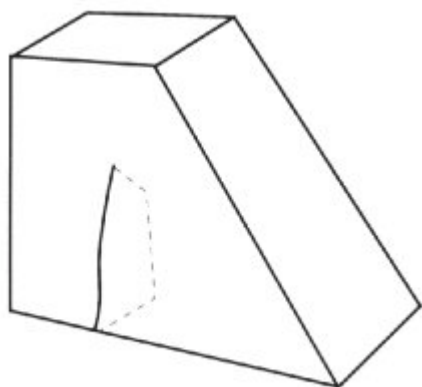
Spjälkning är ett fenomen i betongen som karakteriseras av en spricka parallell med betongens yta. Sprickan kan förorsaka att hela flak av betong lossnar. Orsaken till sådana delamineringar kan vara kraftig korrosion. Vid korrosion av armeringen i en konstruktion uppstår expanderande restprodukter. Detta orsakar spjälkande krafter som kan förorsaka en spricka längs med armeringen och i värsta fall en avspjälkning av täcksikt vid korrosion i flera armeringsjärn i samma lager. En annan orsak till delaminering kan vara allvarliga frostsador.

3.5 Förekomst

En kort beskrivning ges nedan av några lägen i betongkonstruktioner i kraftanläggningar som uppvisar skador. Beskrivningen ska ses som en exemplifiering av var olika skador kan hittas och inte som en fullständig redogörelse för var skador kan uppkomma.

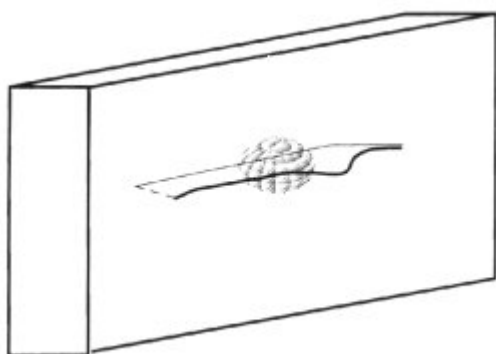
Det visar sig att förekomsten av skadad betong i kraftstationer och dammar omfattar såväl mycket stora och grova konstruktioner och konstruktionsdelar som mer begränsade delar och anslutningar. Hela dammväggar eller stationsväggar utgör så stora objekt att inspektionsmetoder helst ska kunna ge en helhetsbild 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.

Många av konstruktionsdelarna i kraftstationer uppvisar mer eller mindre omfattande sprickbildningar. Grova sprickor förekommer i dammväggar, i uppströmsväggar och bjälklag i stationer, i utskovspelare och i skibord, figur 3.6. Sådana sprickor kan tjäna som initiering för andra skadeeffekter. Fina sprickor i finfördelade mönster kan förekomma i infästningar i generatorfundament.



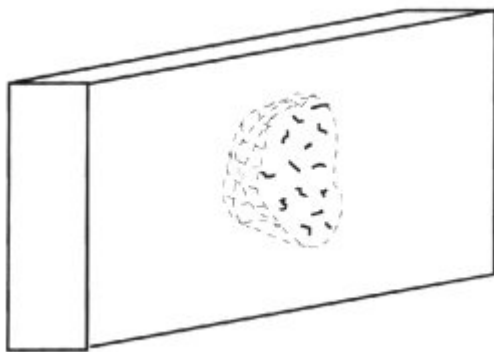
Figur 3.6. Schematisk bild av spricka i konstruktion.

De delar av en kraftstation som utsätts för ensidigt vattentryck uppvisar ofta ett vanligt tecken på begynnande nedbrytning. Uppströmssväggar i kraftstationer, nedströmssidan av dammväggar och utskovspelare har ofta kalkavlagringar på ytan där konstruktionen påverkas av vattenläckage. Även inspektionsgångar kring turbiner och i dammväggar kan påverkas. Urlakningen uppstår ofta vid sprickor eller läckande fogar, figur 3.7. Den inre skadan av urlakning behöver inte vara besvärande även om läckaget och läckagevägen i sig behöver tätas. En sådan tätning kan under vissa omständigheter ske genom att betongen självläker då betongytan får torka ut så att kalken kan avsättas inne i betongen.



Figur 3.7. Schematiskt skadebild av nedbrytning vid spricka.

Uppströmssidan av dammväggar särskilt i vattenlinjen kan få betydande frostsador i form av avskalning och uppluckring av ytskiktet. Även utskovspelare och skibord kan uppvisa frostsador med avskalning som tydligaste skadeeffekt. Skadans betydelse på sikt avgörs i första hand av andra skademekanismer. På nedströmssidan av dammväggar där vatten läcker in i konstruktionen, men där ytskiktet tätas t.ex. av isbildning i sprickor, kan krackeleringssprickor antyda att en nedbrytning av betongen pågår innanför ytskiktet, figur 3.8.



Figur 3.8. Schematisk skadebild vid inneslutning av nedbrutet material.

Vid infästningar till utskovsluckor och intagsluckor kan korrosion iakttas. På frontbalkar och trösklar till inloppssumpar och på skibord kan erosionskador förekomma. I anslutningen mellan konstruktionsdelar, som mellan utskovspelare och skibord, kan otätheter förekomma.

4 TRADITIONELLA METODER FÖR KONTROLL

I det följande beskrivs mer traditionella metoder för kontroll av betong insitu. Beskrivningen innefattar visuell kontroll och naturliga komplement till denna med enklare instrument, medan en avgränsning görs mot mätningar med mer avancerade instrument och utrustningar, vilka behandlas i kapitel 5.

4.1 Visuell kontroll

Tecken på en allvarlig nedbrytning av betongen i en konstruktion kan upptäckas vid en visuell kontroll. Huvudindikatorer på begynnande problem är fuktfläckar, kalkutfällningar, oväntade vinkeländringar eller deformationer samt rörelser hos strukturen som helhet. Dessutom är synliga defekter som sprickbildningar, krosszoner, porösa områden och nedbrytning förorsakad av miljön som t.ex. avskalning, indikatorer på större eller mindre problem.

En viktig del i en visuell kontroll, utöver registrering av tecken på skada, är också att verifiera funktionen av de åtgärder som vidtagits för att skydda konstruktionen. Här kan t.ex. ingå att kontrollera att dränage hålls öppna för att reducera upptryck.

De problemindikationer som kommer fram vid en visuell inspektion dokumenteras genom beskrivning av skadans läge och utbredning på strukturens yta. Problemets omfattning fastställs om möjligt genom mätningar av t.ex. läckageflöden, tjocklek på kalkutfällning, avskalningsdjup och karbonatiseringsgrad i uttaget material. För exempelvis sprickor kan utöver läget också deras orientering och vidd registreras. Djupet på en spricka eller en zon av nedbrutet material är vanligtvis svår att dokumentera, men detta kan vara avgörande för att bedöma hur allvarligt problemet är. Det är också svårt att visuellt beskriva och gradera skada i form av exempelvis ökad porositet och urlakning.

4.2 Sprickmätning

Sprickkartering omfattar i huvudsak en registrering av sprickors läge, orientering och längd. Inmätning görs enklast direkt på konstruktionens yta eller för stora konstruktioner med geodetiska mätinstrument. Sprickmönstret ritas in på ritningar över konstruktionen. Vid sprickbildning på två motstående sidor av en konstruktion kan det vara svårt att bedöma om sprickorna är genomgående mellan sidorna. Om det finns problem att fastställa om sprickor synliga på två sidor bildar sammanhängande system kan de kontrolleras med infärgning.

Sprickvidder mäts översiktligt med spricklupp eller med en sprickviddsjämförare. Enstaka sprickviddsmätningar utan referenser ger dock inte någon tillförlitlig information då effekten av temperatur och last på sprickans vidd kan vara mycket stora. Det är därför lämpligt att följa sprickans rörelser under en tid för att söka bedöma sprickans tillväxt. Vid mätning där rörelsen är vinkelrät mot sprickan kan t.ex. olika typer av extensometrar användas.

4.3 Mätning av rörelser

För bedömning av verkningssättet hos en konstruktion som är sammansatt av flera konstruktionsdelar kan mätning av rörelser i fogar och vid upplag och mätning av vinkeländringar i anslutningar och deformationer av konstruktionsdelar under belastning vara till hjälp. Extensometrar kan användas för mätning i fogar och avvägning av konstruktionens upplag och valda punkter på konstruktionen kan ge information om permanenta sättningar. Lodning av konstruktionsdelar som monoliter kan enkelt ge information om rörelser. Belastningsberoende rörelser kan följas genom montering av lägesgivare.

4.4 Provbörning och laboratorikanalys

Uttagning av borrkärnor ur konstruktionen ger en punktvis information om betongskiktets tjocklek vid gjutning mot berg, närvaro av delamineringar, materialets kondition och eventuella hålrum vid borrhålet.

För att få fram mesta möjliga information om konstruktionens kondition ur de urborrade kärnorna är det av vikt att urborringen görs under kontrollerade former, att mätningar, observationer och störningar protokollförs och att materialet tas om hand på ett bra sätt. Vid urborringen bör man notera totaldjupet för urborringen och vid vilka djup som inget material tillförs kärnan, så att konstruktionens kondition på djupet kan rekonstrueras ur kärnmaterialet. Det urborrade materialet lagras med djupet från vilket det kommit klart markerat. I borrhålet utförs lämpligen en vattenförlustmätning.

På kärnmaterialet kan laboratorieanalys utföras t.ex. i enlighet med ett förfarande för 'besiktning av borrkärnor', som finns specificerat vid Vattenfall Utveckling AB:s betonglaboratorium (VU-SC:1). Besiktningen omfattar visuell bedömning och verifiering av materialegenskaper genom förstörande provning. Dessutom görs kontroller av egenskaper med betydelse för materialets beständighet. De urborrade kärnorna besiktigas visuellt och materialets kvalitet bedöms utifrån granskningen. Materialets porositet och homogenitet är de viktigaste grunderna för karakteriseringen. Den visuella bedömningen görs för de olika djupen som finns representerade i kärnmaterialet. Materialegenskaperna bestäms genom laborieprovning av delar av de uttagna kärnorna för att ge stöd till den visuella bedömningen. Densitet och tryckhållfasthet kontrolleras enligt standardiserade metoder (SS 13 72 34 och SS 13 72 30). Frostbeständigheten hos betongen fastställs genom standardprovning (SS 13 72 44). Dessutom kan materialets täthet värderas med en mätning av vatteninträngningen.

Kemisk analys av det urborrade materialet kan ge ytterligare svar beträffande nedbrytningsfenomen i materialet. T.ex. kan en analys ge svar på graden av karbonatisering, graden av urlakning och eventuellt saltinnehåll.

Tunnslipstekniken erbjuder ett komplement till övriga undersökningar genom att möjliggöra materialanalyser av det urborrade materialet. Tunnslipning av ett prov gör att betongens sammansättning kan studeras, t.ex. kan typen av ballast utläsas, cementpastans kvalitet bedömas och lufiporvolymen, porfördelningen och vatten/cementtalet bestämmas. Dessutom kan nedbrytningsfenomen studeras. T.ex. kan

effekterna av kemiska och fysikaliska nedbrytningsreaktioner studeras, karbonatiseringsgraden vid provstället fastställas och urlakningsgraden bestämmas.

4.5 Övriga hjälpmedel

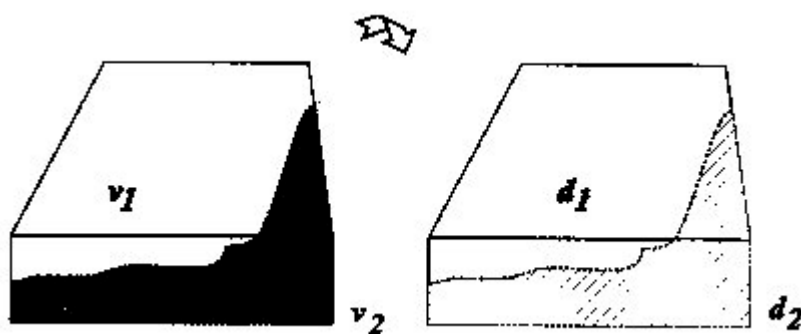
För kontroll av betongytor under vatten, detektering av delamineringar, kontroll av armeringens placering och oförstörande eller begränsat förstörande kontroll av materialkvalitet kan andra enkla och fältmässiga hjälpmedel användas. För att studera en ytas beskaffenhet under vatten kan en videokamera användas för att dokumentera yttre tecken på skada och ytskador. Bomknackning ger en möjlighet att detektera ytliga delamineringar. Enklare instrument, magnetometrar, finns tillgängliga för att kontrollera armeringens placering beträffande såväl läge som djup, genom mätning av det magnetiska fältet kring en sökare. Oförstörande eller begränsat förstörande tester av betongens kvalitet kan göras i fält.

En enkel metod att oförstörande kontrollera betongens kvalitet i ytan erbjuds av studshammaren. En studshammare innehåller en fjäderbelastad stålhammare som när den släpps slår till en stålcolv vilken är i kontakt med betongen. Hammaren studsar tillbaka vid stöten och återstudsens styrka avgörs av betongens hårdhet där stålcolven ligger an. En studshammare är lätt att ta med och enkel att använda, men ger endast kvalitativa mått på betongens kondition eftersom studsvärdet inte teoretiskt kan relateras till hållfastheten. Hållfasthetsbestämning med acceptabel noggrannhet är inte möjlig då ett flertal faktorer som fukthalt, cementtyp, ballast och ytans egenskaper inverkar på mätresultatet. Studshammarmätning kan dock i vissa fall vara en tillräcklig hjälp för att i fält identifiera områden med undermålig kvalitet i en konstruktion. Exempel på andra metoder som ger en bild av betongens kvalitet nära ytan är de begränsat förstörande metoder där en liten betongvolym belastas till brott. Olika principer finns för att belasta betongen som till exempel inskjutning av projektil, utdragning av ett koniskt prov samt avbrytning av ett cylindriskt element. Exempel på metoder är penetrationsmätning med Windsor probe och utdragsprovning med Capo-test. Båda metoderna är relativt enkla att använda och kan utföras i färdig konstruktion, men de innebär en lokal förstörelse av konstruktionens ytskikt. Resultaten ger inte någon väsentlig förbättring av möjligheterna att göra hållfasthetsbestämningar, jämfört med studshammarmätningar. Utdragsprovning och avbrytningsprovning är metoder som är relativt okänsliga för betongens egenskaper utöver hållfastheten och de mäter också relativt direkt hållfasthetsegenskaper (Sentler [14]).

5 MÖJLIGA INSTRUMENTBASERADE KONTROLLMETODER

För att kontrollera betong i anläggningar kan man tänka sig ett antal olika angreppssätt. Mätningarna kan grunda sig på flera olika fysikaliska grundprinciper och kan utföras med olika typer av mätutrustningar. Beroende på storleken och formen hos den konstruktionsdel man vill kontrollera och beroende på de skador man vill detektera kan man välja olika mätprinciper och utrustningskoncept. Olika oförstörande provningsmetoder mäter olika typer av fysikaliska förändringar orsakade av ett skadeförlopp i betongen.

Den fysikaliska grundprincip som ligger till grund för en viss mätmetod gör att metoden kan detektera förändring i en viss fysikalisk mätparameter v . Denna uppmätta förändring sammanhänger sedan mer eller mindre komplext med de fysiska förändringarna i skadad betong d , figur 5.1. De specifika sambanden mellan nedbrytningsgrad och mätparameter för en viss metod och konstruktion kan verifieras med provtagning.



Figur 5.1. Mätparameter v och nedbrytningsgrad d kan behövas korreleras för varje mätmetod och skadetyp

Här nedan ges en kortfattad beskrivning av fysikaliska grundprinciper för olika metoder och sedan principiella metodbeskrivningar för olika typer av mätningar. Somliga av dessa mätningar görs idag i begränsad omfattning vid fördjupad kontroll av betong i anläggningar.

5.1 Fysikaliska grundprinciper

Ett antal olika angreppssätt är tänkbara för att finna de fysiska 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 och strålningsmätningar där påverkan också är lokal.

5.1.1 Vågutbredningsmetoder

En vågrörelse uppstår då en lokal svängning fortplantas genom ett medium. Det finns två typer av vågrörelser som båda är användbara som grund för mätmetoder. De mekaniska vågor som uppkommer då en partikel rubbas ur sitt jämviktsläge och sedan genom mekanisk påverkan flyttar rörelsen vidare genom materialet, kan användas för att detektera förändringar i mediets akustiska egenskaper. Elektromagnetiska vågor kan också användas för kontroll av betong. Denna vågrörelse fortplantar sig som en svängning i elektrisk fältstyrka och reflekterar därför förändringar i elektrisk ledningsförmåga. beskrivningen av kontrollmetoder delas metoderna baserade på elektromagnetiska vågor upp i två grupper. Den ena omfattar radarmätningar med vågor inom ultrakortvågsområdet, ovanför de vanliga radiofrekvenserna (avsnitt 5.3) och den andra omfattar de radioaktiva metoder som baserar sig på gammastrålning vilken har frekvenser ovanför de för ultraviolett ljus (5.5).

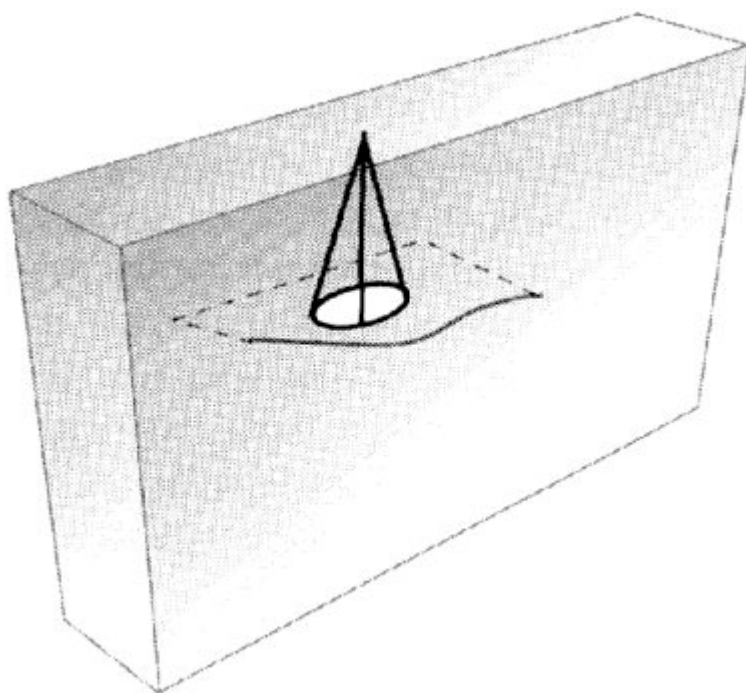
Några fenomen inom vågutbredningsteorin som påverkar möjligheterna att utforma mätmetoder är reflektion, transmission, dämpning och spridning. Vid ett gränsskikt mellan två material med olika egenskaper kommer en del av en infallande våg att refrakteras och en del att reflekteras. Den reflekterade andelen av en mot gränsskiktet infallande plan våg, är lika med reflektionskoefficienten r .

$$r = \frac{(z_1 - z_2)}{(z_1 + z_2)}$$

Där z_1 och z_2 står för respektive materials impedans.

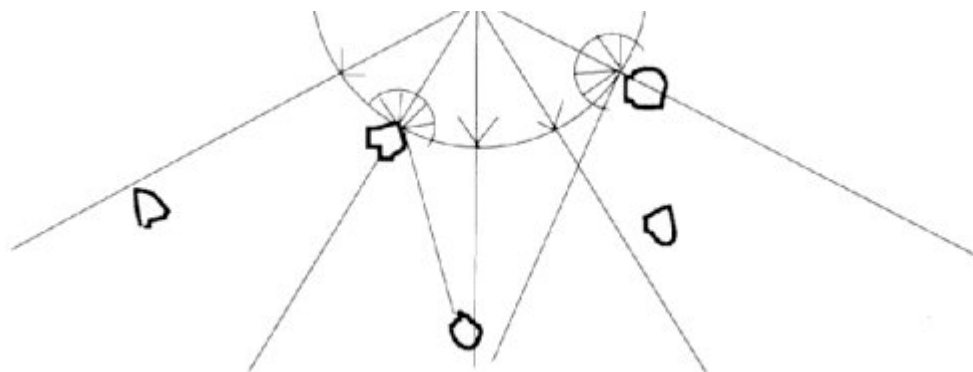
Om diskontinuiteter som ger starka reflexer kan förväntas i en konstruktion så finns också möjlighet att använda en mätmetod som baserar sig på registrering av ekon från materialet. Det som i första hand analyseras är tiden det tar för ekon att nå ytan och detta omräknas till information i djupled utgående ifrån känd information om vågens utbredningshastighet.

Den andel av vågen som transmitteras är i sin tur $(1 - r)$ så att summan av infallande och resulterande vågor är densamma. Transmitterade vågor kan uppfångas på en motstående sida från den där vågen exciteras. I de flesta provningssammanhang åstadkommer man inte plana vågor utan ett vågfält som fortplantar sig med en viss divergens, figur 5.2. Energin fortplantar sig då inte enbart vinkelrätt mot ytan och detta leder till att ekon kan plockas upp från hela den kon i konstruktionen som träffas av vågfältet.



Figur 5.2. Principiell skiss av divergent vågfält från en vågkälla.

När en våg fortplantar sig genom ett material så minskar vågens amplitud genom vågfältets divergens och också genom materialets dämpande egenskaper. Dämpningen kan delas upp i spridning och absorption. Materialets absorption ger en begränsning av vågfältets penetration och måste därför beaktas vid val av mätmetod och utrustning. Spridningen orsakas av reflektioner mot små diskontinuiteter i vågens utbredningsväg och kan förorsaka att spridda vågor fortplantar sig i nya utbredningsriktningar, figur 5.3. Dessa spridda vågor kan ge indikationer om materialets tillstånd och kan användas som bas för en mätmetod.



Figur 5.3. Spridning av vågor vid slumpmässiga diskontinuiteter

Vid ekomätningar registreras reflexer från gränsskikt i materialet. Avgörande för reflexens styrka är impedansskillnaderna i gränssytan. För de elektromagnetiska vågorna är det frågan om elektrisk impedans och för de mekaniska vågorna akustisk impedans. Den akustiska impedansen styrs av produkten mellan materialets densitet och ljudhastighet, vilket indirekt ger ett beroende av produkten mellan densitet och elasticitetsmodul. Detta innebär att en akustisk våg kan reflekteras där densitet och E-modul ändras. 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. Vatten eller luftfyllda hålrum och sprickor utgör reflektorer för en akustisk våg. Luftfyllda hålrum ger nästan total reflektion medan vattenfyllda hålrum kan förväntas reflektera mer än hälften av energin vid vinkelrätt ljudinfall och transmitta resten. Den enda möjligheten att se förbi ett luftfyllt hålrum är genom den diffraktion av vågen runt hålet, som kan uppstå om förhållandena mellan våglängd och storlek på hålrummet är gynnsamma. Armeringsjärn ger reflexer, men också transmission av en del av ljudvågen.

Den elektriska impedansen är frekvensberoende och bestäms av dielektricitetsstalet, den magnetiska susceptibiliteten och i viss mån den elektriska konduktiviteten. Reflexer uppstår vid elektriska diskontinuiteter som i första hand utgörs av variationer i radiovågshastighet. I materialtermer blir beroendet stort av vattenkvoten, joninnehållet och eventuella elektriskt ledande komponenter. Starkt nedbruten och porös betong kan ge reflexer i första hand om den är vattenbemängd och även fuktig betong med salter ger reflexer. Vattenfyllda hålrum reflekterar elektromagnetiska vågor vilket också är fallet med armeringsjärn.

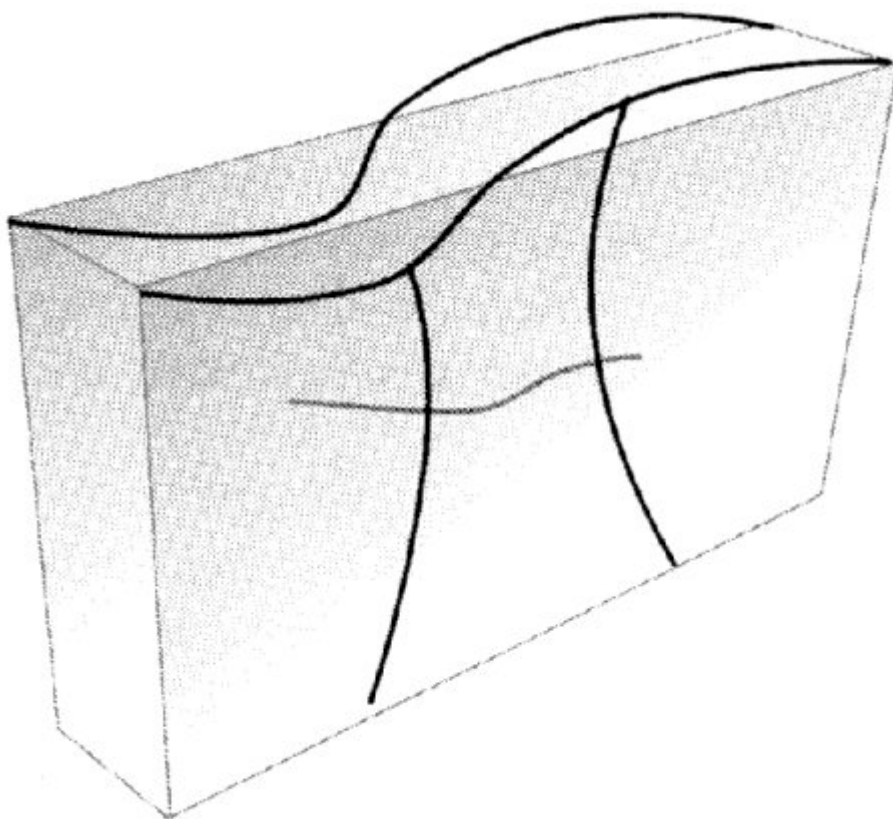
Ett antal olika benämningar finns på mätmetoder baserade på vågutbredning. I avsnitt 5.2 behandlas sådana som grundar sig på utbredning av mekaniska vågor, nämligen UPV som står för Ultrasonic Pulse Velocity, UPE - Ultra-sonic Pulse Echo, SE - Seismic Echo, IE - Impact Echo, IR - Impulse Res-ponse, SASW - Spectral Analysis of Surface Waves, QU - Quantitative Ultrasonics, AU - Acousto Ultrasonics, AE - Acoustic Emission, CSL -Crosshole Sonic Logging och Ultraljudstomografi. Metoder med elektromagnetiska vågor som bas redovisas i avsnitt 5.3 och de är GPR - Ground Penetrating Radar, Flerantenn system för radarmätning, Radar Scanner-system och Radartomografi.

5.1.2 Svängningsmatningar

En 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.

För en provkropp av känd form kan egensvängningsfrekvenserna teoretiskt beräknas utgående ifrån kända fysikaliska materialegenskaper som dynamisk Youngs modul och skjuvmodul. Mätning av egenfrekvensen för en viss svängningsmod gör att materialets egenskaper kan uppskattas. Vid resonansmätning på en hel konstruktion är uppskattningen av materialegenskaper eller avvikelser i dessa ett mer komplicerat

problem genom att inverkan av strukturens form och inspänningsförhållanden är svåra att uppskatta, figur 5.4.



Figur 5.4. Schematisk bild av en väggkonstruktions svängningsbeteende

Utgående från en konstruktions massa m , styvhet k och dämpningsegenskaper c kan strukturens s.k. rumsliga egenskaper modelleras. Den rumsliga modellen byggs upp i elementform och dess dynamiska egenskaper uttrycks i matrisform utgående från dynamikens rörelseekvation för varje element.

$$F = m \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{x} + k \cdot x$$

F är den yttre kraften och x rörelsen. Lösning av ett frisvängningssystem med obefintlig yttre kraft ger egensvängningsfrekvenser, dämpfaktorer och formerna för egenmoderna. Dessa benämns de modala egenskaperna.

Hur konstruktionen beter sig under påtvingad svängning kan analyseras teoretiskt med en responsmodell. Responsmodellen baserar sig på någon typ av responsfunktion, antingen mellan kraft och hastighet uttryckt i mobilitet, mellan kraft och förskjutning uttryckt i receptans eller mellan kraft och acceleration uttryckt i inertans (accelerans). Då rörelseekvationerna löses med harmonisk excitering fås systemets lösning i form av en enda frekvensberoende matris med strukturens mobiliteter. Mobilitetsmatrisen ger strukturens harmoniska respons i en viss koordinat av en kraft som appliceras i en annan

koordinat. Ett generellt uttryck kan formuleras för mobilitetsfunktionen $Y_{jk}(\omega)$ (Ewins [7]).

$$Y_{jk}(\omega) = \frac{x_j}{f_k} = i\omega \cdot \sum_{r=1}^N \frac{(r^{\phi_j}) \cdot (r^{\phi_k})}{\lambda_r^2 - \omega^2}$$

Där N är antalet frihetsgrader (moder) för systemet, λ^2 är egenvärdet för svängningsmod r och r^{ϕ_j} är egenmoden r :s j :te element, d.v.s. den relativa förskjutningen i punkten j vid svängning av mod r .

Uttrycket ovan visar att en direkt koppling kan ställas upp mellan strukturens modala parametrar och dess responskaraktistik. Detta innebär att om en konstruktions egensvängningsmoder kan bestämmas med fri vibrationsanalys så kan också dess respons på en känd excitering bestämmas. Omvänt och mer praktiskt användbart är det faktum att om mobiliteten för en konstruktion kan mätas så kan de modala parametrarna också bestämmas.

Av praktisk betydelse är också att punkten där kraften anbringas och den där responsen mäts är utbytbara. Detta får sitt uttryck i att mobilitetsmatrisen är symmetrisk till sin uppbyggnad.

En mätmetod som grundar sig på en konstruktions dynamiska beteende har som mål att identifiera dynamiska parametrar som egenfrekvens, dämpning och modform genom mätning på konstruktion. Kännedom om dessa parametrar ger omfattande möjligheter att kvantifiera styvhetsförändringar och lokalisera deras ursprung i en konstruktion.

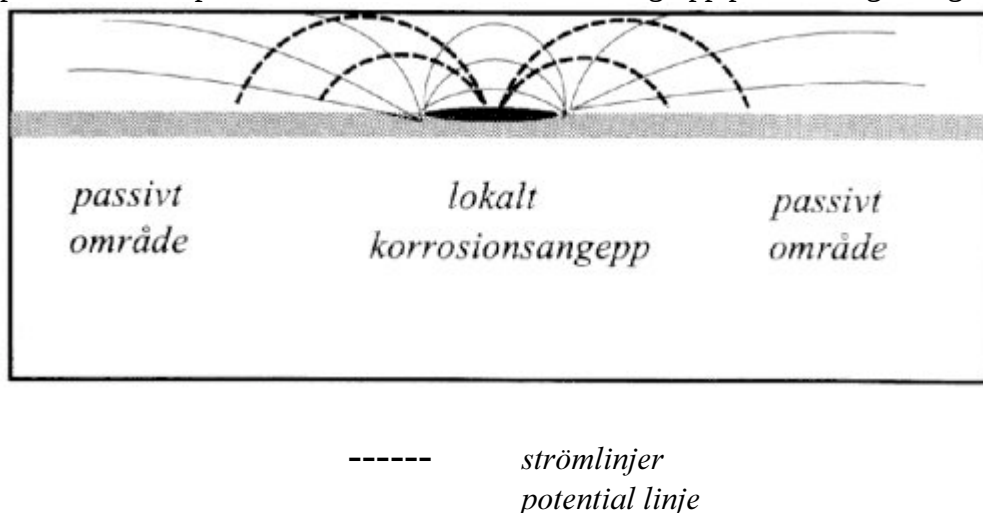
Tre möjliga varianter finns till experimentella studier av konstruktioners svängning. I en typ av situation fokuseras intresset mot en bestämning av strukturens svängningsnivåer under naturliga belastningar. Sådana mätningar kan göras för att bedöma de påkänningar som konstruktionen utsätts för vid drift. Denna mätsituation kan också ge upphov till ett lastbestämningsproblem som dock inte kan lösas entydigt utan tilläggsinformation. Denna mätuppläggning är inte av primärt intresse vid tillståndskontroll. I det andra fallet är det strukturens svängningsbeteende och modeller för detta som verifieras genom att kända exciteringar får sätta strukturen i svängning. Här innefattas två problemtyper, analysproblemet vid vilket kända laster och ett modellerat system ger strukturens rörelser, samt syntesproblemet där kända laster och uppmätta rörelser genererar systemets dynamiska egenskaper och det är i första hand syntesproblemet som ligger till grund för metoder för tillståndskontroll.

Tre metoder för tillståndskontroll presenteras i avsnitt 5.4. Först beskrivs en Dynamisk Responsmätning, sedan EMA - Experimental Modal Analysis och till sist EMA med uppdaterade FE-modeller.

5.1.3 Övriga möjligheter

Andra grundprinciper för kontrollmetoder är mätning av värmekonduktiviteten hos materialet och mätning av elektriska eller magnetiska fält i konstruktionen. De magnetiska metodernas huvudsakliga användning för betong beskrivs i avsnitt 4.5 det vill säga bland de mer gängse metoderna för att verifiera armeringens läge och täcksiktets tjocklek. Inga ytterligare tillämpningar specifikt för bestämning av betongens tillstånd beskrivs. Det bör dock noteras att nya typer av mycket känsliga magnetiska sensorer som börjar finnas på marknaden kan göra att nya tillämpningar kan identifieras genom att mycket små variationer i magnetisk fältstyrka kan mätas. De elektriska metoderna har sin främsta användning för bestämning av problem förknippade med armeringens korrosion. De bygger på galvanisk mätning av elektriska egenskaper vid likström eller mycket lågfrekvent växelström.

Grunden för de elektrokemiska metoderna är mätning av existerande elektrisk potential eller mätning av inducerad elektrisk resistivitet och dess frekvensberoende. Sådana elektriska egenskaper kan uppmätas i armeringsjärnet och dess omgivande miljö. Dessa parametrar har påvisats förändras vid korrosionsangrepp på armeringen, figur 5.5.



Elektrokemiska metoder beskrivs i det följande i avsnitt 5.6.2 då ett intensivt utvecklingsarbete pågår och då dessa problem intimt är förknippade med betongens skadefenomen. Metoder för passiv och aktiv mätning av värmekonduktiviteten har relevans för kontroll av betong genom att variationer i materialets uniformitet ger upphov till variationer i konduktiva egenskaper. Värmetermografering beskrivs i avsnitt 5.6.1.

5.2 Kontrollmetoder med stötvågor

5.2.1 Introduktion

För att kontrollera betongen i konstruktioner kan man tänka sig ett antal olika angreppssätt. Mätningar som grundar sig på utbredning av stötvågor kan utföras på många olika sätt och med olika typer av mätutrustningar. Genom detta skapas flera olika undersökningsmetoder grundade på samma fysikaliska grundprincip. Beroende på

storleken och formen hos den konstruktionsdel man vill kontrollera och beroende på de skador man vill detektera kan man välja olika mätprinciper och utrustningskoncept.

Vid stötvågsutbredning, d.v.s. vid utbredning av transienta vågformer i betong, har ljudvågen en viss begränsad tidsutbredning och innehåller ett spektrum av frekvenser. Vid mätningen tar man emot en ljudvåg som vandrat antingen direkt genom materialet eller som reflekterats tillbaka. Beroende på de frekvenser som ingår i stötvågen kan den fortplantas antingen oberoende av betongens ingående delmaterial och därigenom också oberoende av nedbrytning av materialet eller så beroende på materialets inhomogenitet. För frekvenser under cirka 25 kHz kan man förvänta sig att inverkan av materialstrukturen på ljudutbredningen är obefintlig. För högre frekvenser kan man behöva beakta att signalen sprids och dämpas av den naturliga inhomogeniteten och av materialets nedbrytning.

Olika typer av mekaniska vågor kan fortplanta sig i ett fast material. Den vanligast använda vågtypen som är den som registreras i ekometoderna är longitudinal- eller tryckvågor. Dessutom kan i det inre av ett fast material transversal- eller skjuvvågor utbreda sig. Längs en begränsningsyta kan ytvågor, Rayleighvågor utbreda sig.

Mekaniska vågor av longitudinalvågstyp och transversalvågstyp breder ut sig i materialet med en hastighet som är frekvensoberoende i det frekvensområde som i första hand kommer på fråga vid mätningar i betong. Ljudhastigheten i ett obegränsat homogent medium styrs av betongens genomsnittliga materialegenskaper, E-modul E , Poisson's tal μ och densiteten ρ .

Longitudinal vågornas utbredningshastighet c_l kan uttryckas i dessa parametrar.

$$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{(1-\mu)}{(1-2\mu)(1+\mu)}}$$

Transversalvågshastigheten c_t och Rayleighvågshastigheten c_R relaterade till longitudinalvågshastigheten blir med antagande om $\mu = 0.2$

$$c_t = \sqrt{\frac{(1-2\mu)}{2(1-\mu)}} \cdot c_l = 0.61 \cdot c_l$$

$$c_R = \frac{(0.87 + 1.12\mu)}{(1+\mu)} \cdot \sqrt{\frac{(1-2\mu)}{2(1-\mu)}} \cdot c_l = 0.56 \cdot c_l$$

De snabbaste vågorna i en oskadad betong är alltså tryckvågorna, medan skjuv- och ytvågor fortplantar sig med 56 och 61 % av c_l . I betong har longitudinalvågen normalt en utbredningshastighet på cirka 4000 m/s och i stål fortplantar sig vågorna något snabbare, med cirka 6000 m/s. Utredningshastigheten i luft är bara 343 m/s, medan vatten ger en hastighet av 1480 m/s.

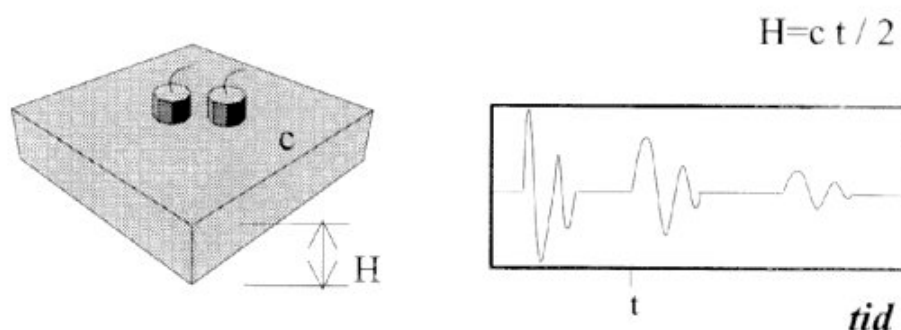
Om en våg utbreder sig i ett medium som fungerar som vågledare, det vill säga i en provkropp med en storlek tvärs utbredningsriktningen som är väsentligt mindre än våglängden, så blir utbredningshastigheten lägre och oberoende av Poisson's tal.

$$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

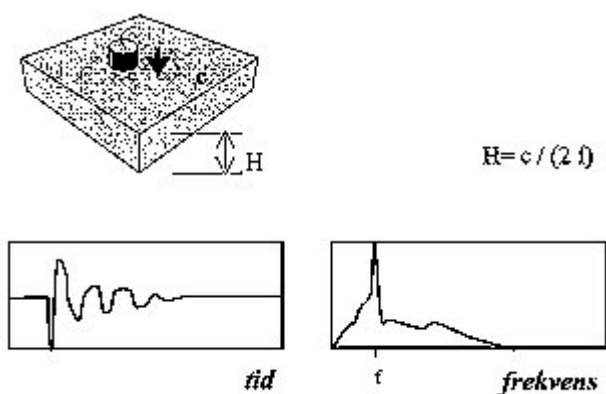
Ytvågor breder alltså också ut sig med en hastighet som i sig är oberoende av frekvensen, men den på utbredningen inverkan betongvolymen förändras med frekvensen. På så vis kan fashastigheten för olika frekvenskomponenter i ytvågen ge information om olika djup i konstruktionen.

Reflektion av mekaniska vågor sker i gränsskikt som beskrivet i avsnitt 5.1.1 och styrkan i reflexen vid vinkelrätt infall mot en gränssyta avgörs följaktligen av impedansskillnaden. I gränsskiktet mellan betong och vatten fås en reflex motsvarande ungefär 70 % av infallande vågs energi. Vid gränsen mellan betong och luft reflekteras 100 % och vid betong/stål 70 %, men med motsatt fas.

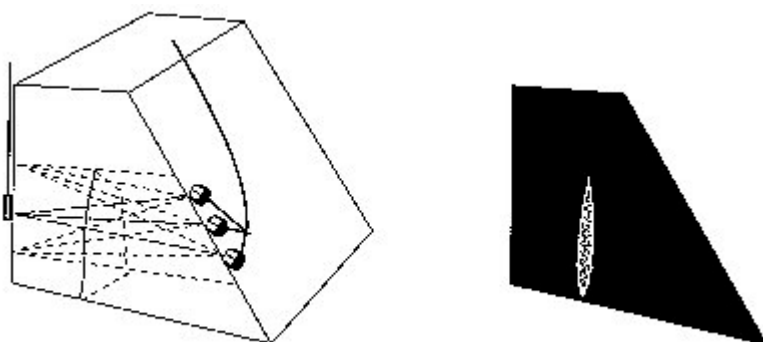
I de följande avsnitten beskrivs mätmetoder baserade på utbredning av mekaniska vågor. De metodnamn som använts är sådana som finns etablerade i litteraturen för i huvudsak betongkonstruktioner. Metoder med lite nytt angreppssätt som ännu inte kommit till någon praktisk användning för betong, men som etablerats för provning av andra kompositmaterial tas också upp. De tre metoderna som beskrivs först (UPV, UPE, SE) bygger i sin grundform på en enkel utvärdering i tidsplanet, figur 5.6. De följande sex metoderna (IE, JR, SASW, QU, AU, AE) har som bas någon sorts utvärdering av frekvensberoende information, figur 5.7. Slutligen beskrivs metoder som baserar sig på kontroll av en konstruktion eller konstruktionsdel mer i sin helhet genom att analysen kombinerar information från flera mätningar i en mätuppläggning, figur 5.8.



Figur 5.6. Mätning och utvärdering av information i tidsplanet för uppskattning av plattjocklek H m.h.a gångtid t.



Figur 5.7. Mätning av tidsignal och utvärdering av frekvensberoende information för uppskattning av plattjocklek H m.h.a resonansfrekvens f .



Figur 5.8. Punktvisa mätningar och utvärdering av kombinerad information.

5.2.2 UPV - Ultrasonic Pulse Velocity

Metod

Metoden grundar sig på utbredning av ultraljudsvågor i en direkt transmissionsmätning. En sändande sökare appliceras på ena sidan av en betongkonstruktion och en mottagare på den andra. En longitudinallvåg 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, uniformitet och skadegrad.

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 (Bungey [3]). Bestämningen av gångtiden ur uppmätt signal kan göras med fasta nivåer för trigging 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.

5.2.3 UPE - Ultrasonic Pulse Echo

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. 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 pulseko mätning erfordrar en eller två sökare som sänder respektive tar emot ljudvågorna, en enhet som exciterar sändaren samt ett digitalt oscilloskåp. 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 (Tasker et.al. [15]).

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 (Wiberg [18]), 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. En annan begränsning för metodens användning är att det i många typer av mätapplikationer krävs en direkt kontakt med ytan. För UPE mätning finns inte någon kommersiellt tillgänglig utrustning anpassad för betong och inte heller några omfattande erfarenheter av fältmässig användning.

5.2.4 SE - Seismic Echo

Metod

Seismic-Echo metoden bygger på samma grundprincip som många andra metoder, dvs reflektion av akustiska vågor med i första hand frekvenser nedanför ultraljudsområdet. Exciteringen sker med en mekanisk impactor och en sökare tar emot vågor som når ytan. I metoden mäts utöver hastighetsresponsen från konstruktionen också kraft-tidssambandet för impacten. Det seismiska ekot från botten på en betongkonstruktion med stort djup tidsbestäms utgående från tillfället för stöten och med kännedom om ljudhastigheten kan djupet till den reflekterande ytan bestämmas.

Mätförfarande

Ett SE mätsystem består av en impactor av hammartyp med antingen inbyggd instrumentering för lastmätning eller med en lastcell som hammaren får träffa vid anslaget. En hastighetssökare eller accelerometer används som mottagare och ett tvåkanaligt digitalt oscilloskop samlar in data.

En stötvåg exciteras i materialet och denna tryckvåg fortplantar sig nedåt. Vid oregelbundenheter i betongen eller från konstruktionens botten fås sedan reflexer som tas emot på ytan. Vid mätuppläggningsen erfordras att strukturen i första hand leder vågenergin ned på djupet utan att starka reflexer kan uppstå i andra riktningar.

Utvärderingsmetodik

Utvärderingen av SE mätningen görs i första hand direkt ur uppmätt signal genom att tiden för ankomna ekon registreras. Med kunskap om materialets ljudhastighet kan reflektorns läge bestämmas. I viss mån kan också ekots styrka ge en uppfattning om reflektorns storlek och typ.

Potential och begränsningar

SE metoden ger goda resultat vid kontroll av uniformiteten i betongkonstruktioner med en form som skapar en vågledare för ljudpulsen (Olson et al. [10]). Metoden kan användas på stora konstruktioner som pelare, pålar och dammväggar för att söka stora defekter. Vid konstruktioner med komplicerad skadebild där signalen på sin väg kan

passera många områden partiellt berörda av defekter riskerar resultatet att bli mycket svårtolkat.

5.2.5 IE - Impact-Echo

Metod

Impact-Echo metoden grundar sig på reflektion av akustiska vågor med i första hand frekvenser nedanför ultraljudsområdet. I denna teknik introduceras en transient stötvåg i betongkroppen med en mekanisk impactor på betongens yta. Vågfältet som exciteras med en nära punktformig mekanisk impactor 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 begränsningytor och inre defekter och tas emot av en mottagare som registrerar ytans rörelse när vågorna kommer. Vid tät placering mellan impactor 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 (Sansalone [13]).

Mätförfarande

Ett Impact-Echo system består av de tre komponenterna, impactor, mottagande sökare och digitalt oscilloskåp med vågformsanalys. Den mekaniska impactorn som exciterar stötvågorna består lämpligen av en stålsfär som knackar på betongens yta vid klenare konstruktioner. Kulan kan t.ex. skjutas i väg med en fjäder. Vid mycket grova konstruktioner kan också hammare användas. Valet av impactor 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 ($1 / \text{kontaktiden}$) 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 ekon 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 (Sansalone [13]).

Potential och begränsningar

IE metoden kan användas för att detektera defekter i betongkonstruktioner. Beroende på frekvensinnehållet i exciteringen kan konstruktioner med tjocklekar upp till flera meter kontrolleras. 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.

5.2.6 JR - Impulse Response

Metod

Impulse-Response metoden bygger på samma grundprincip som Impact-Echo metoden dvs reflektion av akustiska vågor med i första hand frekvenser nedanför ultraljudsområdet. Även här sker exciteringen med en mekanisk impactor och en sökare tar emot vågor som når ytan. Det speciella med metoden är att utöver hastighetsresponsen från konstruktionen mäts också krafttidssambandet för impacten och informationen från båda dessa mätningar används för att analysera konstruktionens kondition. Ett impuls-respons spektrum bildas som överföringsfunktionen mellan in- och utsignal och ur denna utvärderas den dynamiska styvheten eller avståndet till en reflektor.

Mätförfarande

I ett JR mätsystem ingår typiskt en impactor 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 dirac 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

JR metoden ger goda resultat vid kontroll av uniformiteten i betongkon-struktioner med en form som skapar en vågledare för ljudpuls. Även vid kontroll av underlagets egenskaper för betongplatta på mark fungerar metoden (Olson et.al. [10]). Metoden är begränsad till enkla typfall av konstruk-tioner som höga pelare och pålar eller där styvhetsförändringar är avgörande som vid plattor på mark.

5.2.7 SASW - Spectral Analysis of Surface Waves

Metod

Som namnet antyder baserar sig denna metod på utbredning av ytgående mekaniska vågor. En impactor genererar en stötvåg i konstruktionens yta och två mottagande sökare placeras på olika avstånd från impactorn. 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 impactorn 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 impactorn 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 impactorn 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 impactor 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. Detta innebär att stora sökdjup kräver att variationerna i planet är små över en yta ungefär tre gånger så stor som sökdjupet. Metoden har inte fått någon stor användning på betongkonstruktioner och kommersiellt finns inte analysprogramvaran tillgänglig.

5.2.8 QU - Quantitative Ultrasonics

Metod

Metoden grundar sig på utbredning av akustiska vågor inom ultraljudområdet. Mätningen utförs med två separata sökare av piezo-elektrisk typ vilka kan placeras

antingen på motstående sidor om en konstruktionsdel eller på en och samma yta. I mätningen registreras transmitterat ljud som härrör från materialets heterogenitet av nedbrytning eller så registreras ekon från defekter och spritt ljud från materialets heterogenitet. I mätningen fås i första hand information om skadegrad för materialskador med diffus karaktär som mikrosprickbildning och ökad porositet. Ett kvantitativt kvalitetsmått fås genom att den stokastiska karaktären hos en ultraljudssignal i betong används.

Mätförfarande

Avgörande för penetrationen och förmågan att detektera materialskador är de frekvenser som exciteras med sändande sökare. En sändande sökare som skickar en transient ultraljudspuls med frekvenser upp mot 150 kHz kan användas för studier av materialets karaktär om mätsträckorna kan begränsas till cirka en halvmeter. En sökare som arbetar inom samma frekvensområde används som mottagare. Vid en dubbelsidig mätapplikation placeras givarna på var sin sida om mätobjektet. Genom att relativa parametrar inom signalen kan används för att ge de kvantitativa mått som utvärderas så är mätningen relativt oberoende av kopplingsförhållandena och av upplinjeringen av sökarna, dvs om sändare och mottagare placerats helt mittemot varandra över konstruktionen. Vid en enkelsidig mätapplikation placeras sändare och mottagare intill varandra på ena sidan av konstruktionen. De vågor som sprids tillbaka upp mot ytan från akustiska uniformiteter i materialet registreras och analyseras.

Utvärderingsmetodik

Utvärderingen baserar sig på att ökad nedbrytning ger en ökad dämpning av signalen och att denna dämpning har en frekvensberoende karakteristik. Analysen av den transienta mätningen görs i därför i frekvensplanet och relativa spektrala mått kan användas för att korrelera mot skadegraden vid diffus nedbrytning (Wiberg [18]).

Potential och begränsningar

Metoden har en potential för kontroll av materialets kondition vid ringa sökdyj och begränsade tjocklekar på konstruktionsdelarna. Begränsande för mätningen är att sökarna behöver vara i direkt kontakt med betongens yta. Metoden har inte fältnässigt testats och ingen specialutvecklad utrustning finns tillgänglig på marknaden.

5.2.9 AU - Acousto-Ultrasonics

Metod

Vid en AU mätning används ljudvågor i ultraljudområdet eller lägre ned i frekvens. Mätningen görs med två sökare t.ex. av piezo-elektrisk typ som placeras på samma sida av konstruktionen. Acousto-Ultrasonics är ett metodbegrepp som ursprungligen myntats för kontroll av kompositmaterial och komponenter (Vary [17]). Grunden i metoden är att man för en känd typ av konstruktionsdel gör en indirekt mätning som ger ett avtryck

av hela materialet och strukturen. Genom kunskap om komponenten utvärderas avtrycket i sin helhet genom att sk Stress Wave Factors (SWF) bildas. De faktorer som utvärderas bildas på ett sådant sätt att de förändringar som ska identifieras ger utslag genom en minskning av SWF. På så vis kan en enkel faktor användas för att utvisa om en komponent förändras med tiden eller om den avviker från andra likartade komponenter. Metoden lämpar sig för material som är svåra att modellera på den nivå där förändringarna visar sig.

Mätförfarande

En sökare som skickar en transient ljudpuls används för att excitera materialet. En sökare som arbetar inom samma frekvensområde används som mottagare. Båda sökarna placeras på samma sida av konstruktionen.

Utvärderingsmetodik

Ett flertal olika så kallade Stress Wave Factors är möjliga att forma för att utvärdera strukturens kondition. De kan basera sig på spektral information på det sätt som görs i QU eller på parametrar tagna direkt ur uppmätt tidssignal. Även tidssignalens hela förlopp kan ge indikationer om materialets karaktär.

Potential och begränsningar

Metoden har en potential för att ge fingeravtryck av känsliga konstruktionsdelar. En begränsning för metodens användning är att analytiska metoder inte finns för att förutspå hur fingeravtrycket bör förändras vid skada utan att metoden bygger på att ett erfarenhetsunderlag skapas. Metoden har inte utprovats på betongkomponenter.

5.2.10

AE - Acoustic Emission

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. Analysen bygger på att de ankommande ljudpulsernas styrka, karaktär och täthet utvärderas. 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 i från sig under belastning.

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. Potentialen för metoden ligger i övervakning av konstruktionsdelar av begränsad storlek vilka utsätts för stor lokal belastning.

5.2.11 CSL - Gross-hole Sonic Log

Metod, mätförfarande och utvärdering

Vid mätning enligt CSL metoden behövs två borrhål i konstruktionen mellan vilka ljudvågor kan sändas. Vid mätningen sänks en hydrofon ned i vardera borrhålet och ljudhastigheten mellan sökarna bestäms. Mätningen upprepas på flera nivåer utmed djupet och en hastighetsprofil kan på sätt konstrueras för materialet. Genom att sökarna sänks ned i borrhål vilka kan vattenfyllas så kan kontaktproblemet elimineras. Uppskattningen av mätsträckan blir enkel om hålen kan förutsättas vara helt parallella och sökarna sänks under kontrollerade former.

Potential och begränsningar

Metoden kan användas för bestämning av en hastighetsprofil, men begränsningarna av vad som går att detektera är de samma som vid UPV metoden. En fördel för metoden är att mätförfarandet lätt kan automatiseras.

5.2.12 Ultraljudstomografi

Metod

En mätning av ultraljudshastigheten och eventuellt också av ljudvågens dämpning kan användas för att ge en mer global information om en hel konstruktion genom att man till en omfattande mätning av hastigheter för olika ljudvägar kopplar en strukturmodell som iterativt anpassas mot mätningarna. Strukturmodellen och anpassningen av modellens parametrar mot mätdata benämns tomografi och utförs tvådimensionellt. Resultatet som genereras är en hastighetsfördelning för materialet i konstruktionen (Bettolo

[2]).

Mätförfarande

Mätningarna utförs genom att en sändande och en mottagande sökare (t.ex. geofoner) placeras på varsin sida om konstruktionen. En transient ljudpuls sänds genom materialet och på motstående sida registreras och lagras mottagen signal. I första hand analyseras endast gångtiden för ljudpulsen. Genom att kombinera ett stort antal korsande mätsträckor genom konstruktionen kan informationen användas till att bestämma hastigheten lokalt i element i konstruktionens inre. Genom att tomografianalysen görs tvådimensionellt kan mätpunkternas lägen behöva anpassas så att ett plant fall kan konstrueras ur mätdata utan alltför stora fel. En stor mängd mätdata behöver samlas in om en acceptabel upplösning ska fås av hastighetsvariationerna i konstruktionen.

Utvärderingsmetodik

Utvärdering av mätdata bygger på att en skiva av konstruktionen modelleras med ett antal element som beror av det antal mätningar som gjorts på konstruktionen. För varje element ansätts en ljudhastighet som sedan iterativt anpassas mot mätdata. För varje mätsträcka ansätts först en rätlinjig gångväg mellan sändare och mottagare. Denna kan sedan modifieras med en strålgångsberäkning där avvikelser i gångvägen till följd av hastighetsvariationerna beaktas.

Potential och begränsningar

Metoden har en potential när det gäller att globalt utvärdera en konstruktions kondition genom att mätdata från flera mätningar kombineras så att man istället för endimensionella profillinjer kan erhålla en tvådimensionell bild. Känsligheten för skador blir bättre än vid ren UPV mätning genom att uppskattningen inte gäller en medelhastighet över en lång sträcka. En begränsning är dock ljudhastighetens ringa känslighet för diffus skadeutbredning. Utrustning och programvara för ultraljuds tomografi på betong finns att tillgå, men inte som en kommersiellt marknadsförd utrustning.

5.3 Kontrollmetoder med elektromagnetiska vågor

5.3.1 Introduktion

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. Detekterbarheten för olika storlek av defekter vid olika kontrast mellan grundmaterial och defekt behövs också för fullständig förståelse av resultaten. Variationer i våghastighet i konstruktionen ger i första hand upphov till avvikelser i uppskattningen av skadans djupläge. Vid en radarmätning baserad på transmission som vid radartomografi är det förändringar i utbredningshastighet och dämpning som ger möjlighet till skadedetektering.

Avgörande för utvärderingen av data från en radarmätning är utbredningshastigheten i de material som den elektromagnetiska vågen kan komma att transporteras genom. Utbredningshastigheten i vakuum och därigenom ungefärligen gällande också i luft är 300 000 km/s. För bergmaterial är ljudhastigheten cirka 40-50 % av den i luft. För torrt cementbruk kan hastigheten bli så hög som nära 60 % av hastigheten i luft medan fuktigt bruk har en hastighet på cirka 40 % av den i luft. Utbredningshastigheten i betong kan följdaktligen också förväntas ligga kring 40-50 % av den i luft genom att inblandningen av stenmaterial som ballast sänker hastigheten. I vatten är utbredningshastigheten för en elektromagnetisk våg väsentligt lägre, ned mot ungefär 11% av den i luft. En fuktig betong kan därför ha en ytterligare lägre hastighet än ovan nämnda. Den för upplösningen och detekterbarheten betydelsefulla våglängden varierar på samma sätt.

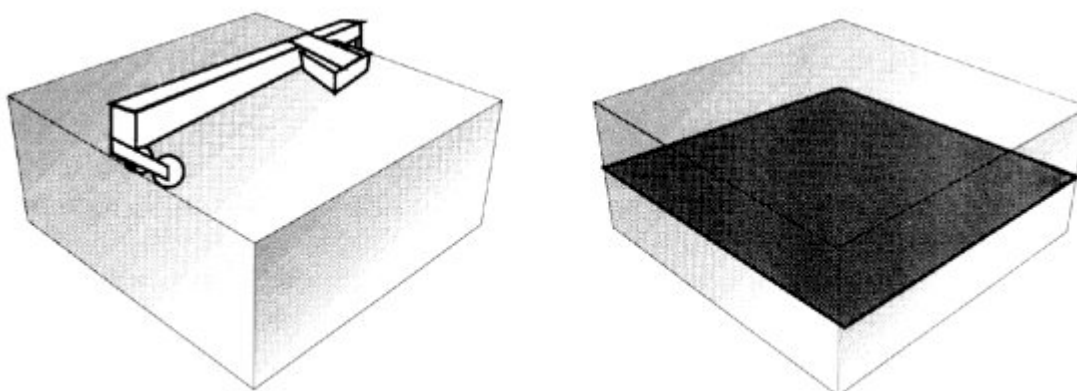
Penetrationen i materialet beror till stor del på vågens frekvensinnehåll och materialets ledningsförmåga. Goda ledare ger en mindre penetration än sämre ledare och högre frekvenser minskar penetrationen i jämförelse med lägre. Frekvensen vid mätning i betong med impuisradar ligger i storleksordningen 500-1000 MHz. Vid en frekvens på 500 MHz fås en våglängd i luft på 0.60 m. Följdaktligen kan betongen bedömas ge våglängden 0.2-0.3 m vid samma frekvens. I vatten blir våglängden ytterligare kortare, ned mot cirka 0.07 m.

Reflektionen vid en gränsyta uttrycks som beskrivet i avsnitt 5.1.1 och strykan i reflexen avgörs av impedansskillnaden vilken för praktiska ändamål kan uttryckas som inversen av utbredningshastigheten (Finnish Geo-techn. Soc., [8]). Med hastighetsantaganden enligt ovan leder detta till att 43-50 % av energin reflekteras i ett gränsskikt mellan betong och luft och att 57-64 % kan förväntas reflekteras i gränsen mellan betong och vatten, men med olika fas för de två fallen.

Detekterbarheten för skador avgörs både av deras storlek och av deras relativa avvikelse i 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 vilken ger en ökad dämpning av den elektromagnetiska vågen och därigenom en minskad penetration. Genom den väsentligt avvikande hastigheten för vatten jämfört med torr betong utgör även vattenfyllda hålrum eller en fuktmättad porös betong en distinkt avvikelse. Vid reflektionsmätning är impedansskillnaden det avgörande för styrkan i reflexen från en stor defekt. Även impedansskillnaden påverkas i första hand av förändringar i utbredningshastighet.

För radiovågor är antalet formulerade och beskrivna varianter på kontrollmetoder betydligt mer begränsat än för ljudvågor. I grunden ligger det koncept som refereras till som Ground Penetrating Radar (Georadar). Varianter i formen av analys ger inte upphov till några nya metodnamn. Endast vid övergången från en-antenn system till fler-antenn system eller vid mätningar där informationen bearbetas till att bygga upp bildinformation av fotografisk karaktär definieras nya metoder. I det följande

presenteras den grundläggande GPR metoden, ett mätkoncept baserat på flera antenner MRS, ett radarscanner system SARA och en metod som bygger på tomografisk analys av radarsignaler. Flerantennsystemet (avsnitt 5.3.3) och Radarscannersystemet (avsnitt 5.3.4) har utvecklats under perioden 1987-1994 vid Avdelningen för Teknisk Geologi vid Lunds Tekniska Högskola. Syftet med båda instrumenten är att alstra mätdata vilka kan presenteras som bilder, figur 5.9. Genom detta förfarande är tanken att avvikelser från det normala kan identifieras av en lekman utan tolkning av experter. Författare till beskrivningarna av dessa system nedan är Peter Ulriksen, Tekn. Geologi, LTH.



Figur 5.9. Automatisk scanning och bildstring med uppmätta data.

5.3.2 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. Radar systemet 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 svartvita band i radargrammen. Bilderna innehåller inte någon tydlig gråskala som presenterar den inbördes styrkan i ekon.

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 indentifiera relativt stora defekter i betong. Mätningar kan göras på konstruktioner med stora 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.

5.3.3 Flerantenn system för radarmätning, MRS

Metod

Flerantennsystemet är optimerat för stor snabbhet. Det baseras på en antennställning med fem radarantennerna i bredd. Denna ställning monteras på ett fordon. Avståndet mellan antennerna kan vara från 35 cm och uppåt. Upplösningen kan alltså inte göras bättre än 35 cm och det beror på antennernas storlek. Data från de fem antennerna lagras i ett datainsamlingssystem, vilket f.n. kan lagra 32 signaler per kanal per sekund. Om fordonet framförs i 57 km/h och avståndet mellan antennerna är 50 cm får man 4 mätningar per kvadratmeter. Vid denna fordons hastighet behöver man i allmänhet inte göra några avspärningar eller trafikdirigeringar. Att öka hastigheten till 90 km/h medför

endast att datatätheten i körriktningen minskar. På motsvarande sätt kan man sänka hastigheten och få tätare mellan mätpunkterna i körriktningen.

Mätförfarande

Fordonet med antennställning och dataregistreringsutrustning körs till mätobjektet. Lämpliga referenspunkter inspekteras. Mätningen påbörjas. Varje gång en referenspunkt passeras trycker man på en knapp på datorn. Därvid trycks ett tal ut på en skrivare och lagras i en datafil. Detta tal anger i vilken position i mätdatafilen den aktuella referenspunkten är belägen. Har man tätt mellan referenspunkterna kan det vara svårt att hinna med om hastigheten är hög. Varje passage av mätobjektet skapar en 2-2.5 m bred remsa med information. Eftersom de flesta mätobjekt är bredare än så krävs flera passager, oftast i olika riktningar.

Utvärderingsmetodik

Innan själva utvärderingen måste mätdata organiseras om så att de bildar en sammanhängande datakub. Data från olika körriktningar måste kastas om och interpolering måste ske så att varje avsnitt motsvaras av lika många mätpunkter. Därefter sätts data samman. Därefter studerar man planbilder ur datamängden. P.g.a. den stora datamängden i längsled är det inte så vanligt att man skriver ut profiler. Planbilderna kan representera en viss nivå i undersökningsobjektet eller också ett skikt med viss tjocklek. Data presenteras på färgplottar och avvikande områden får en färgavvikelse. Hittills har MRS använts för asfalttjockleksmätning och lokalisering av skador i betongbroar. Dessa skador antas bero på inträngande saltvatten, vilket associeras med starka reflexer från gränsytan mellan asfalt och betong.

Potential och begränsningar

En fördel med metoden, förutom snabbheten, är att anomaliernas form i horisontalplanet bevaras. Om man mäter med en antenn på ett fordon som passerar mätobjektet flera gånger kommer konturerna att lösas upp därför att man inte kan positionera fordonet korrekt. Metoden kan snabbt lokalisera de starkaste anomalierna i ett visst mätobjekt. Arbete inleds nu med att värdera mätobjekt relativt varandra. Utvärdering av mätdata från broar kan ske helautomatiskt, medan asfalttjockleksmätning sker interaktivt genom digitalisering av mätdata i glest fördelade punkter. Arbete på att halvautomatisera denna process påbörjas nu. Metoden begränsas av att upplösningen inte kan göras bättre än antennstorleken. Med denna begränsning i minne är det dock tekniskt genomförbart att utöka antalet kanaler till minst 10. Det är också en nackdel att de fem mätspåren registreras med olika antenner och mottagar-elektronik. Ett väsentligt moment i utvärderingen är därför hur man åstadkommer signaler med jämförbara nivåer.

5.3.4 Radar scanner system, SARA

Metod

Radarscannern är optimerad för hög upplösning. Den baseras på ett datorstyrt mekaniskt system, vilket för runt en radarantenn i ett rutnät med godtycklig rutstorlek. Scannern är en 5 m lång balk, vilken bärs upp av fyra hjul. Längs balken kontrolleras antennens rörelse av en servomotor kopplad till en kulskruv. Kulskruvsnoden ger bättre noggrannhet än ren remdrift och kan flytta större laster. Rörelsen i riktningen vinkelrätt mot balkens längdaxel kontrolleras av en annan servomotor kopplad till ett par av hjulen, via en axel, som löper längs balkens undersida. I de fall man önskar undersöka en vägg kopplas en tredje servomotor in. Den har ett hjul i vilket scannern kan hänga. Det fordras att väggen förses med en skena för hjulet att röra sig på. Scannerns maximala svepbredd är 4.3 m med en 500 MHz antenn. I den ortogonala riktningen kan scannern i princip röra sig obehindrat, men begränsas av 15 m långa kablar. Utöver själva scannern och den därpå monterade radarantennen består systemet av en servomotorkontroller och en dator försedd med AID-omvandlare.

Mätförfarande

Scannern flyttas till mätplatsen liggande på taket till en skåpbil. Därefter rullas den på plats med hjälp av särskilda små vagnar. Scannerns hjul placeras på jämnt underlag och antennen positioneras i origo. Därefter startas mätprogrammet i styrdatorn. Antennen börjar nu röra sig. Den stoppar i varje ny position och systemet registrerar mätdata från denna position. Att avsöka en 4 gånger 4 m yta tar cirka 10 timmar med detta förfarande.

Utvärderingsmetodik

Utvärderingen bygger på ankomsttiden för den första mottagna radarsignalen och amplitudvärdet för densamma för varje mätsträcka. Hela mängden av mätdata utvärderas iterativt mot en modell av konstruktionen mellan mätlinjerna. Planet mellan mätlinjerna delas i modellen in i ett antal celler var och en med individuellt ansatta materialegenskaper. Den iterativa tomografiska analysen genererar en hastighetsfördelning i konstruktionen mellan mätlinjerna.

Potential och begränsningar

Metoden har en potential för global utvärdering av en konstruktions kondition. Eftersom korsvisa mätningar kombineras får man en tvådimensionell bild utan att behöva förutsätta en homogen hastighetsfördelning som i en GPR mätning. På så vis bör ett område med avvikande hastighet bättre kunna lokaliseras. Utrustning och programvara finns inte specialanpassad för radartomografi på betong.

5.4 Kontrollmetoder med svängningsmätning

5.4.1 *Introduktion*

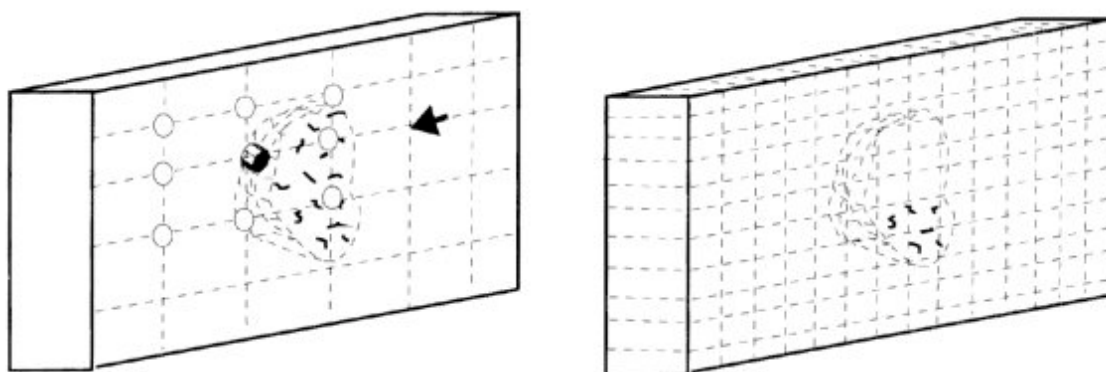
Det avgörande vid analysen av en konstruktions svängningsbeteende är de uppmätta egenfrekvenserna och strukturens dämpning. Vid skada lokalt eller globalt i en konstruktion kan förändringar förväntas i svängningsbeteendet. Det som i första hand är avgörande för att förändringar ska uppstå i den dynamiska responsen är att skadan i tillräcklig grad inverkar på konstruktionens styvhet, massa eller dämpningsegenskaper.

För att förändringarna i dynamisk respons ska bli mätbara måste en så god mätnoggrannhet kunna uppnås att förändringarna i dynamiska parametrar av skada överskrider mätfelen. Mätfel kan uppstå på grund av t.ex. störande vibrationer vilka ger fel i uppmätt respons. För dammkonstruktioner har mätnoggrannheten verifierats och bedömts vara mycket god (Cantieni et al. [5]). Vidare måste den dynamiska responsen kunna omvandlas till modala parametrar på ett sådant sätt att inte nya fel förs in i analysen. Vid övergången till modala parametrar behövs en viss signalanalys på uppmätta frekvensresponsfunktioner och detta kan vara en källa till fel. För att få en direkt koppling till rumsliga egenskaper som massa, styvhet och dämpning måste slutligen resultaten jämföras med en strukturmodell formulerad exempelvis med FEM.

En FE-modell måste innefatta konstruktionens verkliga styvhetsegenskaper och dess faktiska upplagsförhållanden. Genom att randvillkoren för en konstruktion kan vara mycket svåra att korrekt uppskatta och modellera kan ett bättre förfaringssätt vara att uppdatera och förändra modellens styvhets- och upplagsvillkor så att bästa möjliga överensstämmelse fås mellan modell och mätresultat.

De förändringar i modala parametrar som kan förväntas av skada är t.ex. att egenfrekvenserna skiftar nedåt med ökande skada och att dämpningen ökar. Dessutom kommer moder med stora relativa rotationer i de skadade områdena att få större förändringar i egenfrekvenserna än de moder som inte väsentligt exciterar de skadade delarna och härigenom kan fås en indikation om potentiella skadeområden.

Den mest grundläggande metoden som kan formuleras är Dynamisk Responsmätning som endast innefattar mätning i ett fåtal punkter. En annan mätmetod baserad på dynamisk responsmätning och kompletterad med analys av modala parametrar har fått stort genomslag för skadedetektering. Den benämns EMA - Experimental Modal Analysis. För att förbättra analysen och användningen av experimentella resultat kan strukturmodellering med finita element (FEM) användas tillsammans med de experimentella resultaten, EMA och uppdaterade FE-modeller, figur 5.10.



Figur 5.10. Punktvisa mätningar på konstruktion och utvärdering av kombination av mätdata och strukturmodell

5.4.2 Dynamisk Respons

Metod

Vid en dynamisk responsmätning mäts strukturens respons på en pålagd dynamisk last. Karakteristiken som mäts utgörs av en frekvensresponsfunktion för sambandet mellan belastning i en punkt och rörelsen i en annan. Ur frekvensresponsfunktionen kan en resonansfrekvens utläsas och för mycket enkla strukturer kan sedan materialegenskaperna bestämmas. För mer komplicerade strukturer kan en eller flera väl valda responsfunktioner tjäna som fingeravtryck för strukturen och förändringar i beteendet kan följas vid upprepade mätningar.

Mätförfarande

För att utföra en dynamisk responsmätning behövs en anordning för excitering av konstruktionen och accelerometrar, hastighetsgivare eller lägesgivare för mätning av responsen. Exciteringsanordningar kan vara av varierande slag beroende på de frekvenser som önskas exciteras och framför allt beroende på massan och styvheten hos det som ska exciteras. Stötexcitering med hammare eller fallvikt kan användas och likaledes kan olika former av kontinuerlig eller transient excitering användas där lastens påförs med en elektromagnetisk skakare, med elektrohydraulisk skakare eller mekaniskt med roterande massa. Den önskade exciteringens utseende, amplitud och frekvensinnehåll avgör vilken typ som lämpar sig bäst. Vidare behövs åtminstone tvåkanalig AD-omvandling och en enhet för lagring.

Vid mätningen appliceras exciteringen i en punkt och responsen mäts i en annan punkt. En frekvensresponsfunktion fås för varje kombination av exciterings- och mottagningspunkt. För en bestämning av materialegenskaper för en enkel konstruktion med tydliga upplagsvillkor behövs endast en responsfunktion. Om ett fingeravtryck önskas på en mer komplicerad struktur behöver sannolikt fler svängningsmoder

identifieras och därigenom flera kombinationer av lägen för excitering och mottagning mätas.

Utvärderingsmetodik

Ur uppmätta responsfunktioner kan resonanser bestämmas och dämpningen uppskattas.

Potential och begränsningar

Metoden har en möjlig tillämpning för att ta enkla fingeravtryck av en konstruktion. Den utgör också en bas för analytiskt mer utvecklade metoder. Möjligheter kan, med väl valda mätpunkter, finnas att identifiera förändringar i en konstruktions verkningssätt. En definitiv begränsning finns beträffande möjligheten att identifiera skadetyper och läge.

5.4.3 EMA -Experimentell Modanalys

Metod

Experimentell modanalys bygger på en mätning av dynamiska responser enligt ovan, men med ett stort antal mätpunkter på konstruktionens yta. Ur den uppmätta responskaraktistiken beräknas de modala parametrarna. En jämförelse mellan förväntade och uppmätta modformer och resonansfrekvenser ger indikationer om skada.

Mätförfarande

För mätningar behövs hammare, fallvikt eller elektrodynamisk skakare för exciteringen enligt villkor beskrivna i avsnitt 5.4.2. 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 datorer med programvara för modalanalys.

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 en 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.

Potential och begränsningar

Fullskalemätning på en damm visar att tillräcklig mätnoggrannhet kan uppnås för att väl representera och identifiera konstruktionens svängningsmoder (Cantieni et al. [5]). 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.

5.4.4 Experimentell Modanalys med uppdatering med FEM

Metod

Genom att kombinera en mätning med experimentell modanalys och en strukturmodellering med FEM kan mätdata användas för att ge 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 bärighetsanalyser, analyser av speciella lastvillkor o.d. än en traditionell FE-modell skulle kunna göra.

Mätförfarande

Mätförfarandet överensstämmer i sin helhet med det som beskrivs i avsnitt 5.4.3.

Utvärderingsmetodik

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 expandering 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

Metoden har en potential för bärighetsanalys av konstruktioner som har svårbedömda randvillkor och omfattande skador genom att en beräkningsmodell anpassas mot verkligt dynamiskt beteende (Cantieni [5], Ågårdh [19]). 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.

5.5 Kontrollmetoder med strålningsmätning

5.5.1 Introduktion

Den strålning som en konstruktion kan exponeras för i undersökningssyfte breder ut sig i materialet i form av mycket högfrekvent elektromagnetisk vågutbredning. Denna typ av strålning styrs inte av optikens lagar om reflektion och refraktion och karakteriseras

inte av dess våglängd. I första hand används informationen i den strålning som transporterats genom konstruktionen, men teoretiskt finns möjlighet att också studera konstruktionen med en enkelsidig mätmetod. (Bungey [4]) Strålningsintensiteten står i relation till absorptionskoefficienten som beror av materialets täthet och porositet. De prestandaegenskaper som presenteras i det följande gäller för vissa typer av utrustningar och ska ses som en fingervisning om kapaciteter som har uppnåtts.

Nedan beskrivs tre metoder baserade på radioaktiv strålning, gammagrafi, radiografi och radioskopi. Skillnaden mellan metoderna ligger i hur strålkällan utformas och i hur strålningen tas emot efter passage genom konstruktionen.

5.5.2 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 fotolab 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 högfrekventa 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 material-transporter, tidskrävande etablering och säkerhetsarrangemang för strål-skydd vilket tillsammans leder till att cirka 50 bilder av strukturen beräknas kunna tas under en mätvecka. Utrustning finns utvecklad för tillämpningar på betong.

5.5.3 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 fotolab för behandling av bilder.

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

Utvärderingsmetodik

Vid en radiografimätning fås direkt en fotografisk avbildning av strålnings-intensiteten 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.

5.5.4 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 detalj granskning 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.

5.6 Övriga kontrollmetoder

5.6.1 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 fältnässig värmekälla är ett problem. En infraröd kamera eventuellt med digitaliseringmöjlighet används för att mäta värmestrålningen från ytan (Hobbs et al. [9]).

Vid aktiv värmetermografering behövs en värmekälla som kan skapa en temperaturgradient i konstruktionen. Antingen värms ena sidan av konstruktionen upp och värmeutstrålningen på motsatta sidan registreras eller så kontrolleras ytan under avsvälningen 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 enkelsidigt vattentryck med avvikande temperaturer mellan upp och nedströmssida. En ytterligare möjlighet är för att hitta hålrum som tjänar som isolatorer för avsvalningen av en soluppvärmd konstruktion. En betydande begränsning för den passiva metoden är beroendet av naturliga temperaturgradienter som inte kan styras. Dessutom begränsas metoden av den inte helt triviala kopplingen mellan ytemperatur och konduktivitet i en grov konstruktion.

5.6.2 Elektrokemiska metoder

Metod

De elektrokemiska metoderna baserar sig på mätningar av det elektriska fältets egenskaper vid inducerade av 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.

Mätförfarande

En mätning av elektrisk potential baserar sig på det elektriska fält som naturligt uppstår av den ström som flyter genom ett korroderat armeringsjärn, mellan passiva och aktiva områden. Vid mätning av halv-cellpotentialer skapas en god elektrisk kontakt direkt med armeringen, en referenselektrod placeras på betongens yta och en voltmeter kopplas till kretsen. Alternativt kan ytpotentialer mätas d.v.s med inverkan av såväl armering som av potentialfallet över betongens täckskikt. Resistiviteten i armeringen och dess omgivning kan mätas indirekt genom att en ström sänds ned i materialet från två elektroder och att den uppkomna potentialen mäts.

Polarisationsresistans kan mätas genom att stålet matas med ström så att en polarisering av järnet åstadkoms. En mätning av hur mycket ström som måste matas in och ut i järnet för att åstadkomma en polarisering ger polarisationsresistansen (Pettersson [12]). Ny utveckling av elektrokemisk mätteknik, galvanostatisk pulsmätning, baserar sig på att armeringsjärnet polariseras med en transient strömpuls som läggs på över armeringen från ytan och att den resulterande potentialförändringen mäts. Ur den transienta informationen kan ohms resistans och uppenbar polarisationsresistans bestämmas. Ur dessa bestäms betongens resistivitet och verklig korrosionshastighet (Elsener et al. [6]).

Utvärderingsmetodik

Vid en potentialkartering mäts fixa potentialvärden som utöver existensen av korrosion påverkas av betongens fukttillstånd (resistivitet), täcksiktets tjocklek, syretillgång och kloridinnehåll. Potentialvärdena utvärderas genom uppritning av ekvipotentialkartor. De mest negativa uppmätta potentialvärdena svarar mot korrosionszoner i armeringen. Utvärderingen kan förbättras genom en statistisk utvärdering av potentialerna inom en konstruktion (Elsener et al. [6]) och genom studier av potentialgradienterna. För att följa pågående korrosionsaktivitet och uppskatta korrosionshastigheten görs kontroller av resistiviteten och polarisationsresistansen inom en konstruktion. Ett aktivt korroderande armeringsjärn inverkar mycket på uppmätt resistivitet särskilt vid höga frekvenser.

Potential och begränsningar

Potentialkartering erbjuder ett system för att uppskatta omfattningen av korrosionsproblem i en konstruktion, men negativa potentialer kan också uppstå genom polariseringseffekter eller syrebrist till följd av fukt. Detta leder till att potentialen kan indikera fukttillståndet om ingen korroderande armering finns som kan inverka. Kombination med andra typer av elektrokemiska metoder ger möjligheter till karakterisering av pågående korrosion.

6 VÄRDERING AV NYA METODERS ANVÄNDBARHET

6.1 Synpunkter på fältmässiga tillämpningar

Fältmässiga kontroller av anläggningar är förknippade med ett antal olika praktiska överväganden kring val av metod och mätuppläggning. Faktorer som inverkar på valen är objektets storlek, dess tillgänglighet, råheten hos betongens ytor, armeringens mängd och läge samt betongens sammansättning och fuktinnehåll.

Vid planering av en mätning är den misstänkta skadans typ av stort intresse. Detta kan vara avgörande för metodvalet då olika metoder är känsliga för olika typer av förändringar. Storleken på mätobjektet avgör också vilka metoder och utrustningar som kan vara användbara genom de begränsningar i penetration och upplösning som alltid finns. Objektets tillgänglighet avgör om tvåsidiga mätningar eller ekomätningar måste användas. Dessutom behöver det beaktas om mätningen måste göras under vatten. Teoretiskt finns inget hinder för detta för många av metoderna, men utrustningarna behöver specialanpassas.

De traditionella metoderna erbjuder goda möjligheter att noggrant karakterisera materialets kvalitet och pågående nedbrytningsförlopp genom provtagning i konstruktionen. Däremot får man för val av provtagningspunkter förlita sig på visuella kontroller och de slutsatser som kan dras av yttre tecken på skada. Kompletterande oförstörande metoder kan alltså behövas för att söka nedbrutna områden i en konstruktion och bestämma skadegraden, samt i viss mån för att bestämma materialegenskaperna åtminstone relativt inom en konstruktion. För kontroll av delamineringar och andra relativt ytliga skador kan bomknackning ge information som dock inte kan ges en objektiv tolkning och inte heller registreras annat än manuellt. Metoder för att lokalisera och storleksbestämma defekter i en konstruktion behövs. Traditionellt finns inga bra hjälpmedel för att göra helhetsbedömningar av en konstruktion annat än genom att väga samman information från visuell kontroll och provtagning. En noggrann genomgång av en konstruktion med fullständig skadedetektering och materialkontroll skulle kunna ge underlag för kontrollberäkningar av konstruktionens bärighet. För sådana helhetsbedömningar behövs metoder med stora möjligheter till automatisering både beträffande mätförfarande och analys. Metoder som direkt ger en helhetsbedömning av bärigheten och stabiliteten har också en plats i provningssammanhang.

Några olika möjliga applikationer vid kontroll av betong finns listade nedan och en utvärdering av de teoretiska möjligheterna att använda ofp presenteras.

6.2 Bestämning av allmäntillstånd

För att åstadkomma helhetsbedömningar av en konstruktions tillstånd kan alla typer av oförstörande metoder ge användbar information, i synnerhet för små konstruktionsdelar där ett manuellt och punktvis mätförfarande går att genomföra. Då större ytor behöver täckas in med kontroll krävs ett visst mått av automatisering av åtminstone datalagring

och redovisning. Detta bör gå att åstadkomma för alla typer av mätmetoder. Ytterligare förenkling av tillståndskontrollen kan erhållas genom automatisering även av mätförfarandet. Vissa mätuppläggningar för tomografianalys med radar eller ultraljud bör gå att automatisera. Andra metoder som helt bygger på automatisk mätning över en yta är scannermetoder och i viss mån givare monterade i serie. Scannermetoden har hittills tillämpats med radarteknik, men andra tekniker som magnetiska, ultraljud eller elektrokemiska också är tänkbara. En tillämpning som bygger på att mätgivare monteras i serie är det flerantennsystem med radar som presenterats. Andra typer av seriekopplingar av givare är tänkbara för att täcka in en större yta, men möjligheterna begränsas av att mätningen bör vara kontaktfri för att fungera. De metoder som mest tydligt uppfyller villkoren om att ge en helhetsbild är de dynamiska teknikerna med strukturens svängningsmönster som grund. Hit räknas i första hand den experimentella modanalysen som kan ge ett fingeravtryck av en konstruktion för långsiktig övervakning. Med hjälp av modellering av konstruktionen och uppdatering av mätdata kan bättre möjligheter till helhetsbedömning och värdering av mätdata fås. En metod som så distinkt mäter helheten i strukturens beteende kan dock begränsas av att problemen måste vara av relativt allvarlig karaktär för att kunna indikeras.

Vid tillståndsbedömning utgående från detaljerad skadedetektering genomförd i en hel konstruktion kan information inhämtas på olika sätt som angivet ovan. Vissa typer av mätmetoder ger information om medeltillståndet längs en linje eller volym av konstruktionen. Hit hör de elektrokemiska metoderna, metoder baserade på strålningsmätning, termografi och vissa av de stötvågsbaserade teknikerna som UPV, QU och AU. Dessa metoder ger inte någon information om var inom det kontrollerade området eller längs den kontrollerade sträckan i varje mätning som skadan är belägen. De olika typerna av punktmätningar med ekoteknik ger information om tillståndet längs en mätlinje, men med möjlighet att också lägesbestämma skadan i djupled under förutsättning att materialet i övrigt kan betraktas som homogent. Exempel på metoder med potential för sådan lägesbestämning är UPE, SE, LE och IR. För att få information om tillståndet över en tvärsnittsytta genom konstruktionen kan upprepade punktmätningar längs en linje användas eller tekniker med automatiserad lagring och analys vid en sådan förflyttning. Direkt kontroll av tillståndet över en tvärsnittsytta i konstruktionen kan åstadkommas med CSL och GPR eller med tomografi baserad på radarmätningar eller ultraljudmätningar. En tredimensionell skadedetektering och lägesbestämning kan fås med metoder liknande de här presenterade SARA och MRS.

6.3 Detektering av defekter

Detektering av defekter kan göras med alla typer av oförstörande metoder vilka har förmåga att identifiera och lägesbestämma lokala förändringar i en konstruktions inre. Metoderna kan dock förväntas vara olika väl lämpade för olika skadesituationer. Större hålrum och sprickplan lokaliserade vinkelrätt mot mätriktningen bör vara lättast att detektera, medan inneslutningar av nedbrutet eller poröst material samt sprickor med ogynnsam riktning är svårare att kontrollera. I det följande diskuteras de grundläggande mätteknikerna. Scanner- och tomografikoncept kan dock i vissa fall ge bättre resultat och större möjligheter än motsvarande grundläggande metoder antyder.

Detektering av sprickor vars plan ligger vinkelrätt mot mätriktningen och av hålrum kan göras om skadan är tillräckligt omfattande för att ge utslag i mätningen. För konstruktioner med tiotals meters mätsträcka, som pålar, pelare i höjdriktningen, dammväggar från krönet o.d. kan metoder med lågfrekvent vågutbredning användas, t.ex. JR, SE och GPR. I motsvarande situationer, men för konstruktioner med upp till några meters tjocklek kan många typer av metoder ge information om tillståndet, t.ex. UPE, IIE, GPR, strålningsmätningar och termografering. För detektering av inneslutningar och mikrosprickbildningar där distinkta ekon inte fås är det troligt att metoder som AU, QU, SASW och strålningsmätningar har störst potential.

Om konstruktionen har en komplicerad och starkt begränsande geometri i någon riktning kan detta ibland inverka på mätresultaten. De metoder som kan ta med inverkan av provkroppens geometri direkt i analysen är tomografiska metoder samt de metoder som kan jämföras med teoretiska beräkningar t.ex. med finita element som för Impaet-Echo och Experimentell modanalys.

6.4 Bestämning av materialegenskaper

För bestämning av materialegenskaper så är som nämnts tidigare de traditionella provtagningarna mycket effektiva. Metoder kan dock behövas för att oförstörande hitta områden med avvikande egenskaper från resten av konstruktionen.

För bestämning av relativa hållfastheter i en konstruktion är mätning av ultraljudshastighet och andra karakteristiska hos ultraljudssignaler användbara. Bestämning av UPV är en effektiv metod då två sidor av konstruktionen är åtkomliga. För tillståndskontroll utan provtagning ur konstruktionen kan kompletterande mätningar med traditionella oförstörande eller delvis förstörande hjälpmedel ge en ökad möjlighet att hitta avvikelser i materialkvalitet.

6.5 Bestämning av skadegrad

Detektering av zoner av nedbrutet material och bestämning av skadegrad är en del av problemen vid tillståndskontroll som bör kunna lösas med ofp. Bestämning av skadetyper och skadeorsak är inte i första hand en problemställning som löses med oförstörande provning utan för detta behövs kemisk och mikroskopisk analys. En bestämning av utbredning och relativ skadegrad inom en viss konstruktion kan dock i sig vara av betydelse.

För karakterisering av nedbrytning av betongen har ultraljudsmetoder visat sig lämpliga. Med kvantitativ ultraljudsprovning kan skadetillväxt följas och karakteriseras vid t.ex. uppsprickning och frostskada. De elektrokemiska metoderna kan användas för att följa skadetillväxt i form av armeringskorrosion. Zoner av nedbrutet material kan vid omfattande skada lokaliseras med såväl stötvågor som elektromagnetiska vågor.

7 SLUTSATSER

7.1 Direkta applikationer

För direkt applikation finns ett antal tekniker som utvecklats och testas i betongsammanhang. Hit hör Impact-Echo, Seismic-Echo, Impulse-Response, Ultraljudsmetoder, Georadar, strålningsmätning, termografi och elektrokemiska metoder. De flesta av dessa finns dock än så länge inte tillgängliga hos mätkonsulter eller ens med utrustningar kommersiellt tillgängliga. Metodernas möjligheter och begränsningar för skadedetektering i fältmässig miljö är inte heller fullt klarlagda. Omfattande utvecklingsarbete pågår inom området.

Nedan ges en beskrivning av tillgången på utrustningar och möjligheterna till att få mätjobb utförda. Redovisningen ska inte ses som absolut heltäckande då utvecklingen på området går mycket snabbt. Färdiga utrustningar finns kommersiellt att tillgå för åtminstone UPV, LE, EMA, GPR och potential- och resistivitetsmätningar. Separata komponenter för att sätta samman utrustningar kan hittas för SE, IR, QU, AU och AE. Vissa andra typer av mätningar kan med stor sannolikhet beställas från de organisationer som bedriver utvecklingsarbetet. Dit hör t.ex. ultraljudstomografi, strålningsmätningar och radarscannermätningar.

7.2 Tänkbar vidareutveckling

Många möjligheter finns till fortsatt utveckling inom området både beträffande mätutrustningar och deras fältmässighet, kapacitet och prestanda, men också beträffande analys- och redovisningstekniker.

Utvecklingsarbetet bör inriktas på några metoder som kompletterar varandra beträffande typ av skador som kan detekteras och storlek på konstruktioner som kan kontrolleras. De flesta av kontrollmetoderna har ingen teoretisk begränsning för användning under vatten, men mätutrustningar behöver vidareutvecklas för att täcka ett sådant behov. Begränsningarna i metodernas förmåga att detektera skador måste klargöras. Redovisningstekniker bör också utvecklas så att resultat från olika undersökningar kan korreleras och skadeindikationerna föras vidare till en modell för konditionsbestämning.

8 REFERENSER

- [1] Andersson, P.M., Linder, B.G., Nilsson, N.R., (1991) *A radar system for mapping internal erosion in embankment dams*, Water Power and Dam Construction, July.
- [2] Bettolo, G., Superbo, S., (1993), *Sonic Tomography*, Felsbau, Journal for Rock Engineering, Oct.
- [3] Bungey, J.H., (1989) *Testing of concrete in structures*, Chapman and Hall, New York.
- [4] Bungey, J.H. (1990) *NDT of concrete the current scene*, Nondestr. Test Eval. Vol. 5, pp. 277-300.
- [5] Cantieni, R., Deger, Y., Pietrzko, S., (1994), *Modal Analysis of a Concrete Gravity Dam: Experiment, Finite Element Analysis and Link*, Proc. of the 12 International Modal Analysis Conf., Honolulu, Hawaii, Soc. for Experimental Mechanics, Vol. 1, ppA42-448.
- [6] Elsener, B., Wojitas, H., Böhm, H., (1994), *Inspection and monitoring of reinforced concrete structures - Electrochemical methods to detect corrosion*, Insight, Vol.36, No. 7, pp. 502-506.
- [7] Ewins, D.J., (1991), *Modal Testing: Theory and Practice*, John Wiley and Sons Inc., Chichester.
- [8] Finnish Geotechnical Society, (1992) *Ground Penetrating Radar*, ISBN 951-682-238-X, Tammer-Paino Oy, Tampere.
- [9] Hobbs, Kenway-Jackson, Milne, (1991), *Quantitative measurement of thermal parameters over large areas using pulse video thermography*, Materials and Manufacturing Technology Division, AEA Industrial Techn. Harwell Laboratory, Didcot, report AEA-JnTec-0426, 14pp.
- [10] Olson, L.D., Wright, C., Stokoe, K.H., (1990) *Strides in nondestructive testing*, Civil Engineering Journal, May, pp.52-55.
- [11] Olson, L.D., Wright, C., (1990) *Nondestructive Testing for Repair and Rehabilitation*, Concrete International, March, pp. 58-64.
- [12] Pettersson, K., (1993), *Olika faktorerers inverkan på korrosionshastigheten. Mätningar på betongkonstruktioner i fält*, Cement och Betong Institutet, Stockholm, rapport 1:93, 1313pp.

- [13] Sansalone, M., (1986) *Impact-Echo: A method for flaw detection in concrete using transient stress waves*, US department of commerce, Gaithersburg, NBSIR 86-3452, 220pp.
- [14] Sentler, L., (1981) *Icke förstörande provningsmetoders praktiska användning på betong*, Avd. Bärande konstruktioner, Tekniska Högskolan i Lund, rapport TVBK-301 1.
- [15] Tasker, C.G., Milne, J.M., Smith, R.L., (1990) *Recent work at the national NDT centre on concrete inspection*, British Journal of NDT, Vol. 32, pp. 355-359.
- [16] Ulriksen, P., (1992), *Georadar spårar skador i betongbroar*, Byggforskning 92.2.
- [17] Vary, A., (1982) *Acousto-Ultrasonic characterization of fibre reinforced composites*, Materials Evaluation, Vol. 40, No. 6, pp.650-662.
- [18] Wiberg, U., (1993) *Material characterization and defect detection in concrete by quantitative ultrasonics*, Royal Institute of Technology, Dept. of Structural Engineering, TRITA-BKN. Bulletin7, 152pp.
- [19] Ågårdh, L., (1992), *Updating of a FE-model based on results from experimental modal analysis of a highway concrete bridge*, Swedish National Testing and Research Institute, Building Technology, SP-AR 1992:34, 3lpp.

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